



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικό και Καποδιστριακό  
Πανεπιστήμιο Αθηνών

ΔΠΜΣ ΡΑΔΙΟΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επίγειες ασύρματες οπτικές επικοινωνίες και μελέτη της  
τυρβώδους ροής σε σχέση με την απόδοση και την αξιοπιστία  
των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων

ΜΙΧΑΗΛ ΓΙΟΥΛΗΣ

ΑΜ: 2019110

Επιβλέπων:  
Ε. Νισταζάκης,  
Καθηγητής Τμήματος Φυσικής  
ΕΚΠΑ

Αθήνα 2021

Διπλωματική εργασία: Επίγειες ασύρματες οπτικές επικοινωνίες και μελέτη της  
τυρβώδους ροής σε σχέση με την απόδοση και την  
αξιοπιστία των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων

Συγγραφέας: Μιχαήλ Γιούλης

Επιβλέπων καθηγητής: Ε. Νισταζάκης, Καθηγητής

Εξεταστική επιτροπή:

- 1) Α. Τζανακάκη, Αναπλ. Καθηγήτρια
- 2) Μ. Αναστασόπουλος, Αναπλ. Καθηγητής
- 3) Ε. Νισταζάκης, Καθηγητής

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

Μιχαήλ Γιούλης

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 και 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 επεξεργάστηκαν, 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 δικής σας εργασίας. 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.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα	Σελ 3
Ευχαριστίες	Σελ 6
Περίληψη	Σελ 7
Εισαγωγή	Σελ 9
<b>Κεφάλαιο 1</b>	
Συστήματα οπτικών επικοινωνιών εξωτερικού χώρου	Σελ 10
1.1 Γενικά	Σελ 10
1.2 Τρόποι λειτουργίας FSO συστημάτων	Σελ 10
1.2.1 Ζώνες Fresnel	Σελ 13
1.2.2 Εξίσωση Friss και ισχύς σήματος στον ελεύθερο χώρο	Σελ 15
1.2.3 Βασικοί τρόποι λειτουργίας FSO συστήματος	Σελ 16
1.2.4 Τα βασικά χαρακτηριστικά τεχνολογίας FSO	Σελ 17
1.2.5 Εφαρμογές FSO	Σελ 18
1.2.6 Επικινδυνότητα laser	Σελ 18
1.2.6.1 Η υπεριώδης ακτινοβολία	Σελ 19
1.2.6.2 Ορατή και κοντινή υπέρυθη ακτινοβολία	Σελ 19
1.2.6.3 Μέση και μακρινή υπέρυθη ακτινοβολία	Σελ 20
<b>Κεφάλαιο 2</b>	
Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση, διαθεσιμότητα και αξιοπιστία των FSO επικοινωνιών	Σελ 21
2.1 Θερμοκρασία	Σελ 21
2.2 Ομίχλη	Σελ 22
2.2.1 Kruse Model	Σελ 24
2.2.2 Kim Model	Σελ 25
2.2.3 Al-Naboulsi Model	Σελ 25
2.2.4 Ijaz Model	Σελ 26
2.3 Βροχή	Σελ 28
2.4 Απώλειες, Αξιοπιστία και Διαθεσιμότητα	Σελ 29
2.4.1 Απόσταση σύνδεσης	Σελ 29
2.4.1.1 Γεωμετρικές απώλειες	Σελ 30
2.4.1.2 Η μοριακή εξασθένηση	Σελ 31
2.4.1.3 Απώλειες του συστήματος	Σελ 31

2.4.2 Απώλειες ατμοσφαιρικού καναλιού	Σελ 31
2.4.2.1 Εξασθένηση λόγω ομίχλης	Σελ 32
2.4.2.2 Εξασθένηση λόγω βροχής και χιονόπτωσης	Σελ 33
2.4.2.2.1 Εξασθένηση λόγω βροχής	Σελ 33
2.4.2.2.2 Εξασθένηση λόγω χιονόπτωσης	Σελ 33
2.4.2.3 Απώλειες λόγω σπινθηρισμού	Σελ 34
2.4.2.4 Τροποσφαιρική διάθλαση	Σελ 35
2.4.2.5 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα FSO συστημάτων	Σελ 36
2.5 Υβριδικά συστήματα	Σελ 37
<b>Κεφάλαιο 3</b>	
Ατμοσφαιρική τυρβώδης ροή	Σελ 40
3.1 Διασπορά οπτικής δέσμης	Σελ 40
3.2 Μελέτη Τυρβώδους Ροής σε θάλαμο προσομοίωσης	Σελ 42
3.2.1 Προσδιορισμός BER	Σελ 45
3.3 Gaussian beam lasers, χρήση σε FSO συστήματα	Σελ 47
3.3.1 Πλάτος δέσμης	Σελ 48
3.3.2 Τρισδιάστατη μορφή Gaussian δέσμης	Σελ 49
3.3.3 Διάδοση στον ελεύθερο χώρο, μετατόπιση φάσης Gouy	Σελ 51
3.4 Αξιολόγηση BER σε FSO επικοινωνίες λόγω ύπαρξης τυρβώδους ροής	Σελ 52
3.4.1 Επηρεασμός BER λόγω ακτίνας δέσμης	Σελ 55
3.4.2 Η επίδραση της απόστασης πομπού-δέκτη στο BER	Σελ 57
<b>Κεφάλαιο 4</b>	
Μοντελοποίηση καναλιών οπτικής τύρβης	Σελ 59
4.1 Μέτρηση προφίλ τυρβώδους ροής στο κατώτερο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, Μοντέλο HAP	Σελ 59
4.2 Μοντέλα μελέτης τυρβώδους ροής, ανάλυση και απόδοση FSO συστημάτων	Σελ 66
4.2.1 Μοντέλο Lognormal	Σελ 67
4.2.2 Μοντέλο Negative exponential	Σελ 68
4.2.3 Μοντέλο Gamma-gamma	Σελ 68
4.2.4 Μοντέλο M-κατανομής	Σελ 69
4.2.5 Τυρβώδης ροή λόγω ταχύτητας ανέμου	Σελ 71

## Κεφάλαιο 5

Βελτίωση απόδοσης FSO συστημάτων με χρήση δευτερευόντων διατάξεων	Σελ 75
5.1 Υβριδικά συστήματα	Σελ 75
5.2 Μοντελοποίηση καναλιού ευρισκομένου σε ατμοσφαιρική τύρβη, εφαρμογή σε υβριδικά συστήματα	Σελ 76
5.2.1 Αποδοτικότητα Υβριδικών συστημάτων	Σελ 81

## Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα	Σελ 84
Βιβλιογραφία	Σελ 86

## **Ευχαριστίες**

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Έκτορα Νισταζάκη για την επιστημονική καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και για την εμπιστοσύνη του προς το πρόσωπό μου.

Ακόμη, οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου, η οποία έχει σταθεί πολύτιμο στήριγμα σε όλη την πορεία μου.

## Περίληψη

Οι ασύρματες οπτικές επικοινωνίες ή αλλιώς Free Space Optics Communications (FSOs) αποτελούν ασύρματα τηλεπικοινωνιακά, συστήματα στα οποία για την μεταφορά της πληροφορίας χρησιμοποιείται το ορατό και υπέρυθρο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ενώ το κανάλι διάδοσης της ασύρματης ζεύξης είναι η ατμόσφαιρα.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ραγδαία αύξηση των συγκεκριμένων συστημάτων σε επίπεδο ανάπτυξης και εφαρμογών, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν τόσο στην υψηλή μεταφορά δεδομένων όσο και στην ευκολία εγκατάστασης αντικαθιστώντας τις ενσύρματες επικοινωνίες, όπου δεν είναι εφικτές να υλοποιηθούν.

Λόγω του ότι το κανάλι διάδοσης είναι η ατμόσφαιρα και σε αυτήν παρουσιάζονται διακυμάνσεις που επηρεάζουν την αξιοπιστία και απόδοση των συστημάτων, στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η πλειονότητα των περιπτώσεων που δημιουργούν διαταραχή σε ένα FSO σύστημα και δυσχεραίνουν την διαθεσιμότητα και αξιοπιστία του. Επίσης μελετάται η ατμοσφαιρική τύρβη ως προς την δυσλειτουργία που είναι ικανή να προκαλέσει σε ένα FSO σύστημα και παρουσιάζεται μια προσπάθεια συγκέντρωσης αρκετών περιπτώσεων διαταραχής και ατμοσφαιρικής τύρβης μέσω διαφόρων μαθηματικών μοντέλων που επιτρέπουν μια καλή προσέγγιση για μελέτη αυτής.



## **Abstract**

Optical Wireless Communications (OWC) or Free Space Optics Communications (FSOs) are wireless telecommunications systems in which the visible and infrared spectrum of electromagnetic radiation is used to transmit information while the propagation channel of the wireless connection is the atmosphere.

In recent years, can be noticed the increase of these systems in terms of development and applications, due to their advantages in both high data transfer and ease of installation, replacing communications where they are not possible.

Due to the fact that the propagation channel is the atmosphere and in it there are fluctuations that affect the reliability and performance of the systems, in the present study the majority of cases that are maintained in an FSO system and channel its supply and reliability are presented. Atmospheric turbulence is also studied in terms of the malfunction that it is capable of causing in an FSO system and an attempt is made to gather all possible cases of disturbance and atmospheric turbulence through various mathematical models that offer an approached of high precision a good precision to study then.

## Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία αναφέρεται σε οπτικές επικοινωνίες εξωτερικού χώρου στην περιοχή των οπτικών συχνοτήτων. Γίνεται αναφορά σε: τρόπους λειτουργίας FSO συστημάτων(αναφέροντας πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών), παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση, διαθεσιμότητα και αξιοπιστία και αναλύεται το φαινόμενο της ατμοσφαιρικής τύρβης εκτενώς.

Οι οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου (Free Space Optics-FSO) είναι τεχνολογίες ασύρματων ζεύξεων που χρησιμοποιούν την διάδοση φωτός στον ελεύθερο χώρο για τη μετάδοση δεδομένων για τηλεπικοινωνίες ή δικτύωση υπολογιστών. Ο ελεύθερος χώρος περιλαμβάνει αέρα, διάστημα, κενό ή κάτι παρόμοιο και δεν σχετίζεται με τις επικοινωνίες που χρησιμοποιούν οπτικές ίνες. Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι χρήσιμη, όταν οι φυσικές συνδέσεις δεν είναι πρακτικές λόγω του υψηλού κόστους ή άλλων εκτιμήσεων. Στην παρούσα εργασία θα αναφερθούμε σε συστήματα επίγειων ζεύξεων.

Κάνοντας μια ιστορική αναδρομή για τις οπτικές επικοινωνίες, φαίνεται πως οι αρχαίοι Έλληνες χρησιμοποιούσαν ένα κωδικοποιημένο αλφαβητικό σύστημα σηματοδότησης με πυρσούς για επικοινωνία. Στη σύγχρονη εποχή, αναπτύχθηκαν ασύρματοι οι οποίοι χρησιμοποιούσαν κωδικοποιημένα σήματα για επικοινωνία με τους παραλήπτες τους. Το 1880, ο Alexander Graham Bell δημιούργησε το φωτοφόρο που χρησιμοποιήθηκε για τη μετάδοση ήχου χρησιμοποιώντας μια δέσμη φωτός. Στις 3 Ιουνίου 1880 πραγματοποίησε την πρώτη ασύρματη τηλεφωνική μετάδοση στον κόσμο μεταξύ δύο κτιρίων, σε απόσταση περίπου 213 μέτρων. Το 1937 η εταιρία οπτικής Carl Zeiss ανέπτυξε μία συσκευή μέσω της οποίας χρησιμοποιούσε φωτεινές ακτίνες για την επικοινωνία φωνητικών σημάτων.

Η εφεύρεση των laser στην δεκαετία του 1960 έφερε επανάσταση στην οπτική του ελεύθερου χώρου και πολλοί στρατιωτικοί οργανισμοί ενδιαφέρθηκαν ιδιαίτερα για την ανάπτυξή τους. Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή έχασε την δυναμική της αγοράς μετά την εμφάνιση των οπτικών ινών.

## Κεφάλαιο 1

### Συστήματα οπτικών επικοινωνιών εξωτερικού χώρου

#### 1.1 Γενικά

Στις ασύρματες επικοινωνίες μπορούμε να επιτύχουμε ζεύξεις με δύο τρόπους:

- Με άμεση οπτική επαφή (line of sight) μεταξύ πομπού και δέκτη
- Με εκμετάλλευση των μηχανισμών που διέπουν την διάδοση των Η/Μ κυμάτων, ανάκλαση (reflection), περίθλαση (diffraction), σκέδαση (scattering).

Οι μηχανισμοί διάδοσης βρίσκουν ευρεία εφαρμογή κυρίως σε συχνότητες κάτω των 300GHz για ασύρματες επικοινωνίες. Μέσω αυτών των μηχανισμών έχουμε το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών (multipath), όπου λόγω της παρουσίας του ίδιου κύματος στον δέκτη μέσα από διαφορετικές διαδρομές επιτυγχάνεται η τελική επικοινωνία. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι η παρουσία διαλείψεων στον χώρο των τηλεπικοινωνιών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για συχνότητες άνω των 30GHz είναι απαραίτητη η οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη αλλά και η χρήση κατευθυντικών κεραιών.

#### 1.2 Τρόποι λειτουργίας FSO συστημάτων

Οι οπτικές FSO επικοινωνίες ευνοούν τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, με ζεύξεις από σημείο σε σημείο μεγάλου εύρους, όπου το μέγεθος των τερματικών και η ισχύς είναι περιορισμένα. Ο χώρος εφαρμογής των FSO επικοινωνιών είναι (30GHz-800THz) και κυρίως σε μήκη κύματος (785-1550nm) σε επίγειες εφαρμογές με αποστάσεις κάποιων δεκάδων μέτρων έως μερικά χιλιόμετρα [1].

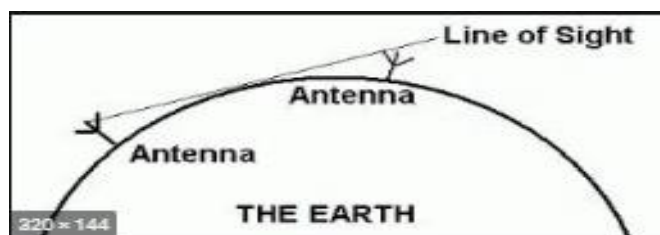
Αναλογιζόμενοι όμως από την μία πλευρά την εξασφάλιση της οπτικής επαφής (πομπού- δέκτη) και από την άλλη πλευρά το εύρος ζώνης εφαρμογών των FSO επικοινωνιακών συστημάτων, αμέσως αντιλαμβανόμαστε πως κατά την εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος έχει προβλεφθεί και εξασφαλιστεί η line of sight

επικοινωνία και τα μόνα εμπόδια που θα μπορούσαν να δημιουργήσουν προβλήματα στην ζεύξη μας είναι εμπόδια τα οποία θα τα χωρίσουμε στην παρούσα εργασία σε δύο κατηγορίες: τυχαία εμπόδια και εμπόδια του μέσου.

Στα τυχαία εμπόδια θα συμπεριλάβουμε ξένα σώματα που θα μπορούσαν να βρεθούν εντός της ακτίνας με την οποία οδηγείται το H/M κύμα ή ακόμα και τυχαίες καταστάσεις που θα οδηγούσαν σε απώλεια της οπτικής ζεύξης, όπως για παράδειγμα άνεμοι ή μετακινήσεις εδάφους και κτιρίων (μια σεισμική δόνηση), όπου εδράζονται οι εγκαταστάσεις κεραιών. Στα εμπόδια του μέσου θα αναφέρουμε την υγρασία ως γενική έννοια που ποικίλλει σε ποσοστό ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες (βροχή, ομίχλη) με την λογική των σταγονιδίων. Από τα προαναφερθέντα ο κυριότερος παράγοντας δημιουργίας παρεμβολών στις FSO επικοινωνίες είναι η υγρασία της ατμόσφαιρας που εμπεριέχει σταγονίδια νερού της τάξης μεγέθους των χιλιοστών (mm) και μικρότερα, τα οποία αποτελούν εμπόδιο διάδοσης, διότι τα μήκη κύματος ( $\lambda$ ) στα οποία κινούμαστε είναι ίδιας τάξεως και χαμηλότερα (εμπόδια συγκρίσιμα με το μέγεθος του μήκους κύματος).

Ένας παράγοντας με καθοριστικό ρόλο στην κατασκευή και χρήση ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι το εύρος συχνοτήτων που θα χρειαστεί να λειτουργήσει το σύστημα αλλά και η απόσταση, καθώς όσο οδηγούμαστε σε υψηλές συχνότητες τόσο περισσότερο στενεύει η χωρική δέσμη με την οποία που κατευθύνεται ένα H/M κύμα αλλά και μειώνεται η ισχύς του σήματος και αντίστροφα.

Τα FSO συστήματα χρησιμοποιούν δέσμες φωτός laser για την αποστολή του σήματος πληροφορίας. Ένας πομπός και ένας δέκτης δημιουργούν μια ζεύξη από σημείο σε σημείο (Point-to-Point, PtP), με την προϋπόθεση ότι μεταξύ τους υπάρχει γραμμική οπτικής επαφής (Line of Sight, LOS) χωρίς εμπόδια, όπως στο Σχήμα 1 [2].



Σχήμα 1 line of sight επικοινωνία [3]

Η απόσταση όμως μεταξύ δύο κεραιών περιλαμβάνει ένα τόξο (επιφάνεια γης) το οποίο είναι μετρήσιμο και αντιστοιχεί σε γωνία  $\alpha^\circ$  και υπολογίζεται από την σχέση (1)

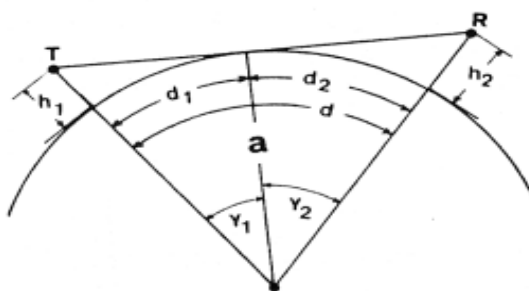
$$\alpha = \frac{360L}{2\pi\rho} \text{ (}^\circ\text{)} \quad (1)$$

όπου  $\rho$  η ακτίνα γης και  $\alpha^\circ$  η γωνία από το κέντρο της γης έως τις κεραιές.

Δεδομένου ότι το μήκος του τόξου  $L$  είναι η επιφάνεια της γης και στα FSO συστήματα οι αποστάσεις είναι της τάξης των λίγων χιλιομέτρων, μπορώ να υποθέσω πως το  $L$  είναι πολλαπλάσιο του μήκους κύματος που εκπέμπω (λόγω της ανάγκης ακρίβειας στον στόχο) τότε  $L = \chi\lambda$  και (θεωρώντας προσεγγιστικά σε αυτή την περίπτωση ως επίπεδη την επιφάνεια της γης και το ύψος των κεραιών σε σχέση με την ακτίνα της γης αμελητέο), άρα από την σχέση (1) προκύπτει ότι η γωνία  $\alpha$  είναι ανάλογη του μήκους κύματος.

Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η γωνία  $\alpha$  εξαρτάται από την συχνότητα. Δηλαδή όσο η  $f$  συχνότητα αυξάνεται, τόσο το  $\lambda$  μικραίνει και άρα η απόσταση μεταξύ δυο κεραιών θα πρέπει να μικραίνει για να επιτευχθεί η επικοινωνία.

Γενικότερα θα πρέπει να ισχύει η συνθήκη οπτικής επαφής μεταξύ δύο κεραιών [4], όπου σε ιδανική περίπτωση θεωρούμε την γη τέλεια, σφαιρική και λεία με ομογενή ατμόσφαιρα (δείκτης διάθλασης = κενού).



Σχήμα 2 Συνθήκη οπτικής επαφής [4]

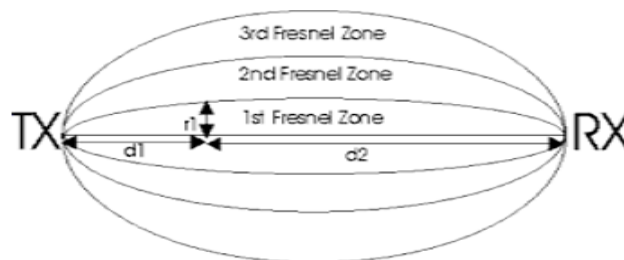
Έτσι για να ισχύει η συνθήκη οπτικής επαφής θεωρώ ότι  $d_1 + d_2 = TR$  διότι είναι πολύ μικρή απόσταση των κεραιών σε σχέση με την ακτίνα της γης και η απόσταση μεταξύ των κεραιών δίνεται από την ακόλουθη σχέση[4]:

$$d = d_1 + d_2 = (2a)^{\frac{1}{2}}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (2)$$

### 1.2.1 Ζώνες Fresnel

Σε ένα εκπεμπόμενο σήμα το αριθμητικό άνοιγμα μιας δέσμης του σήματος μεγαλώνει καθώς η δέσμη οδεύει προς τον δέκτη. Το εκπεμπόμενο όμως σήμα, εκτός από την απ' ευθείας διαδρομή που θα ακολουθήσει από τον πομπό προς τον δέκτη, θα διαθλαστεί από διάφορες επιφάνειες και εμπόδια που θα εμφανιστούν στην διαδρομή του. Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα το φαινόμενο της πολυόδευσης, δηλαδή ο δέκτης να δέχεται αφ' ενός το απευθείας σήμα από τον δέκτη (line-of-sight), αλλά και δευτερεύοντα σήματα, ίδια με το εκπεμπόμενο, τα οποία προέρχονται από τις παραπάνω ανακλάσεις και περιθλάσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα διάφορα σήματα να καταφθάνουν στον δέκτη με διαφορετική φάση και να έχουμε άλλοτε καταστρεπτική και άλλοτε ενισχυτική συμβολή [5].

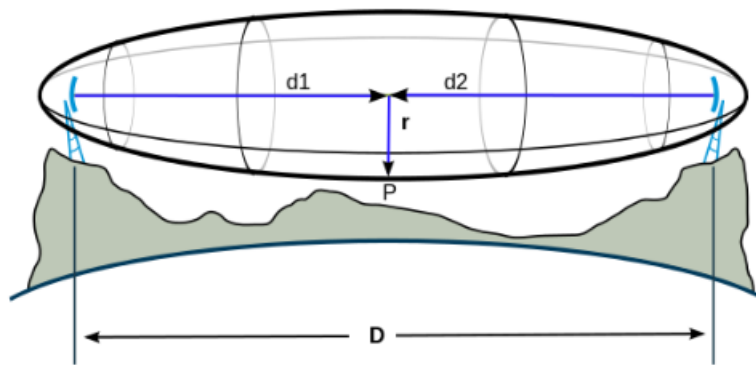
Σύμφωνα με την θεωρία του Γάλλου φυσικού Augustin-Jean Fresnel, υπάρχει ένα σύνολο  $n$  ομόκεντρων ελλειψοειδών περιοχών, οι οποίες ονομάζονται ζώνες, μέσα στις οποίες πρέπει να μην υπάρχει κάποιο αντικείμενο, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη απόδοση της ασύρματης ζεύξης. Οι ζώνες με την μεγαλύτερη συνεισφορά είναι η 1<sup>η</sup>, η 2<sup>η</sup> και η 3<sup>η</sup>, με την πρώτη να είναι σημαντικότερη όλων. Γι' αυτόν τον λόγο, τουλάχιστον το 60% της 1<sup>ης</sup> ζώνης θα πρέπει να είναι ελεύθερο από εμπόδια, ενώ για την μέγιστη απόδοση του συστήματος θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 80% ελεύθερη [5].



Σχήμα 3 Ζώνες Fresnel [4]

Όσα σήματα διαθλώνται από κάποιο εμπόδιο το οποίο βρίσκεται μέσα στην πρώτη ζώνη φτάνουν στον δέκτη με διαφορά φάσης λιγότερη από  $90^\circ$ , στην δεύτερη ζώνη με διαφορά φάσης από  $90^\circ$  έως  $270^\circ$  και στην τρίτη ζώνη με διαφορά φάσης από  $270^\circ$  έως  $450^\circ$ . Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3 η 2<sup>η</sup> ζώνη περικλείει την 1<sup>η</sup>, η 3<sup>η</sup> περικλείει την 2<sup>η</sup> και την 1<sup>η</sup> κλπ.

Η γεωμετρία που ακολουθείται για να υπολογιστεί η ακτίνα της n<sup>ης</sup> ζώνης Fresnel είναι η παρακάτω:



Σχήμα 4 Η ακτίνα r ενός σημείου P το οποίο απέχει  $d_1$  από τον πομπό,  $d_2$  από τον δέκτη και  $D = d_1 + d_2$  η απόσταση πομπού και δέκτη [4]

Η ακτίνα  $r_n$  ενός οποιουδήποτε σημείου P της n<sup>ης</sup> ζώνης Fresnel σε (m) θα δίνεται από την σχέση [4]:

$$r_n = \sqrt{n \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \lambda} \quad (3)$$

όπου n ο αριθμός της εκάστοτε ζώνης Fresnel,  $d_1$  και  $d_2$  οι αποστάσεις από τον πομπό και τον δέκτη αντίστοιχα σε (m) και  $\lambda$  το μήκος κύματος του σήματος σε (m).

Για πρακτικές εφαρμογές πρέπει να υπολογιστεί η μέγιστη ακτίνα της 1<sup>ης</sup> ζώνης Fresnel, έτσι ώστε κατά την διάρκεια του σχεδιασμού του συστήματος να μην υπάρχει κάποιο εμπόδιο εντός αυτής της ακτίνας 1<sup>ης</sup> ζώνης. Αντικαθιστώντας στην σχέση(3)  $n=1$  και  $d_1=d_2=\frac{D}{2}$  θα προκύψει[4]:

$$r_{1max} = \frac{1}{2} \sqrt{D\lambda} \quad (4)$$

Από την παραπάνω σχέση διακρίνουμε ότι η ακτίνα της  $1^{ης}$  ζώνης είναι ανάλογη της  $\sqrt{\lambda}$  που ως αποτέλεσμα έχει όσο μικραίνει το μήκος κύματος ( $\lambda$ ), δηλαδή όσο ανεβαίνουμε σε συχνοτικές τιμές, τόσο να μικραίνει η ακτίνα.

Η πρώτη όμως ζώνη, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, είναι η σημαντικότερη όλων για τον λόγο ότι τουλάχιστον το 60% αυτής πρέπει να είναι ελεύθερο από εμπόδια, ενώ για την μέγιστη απόδοση του συστήματος θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 80% ελεύθερη.

Δεδομένου ότι:

- οι συχνότητες στις οποίες εργαζόμαστε για FSO συστήματα είναι (30GHz-800 THz)
- και η διάμετρος μίας σταγόνας βροχής (ακραία περίπτωση) είναι της τάξης των (0.5-0.6mm) κοντά στην επιφάνεια της γης,

προκύπτει ως αποτέλεσμα ότι η ακτίνα δέσμης φωτός υφίσταται διάθλαση και αλλάζει κατεύθυνση ή ακόμα και περιθλάται στην σχεδόν κυλινδρική και θεωρητικά λεία επιφάνεια των σταγονιδίων, λόγω του ότι η διάμετρος των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα είναι πολλαπλάσια του μήκους κύματος. Στις περισσότερες των περιπτώσεων ξεπερνάμε το 60% της  $1^{ης}$  ζώνης που πρέπει να είναι ελεύθερο από εμπόδια. Επίσης λόγω του ότι το σύνολο των σταγονιδίων της βροχής στον αέρα έχουν όγκο συγκρίσιμο με τον χώρο που καταλαμβάνει η ελλειψοειδής επιφάνεια  $1^{ης}$  τάξης έχουμε προβλήματα αξιοπιστίας πληροφορίας λόγω διαλείψεων.

Καταλήγοντας θα μπορούσαμε να πούμε πως σε υψηλές συχνότητες η έννοια των ζωνών Fresnel παρουσιάζει πραγματικό ενδιαφέρον για μελέτη, λόγω της στενότητας της δέσμης.

### 1.2.2 Εξίσωση Friis και ισχύς σήματος στον ελεύθερο χώρο

Ο τύπος μετάδοσης Friis χρησιμοποιείται στην μηχανική τηλεπικοινωνιών εξισώνοντας την ισχύ στους ακροδέκτες μιας κεραίας λήψης ως το προϊόν της πυκνότητας ισχύος του προσπίπτοντος κύματος και του πραγματικού ανοίγματος της κεραίας λήψης υπό ιδανικές συνθήκες, δεδομένης μιας άλλης κεραίας που εκπέμπει σε μια γνωστή απόσταση. Ο συγκεκριμένος τύπος παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Δανό-Αμερικανό ραδιομηχανικό Harald T. Friis το 1946 και αναφέρεται ως εξίσωση μετάδοσης Friis [6].



Υποθέτουμε ότι μεταξύ πομπού και δέκτη δεν παρεμβάλλεται κάποιο εμπόδιο που θα εξασθενούσε το σήμα και θεωρούμε ότι η εκπομπή σήματος γίνεται από ισοτροπική κατευθυντική κεραία εκπομπής [4].

Τότε η ισχύς που λαμβάνεται από επιφάνεια με ενεργό διατομή  $A_R$  κάθετη στην διάδοση του κύματος και σε απόσταση  $d$  από την πηγή δίνεται από την σχέση[4]:

$$W_R = W_T \frac{G_T A_R}{4\pi d^2} \quad (5)$$

Όπου:

Πομπός	Μέσο διάδοσης	Δέκτης
Ισχύς εισόδου: $W_T$	Ελεύθερος χώρος	Ισχύς εξόδου: $W_R$
Κέρδος Κεραίας: $G_T$	Μήκος ζεύξης: $d$	Κέρδος Κεραίας: $G_R$
Ενεργός Διατομή: $A_T$	Χωρίς Απώλειες	Ενεργός διατομή: $A_R$

Πίνακας 1

Η ισχύς λήψης μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα κέρδη κεραιών (σχέση 6) ή μόνο τις ενεργές διατομές (σχέση 7). Έτσι καταλήγουμε στις εξισώσεις μετάδοσης του Friis για ελεύθερο χώρο [4]:

$$W_R = W_T \frac{G_R G_T \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (6) \quad \text{και} \quad W_R = W_T \frac{A_R A_T}{(\lambda d)^2} \quad (7)$$

Από την σχέση (6) προκύπτει ότι υπάρχει αναλογία της ισχύος εξόδου με το τετράγωνο του μήκους κύματος, ενώ από την σχέση (7) προκύπτει ότι λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις ενεργές επιφάνειες η ισχύς εξόδου είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου του μήκους κύματος.

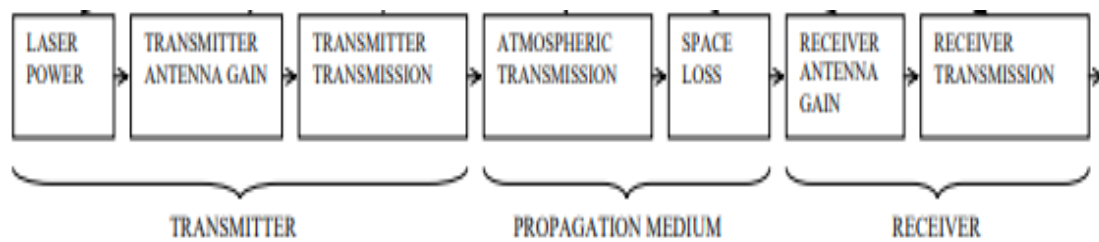
### 1.2.3 Βασικοί τρόποι λειτουργίας FSO συστήματος

Ο τρόπος λειτουργίας ενός FSO συστήματος είναι σχετικά απλός καθώς η δομή του αποτελείται από τα ακόλουθα:

- Πομπό
- Δέκτη
- Ασύρματο κανάλι

Ο πομπός έχει ως βασική λειτουργία την οδήγηση της δέσμης Laser μέσω μιας διόδου στέλνοντας την δέσμη στον δέκτη.

Ο δέκτης μέσω μιας φωτοδιόδου κάνει την ανάστροφη λειτουργία. Λαμβάνει την δέσμη laser και την μετατρέπει σε σήμα.



Σχήμα 5 Υποτυπώδες διάγραμμα λειτουργίας FSO συστημάτων [7]

Ένα αποτελεσματικό σύστημα FSO πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί σε υψηλά επίπεδα ισχύος για εκπομπή σε μεγάλες αποστάσεις
- υψηλή ταχύτητα διαμόρφωσης
- ο συνολικός σχεδιασμός του συστήματος πρέπει να έχει μικρό ίχνος και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- δυνατότητα να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών με μικρή υποβάθμιση της απόδοσης
- ο μέσος χρόνος αστοχιών (MTBF) του συστήματος πρέπει να είναι περισσότερος από 10 χρόνια

#### 1.2.4 Τα βασικά χαρακτηριστικά τεχνολογίας FSO

- Μεγάλο εύρος ζώνης
- Χώρος συχνοτήτων (υπέρυθρες, ορατές και υπεριώδεις)
- Πολύ στενό μέγεθος δέσμης (μια δέσμη laser έχει απόκλιση ορίου περιθλασης μεταξύ (0.01 – 0.1 mrad)

- Δεν χρειάζεται ειδική άδεια εκτός του εύρους των RF ακτινοβολιών
- Το κόστος ανάπτυξης ενός FSO συστήματος είναι χαμηλότερο από RF σύστημα, με συγκρίσιμο ρυθμό δεδομένων
- Γρήγορη εγκατάσταση και λειτουργία
- Η απόδοση οπτικού καναλιού εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες

### 1.2.5 Εφαρμογές FSO

Εφαρμογές παρουσιάζονται:

- σε μητροπολιτικά δίκτυα MAN
- σε κυψελιδωτά δίκτυα (cellular networks)
- σε επικοινωνίες μεταξύ επίγειων σταθμών και δορυφόρων με μόνη λύση την FSO επικοινωνία στο διάστημα (υψηλός όγκος δεδομένων και αξιοπιστία)

### 1.2.6 Επικινδυνότητα laser

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η χρήση των laser ανάλογα με την συχνότητα και την ισχύ εκπομπής μπορεί να είναι επιβλαβής για τα μάτια και το δέρμα του ανθρώπου. Τα laser κατηγοριοποιούνται σε κλάσεις ανάλογα με την επικινδυνότητά τους:

- CLASS I (ακίνδυνο): Τα laser κλάσης 1 δεν προκαλούν καταστροφή στα μάτια ακόμη κι αν η δέσμη πέσει μέσα στο μάτι από ατύχημα. Ωστόσο συνεχόμενο κοίταγμα της δέσμης απευθείας με γυμνό μάτι θα πρέπει να αποφεύγεται. Η ισχύς των laser κλάσης 1 είναι μικρότερη από 0.4  $\mu\text{W}$  για συνεχή CW laser με μήκος κύματος στο ορατό.
- CLASS II: Τα laser κλάσης 2 δεν προκαλούν καταστροφή στα μάτια κατά τη διάρκεια ενός ανοιγοκλεισίματος του ματιού (περίπου 0.25sec). Ωστόσο μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στην περίπτωση που ο παραπάνω χρόνος παραταθεί. Τα laser κλάσης 2 έχουν μήκη κύματος στο ορατό φάσμα (400 - 700 nm) και ισχύ εξόδου μεταξύ 0.4  $\mu\text{W}$  και 1 mW για CW laser. Ο μεγαλύτερος αριθμός αυτής της κατηγορίας είναι στα Ηλίου-Νέου (He-Ne).
- CLASS IIIa: Τα laser κλάσης 3a δεν προκαλούν καταστροφή στα μάτια κατά τη διάρκεια ενός ανοιγοκλεισίματος του ματιού (περίπου 0.25sec). Ωστόσο,

είναι πιθανή η ζημιά στην περίπτωση που κοιτάζουμε τη δέσμη με κάποιο φακό ή και απευθείας για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η ισχύς εξόδου για CW laser με μήκη κύματος στο ορατό φάσμα είναι μεταξύ 1-5 mW.

- CLASS IIIb (απαγορεύεται η άμεση έκθεση): Τα laser κλάσης 3b μπορούν να προκαλέσουν ζημιές από ατυχήματα στα μάτια στην περίπτωση που κοιτάζουμε τη δέσμη απευθείας ή ακόμη και κάποιο ανακλώμενο κομμάτι της. Η ισχύς εξόδου για CW laser είναι μεταξύ 5 - 500 mW. Εξαιρώντας τα μεγάλης ισχύος laser αυτής της κατηγορίας, η διαχεόμενη δέσμη laser δεν είναι επικίνδυνη εκτός κι αν την κοιτάζουμε με κάποιο φακό.
- CLASS IV (ιδιαίτερα επικίνδυνα): Η κλάση 4 είναι τα πιο επικίνδυνα laser. Έκθεση στη δέσμη τους ή ακόμη και σε ανάκλασή της ή και διάχυσή της είναι ενδεχόμενα επικίνδυνη τόσο για τα μάτια όσο και για το δέρμα. Η ισχύς εξόδου για CW laser για όλα τα μήκη κύματος είναι μεγαλύτερη από τα 500 mW. Όλα τα παλμικά laser που λειτουργούν στα μήκη κύματος 400 nm έως 1400 nm θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στην κλάση 4.

Συμπέρασμα: η έκθεση στην ακτινοβολία laser μπορεί να προκαλέσει βλάβες στα μάτια και στο δέρμα. Το μέγεθος και ο τύπος της βλάβης εξαρτάται από την ποσότητα της αποτιθεμένης ενέργειας και από το μήκος κύματος του φωτός.

#### **1.2.6.1 Η υπεριώδης ακτινοβολία**

Η έκθεση του ματιού στο υπεριώδες φως στην περιοχή των 200-315nm απορροφάται από τον κερατοειδή και μπορεί να προκαλέσει φωτοκερατίτιδα (φλεγμονή του κερατοειδούς). Το κοντινό υπεριώδες φως στην περιοχή των 315-400nm απορροφάται κυρίως στο φακό του ματιού και μπορεί να προκαλέσει καταρράκτη. Μήκη κύματος μικρότερα από 400nm δεν αποτελούν κίνδυνο για τον αμφιβληστροειδή.

#### **1.2.6.2 Ορατή και κοντινή υπέρυθη ακτινοβολία**

Η έκθεση του ματιού σε δέσμες laser στο ορατό (400-700nm) και κοντινό υπέρυθρο (700- 1400nm) φάσμα μπορεί να βλάψει τον αμφιβληστροειδή. Οι δέσμες laser αυτής

της φασματικής περιοχής διαδίδονται μέσα στο μάτι και εστιάζονται από το φακό παράγοντας ισχυρή ένταση φωτός στον αμφιβληστροειδή. Η ένταση της ακτινοβολίας πάνω στον αμφιβληστροειδή μπορεί να ξεπεράσει έως 100000 αυτής της προσπίπτουσας στον κερατοειδή εξαιτίας της εστίασης. Η μετατροπή αυτής της ενέργειας σε θερμότητα μπορεί να προκαλέσει εγκαύματα στον αμφιβληστροειδή με αποτέλεσμα την απώλεια όρασης ακόμη και την τύφλωση αν πειραχθεί το οπτικό νεύρο. Ακόμη και χαμηλής ενέργειας δέσμες μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στο μάτι. Για το λόγο αυτό η περιοχή των 400-1400nm ονομάζεται περιοχή οφθαλμικής επικινδυνότητας. Η έκθεση του δέρματος στην ορατή ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει εγκαύματα και υπέρμετρη ξήρανση.

### **1.2.6.3 Μέση και μακρινή υπέρυθη ακτινοβολία**

Οι δέσμες laser της μέσης και μακρινής υπέρυθρης ακτινοβολίας προκαλούν βλάβες κυρίως στον κερατοειδή και λιγότερο στον φακό του ματιού. Η βλάβη οφείλεται συνήθως σε φαινόμενα θερμότητας αν και τα παλμικά laser μπορεί να προκαλέσουν βλάβες εξαιτίας θερμομηχανικών φαινομένων. Το φως με μήκη κύματος πάνω από 1400nm δεν φτάνει στον αμφιβληστροειδή. Η μέση υπέρυθη ακτινοβολία με μήκη κύματος μεταξύ 1400nm και 3000nm μπορεί να διαπεράσει μέσα στον φακό του ματιού προκαλώντας καταρράκτη. Η μακρινή υπέρυθη ακτινοβολία με μήκη κύματος μεταξύ 3000 και 10000nm απορροφάται από τον κερατοειδή και μπορεί να προκαλέσει καψίματα σε αυτόν μέχρι και απώλεια όρασης.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, ένας σημαντικός παράγοντας χαρακτηρισμού επικινδυνότητας δέσμης laser είναι η ισχύς στην οποία εκπέμπει ένα σύστημα. Τα συστήματα για τα οποία γίνεται αναφορά στην παρούσα εργασία δεν λειτουργούν σε ισχύ πάνω από 150-180mW.

## Κεφάλαιο 2

### Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση, διαθεσιμότητα και αξιοπιστία των FSO συστημάτων επικοινωνιών

Η ατμόσφαιρα επηρεάζει καθοριστικά την απόδοση των FSO επικοινωνιακών συστημάτων, όχι μόνο στις επίγειες εφαρμογές αλλά και για ζεύξεις (π.χ. μεταξύ επίγειων σταθμών και δορυφόρων, αεροσκαφών ή τερματικών UAV), διότι σε διάφορα τμήματα των ατμοσφαιρικών διαδρομών περιλαμβάνονται πάντα διαταραχές [7].

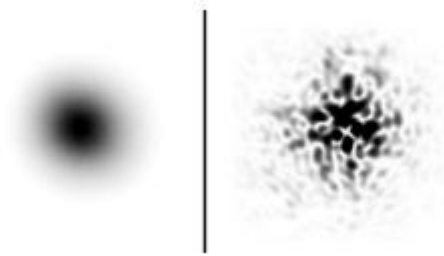
Υπάρχουν αρκετά παράθυρα στην ατμοσφαιρική μετάδοση μεταξύ (700-10000nm) με εξασθένηση  $<0.2$  dB/km. Η πλειοψηφία των συστημάτων laser ελεύθερου χώρου είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν στα παράθυρα των μηκών κύματος (780–850 και 1520–1600nm). Στην περιοχή των 850nm παρατηρείται στα συστήματα υψηλή απόδοση, αξιοπιστία και υπάρχει μεγάλη διαθεσιμότητα υλικών εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται για εξοπλισμό του δικτύου διάδοσης [7].

Τα κύρια προβλήματα όμως των FSO συνδέσεων που λειτουργούν σε εξωτερικούς χώρους όπως η ατμόσφαιρα, προκύπτουν από την εξασθένηση και τη διακύμανση του οπτικού σήματος σε έναν δέκτη. Η μετάδοση RF επηρεάζεται περισσότερο από τη βροχή και η οπτική μετάδοση επηρεάζεται περισσότερο από την ομίχλη. Επιπλέον, τα προγράμματα προστασίας από σφάλματα που είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν τα τυχόν προβλήματα των FSO βρίσκονται υπό ανάπτυξη.

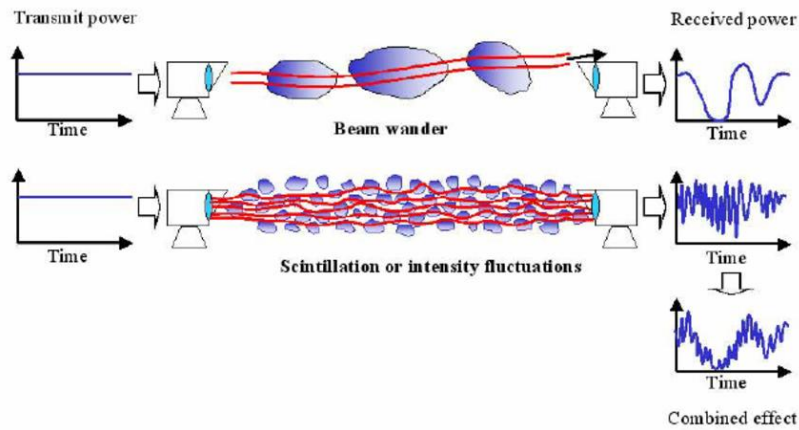
#### 2.1 Θερμοκρασία

Η ατμοσφαιρική τυρβώδης ροή (Atmospheric Turbulence) με την οποία θα ασχοληθούμε εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο είναι ένας σημαντικός παράγοντας επηρεασμού των συστημάτων ανοικτού χώρου. Η τυρβώδης ροή προκαλείται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας στα στρώματα της ατμόσφαιρας κατά μήκος της διάδοσης του καναλιού. Λόγω της αλλαγής θεοκρασίας υπάρχουν τυχαίες αλλαγές στον δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται διαθλαστικά φαινόμενα με αρνητικές επιδράσεις. Ένα φαινόμενο που προκαλείται από αυτήν την ανωμαλία στο κανάλι μετάδοσης είναι ο σπινθηρισμός όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα (6) ο οποίος αλλοιώνει το σήμα και ο δέκτης λαμβάνει το

σήμα με υψηλό θόρυβο [8].



Σχήμα 6 Ένταση δέσμης στον πομπό αριστερά και ένταση δέσμης στον δέκτη δεξιά (σπινθηρισμός) [8]



Σχήμα 7 Σήμα με υψηλό θόρυβο λόγω της ατμοσφαιρικής τυρβώδους ροής [8]

Ο σπινθηρισμός είναι το αποτέλεσμα της χωρικής και χρονικής μετατόπισης μιας δέσμης laser που κινείται σε ατμοσφαιρικό μέσο όπου παρουσιάζονται αλλαγές στον διαθλαστικό δείκτη (για μήκος ζεύξης πολλαπλάσιο του μήκους κύματος).

## 2.2 Ομίχλη

Η ομίχλη θεωρείται ως μια σοβαρή καιρική κατάσταση που μπορεί να προκαλέσει μείωση της ορατότητας σε λίγα μέτρα με υψηλή εξασθένηση έως 480 dB/km στις

χειρότερες περιπτώσεις. Η χωρητικότητα του καναλιού FSO όταν η ορατότητα μειώνεται, φτάνει στο μηδέν bit/s όταν η ομίχλη πλησιάζει προσωρινά στο πυκνότερο επίπεδο. Τα σωματίδια της ομίχλης αποτελούνται από πολύ λεπτά σταγονίδια νερού ή πάγου ή συνδυασμό και των δύο κοντά στην επιφάνεια της γης. Αυτά τα σωματίδια διασκορπίζουν το φως και επομένως μειώνουν την ορατότητα. Η ομίχλη περιγράφεται με ορατότητα μικρότερη από 1 km στο οπτικό πεδίο και σχετική υγρασία που φτάνει στο επίπεδο κορεσμού (100%) [9].

Η πιο σημαντική παράμετρος στην ομίχλη είναι η κατανομή μεγέθους σωματιδίων που χρησιμοποιείται για να μοντελοποιηθεί. Τα χαρακτηριστικά της ομίχλης μπορεί να διαφέρουν από το ένα συμβάν ομίχλης στο άλλο ή ακόμη και κατά τη διάρκεια του ίδιου γεγονότος ομίχλης. Εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες, όπως η εποχή και η τοποθεσία. Γενικά, το μέγεθος σωματιδίων ομίχλης είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος ενός FSO σήματος ανεξαρτήτως εποχής, γεγονός που προκαλεί μεγάλη εξασθένηση για συνδέσεις FSO. Η εξασθένηση φτάνει τα 480 dB/km σε πυκνή ομίχλη και τα 130 dB/km σε μέτρια ομίχλη. Καθώς η συγκέντρωση ομίχλης αυξάνεται στον αέρα, το εύρος ορατότητας μειώνεται [9].

Ο καθορισμός του μεγέθους και της περιεκτικότητας σε νερό και σε σωματίδια ομίχλης είναι μια σημαντική πληροφορία για να προβλεφθεί η εξασθένηση, λόγω του ότι αυτές οι πληροφορίες δεν είναι διαθέσιμες για τον χώρο στον οποίο λειτουργεί το σύστημα. Έτσι αναπτύχθηκαν μοντέλα για την πρόβλεψη αυτών των πληροφοριών που χρησιμοποιούν διαθέσιμες πληροφορίες από μετεωρολογικούς σταθμούς [9].

Ως ορατότητα ορίζεται η απόσταση από ένα αντικείμενο όπου η εικόνα διακρίνεται σε ένα ορισμένο ποσοστό σε σύγκριση με το πώς θα ήταν σε κοντινή απόσταση. Η διάκριση εικόνας που μειώνεται στο 2% και 5% θεωρείται εντός ορίου της θεμιτής ορατότητας. Η ορατότητα μετράται στα 550 nm που αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ένταση του ηλιακού φάσματος. Για να γίνει αυτός ο υπολογισμός χρησιμοποιείται ο νόμος Beer-Lambert που μας δίνει την ειδική εξασθένηση  $A$  [9].

**Παράδειγμα:** Για να υπολογιστεί το 5% της ορατότητας σε φωτεινή δέσμη στα 550nm, χρησιμοποιείται ο τύπος για την ειδική εξασθένηση και δίνεται από την σχέση [9]:



$$A = 10 \log(e) \frac{-\ln(0.05)}{V} = \frac{13}{V} \left( \frac{dB}{Km} \right) \quad (8)$$

όπου  $V$  είναι η ορατότητα σε χιλιόμετρα. Για υπολογισμό ορατότητας 2%, χρησιμοποιείται το 17 αντί για 13 στην σχέση (8) [9].

Με γνώμονα την παραπάνω σχέση έχουν αναπτυχθεί 4 βασικά μοντέλα για την μελέτη της εξασθένησης μιας φωτεινής δέσμης σε οποιοδήποτε μήκος κύματος και αναφέρονται παρακάτω.

### 2.2.1 Kruse Model

Ο Kruse πρότεινε μια τροποποίηση έτσι ώστε τα σωματίδια να επηρεάζονται σε μήκη κύματος διαφορετικά από 550 nm. Το μοντέλο Kruse (από το 1962) χρησιμοποιείται ευρέως για πολλά χρόνια ως το μοναδικό μοντέλο που προβλέπει την εξασθένηση λαμβάνοντας δεδομένα ορατότητας. Η εξασθένηση σύμφωνα με το μοντέλο Kruse και με βάση την (σχέση 8), δίνεται από την σχέση [9]:

$$A = \frac{13}{V} \left( \frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q} \left( \frac{dB}{Km} \right) \quad (9)$$

όπου  $V$  είναι η ορατότητα σε km, και  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος σε μm.

Το μοντέλο εκτιμά την εξασθένηση στις ορατές και πλησίον υπέρυθρες ζώνες. Ο συντελεστής  $q$  που εξαρτάται από την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων, καθορίστηκε από πειραματικά δεδομένα ως εξής [9]:

$$q = \left\{ \begin{array}{ll} 1.6 & V > 50Km \\ 1.3 & 6Km < V < 50Km \\ 0.585V^{\frac{1}{3}} & V < 6Km \end{array} \right\} \quad (10)$$

Το μοντέλο Kruse έχει προταθεί αρχικά για σωματίδια μικρότερα από τα μήκη κύματος σε ορατές ζώνες. Η ομίχλη έχει μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων και για αυτόν τον λόγο η μελέτη εξασθένησης μέσω αυτού του μοντέλου οδηγεί σε αβεβαιότητα σχετικά με την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων, για ορατότητα μικρότερη από 1 km.

### 2.2.2 Kim Model

Μια μελέτη που προτάθηκε για την εγκυρότητα του μοντέλου Kruse από τον Kim, ήταν η πρόταση τροποποίησης του αρχικού μοντέλου για την παράμετρο ορατότητας μικρότερη από 500m. Έτσι με βάση το προτεινόμενο μοντέλο Kim (2001), ο υπολογισμός εξασθένησης της ομίχλης για ( $V < 500$  m) θεωρήθηκε ως ανεξάρτητος από το μήκος κύματος. Σύμφωνα με αυτήν τη μελέτη, ο αρχικός συντελεστής  $q$  στην σχέση (9) στο μοντέλο Kruse τροποποιείται ως ακολούθως [9]:

$$q = \left\{ \begin{array}{ll} 1.6 & V > 50Km \\ 1.3 & 6Km < V < 50Km \\ 0.16V + 0.34 & V < 6Km \\ V - 0.5 & 0.5Km < V < 1Km \\ 0 & V < 0.5Km \end{array} \right\} \quad (11)$$

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο στα 1550 nm και τα 550 nm θα έχουμε εξασθένηση ίδιου επιπέδου για ορατότητα μικρότερη από 500 m.

### 2.2.3 Al-Naboulsi Model

Στα μοντέλα Kim και Kruse οι πληροφορίες σχετικά με την κατανομή μεγέθους σωματιδίων και τον τύπο ομίχλης δεν συμπεριλαμβάνονταν. Για αυτό το λόγο ένα εργαλείο προγραμματισμού FASCOD χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο Al-Naboulsi για τη μοντελοποίηση της εξασθένησης ομίχλης. Χρησιμοποιώντας αυτό το εργαλείο, ο Al Naboulsi δημιούργησε ένα μοντέλο (2004) για εξασθένιση ομίχλης στη φασματική ζώνη (0.69-1.55μm), το οποίο ισχύει για ορατότητα μεταξύ 50 m και 1 km. Έχουν προταθεί δύο μοντέλα πρόβλεψης εξασθένησης για τύπους ομίχλης, της μεταφοράς και της απορρόφησης. Η πρόβλεψη εξασθένησης ομίχλης μεταφοράς είναι το είδος ομίχλης όπου θερμός αέρας βρίσκεται πάνω από κρύα επιφάνεια και δίνεται από την σχέση [9]:

$$A_{adv} = 4.343 \left( \frac{0.11478\lambda + 3.8367}{V} \right) \left( \frac{dB}{Km} \right) \quad (12)$$

και η πρόβλεψη εξασθένησης ομίχλης απορρόφησης είναι το είδος ομίχλης όπου κρύος αέρας βρίσκεται πάνω από θερμή επιφάνεια και δίνεται από την σχέση [9]:

$$A_{conv} = 4.343 \left( \frac{0.18126\lambda^2 + 0.13709\lambda + 3.7502}{V} \right) \left( \frac{dB}{Km} \right) \quad (13)$$

όπου το V δίνεται σε Km και το λ σε μm.

Αυτό το μοντέλο εξαρτάται από το μήκος κύματος, σύμφωνα με το οποίο αυξάνεται η εξασθένιση καθώς το μήκος κύματος αυξάνεται στη ζώνη (0.69-1.55 μm) (αυτό δεν ισχύει για τα μοντέλα Kruse και Kim όπου η εξασθένιση μειώνεται όταν το μήκος κύματος αυξάνεται).

### 2.2.4 Ijaz Model

Λόγω της δυσκολίας λήψης μετρήσεων σε πραγματικό περιβάλλον, για να αναπτυχθεί το μοντέλο Ijaz, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε ελεγχόμενο εσωτερικό θάλαμο για την εξασθένηση της ομίχλης σε μήκος κύματος από (0.6 μm έως 1.6 μm). Τα αποτελέσματα δείχνουν εξάρτηση απόσβεσης από το μήκος κύματος για  $V > 15$  m, σύμφωνα με την οποία τα ορατά μήκη κύματος εξασθενούν περισσότερο από τα μήκη κύματος υπέρυθρων. Επιπλέον, ένα νέο μοντέλο (2013) προτάθηκε για μήκη κύματος μεταξύ (0.6 μm και 1.6 μm) το οποίο δίνεται από την σχέση [9]:

$$A = \frac{17}{V} \left( \frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q(\lambda)} \left( \frac{dB}{km} \right) \quad (14)$$

όπου  $V$  δίνεται σε km,  $\lambda$  σε μm και  $q(\lambda) = 0.148\lambda - 0.0947$  εξαρτώμενο από το μήκος κύματος [9]. Το μοντέλο ισχύει για ορατότητα μεταξύ (15m έως 1km). Μια σύνοψη των προηγούμενων εμπειρικών μοντέλων που συζητήθηκαν παρουσιάζεται στον ακόλουθο Πίνακα (2).

Model	Formula
-------	---------

Kruse	$A = \frac{13}{V} \left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-q}, \quad q = \begin{cases} 1.6 & V > 50km \\ 1.3, & 6km < V < 50km \\ 0.585V^{1/3} & V < 6km \end{cases}$
Kim	$A = \frac{13}{V} \left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-q}, \quad q = \begin{cases} 1.6 & V > 50km \\ 1.3, & 6km < V < 50km \\ 0.16V + 0.34 & 1km < V < 6km \\ V - 0.5 & 0.5km < V < 1km \\ 0 & V < 0.5km \end{cases}$
Al-Naboulsi Convection	$A = 4.343 \left(\frac{0.11478\lambda + 3.8367}{V}\right)$
Al-Naboulsi Advection	$A = 4.343 \left(\frac{0.18126\lambda^2 + 0.13709\lambda + 3.7502}{V}\right)$
Ijaz	$A = \frac{17}{V} \left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-q(\lambda)}, \quad q(\lambda) = 0.148\lambda - 0.0947$

Πίνακας 2 εμπειρικών μοντέλων απόσβεσης ομίχλης [9]

### 2.3 Βροχή

Δύο πολύ σημαντικοί παράγοντες επηρεασμού στα συστήματα FSO είναι οι γεωμετρικές απώλειες που εξαρτώνται κυρίως από την απόκλιση (σφάλματα σκόπευσης) και η εξασθένηση λόγω βροχοπτώσεως, η οποία με τη σειρά της δημιουργεί σκεδάσεις. Η σκέδαση προκαλείται από σωματίδια όπως ομίχλη και βροχή. Ο τύπος της σκέδασης καθορίζεται από το μέγεθος των σωματιδίων που την προκαλούν. Έτσι, στην περίπτωση βροχής το κύριο συστατικό ατμοσφαιρικής εξασθένησης θεωρείται ότι είναι μόνο απώλειες σκέδασης. Άλλοι παράγοντες όπως σκόνη ή υγρά σωματίδια στον αέρα θα μπορούσαν επίσης να προκαλέσουν σκέδαση, δεδομένου ότι υπάρχουν ανωμαλίες στην επιφάνεια εισόδου σήματος αλλά δεν θα συμπεριληφθούν σε αυτή την εργασία.

Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορεί να προκύψει η συνολική έκφραση εξασθένησης. Η συνολική εξασθένηση είναι ένας συνδυασμός ατμοσφαιρικής εξασθένησης και γεωμετρικών απωλειών. Η συνολική εξασθένηση λόγω σκέδασης από βροχή για ένα σύστημα FSO είναι στην πραγματικότητα απλή υπολογιστική διαδικασία (αφήνοντας την οπτική απόδοση, θορύβους, κ.λπ.) και μπορεί να περιγραφεί ως λόγος ισχύος εκπομπής προς την ισχύ λήψης, η οποία είναι ίση με [10]:

$$\frac{P_{transmit}}{P_{receive}} = 10 \log \frac{d_2^2}{(d_1 + (\theta R))^2} (e^{\beta R}) \quad (15)$$

Όπου [10]:

- $d_1$  = άνοιγμα διαμέτρου πομπού (m)
- $d_2$  = άνοιγμα διαμέτρου δέκτη (m)
- $\theta$  = γωνία απόκλισης δέσμης (mrad)
- $R$  = μήκος ζεύξης (km)
- $\beta$  = συντελεστής σκέδασης (1 / km)

Στο παράθυρο μήκους κύματος 1550nm φαίνεται να βρίσκει πολύ καλή εφαρμογή η σχέση (15) λόγω της ικανότητας διεύθυνσης της φωτεινής δέσμης.

#### 2.4 Απώλειες, Αξιοπιστία και Διαθεσιμότητα

Οι FSO ζεύξεις είναι ευάλωτες λόγω ατμοσφαιρικής εξασθένησης, τυρβώδους ροής και σφαλμάτων σκόπευσης. Η κακή ευθυγράμμιση της οπτικής δέσμης μεταξύ του πομπού και του δέκτη συμβαίνει είτε λόγω κακής τοποθέτησης, είτε λόγω μικρών κινήσεων που οφείλονται σε ανέμους, σεισμούς κλπ. Ο ρυθμός δεδομένων που παρέχεται από μία FSO ζεύξη είναι της τάξης των 10 Gbps που είναι πολύ υψηλό σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα κεφάλαια, τα προβλήματα απόδοσης και αξιοπιστίας παρατηρούνται σε περιπτώσεις εξωγενών παραγόντων και όχι σε σφάλματα του συστήματος. Οι ακόλουθες πληροφορίες προκύπτουν σύμφωνα με μία μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην Αλγερία στο φάσμα των υπερύθρων και χρησιμοποιείται ως ένα γενικό πλάνο σε σχέση με το ποιες παραμέτρους πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για να μελετηθεί ένα FSO σύστημα.

#### 2.4.1 Απόσταση σύνδεσης

Το περιθώριο οπτικής σύνδεσης είναι η επιπλέον διαθέσιμη ισχύς πάνω από την ευαισθησία του δέκτη και ορίζεται από την σχέση [11]:

$$M_{liassion} (dB) = P_e + |S_r| - Att_{Geo} (dB) - Att_{mol} (dB) - \sum P_{sys} (dB) \quad (16)$$

Όπου:

- $P_e$  είναι η ποσότητα της οπτικής ενέργειας που μεταδίδεται (dBm)
- $S_r$  είναι η ευαισθησία του δέκτη (dBm).
- Το  $Att_{Geo}$  είναι η γεωμετρική εξασθένηση του συνδέσμου (dB)
- Το  $Att_{mol}$  είναι η μοριακή εξασθένηση του συνδέσμου (dB).
- Το  $P_{sys}$  (dB) είναι οι απώλειες του συστήματος.

Το μήκος σύνδεσης καθορίζεται από το εάν το σύστημα είναι σε θέση να παρέχει επαρκή οπτική ισχύ στις χειρότερες ατμοσφαιρικές συνθήκες (ομίχλη, βροχή, χιόνι, μειωμένη ορατότητα λόγω καπνού, σπινθηρισμού κ.λπ.) λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του συστήματος οπτικής επικοινωνίας και του περιβάλλοντος στο οποίο πρόκειται να αναπτυχθεί ο σύνδεσμος.

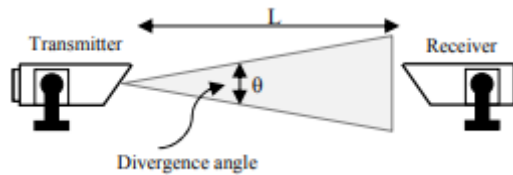
##### 2.4.1.1 Γεωμετρικές απώλειες

Γεωμετρικές απώλειες είναι οι απώλειες που προκύπτουν από τη διάδοση της μεταδιδόμενης δέσμης στον χώρο μεταξύ του πομπού και του δέκτη ανεξαρτήτως εμποδίων. Συνήθης περίπτωση είναι η δέσμη να απλώνεται σε μέγεθος μεγαλύτερο από το άνοιγμα λήψης και μέρος της ενέργειας σήματος να χάνεται. Οι γεωμετρικές απώλειες μπορούν να προσεγγιστούν από τον ακόλουθο τύπο [11]:

$$G_a = 10 \log \frac{S_{trans}}{S_{captur}} = 10 \log \left[ \frac{\pi/4(l\theta)^2}{S_{captur}} \right] (dB) \quad (17)$$

Όπου:

Τα  $S_{trans}$  και  $S_{captur}$  είναι οι διάμετροι της ενεργού περιοχής στον πομπό και τον δέκτη αντίστοιχα (mm),  $\theta$  είναι η γωνία απόκλισης (mrad) και  $l$  είναι η απόσταση σύνδεσης (m).



Σχήμα 8 Η γωνία απόκλισης μεταξύ δύο μονάδων FSO [11]

#### 2.4.1.2 Η μοριακή εξασθένηση

Η μοριακή εξασθένηση προκύπτει από την επίδραση της απορρόφησης και της διάχυσης του υπέρυθρου φωτός με μόρια αερίων που υπάρχουν στην επίγεια ατμόσφαιρα, προκαλώντας εξασθένηση στη δέσμη και επηρεάζοντας άμεσα την απόσταση μετάδοσης. Τα πιο συνηθισμένα απορροφητικά σωματίδια είναι το νερό, το διοξείδιο του άνθρακα και το όζον, τα οποία δημιουργούν τη μοριακή απορρόφηση [11].



<b>Μήκος κύματος (nm)</b>	<b>Μοριακή απορρόφηση (dB/Km)</b>
550	0.13
690	0.01
850	0.41
1550	0.01

Πίνακας 3 Μοριακή απορρόφηση σε ορισμένα τυπικά μήκη κύματος [11]

Από τον πίνακα (2) διαφαίνονται δύο παράθυρα καταλληλότερων μηκών κύματος (690 και 1550 nm).

#### **2.4.1.3 Απώλειες του συστήματος**

Η πρώτη πηγή απώλειας είναι οι κατασκευαστικές ατέλειες στους φακούς και γενικά σε οπτικά στοιχεία. Για παράδειγμα, ένας φακός μπορεί να μεταδώσει το 96% του φωτός, αλλά το 4% ανακλάται ή απορροφάται. Το ποσό αυτής της απώλειας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού και την ποιότητα των φακών. Αυτή η τιμή πρέπει να μετρηθεί ή να προέλθει από τον κατασκευαστή των οπτικών εξαρτημάτων [11].

#### **2.4.2 Απώλειες ατμοσφαιρικού καναλιού**

Η απόδοση ενός FSO συστήματος είναι αποτέλεσμα διαφόρων ατμοσφαιρικών παραγόντων όπως η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η ομίχλη, ο καπνός και η βροχή, αλλά συνήθως κυριαρχεί η ομίχλη, καθώς το μέγεθος των σωματιδίων της ομίχλης είναι συγκρίσιμο με τα οπτικά μήκη κύματος που συνήθως χρησιμοποιούνται για μετάδοση σε FSO συστήματα. Η ομίχλη μπορεί να τροποποιήσει τα χαρακτηριστικά του φωτός ή να εμποδίσει εντελώς τη διέλευση του φωτός μέσω ενός συνδυασμού απορρόφησης, σκέδασης και ανάκλασης [11].

##### **2.4.2.1 Εξασθένηση λόγω ομίχλης**

Σύμφωνα με την μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην Αλγερία, παρατηρήθηκε ότι για την πυκνή θαλάσσια ομίχλη η ειδική εξασθένηση μπορεί να είναι έως 480 dB/km. Στην περίπτωση ομίχλης χερσαίου περιβάλλοντος, η ειδική εξασθένηση μπορεί να φθάσει τα 130 dB/km.

Σύμφωνα με στοιχεία που ελήφθησαν από την «Εθνική Υπηρεσία Μετεωρολογίας της Αλγερίας», η εμφάνιση της ομίχλης εξαρτάται από την τοποθεσία (γεωγραφικό μήκος και πλάτος) και από την εποχή. Ο ακόλουθος πίνακας μας δίνει τον αριθμό των ημερών όπου ομίχλη εμφανίζεται για ένα έτος σε τέσσερις κύριες πόλεις της Αλγερίας, τρεις από τις οποίες βρίσκονται στο βόρειο μέρος της χώρας (Αλγέρι, Αννάμπα, Οράν) και μία νοτιότερα αυτών (Γκάρνταγια).

α/α	Αλγέρι	Αννάμπα	Οράν	Γκάρνταγια
Ιανουάριος	5	0	5	0
Φεβρουάριος	6	5	6	0
Μάρτιος	2	5	2	0
Απρίλιος	0	0	0	0
Μάιος	4	0	2	0
Ιούνιος	1	2	0	0
Ιούλιος	4	3	0	0
Αύγουστος	2	1	0	0
Σεπτέμβριος	0	0	2	0
Οκτώβριος	3	2	3	0
Νοέμβριος	10	0	13	0
Δεκέμβριος	5	1	1	0
Έτος	42	19	34	0

Πίνακας 4 Εμφάνιση ομίχλης σε πόλεις της Αλγερίας [11]

Όπως είχε αναφερθεί και στο κεφάλαιο (2.2) η ομίχλη απορρόφησης σχηματίζεται από την κίνηση υγρών μαζών και θερμού αέρα πάνω από ψυχρότερες θαλάσσιες ή χερσαίες επιφάνειες. Χαρακτηρίζεται από υγρασία υψηλότερη από  $0.20 \text{ gr/m}^3$  και διάμετρο σωματιδίων κοντά στα  $20 \mu\text{m}$  [11].

Η ομίχλη ακτινοβολίας σχετίζεται με την ψύξη εδάφους από ακτινοβολία. Εμφανίζεται όταν ο αέρας είναι αρκετά δροσερός και γίνεται κορεσμένος. Αυτή η ομίχλη εμφανίζεται γενικά κατά τη διάρκεια της νύχτας και στο τέλος της ημέρας. Η διάμετρος των σωματιδίων είναι περίπου  $4 \mu\text{m}$  και η περιεκτικότητα σε υγρό νερό

ποικίλλει μεταξύ 0.01 και 0.1 gr/m<sup>3</sup> [11].

Η μελέτη χρησιμοποιεί το AI Naboulsi Model για την εξασθένηση ομίχλης όπως έχουμε αναφέρει στο κεφάλαιο (2.2).

#### 2.4.2.2 Εξασθένηση λόγω βροχής και χιονόπτωσης

##### 2.4.2.2.1 Εξασθένηση λόγω βροχής

Σε αντίθεση με την ομίχλη, η βροχή έχει μικρή επίδραση στο FSO συστήματα και δεν αποτελεί μείζονα παράγοντα στη διαθεσιμότητά τους, αλλά οι έντονες βροχοπτώσεις μπορεί να προκαλέσουν σημαντική εξασθένηση για το οπτικό σήμα και να εξασθενίσουν την ισχύ της μεταδιδόμενης δέσμης κατά μήκος της διαδρομής. Η εξασθένηση λόγω βροχής, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος είναι συνάρτηση της έντασης βροχόπτωσης R (mm/h) σύμφωνα με την σχέση [11]:

$$Aff_{rain} = 1.076R^{0.67} \left(\frac{dB}{Km}\right) \quad (18)$$

##### 2.4.2.2.2 Εξασθένηση λόγω χιονόπτωσης

Το χιόνι έχει μικρή επίδραση στις ζεύξεις FSO και θεωρούμε ότι μελετάται σαν βροχή. Το χιόνι γενικά πέφτει με τη μορφή νιφάδων ή σε ορισμένες πολύ κρύες χώρες με τη μορφή αδρανών κρυστάλλων πάγου με τις νιφάδες να φτάνουν σε διάμετρο τα 15mm. Οι νιφάδες χιονιού είναι γενικά μεγαλύτερες από τις σταγόνες της βροχής και προκαλούν περισσότερες διακυμάνσεις σε ισχυρές χιονοπτώσεις, όπου υπάρχει μεγάλη πυκνότητα σε όγκο νιφάδων και μπορεί να προκαλέσουν την αποτυχία του συνδέσμου της στενής δέσμης laser. Το επίπεδο σήματος που λαμβάνεται εξαρτάται από τη διάμετρο των νιφάδων χιονιού και την απόσταση από τον πομπό. Η εξασθένηση λόγω χιονιού είναι συνάρτηση του μήκους κύματος λ(nm) και της έντασης της βροχόπτωσης R (mm/h) σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις για υγρό χιόνι και στεγνό χιόνι ανάλογα με το υψόμετρο [11]:

- Υγρό χιόνι (υψόμετρο <500m)

$$Aff_{snow} = (0.0001023\lambda + 3.7855476)R^{0.72} \left(\frac{dB}{Km}\right) \quad (19)$$

- Στεγνό χιόνι (υψόμετρο >= 500 m)

$$Aff_{snow} = (0.0000542\lambda + 5.4948776)R^{0.72} \left(\frac{dB}{Km}\right) \quad (20)$$

Οι σχέσεις (19) και (20) είναι μια τροποποίηση της σχέσης (18) εξασθένησης βροχής για τον λόγο ότι μελετάται ως μορφή βροχής.

#### 2.4.2.3 Απώλειες λόγω σπινθηρισμού

Η απόδοση των FSO συστημάτων επικοινωνίας επηρεάζεται από το σπινθηρισμό σε έντονες ηλιόλουστες μέρες. Ο σπινθηρισμός είναι ένα από τα αποτελέσματα των αλλαγών της θερμοκρασίας στην πυκνότητα σωματιδίων του αέρα. Στις περιοχές όπου λαμβάνει χώρα το φαινόμενο του σπινθηρισμού παρατηρείται αλλαγή του διαθλαστικού δείκτη κατά μήκος της διαδρομής μετάδοσης, που κινείται τυχαία στο χώρο. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχουν πολλαπλές διαδρομές και αλλαγές γωνίας άφιξης στην πλευρά του δέκτη, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν άμεσα την ποιότητα και την διαθεσιμότητα του συνδέσμου. Ο σπινθηρισμός δημιουργεί πολύ σημαντική απώλεια και είναι πολύ εντονότερος το μεσημέρι ή τα μεσάνυχτα λόγω της υψηλότερης διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στην επιφάνεια της γης και την ατμόσφαιρα. Μια παράμετρος που χρησιμοποιείται συχνά ως μέτρο της αντοχής σπινθηρισμού είναι η παράμετρος της ατμοσφαιρικής δομής ή  $C_n^2$  που έχει άμεση σχέση με την τυρβώδη ροή καθώς χαρακτηρίζει ποιοτικά την αναταραχή που υπάρχει στο μέσο διάδοσης [11].

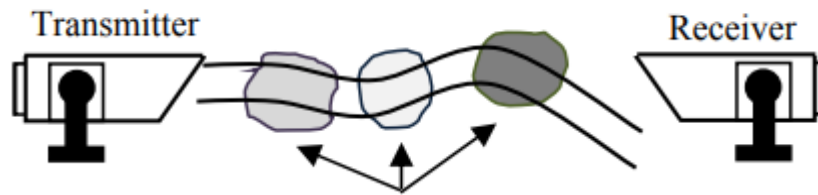
Η παράμετρος  $C_n^2$  ( $m^{-2/3}$ ) παίρνει τις ακόλουθες τιμές ανάλογα με το μέγεθος της διαταραχής:

- για χαμηλή αναταραχή  $10^{-16}$  ( $m^{-2/3}$ )
- για μέτρια αναταραχή  $10^{-14}$  ( $m^{-2/3}$ )
- για υψηλή αναταραχή  $10^{-13}$  ( $m^{-2/3}$ )

Η εξασθένηση λόγω σπινθηρισμού δίνεται από την σχέση [11]:

$$Aff_{scintillation} = 2\sqrt{23.17k^{7/6}C_n^2L^{11/6}} \quad (21)$$

όπου:  $k$  είναι ο κυματαριθμός  $2\pi/\lambda$  και η  $L$  απόσταση ζεύξης.

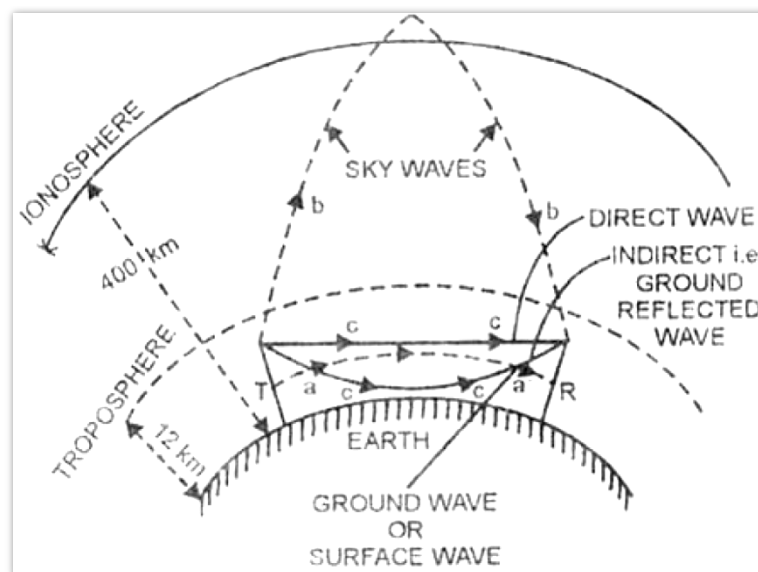


Σχήμα 9 Απώλεια στόχευσης λόγω διαθλαστικής ανωμαλίας [11]

#### 2.4.2.4 Τροποσφαιρική διάθλαση

Ένα φαινόμενο που μπορεί να παρατηρηθεί είναι η εκτροπή της δέσμης Laser λόγω αλλαγής του δείκτη διάθλασης ανάλογα με το ύψος της τροπόσφαιρας (λίγα km πάνω από την επιφάνεια της γης).

Η παρούσα εργασία αναφέρεται σε εγκαταστάσεις που αφορούν τον χώρο της τροπόσφαιρας. Η τροπόσφαιρα μπορεί να χωριστεί σε στρώματα ανάλογα με τον δείκτη διάθλασης που παρουσιάζεται στην αντίστοιχη περιοχή. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται αλλά και χρησιμοποιείται στην διάδοση κυμάτων στον τροποσφαιρικό χώρο με κυματοδήγηση σε περιπτώσεις κυμάτων που τείνουν να περάσουν από την μία περιοχή στην άλλη με πολύ μικρές γωνίες [4].



Σχήμα 10 Εκτροπή κυμάτων λόγω αλλαγής του δείκτη διάθλασης με φαινόμενο κυματοδήγησης [4]

Στην περίπτωση των FSO συστημάτων μπορεί να συμβεί εκτροπή δέσμης και όχι κυματοδήγηση. Συμπερασματικά πρέπει ο πομπός και ο δέκτης της ζεύξης να βρίσκονται στον ίδιο τροποσφαιρικό χώρο όσον αφορά στο ύψος με σκοπό την αποφυγή ανωμαλιών στην ζεύξη. Οι παραπάνω λόγοι μας δίνουν την πληροφορία ότι οι FSO ζεύξης υπόκεινται σε πολλούς περιορισμούς που δημιουργούν επιτακτική την ανάγκη μελέτης των παραγόντων που επηρεάζουν το σύστημά μας πριν την υλοποίηση.

#### **2.4.2.5 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα FSO συστημάτων**

Τα πλεονεκτήματα των FSO επικοινωνιών προκύπτουν από τα βασικά χαρακτηριστικά μιας δέσμης laser όπως (η υψηλή συχνότητα της, η συνοχή και η χαμηλή απόκλιση) που οδηγούν σε αποτελεσματική παροχή ισχύος σε έναν δέκτη και υψηλή μεταφορά πληροφοριών (χωρητικότητα).

Τα βασικά χαρακτηριστικά μιας δέσμης laser παρέχουν τα ακόλουθα πρόσθετα πλεονεκτήματα σε FSO επικοινωνίες[12]:

- Υψηλή χωρική επιλεκτικότητα χωρίς παρεμβάσεις
- Ο υψηλός διαθέσιμος ρυθμός bit τους επιτρέπει να εφαρμόζονται σε όλους τους τύπους δικτύων
- Η οπτική ζώνη χρήσης βρίσκεται έξω από τον τομέα των τηλεπικοινωνιακών ρυθμίσεων και επομένως δεν απαιτείται ειδική άδεια για την λειτουργία τους.
- Το μικρό μέγεθος και το μικρό βάρος των οπτικών τερματικών τους επιτρέπει να ενσωματώνονται εύκολα σε κινητά συστήματα.
- Δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία

Είναι σαφές ότι οι FSO επικοινωνίες έχουν καλές προοπτικές για εκτεταμένη εφαρμογή. Η τεχνολογία FSO συστημάτων χρησιμοποιείται ήδη σε επίγειες, κινητές και δορυφορικές συνδέσεις.

Όσον αφορά στην βελτίωση της αξιοπιστίας, τυγχάνουν εφαρμογής νέες μέθοδοι όπως τα υβριδικά συστήματα FSO / RF [13].

Τέλος τα FSO συστήματα είναι μια τεχνολογία LOS (οπτική επαφή), όπου επιτυγχάνεται επικοινωνία δεδομένων, φωνής και βίντεο με μέγιστο ρυθμό

δεδομένων 10 Gbps έχοντας αμφίδρομη συνδεσιμότητα.

Στα αρνητικά θα μπορούσαν να τοποθετηθούν τα ακόλουθα, επιγραμματικά:

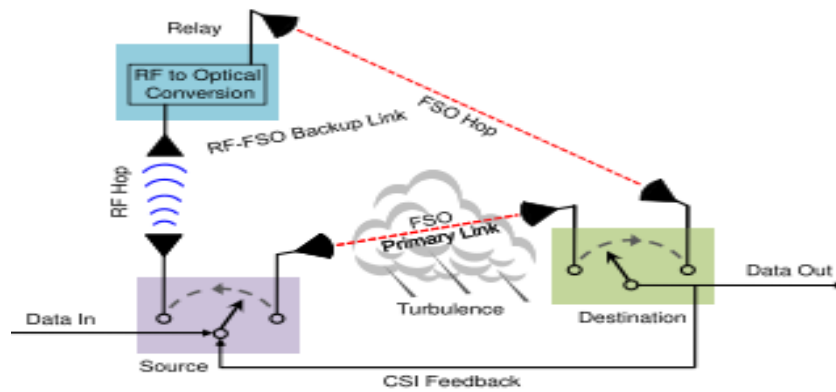
- Ανάγκη μεγάλης ακρίβειας στην ζεύξη μεταξύ πομπού και δέκτη
- Απώλεια οπτικής επαφής που ισοδυναμεί με απώλεια ζεύξης
- Επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες
- Σχετικά περιορισμένες αποστάσεις ζεύξεων

Παρά το γεγονός ότι οι αρνητικοί παράγοντες είναι σημαντικοί όσο αφορά την λειτουργία των FSO συστημάτων, τα FSO συστήματα παρουσιάζουν ένα πεδίο δόξης λαμπρό για μελλοντικές εφαρμογές, όπως δίκτυα επικοινωνιών 5<sup>ης</sup> γενιάς (5G), όπου ήδη εφαρμόζονται αλλά και δίκτυα 6<sup>ης</sup> γενιάς (6G) που τυγχάνουν ερευνητικού σταδίου στην Κίνα από το 2020 όπου υλοποιήθηκε η πρώτη δοκιμαστική εφαρμογή.

## 2.5 Υβριδικά συστήματα

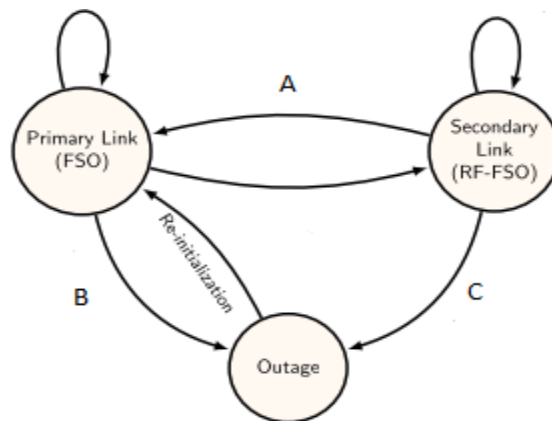
Τα Υβριδικά FSO συστήματα είναι συμπληρωματικά των απλών FSO συστημάτων και χρησιμοποιούνται, για να εξασφαλίσουν την ζεύξη σε περιπτώσεις απωλειών. Στην παρούσα εργασία θα προσπαθήσουμε να δώσουμε μια εικόνα λειτουργίας των απλών υβριδικών FSO συστημάτων μέσα από ένα FSO/RF-FSO σύστημα. Εκτενέστερα θα γίνει αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο.

Η λειτουργία των υβριδικών FSO συστημάτων στηρίζεται στην λογική της διπλής επικοινωνίας. Η κύρια γραμμή μετάδοσης είναι η γραμμή ζεύξης μεταξύ πομπού και δέκτη. Για να εξασφαλιστεί όμως η κύρια ζεύξη σε περιπτώσεις αναταραχών καναλιού, υπάρχει και μια backup RF-FSO ζεύξη που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία πομπού και δέκτη από άλλη διαδρομή στην οποία δεν υπάρχει αναταραχή και είναι εφικτή η επικοινωνία [13,14].



Σχήμα 11 Χωροταξική δομή FSO/RF-FSO συστήματος [14]

Το υβριδικό σύστημα λειτουργεί με γνώμονα τον θόρυβο SNR στην κύρια ζεύξη.



Σχήμα 12 Τυπική διάταξη λειτουργίας συστήματος ενός υβριδικού FSO/RF-FSO [13]

Στο σχήμα 12 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη λειτουργίας ενός υβριδικού FSO συστήματος με συνεχείς μεταβάσεις μεταξύ του PL (Primary link) και του SL (Secondary link). Σε αυτό το σχήμα, το FSO-PL παραμένει σε κατάσταση ON όσο το SNR (Signal/Noise) του PL παραμένει κάτω από το επίπεδο κατωφλίου που έχει ορισθεί. Αν το επίπεδο SNR (Signal/Noise) του PL ξεπεράσει το επίπεδο κατωφλίου, τότε το PL αλλάζει σε κατάσταση OFF και το σύστημα αλλάζει σε RF-FSO-SL για μετάδοση δεδομένων με την προϋπόθεση ότι το SNR αυτού (SL) του συνδέσμου είναι μικρότερο του SNR (Signal/Noise) του PL. Το PL επανέρχεται σε κατάσταση ON όταν το SNR-PL κατέβει σε επίπεδο κάτω από αυτό που έχει ορισθεί να λειτουργεί.



Το σύστημα είναι σε θέση να αντιληφθεί την κατάσταση απωλειών και να αποφασίσει αν θα αλλάξει κατάσταση ή θα παραμείνει στην ίδια. Ο βασικός περιορισμός σε αυτά τα συστήματα είναι ότι δεν έχουν την ίδια απόδοση η πρωτεύουσα με την δευτερεύουσα ζεύξη, με την δευτερεύουσα να υστερεί σημαντικά και να παρουσιάζει μεγαλύτερο ρυθμό (BER).

Τέλος μια άλλη δυνατότητα χρήσης για καλύτερη απόδοση του παραπάνω συστήματος είναι ο δευτερεύων σύνδεσμος RF να είναι εξοπλισμένος με δυνατότητα πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων (MIMO), έτσι ώστε να πλησιάζει τον ρυθμό δεδομένων των συνδέσεων FSO για να εξασφαλίζει την ζεύξη, τον ρυθμό μετάδοσης αλλά και την αξιοπιστία.

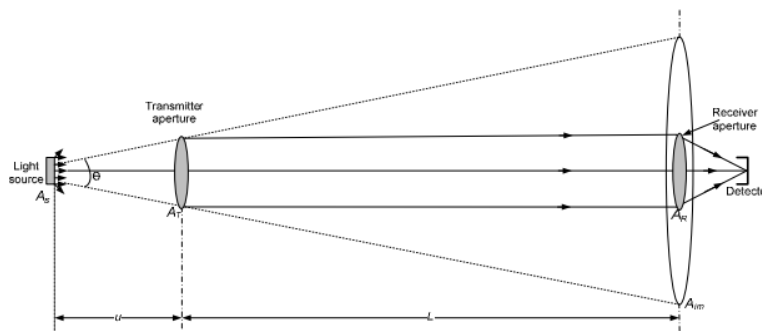
## Κεφάλαιο 3

### Ατμοσφαιρική τυρβώδης ροή

Η ατμοσφαιρική τυρβώδης ροή (Atmospheric Turbulence) που είχαμε αναφέρει και σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι ένας σημαντικός παράγοντας επηρεασμού των επικοινωνιακών συστημάτων ανοικτού χώρου. Η τυρβώδης ροή προκαλείται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας στα στρώματα της ατμόσφαιρας κατά μήκος της διάδοσης του καναλιού διάδοσης. Λόγο της αλλαγής θεοκρασίας υπάρχουν τυχαίες αλλαγές στον δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας και έτσι τα Η/Μ κύματα επηρεάζονται αρνητικά από διαθλαστικά φαινόμενα. Αποτέλεσμα της τυρβώδους ροής είναι οι διακυμάνσεις που προκαλούνται τόσο στην ένταση όσο και στη φάση του λαμβανόμενου φωτεινού σήματος, επηρεάζοντας την απόδοση του συνδέσμου.

### 3.1 Διασπορά οπτικής δέσμης

Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2.4.1. οι Γεωμετρικές απώλειες προκύπτουν από την διάδοση της μεταδιδόμενης δέσμης μεταξύ του πομπού και του δέκτη, με την δέσμη να απλώνεται σε μέγεθος μεγαλύτερο από το άνοιγμα λήψης, με αποτέλεσμα μέρος της ενέργειας σήματος να χάνεται [2].



Σχήμα 13 Διασπορά οπτικής δέσμης [2]

- $A_T$  άνοιγμα ή εμβαδό διαφράγματος πομπού
- $A_R$  άνοιγμα ή εμβαδό διαφράγματος δέκτη
- $\theta$  γωνία εκπεμπόμενης δέσμης

Λαμβάνοντας ως δεδομένο τις διακυμάνσεις λόγω ύπαρξης τυρβώδους ροής, θα στραφούμε προς τις τεχνικές επικοινωνίας που έχουν σκοπό την εξάλειψη αυτού του φαινομένου ως τελικό αποτέλεσμα στον δέκτη.

Δύο χρήσιμες παράμετροι που περιγράφουν την επαγόμενη από τυρβώδη ροή εξασθένιση, είναι το μήκος συσχέτισης των διακυμάνσεων της έντασης  $d_0$  (χωρικό πεδίο) και ο χρόνος συσχέτισης των διακυμάνσεων της έντασης  $\tau_0$  (χρονικό πεδίο). Όταν το άνοιγμα του δέκτη  $A_R$  μπορεί να γίνει μεγαλύτερο από το μήκος συσχέτισης, τότε η επαγόμενη από τυρβώδη ροή εξασθένιση μπορεί να μειωθεί [16].

Στις τεχνικές χρονικού πεδίου  $\tau_0$ , χρησιμοποιείται ένας μόνο δέκτης. Εάν ο δέκτης έχει γνώση της κατανομής οριακής εξασθένισης, αλλά δεν γνωρίζει ούτε την συσχέτιση χρονικής εξασθένισης ούτε την κατάσταση στιγμιαίας εξασθένισης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια τεχνική ανίχνευσης συμβόλου - συμβόλου μέγιστης πιθανότητας (ML). Εάν ο δέκτης γνωρίζει περαιτέρω την κοινή χρονική κατανομή εξασθένισης, αλλά όχι την κατάσταση στιγμιαίας εξασθένισης, ο δέκτης μπορεί να χρησιμοποιήσει μια τεχνική ανίχνευσης ακολουθίας ML (MLSD) για να μετριάσει την επαγόμενη από την αναταραχή εξασθένιση [16].

Στις τεχνικές χωρικού πεδίου  $d_0$ , πρέπει να χρησιμοποιούνται τουλάχιστον δύο δέκτες για τη συλλογή της φωτεινής δέσμης σε διαφορετικές θέσεις ή από διαφορετικές χωρικές γωνίες. Για να μεγιστοποιηθεί το κέρδος λήψης, οι πολλαπλοί δέκτες θα πρέπει να τοποθετούνται όσο το δυνατόν πιο μακριά μεταξύ τους, έτσι ώστε η εξασθένιση (διαθλαστική ανωμαλία) που προκαλείται να είναι συσχετισμένη στους διάφορους δέκτες, κάτι που πρακτικά μπορεί να μην είναι πάντα εφικτό [16].

Η ατμοσφαιρική τυρβώδης ροή ποικίλει ανάλογα με την τοπική θερμοκρασία και πίεση. Αυτές οι δύο παράμετροι επηρεάζονται όμως από:

- την χρονική διάρκεια της ημέρας (αλλαγή ηλιοφάνειας)
- εξωγενείς παράγοντες (ύπαρξη θερμικών πηγών)
- την αλλαγή των καιρικών συνθηκών

και έχουν ως αποτέλεσμα την ανομοιογένεια του δείκτη διάθλασης στο χωρικό μέσο διάδοσης που είναι η ατμόσφαιρα.

Η γεωγραφική θέση όπου λειτουργεί ένα FSO σύστημα επικοινωνίας (π.χ. επίπεδο έδαφος, παράκτια περιοχή, νησιά) καθιστά ξεχωριστή την εκάστοτε μελέτη του φαινομένου της τυρβώδους ροής [17].

Οι τυχαίες διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας που συνήθως

αναφέρονται ως οπτική αναταραχή είναι υπεύθυνες για διακυμάνσεις στην ένταση μεταφοράς σήματος της ακτίνας laser. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως σπινθηρισμός.

Ο σπινθηρισμός προκύπτει από θερμικές κλίσεις και αναταράξεις εντός της οπτικής διαδρομής που προκαλούνται από τη διακύμανση στην θερμοκρασία και την πυκνότητα του αέρα. Οι ζώνες διαφορετικής πυκνότητας που παρουσιάζονται στο μέσο διάδοσης λειτουργούν ως φακοί, διασπείροντας το φως μακριά από την αναμενόμενη πορεία του. Αυτό οδηγεί σε επαναλαμβανόμενες στιγμιαίες απώλειες σήματος, υποβαθμίζοντας έτσι την ποιότητα απόδοσης.

Η ατμοσφαιρική τυρβώδης ροή επηρεάζει την διάδοση μιας δέσμης φωτός μέσα στο κανάλι με τρεις τρόπους [18]:

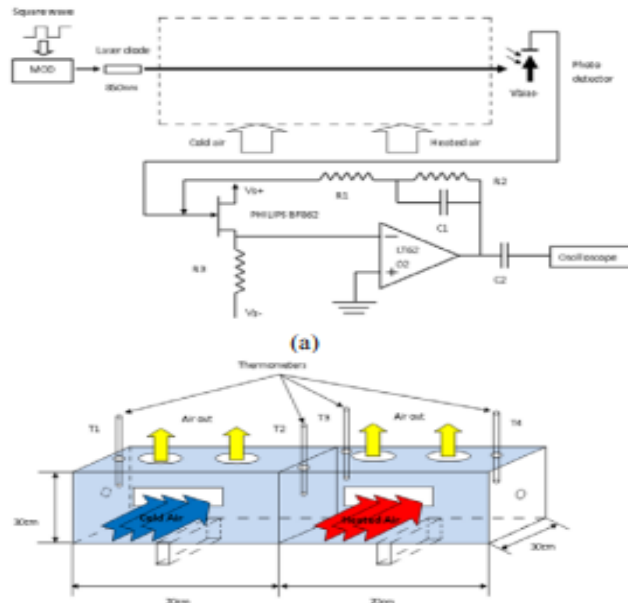
- το μέτωπο του κύματος παραμορφώνεται από τη διακύμανση λόγω του σπινθηρισμού, δημιουργώντας έτσι τις διακυμάνσεις στην ένταση του οπτικού σήματος.
- η περιπλάνηση της δέσμης πραγματοποιείται λόγω της περίθλασης της δέσμης laser, όταν η διάμετρος της δέσμης είναι μικρότερη ή ίση με το μέγεθος των στροβιλίων.
- η ατμοσφαιρική αναταραχή κάνει την ακτίνα laser να εξαπλωθεί πέρα από το όριο περίθλασης. Ο σπινθηρισμός είναι ένα σοβαρό πρόβλημα και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική επιδείνωση της απόδοσης του BER.

### **3.2 Μελέτη Τυρβώδους Ροής σε θάλαμο προσομοίωσης**

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζεται μια πειραματική διάταξη με έναν θάλαμο προσομοίωσης ατμοσφαιρικών αναταράξεων που φαίνεται στο Σχήμα 14 ο οποίος έχει τις ακόλουθες διαστάσεις: (140x30x30cm). Η αναταραχή προσομοιώνεται με εμφύσηση κρύου και ζεστού αέρα στον θάλαμο. Ο κρύος αέρας ρυθμίζεται περίπου στους 20°C και ο ζεστός αέρας καλύπτει ένα εύρος θερμοκρασιών από 20 έως 80°C. Χρησιμοποιώντας μια σειρά αεραγωγών, επιτυγχάνεται πρόσθετος έλεγχος θερμοκρασίας εξασφαλίζοντας έτσι μια σταθερή κλίση θερμοκρασίας μεταξύ της πηγής και του ανιχνευτή.

Τέσσερα θερμόμετρα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των στιγμιαίων θερμοκρασιών και της κλίσης της θερμοκρασίας. Το όλο πείραμα διεξάγεται σε

σκοτεινό δωμάτιο για να μειώσει περαιτέρω την επίδραση του φωτός του περιβάλλοντος στο ελάχιστο.



Σχήμα 14 (α) Το απλοποιημένο διάγραμμα της πειραματικής ρύθμισης, και β) ο θάλαμος προσομοίωσης αναταράξεων [18]

Ο πομπός χρησιμοποιεί πηγή laser με μέγιστη οπτική ισχύ εξόδου 3 mW και μήκος κύματος 850nm. Το κοντινό υπέρυθρο μήκος κύματος έχει επιλεγεί για λόγους κόστους και διαθεσιμότητας. Επίσης, σε αυτό το μήκος κύματος, η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταδοθεί περιορίζεται από τις απαιτήσεις ασφάλειας των ματιών. Ο οπτικός δέκτης αποτελείται από μια φωτοδίοδο PIN, ένα φίλτρο οπτικής ζώνης με φασματικό εύρος ζώνης 800-1100nm για τον περιορισμό του φωτός ακτινοβολίας υποβάθρου και έναν ενισχυτή trans-σύνθετης αντίστασης.

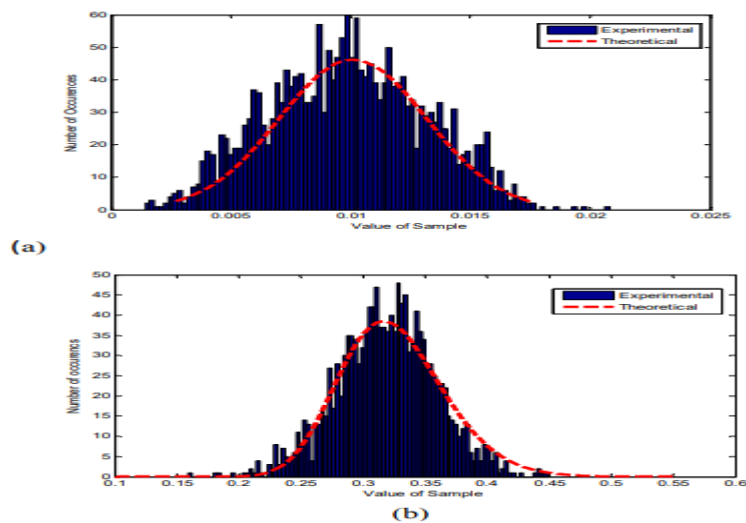
Στην οπτική πηγή εφαρμόζεται ένα σήμα εισόδου τετραγωνικού κύματος με μέγιστη τάση ( $V_{pp}$  peak to peak) 500mV. Οι γενικές παράμετροι προσομοίωσης δίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 1

Parameters	Values
Laser diode class (Beta Tx)	Class IIIb
Laser diode wavelength	850 nm
Maximum laser power	3mV

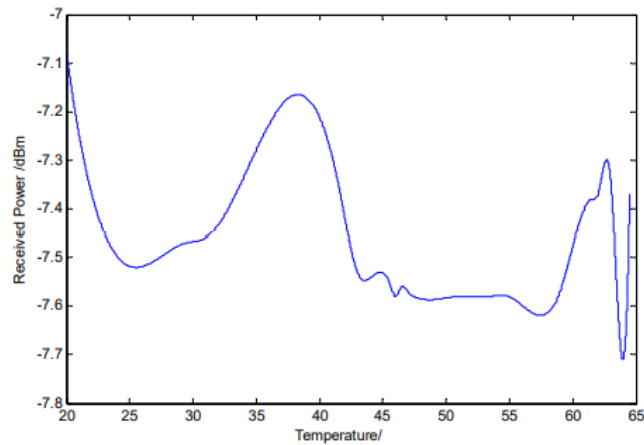
Maximum data rate	1Mbps
PIN photo detector (SFH203PFA) switching time	0.5μs
Modulation type	OOK
Optical band-pass filter	800 -1100 nm
Turbulence simulation chamber	140×30×30 cm
Temperature range	20°C - 80°C

Πίνακας 5 Παράμετροι προσομοίωσης [18]

Προκειμένου να χαρακτηριστεί ποσοτικά η αναταραχή που δημιουργείται μέσα στο θάλαμο, μετρήθηκε το λαμβανόμενο μέσο σήμα με και χωρίς το συνδυασμό κρύου/ζεστού αέρα. Από τα δεδομένα, σχεδιάστηκε η κατανομή του σήματος χωρίς και με σπινθηρισμό. Ο σπινθηρισμός που δημιουργείται είναι πολύ ασθενής. Το γενικό αποτέλεσμα εξασθένησης ισχύος σε εύρος θερμοκρασίας με σπινθηρισμό παρουσιάζεται στο (σχήμα 16) όπου παρουσιάζει εξασθένηση έως 0.6dB [18].



Σχήμα 15 Το λαμβανόμενο μέσο σήμα (α) χωρίς σπινθηρισμό, (β) με σπινθηρισμό. Τιμή δείγματος οριζόντια, αριθμός εμφανίσεων κάθετα [18]



Σχήμα 16 Λαμβανόμενη ισχύς σε εύρος θερμοκρασίας για μικρό χρονικό διάστημα με σπινθηρισμό και ελεγχόμενο μικρό στροβιλισμό [18]

### 3.2.1 Προσδιορισμός BER

Στο (σχήμα 17), παρουσιάζεται ένα σήμα δύο επιπέδων με τις αντίστοιχες κατανομές Gauss. Το BER δίνεται από την σχέση [18]:

$$BER = P_e = a_0 P_0 + a_1 P_1 \quad (22)$$

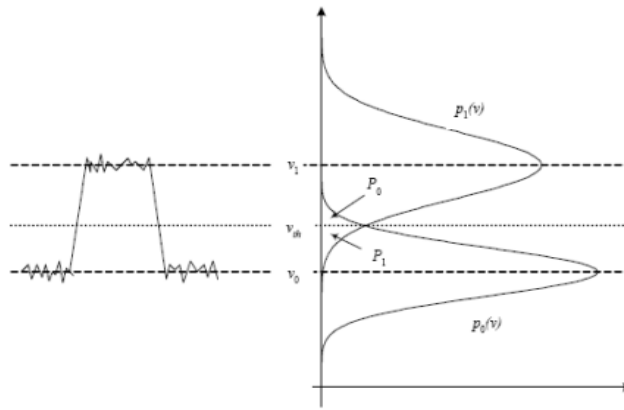
όπου τα  $a_0$  και  $a_1$  είναι πιθανότητες μετάδοσης για δυαδικά 0 και 1 αντίστοιχα και τα  $P_0$  και  $P_1$  δίνονται από τις σχέσεις [18]:

$$P_0 = \int_{V_{th}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \exp\left[-\frac{(v-v_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] dv \quad (23)$$

και

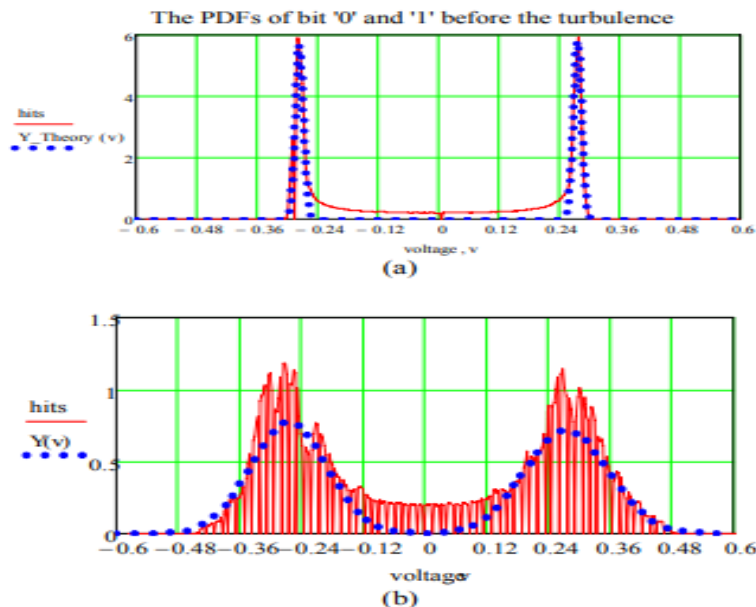
$$P_1 = \int_{-\infty}^{V_{th}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} \exp\left[-\frac{(v-v_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] dv \quad (24)$$

Στην περίπτωση που τα δυαδικά δεδομένα είναι τέτοια ώστε ο αριθμός των 0 και 1 να είναι ίσος, τότε  $a_0 = a_1 = 0.5$  και το καθαρό BER =  $\frac{1}{2} [P_0 + P_1]$ .



Σχήμα 17 Κατανομή δυαδικών ψηφίων «0» και «1» για αξιολόγηση BER [18]

Με σπινθηρισμό, το λαμβανόμενο σήμα είναι το άθροισμα δύο κατανομών: της Gaussian (λόγω θορύβου) και της κανονικής καταγραφής (λόγω σπινθηρισμού) όπως παρουσιάζεται στο (σχήμα 18). Αν και η διάταξη έχει πολύ μικρό μήκος, περίπου 150 cm και θα περιμέναμε να έχουμε σχεδόν μηδενική εξασθένηση, τα αποτελέσματα δείχνουν υψηλό BER λόγω του σπινθηρισμού στην δοκιμή με ροή ρευμάτων αέρα. Η προσομοιωμένη αναταραχή υποβάθμισε την απόδοση του συνδέσμου BER περίπου  $10^{-4}$  [18].



Σχήμα 18 Η κατανεμημένη λήψη σήματος: (α) χωρίς σπινθηρισμό (θεωρητικό) και (β) με σπινθηρισμό (πραγματικό). Διακεκομμένες γραμμές - θεωρητική εφαρμογή, συμπαγής γραμμή - πειραματικά δεδομένα [18]



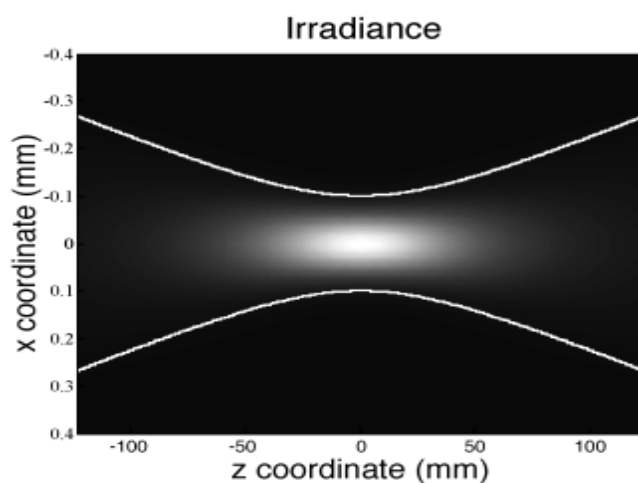
### 3.3 Gaussian beam lasers, χρήση σε FSO συστήματα

Οι δέσμες laser Gaussian είναι ο απλούστερος και συχνά ο πιο επιθυμητός τύπος δέσμης που παρέχεται από μια πηγή laser. Στην μελέτη ακτίνων Gaussian θεωρείται ότι οι δέσμες έχουν εγκάρσιες διαστάσεις και ότι η συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου βρίσκεται κατά μήκος της διάδοσης και δεν μελετώνται φαινόμενα πόλωσης με την δέσμη να θεωρείται ομοιογενώς πολωμένη. Η χρήση ακτίνων Gaussian είναι ιδανική για μελέτη φαινομένων περίθλασης.

Η διάδοση της δέσμης laser είναι ένα τρισδιάστατο πρόβλημα (δύο εγκάρσιες διαστάσεις  $x$ ,  $y$  και μία αξονική διάσταση  $z$ ). Η κατανομή πλάτους όμως μιας δέσμης laser Gaussian μπορεί να μελετηθεί σε δισδιάστατη μορφή ( $x$ ,  $z$ ). Έτσι με την σχέση (25) εκφράζεται και περιγράφεται η συμπεριφορά του πλάτους της δέσμης laser ως συνάρτηση της εγκάρσιας συντεταγμένης  $x$  και της αξονικής συντεταγμένης  $z$  [19].

$$\Psi(x, z) = \Psi_0 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\omega_0 \exp\{-i[\Phi_0 - \Phi(z)]\}}{\omega(z)} \times \exp\left[-i \frac{kx^2}{2R(z)} - \frac{x^2}{\omega^2(z)}\right] \quad (25)$$

Όπου  $k=2\pi/\lambda$  ο κυματαριθμός και  $\lambda$  το μήκος κύματος δέσμης.



Σχήμα 19 Παραβολική κατανομή ακτινοβολίας δέσμης Gaussian [19]

Παρατηρώντας το Σχήμα (19) βλέπουμε τον σχεδιασμό του μοτίβου ακτινοβολίας με όρους  $x$  και  $z$ . Η ακτινοβολία δείχνει ένα μέγιστο γύρω από ένα δεδομένο σημείο όπου το εγκάρσιο μέγεθος της δέσμης είναι ελάχιστο. Το σημείο αυτό αντιπροσωπεύει ένα ψευδο-εστιακό σημείο με ιδιαίτερες ιδιότητες.

### 3.3.1 Πλάτος δέσμης

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό για μια δέσμη laser είναι να γνωρίζουμε το ακριβές μέγεθος της ακτίνας γύρω από τον άξονα διάδοσης της.

Η εξίσωση (25) αποτελείται από δύο μέρη, ένα πραγματικό και ένα φανταστικό. Το φανταστικό μέρος σχετίζεται με την φάση της δέσμης και το πραγματικό μέρος συνδέεται με την εγκάρσια κατανομή της ακτινοβολίας της δέσμης. Από την εξαγωγή του πραγματικού τμήματος από την εξίσωση (25), διαφαίνονται οι εξαρτήσεις του πλάτους και της ακτινοβολίας [19]:

$$\Psi(x, z) \propto \exp\left[-\frac{x^2}{\omega^2(z)}\right] \quad (26)$$

και

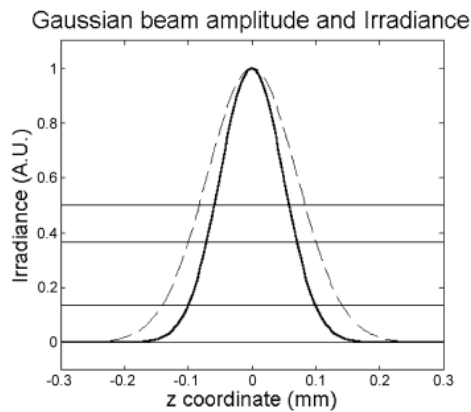
$$I(x, z) = |\Psi(x, z)|^2 \propto \exp\left[-\frac{2x^2}{\omega^2(z)}\right] \quad (27)$$

με την συνάρτηση  $\omega(z)$  να περιγράφει την εξέλιξη κατά μήκος της κατεύθυνσης διάδοσης των σημείων που έχουν μείωση  $1/e$  σε πλάτος ή  $1/e^2$  σε ακτινοβολία, σε σχέση με το πλάτος στον άξονα διάδοσης [19]:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z\lambda}{\pi\omega_0^2}\right)^2} \quad (28)$$

Όσον αφορά όμως στην τρισδιάστατη μορφή της δέσμης γίνεται η υπόθεση ότι είναι περιστροφικά συμμετρική.

Η γραφική αναπαράσταση του Σχήματος (19) παρουσιάζεται ως μια λευκή γραμμή με υπερβολική (σχηματικά) κατανομή ακτινοβολίας. Φτάνει ένα ελάχιστο στο  $z = 0$ , για να είναι η ελάχιστη τιμή του  $\omega_0$ . Αυτή η παράμετρος, η οποία διέπει την υπόλοιπη εξέλιξη, συνήθως ονομάζεται πλάτος δέσμης. Πρέπει να σημειωθεί ότι το  $\omega(z)$  εξαρτάται από το  $\lambda$ , όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος στο υλικό όπου διαδίδεται η δέσμη. Σε κάθε κάθετο επίπεδο, η δέσμη στον  $z$  δείχνει ένα προφίλ Gaussian. Το πλάτος φτάνει στο ελάχιστο στην μέση απόσταση της δέσμης και στη συνέχεια διαστέλλεται.

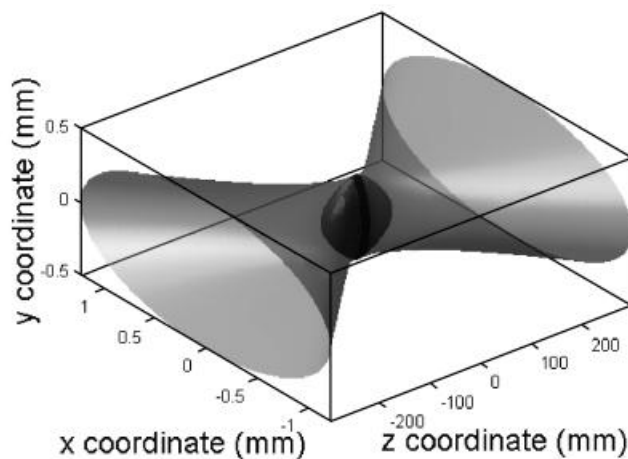


Σχήμα 20 Εγκάρσιο προφίλ του πλάτους της δέσμης Gauss στη μέση της δέσμης (διακεκομμένη γραμμή) και της ακτινοβολίας (συμπαγή γραμμή) [19]

Στο σχήμα 20 και οι δύο παραστάσεις έχουν κανονικοποιηθεί στη μέγιστη τιμή. Η τιμή του πλάτους της μέσης δέσμης  $w_0$  είναι 0.1 mm.

Οι οριζόντιες γραμμές αντιπροσωπεύουν (σε αυξανόμενη τιμή) το  $1/e^2$  της μέγιστης ακτινοβολίας, το  $1/e$  του μέγιστου πλάτους και το 0.5 της μέγιστης ακτινοβολίας και πλάτους.

### 3.3.2 Τρισδιάστατη μορφή Gaussian δέσμης



Σχήμα 21 τρισδιάστατη αναπαράσταση Gaussian δέσμης [19]

Για μια γενικευμένη Gaussian δέσμη που διαδίδεται κατά μήκος του άξονα Z, η σύνθετη κατανομή πλάτους στο επίπεδο διατομής XY δίνεται από την εξίσωση [20]:

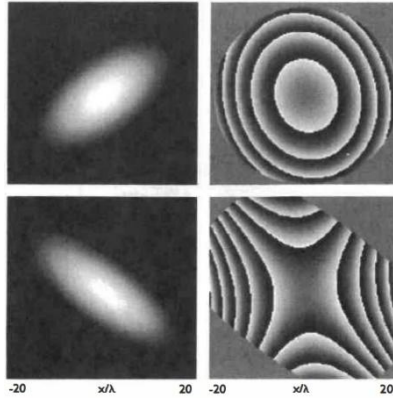
$$\hat{a}(x, y, z = 0) = \hat{a}_0 \exp[-\pi(ax^2 + 2bxy + cy^2)] \quad (29)$$

Η μιγαδική σταθερά  $\hat{a}_0$  είναι το πλάτος στην αρχή του συστήματος συντεταγμένων και οι συντελεστές :  $a = (a_1 + ia_2)$ ,  $b = (b_1 + ib_2)$ ,  $c = (c_1 + ic_2)$  είναι σταθεροί μιγαδικοί αριθμοί.

Οι μόνοι περιορισμοί στις παραμέτρους της εξίσωσης (29) είναι ( $a_1 \geq 0$ ), ( $c_1 \geq 0$ ) και  $a_1c_1 \geq b_1^2$  για να μην αποκλίνει το πλάτος στο άπειρο. Το περιεχόμενο ισχύος της δέσμης (δηλαδή, η ενσωματωμένη ένταση πάνω από το επίπεδο XY) βρίσκεται από την σχέση [20]:

$$P = 1/2 |\hat{a}_0|^2 / \sqrt{a_1c_1 - b_1^2} \quad (30)$$

Τα πραγματικά μέρη των παραμέτρων  $a$ ,  $b$ ,  $c$  καθορίζουν το προφίλ του μεγέθους της δέσμης στο επίπεδο XY στο  $z = 0$ , ενώ τα φανταστικά τους μέρη καθορίζουν το προφίλ φάσης της δέσμης.



Σχήμα 22 Κατανομές έντασης (αριστερά) και φάσης (δεξιά) στις διατομές δύο ακτίνων Gauss που έχουν διαφορετικές παραμέτρους  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . [20]

Στο Σχήμα (22) παρουσιάζονται κατανομές έντασης και φάσης ακτίνων Gauss. Τα διαγράμματα φάσης κωδικοποιούνται σε κλίμακα του γκρι, με το μαύρο να αντιπροσωπεύει  $-180^\circ$  και το λευκό να αντιστοιχεί σε  $+180^\circ$ . Τα χαρακτηριστικά των ακτίνων είναι: (Επάνω)  $a_1 + ia_2 = 0.009 - i0.023$ ,  $b_1 + ib_2 = -0.006 - i0.002$ ,  $c_1 + ic_2 = 0.012 - i0.016$ . (Κάτω)  $a_1 + ia_2 = 0.011 - i0.023$ ,  $b_1 + ib_2 = -0.01 - i0.003$ ,  $c_1 + ic_2 = 0.016 + i0.012$ .

### 3.3.3 Διάδοση στον ελεύθερο χώρο, μετατόπιση φάσης Gouy

Η μετατόπιση φάσης Gouy οποιασδήποτε εστιασμένης δέσμης προέρχεται από τον εγκάρσιο χωρικό περιορισμό και παρατηρείται κατά την διέλευση της δέσμης από το σημείο  $z_0$ .

Θεωρούμε ένα μονοχρωματικό κύμα συχνότητας  $\omega$  με κυματαριθμό  $k=\omega/c$  που διαδίδεται κατά μήκος της κατεύθυνσης  $z$ . Μια πεπερασμένη δέσμη ωστόσο, θα έχει μια διασπορά στον εγκάρσιο χώρο επειδή αποτελείται από ένα γωνιακό φάσμα επίπεδων κυμάτων που μπορεί να ληφθεί μέσω ενός μετασχηματισμού Fourier. Ο κυματαριθμός σχετίζεται με αυτές τις εγκάρσιες συνιστώσες και δίνεται από την σχέση [21]:

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad (31)$$

όπου  $k_x$ ,  $k_y$  και  $k_z$  είναι τα διανυσματικά στοιχεία του κύματος κατά μήκος των αξονικών συντεταγμένων. Εφόσον το  $k=\omega/c$  είναι σταθερό, η παρουσία των εγκάρσιων συνιστωσών μειώνει το μέγεθος της αξονικής συνιστώσας στην τιμή  $k_z=k$  για ένα άπειρο επίπεδο κύμα που διαδίδεται κατά μήκος του  $z$ . Στην περίπτωση όμως της πεπερασμένης δέσμης η αξονική συνιστώσα δίνεται από την σχέση [21]:

$$\bar{k}_z \equiv \frac{\langle k_z^2 \rangle}{k} = k - \frac{\langle k_x^2 \rangle}{k} - \frac{\langle k_y^2 \rangle}{k} \quad (32)$$

Η σταθερά ενεργού διάδοσης που ορίζεται στην σχέση (32) σχετίζεται με τη συνολική φάση διάδοσης  $\Phi(z)$  στον άξονα μέσω της σχέσης [21]:

$$\bar{k}_z \equiv \partial\Phi(z)/\partial z \quad (33)$$

Ο πρώτος όρος της σχέσης (32) αποδίδει τη φάση  $k_z$  ενός άπειρου επίπεδου κύματος που διαδίδεται κατά μήκος του  $z$ . Οι δύο τελευταίοι όροι προκαλούν τη μετατόπιση φάσης Gouy.

Για να αντιληφθούμε το αποτέλεσμα της μετατόπισης Gouy, όπως αρχικά θεωρήσαμε μια μονόχρωμη δέσμη με εγκάρσια κατανομή Gauss που δίνεται από την σχέση [21]:

$$f(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega(z)} \exp \left[ -\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)} \right] \quad (34)$$

όπου  $\omega^2(z)$  δίνεται από την σχέση [21]:

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_R} \right)^2 \right] \quad (35)$$

ότι αντιπροσωπεύει την ακτίνα δέσμης και  $\omega_0$  είναι το ελάχιστο μέγεθος (μέση δέσμης) στο  $z=0$ . Το εύρος Rayleigh ορίζεται ως η διάσταση της μέσης της ακτίνας διάδοσης κατά μήκος του  $z$  με  $z_R = \pi \omega_0^2 / \lambda$  όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος. Το πραγματικό όμως εύρος της δέσμης είναι κατά  $\sqrt{2}$  μεγαλύτερο απ' ότι στο μέσον. Η διαφορά αυτή είναι ικανή να προκαλέσει στην διαδιδόμενη ακτίνα μετατόπιση φάσης έως  $180^\circ$ , και δίνεται από την σχέση [20],[21],[22]:

$$\Phi_G = -\arctan(z/z_R) \quad (36)$$

Αυτός ο παράγοντας είναι σημαντικός και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κάθε φορά που απαιτείται η ακριβής γνώση του μετώπου κύματος.

### 3.4 Αξιολόγηση BER σε FSO επικοινωνίες λόγω ύπαρξης τυρβώδους ροής

Οι στρεβλώσεις μιας δέσμης επικοινωνίας laser που προκύπτουν από τις ανομοιογένειες του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση των συστημάτων επικοινωνίας FSO με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της σύνδεσης επικοινωνίας. Αυτή η κατάσταση οφείλεται στην αύξηση του αριθμού των σφαλμάτων στο λαμβανόμενο σήμα. Η απόδοση του συστήματος επικοινωνίας συνήθως χαρακτηρίζεται από μια σημαντική παράμετρο που ονομάζεται «ποσοστό σφάλματος δυαδικών ψηφίων (BER)». Αυτή η παράμετρος εξαρτάται τόσο από τα σφάλματα που προκύπτουν από θόρυβο που σχετίζεται με το ηλεκτρονικό κύκλωμα όσο και από τα στροβιλίσματα της ατμόσφαιρας λόγω τυρβώδους ροής. Η επίλυση αυτών των προβλημάτων είναι απαραίτητη για την έρευνα και τον σχεδιασμό των FSO συστημάτων.

Η διάδοση της δέσμης laser στην ατμόσφαιρα μπορεί να περιγραφεί μέσω της

κυματικής εξίσωσης που δίνεται από την σχέση [22]:

$$\nabla^2 E + k^2 n^2(\vec{r}) E = 0 \quad (37)$$

όπου  $E$  το ηλεκτρικό πεδίο και  $k$  κυματαριθμός κύματος, αντίστοιχα.

Η παράμετρος  $n$  είναι ο δείκτης διάθλασης του μέσου που είναι γενικά μια τυχαία συνάρτηση χρόνου και χώρου.

Η φύση των ατμοσφαιρικών διαταραχών μπορεί να περιγραφεί με το μοντέλο Kolmogorov όπου έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε προσομοιώσεις αστρονομικών απεικονίσεων.

Η παράμετρος του ποσοστού σφάλματος BER για σήμα που αποστέλλεται με δέσμη laser σε απόσταση  $z$  μπορεί να εκφραστεί με την [22]:

$$BER(z) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_Q^\infty e^{-x^2} dx = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}Q(z) \quad (38)$$

όπου  $Q(z)$  είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο του συστήματος και δίνεται από την σχέση [22]:

$$Q(z) = \frac{\langle i_s(z) \rangle}{2\sqrt{2}\sigma_j(z)} \quad (39)$$

Με  $\langle i_s(z) \rangle$  να είναι το ρεύμα φωτοδιόδου δέκτη λόγω δέσμης laser και  $\sigma_j(z)$  η στατιστική του διακύμανση και η παράμετρος  $\langle i_s(z) \rangle$  υπολογίζεται από την σχέση [22]:

$$\langle i_s(z) \rangle = S_i \Phi_s(z) \quad (40)$$

όπου  $S_i$  είναι η απόλυτη ευαισθησία του φωτοανιχνευτή και  $\Phi_s(z)$  είναι η οπτική ισχύς που λαμβάνει ο ανιχνευτής στην απόσταση  $z$  από την πηγή του laser. Ο συμβολισμός  $\langle \ \rangle$  υποδηλώνει μέσο όρο πάνω από τις κβαντικές διακυμάνσεις και είναι ποσοτικός. Η απόλυτη ευαισθησία φωτοανιχνευτή  $S_i$  ορίζεται απλά από την σχέση [22]:

$$S_i = \frac{en\lambda}{hc} \quad (41)$$

όπου  $e$  φορτίο ηλεκτρονίου,  $n$  η κβαντική απόδοση φωτοδιόδου,  $h$  η σταθερά του Planck και  $c$  η ταχύτητα φωτός σε ελεύθερο χώρο.

Η οπτική ισχύς λήψης του ανιχνευτή  $\Phi_s(z)$  υπολογίζεται από την σχέση [22]:

$$\Phi_s(z) = \frac{\tau_R}{2n_0} \int_{SR} E(z) E^*(z) da \quad (42)$$

όπου  $n_0$  είναι η ηλεκτρομαγνητική σύνθετη αντίσταση του ελεύθερου χώρου και  $\tau_R$  η διαφάνεια του δέκτη (δεκτικότητα ακτινοβολίας χωρίς αισθητή απορρόφηση).

Για μια παραμορφωμένη δέσμη η γενική μορφή για το πλάτος της δέσμης κατά μήκος του άξονα  $x$  μπορεί να εκφραστεί με την σχέση [22]:

$$w(x) = 2 \left[ \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |E(x)|^2 [x - x_{cm}(E)]^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |E(x)|^2 dx} \right]^{1/2} \quad (43)$$

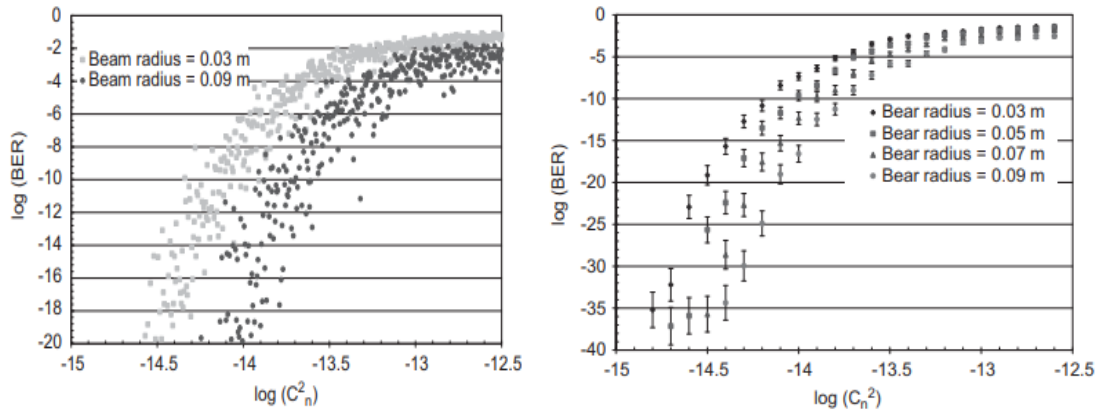
με τον παρονομαστή να είναι η ολική ακτινοβολία της δέσμης και  $x_{cm}(E)$  ορίζεται ως η θέση του κέντρου έντασης της δέσμης και δίνεται από την σχέση [22]:

$$x_{cm}(E) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |E(x)|^2 x dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |E(x)|^2 dx} \quad (44)$$

Στην διαταραγμένη ατμόσφαιρα, το μέγεθος του γενικού πλάτους δέσμης  $w(x)$  στη θέση του δέκτη είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό του ελεύθερου χώρου. Η διακύμανση του  $w(x)$  επηρεάζει την οπτική ισχύ που λαμβάνει ο ανιχνευτής  $\Phi_s(z)$  στην εξίσωση (42) από την οποία μπορεί να επηρεαστεί το BER.

Στο σχήμα (23) τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται έχουν χρησιμοποιηθεί δέσμες laser ακτίνας  $r_L=0.03-0.09m$  σε αποστάσεις έως 1000m. Ενώ τα μήκη κύματος laser που χρησιμοποιούνται κυρίως σε FSO συστήματα είναι  $\lambda=850nm$  και  $\lambda=1550nm$ .



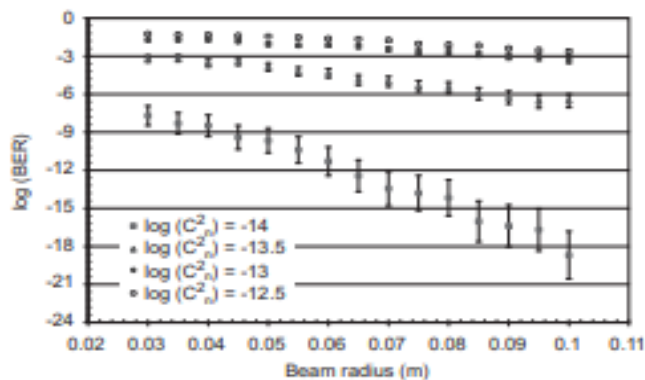


Σχήμα 23 Τυπικές τιμές του BER έναντι διαφορετικών παραγμένων συνθηκών για διαφορετικές ακτίνες laser, μήκος κύματος  $\lambda=850\text{nm}$  αριστερά και  $\lambda=1550\text{nm}$  δεξιά, για δέκτη σε απόσταση  $z=1000\text{m}$  [22]

Στο (σχήμα 23) αριστερά παρατηρείται η ακτίνα δέσμης laser  $0.03\text{ m}$  να λειτουργεί τέλεια σε μια κατάσταση αναταραχής  $\log C_n^2 \cong -14.7$  ενώ με τις ίδιες συνθήκες μια ακτίνα laser με ακτίνα  $0.09\text{ m}$  έχει παρόμοια απόδοση σε ισχυρότερη δύναμη στροβιλισμού  $\log C_n^2 = -13.7$ . Όμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και δεξιά του (σχήματος 23) για τέσσερις δέσμες laser. Όπου  $C_n^2$  είναι ο συντελεστής ατμοσφαιρικής δομής και χαρακτηρίζει ποιοτικά την αναταραχή που υπάρχει στο μέσο διάδοσης

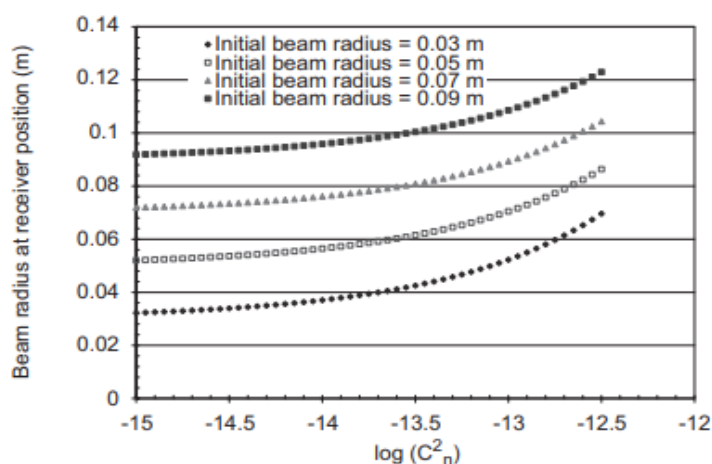
### 3.4.1 Εξάρτηση του BER από την ακτίνα της διατομής της δέσμης

Σε συγκεκριμένες καταστάσεις αναταραχής και απόστασης, το laser με μεγαλύτερη ακτίνα δέσμης έχει καλύτερη απόδοση παρέχοντας μικρότερο BER. Στο (σχήμα 24) παρατηρείται η αλλαγή στο BER έναντι της ακτίνας δέσμης laser. Το μήκος κύματος laser θεωρείται  $\lambda=850\text{nm}$  και οι υπολογισμοί έγιναν για απόσταση  $z=1000\text{ m}$ .



Σχήμα 24 Καταγραφή παραμέτρων (BER) έναντι ακτίνας δέσμης laser για τέσσερις διαφορετικές παραγμένες συνθήκες  $\log Cn^2 = -12.5, -13, -13.5$  και  $-14$ . Το  $\lambda = 850\text{nm}$  και απόσταση  $z=1000\text{m}$  [22]

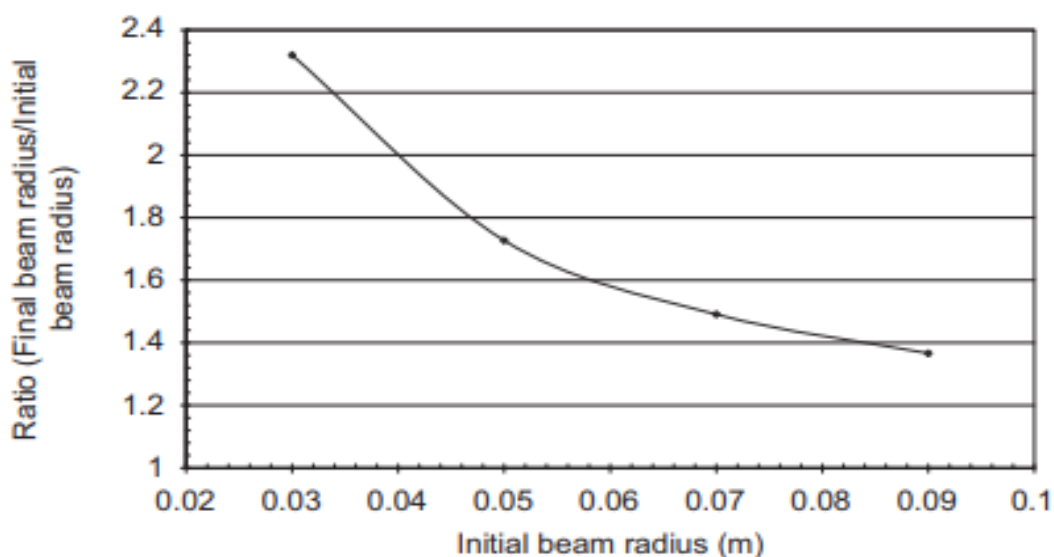
Στο (σχήμα 25) παρουσιάζεται η τελική ακτίνα δέσμης (στη θέση του δέκτη σε απόσταση 1000 m για  $\lambda=850\text{nm}$ ) έναντι του  $\log Cn^2$  για τέσσερα διαφορετικά αρχικά μεγέθη δέσμης (0.03, 0.05, 0.07 και 0.09 m).



Σχήμα 25 Τελική ακτίνα δέσμης (στη θέση του δέκτη σε απόσταση 1000m για  $\lambda=850\text{nm}$ ), για διάφορες ακτίνες δέσμης [22]

Για παράδειγμα, μια αρχική ακτίνα δέσμης 0.03m αυξάνεται σε 0.07m, ενώ η αρχική ακτίνα δέσμης 0.09m αυξάνεται σε 0.12m όσο αυξάνεται το  $\log Cn^2$ . Αυτό σημαίνει ότι η μικρότερη αρχική ακτίνα δέσμης επηρεάζεται πιο σημαντικά λόγω ατμοσφαιρικής τυρβώδους ροής.

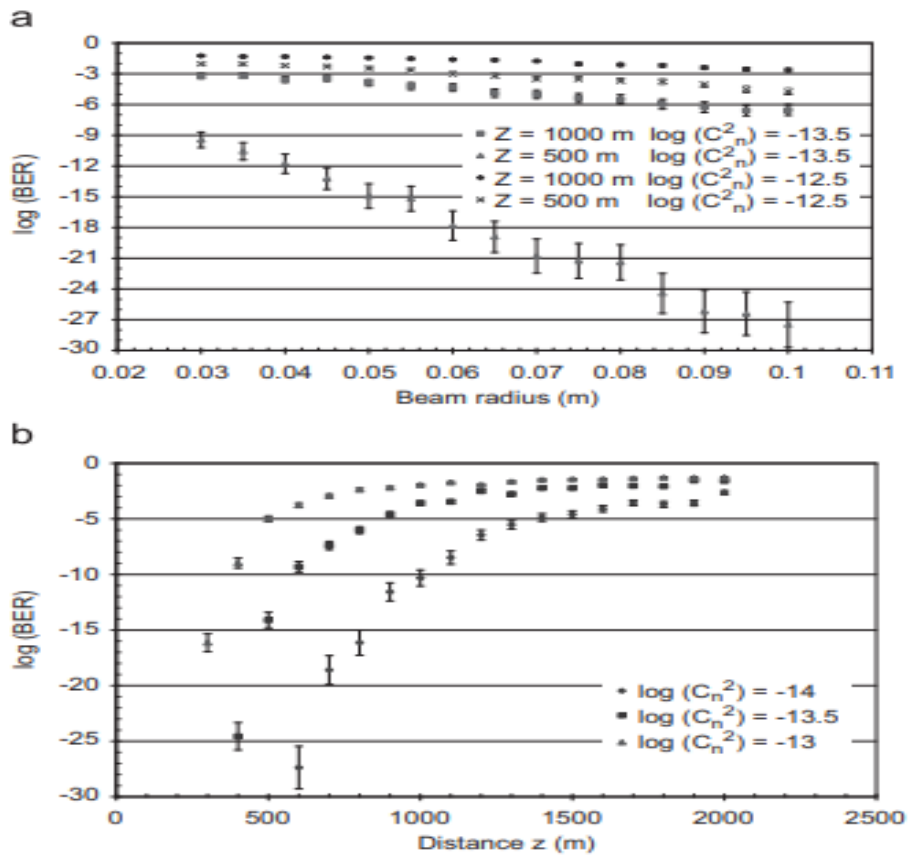
Στο σχήμα (26) παρουσιάζεται ο λόγος της τελικής ακτίνας δέσμης (στη θέση του δέκτη) προς την αρχική ακτίνα δέσμης για την κατάσταση του  $\log Cn^2 = -12.5$ . Όπως φαίνεται ο λόγος μειώνεται δραματικά με την αύξηση της αρχικής ακτίνας δέσμης.



Σχήμα 26 Λόγος της τελικής ακτίνας δέσμης (στη θέση του δέκτη) προς την αρχική ακτίνα δέσμης για σταθερή τιμή του  $\log Cn^2 = -12.5$  [22]

### 3.4.2 Η επίδραση της απόστασης πομπού-δέκτη στο BER

Η απόσταση σύνδεσης πομπού – δέκτη για σταθερή ακτίνα δέσμης, φαίνεται να επηρεάζει το ποσοστό σφάλματος BER. Το σχήμα 27 (α) μας παρέχει πληροφορίες σχετικά με το (BER), έναντι ακτίνας δέσμης laser για δύο διαφορετικές αποστάσεις διάδοσης  $z=500\text{m}$  και  $z=1000\text{m}$  σε δύο διαφορετικές τυρβώδεις συνθήκες, δηλαδή  $\log Cn^2 = -13.5$  και  $\log Cn^2 = -12.5$ . Από το σχήμα φαίνεται ότι για απόσταση  $z = 500\text{m}$ , με  $\log Cn^2 = -12.5$  λαμβάνονται τιμές περίπου από  $\log(\text{BER}) = -10$  έως  $-28$  για ακτίνα δέσμης  $0.03\text{-}0.1\text{m}$ , ενώ για  $z = 1000\text{m}$ ,  $\log(\text{BER}) = -3$  έως  $-6$ . Στην περίπτωση της διαταραχής με  $\log Cn^2 = -13.5$  δεν παρατηρείται ιδιαίτερη αλλαγή στο BER. Στο σχήμα 27 (b) παρουσιάζεται ο  $\log(\text{BER})$  έναντι ακτίνας δέσμης laser  $0.05\text{m}$  με  $\lambda=850\text{m}$ , και τρεις διαφορετικές διαταραχές  $\log Cn^2 = -13$ ,  $\log Cn^2 = -13.5$ ,  $\log Cn^2 = -14$ . Το BER αυξάνεται δραματικά με την απόσταση και για τις τρεις διαφορετικές συνθήκες αναταραχής [22].



Σχήμα 27 Επηρεασμός BER σε σχέση με την απόσταση [22]

Η απόδοση εμπορικών συστημάτων FSO για τυπική τιμή  $\text{BER} < 10^{-10}$  είναι αποδεκτή και σύμφωνα με το σχήμα 27(b), η δέσμη laser με αρχική ακτίνα 0.05m μπορεί να μην είναι κατάλληλη για FSO σύστημα σε αποστάσεις  $z=1000\text{m}$ .

Μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι σε μια ταραγμένη ατμόσφαιρα, η αύξηση της απόστασης μεταξύ του πομπού και του δέκτη επηρεάζει σημαντικά το BER και κατά συνέπεια μειώνει την απόδοση του συστήματος FSO

## Κεφάλαιο 4

### Μοντελοποίηση καναλιών οπτικής τύρβης

Πολλά συστήματα FSO (εξωτερικού χώρου), λόγω της ιδιαιτερότητας που τα χαρακτηρίζει ως προς την οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, αναπτύσσονται πάνω από δασικές περιοχές. Η ανακατανομή υγρασίας αλλά και αερίων μαζών ίσως να είναι προβλέψιμες και να μπορούν να υπολογιστούν ανάλογα με την ώρα της ημέρας και η λήψη τιμών μπορεί να εφαρμοσθεί σε διάφορα μοντέλα.

#### 4.1 Μέτρηση προφίλ τυρβώδους ροής στο κατώτερο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, Μοντέλο HAP

Οι διακυμάνσεις στον δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας, γνωστές και ως οπτικές αναταράξεις, προκαλούνται από τον άνεμο που πνέει πάνω από την επιφάνεια της Γης και την θερμοκρασία μεταξύ της επιφάνειας και του αέρα πάνω από αυτήν. Στις ορατές και υπέρυθρες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, οι αλλαγές θερμοκρασίας είναι ο κύριος λόγος οπτικών αναταράξεων. Οι ακτίνες φωτός ή laser που διαδίδονται μέσω της ατμόσφαιρας μπορούν να επηρεαστούν σοβαρά από αυτή την οπτική αναταραχή, προκαλώντας φαινόμενα όπως εξάπλωση δέσμης, περιπλάνηση δέσμης, διακυμάνσεις ακτινοβολίας και απώλεια χωρικής συνοχής.

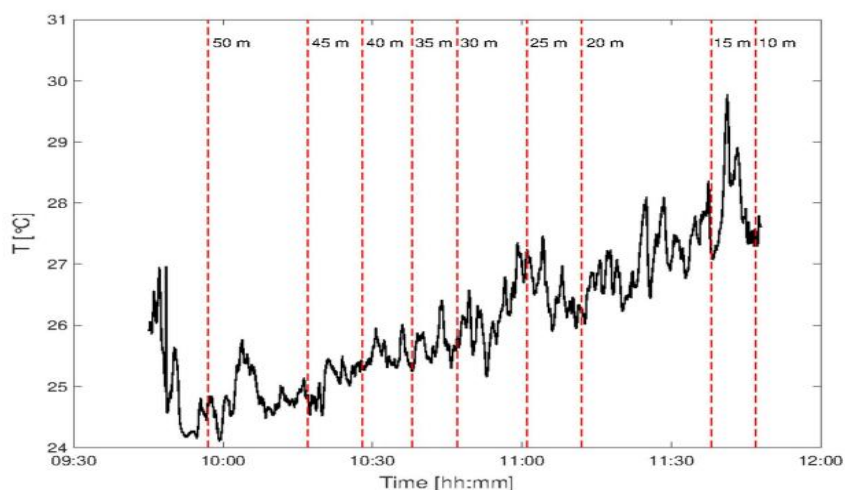
Ο δείκτης διάθλασης  $C_n^2$ , θεωρείται συχνά σταθερός κατά μήκος της διαδρομής μιας οπτικής δέσμης, όταν αυτή διαδίδεται κατά μήκος μιας οριζόντιας διαδρομής και πάνω από υποτιθέμενο ομοιογενές έδαφος. Αυτή η υπόθεση δεν ισχύει όταν το οπτικό κύμα διαδίδεται κατά μήκος μιας κατακόρυφης ή λοξής διαδρομής, καθώς ο δείκτης διάθλασης  $C_n^2$  ποικίλλει ανάλογα με το ύψος πάνω από το έδαφος.

Στο ακόλουθο παράδειγμα ένα σύστημα RTD χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα. Η συσκευή περιείχε οκτώ ανιχνευτές RTD, οι οποίοι μετρούσαν τη θερμοκρασία σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Το εύρος θερμοκρασίας ανιχνευτών RTD είναι 0–100°C και η ακρίβεια είναι μεταξύ 0.03–0.045°C. Οι μετρήσεις θερμοκρασίας καταγράφονταν κάθε 2 δευτερόλεπτα για κάθε ανιχνευτή RTD. Τα RTD ήταν άνισα τοποθετημένα σε μια οριζόντια ράβδο. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα σε διαφορετικά ύψη, το σύστημα RTD πέταξε κάτω από ένα δεμένο μετεωρολογικό μπαλόνι και τοποθετήθηκε και σε έναν τηλεσκοπικό ιστό όπως στο Σχήμα (28).



Σχήμα 28 Πειραματική εγκατάσταση του συστήματος RTD κάτω από μετεωρολογικό μπαλόνι (αριστερά) και σε τηλεσκοπικό ιστό (δεξιά) [23]

Εξέλιξη πειράματος: Το μετεωρολογικό μπαλόνι υψώθηκε σε ύψος 50m και είχε την δυνατότητα να κατεβαίνει αργά χωρίς ανεμισμό. Κάθε φορά κατέβαινε 5m όπου και παίρνονταν νέες μετρήσεις. Αυτό έγινε μέχρι τα 10m τελικό ύψος. Πραγματοποιήθηκαν τρεις εκτοξεύσεις μπαλονιών, στις 25 και 26 Σεπτεμβρίου 2018 στην τοποθεσία του Πανεπιστημίου του Maryland Unmanned Aircraft Systems (UAS) στο αεροδρόμιο St. Mary's County στην Καλιφόρνια, MD, ΗΠΑ. Η εκτόξευση στις 25 Σεπτεμβρίου 2018 πραγματοποιήθηκε μεταξύ 12:00 και 13:00 και το μπαλόνι απελευθερώθηκε σε μέγιστο ύψος του συστήματος RTD 30m, μετά το οποίο κατέβαινε κατά 5m κάθε φορά σε ένα ελάχιστο ύψος των 10m. Η εκτόξευση στις 26 Σεπτεμβρίου 2018 πραγματοποιήθηκε μεταξύ 9:45 και 12:00 και είχε μέγιστο ύψος του συστήματος RTD 50 m και έφτασε σε ελάχιστο ύψος 15m. Και οι δύο εκτοξεύσεις πραγματοποιήθηκαν σε επίπεδο γλοοτάπητα. Μια τρίτη εκτόξευση πραγματοποιήθηκε στις 7 Δεκεμβρίου 2018 στο Shuttle Landing Facility του Διαστημικού Κέντρου Kennedy στην Φλόριντα των ΗΠΑ. Το αερόστατο εκτοξεύτηκε μεταξύ 7:30 και 10:00 και το σύστημα RTD έφτασε σε μέγιστο ύψος 50m και ελάχιστο ύψος 20m και το μπαλόνι εκτοξεύτηκε πάνω από την άσφαλο. Τα αποτελέσματα θερμοκρασιών 26 Σεπτεμβρίου 2018 παρουσιάζονται στο σχήμα (29).



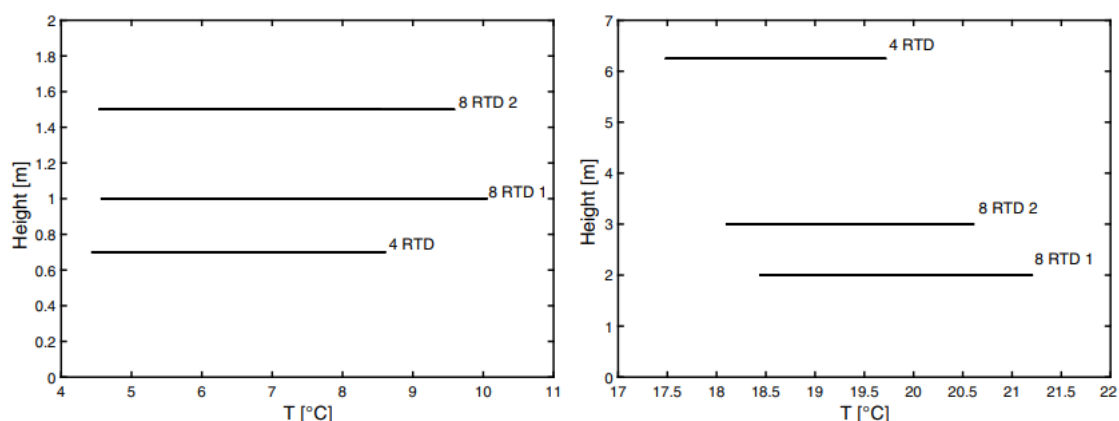
Σχήμα 29 Μέση θερμοκρασία σε σχέση με τον χρόνο όπως μετρήθηκε κατά την εκτόξευση του μπαλονιού στις 26 Σεπτεμβρίου 2018 στην Καλιφόρνια [23]

Η μέση θερμοκρασία (των ανιχνευτών) με την πάροδο του χρόνου, όπως μετρήθηκε στις 26 Σεπτεμβρίου 2018 στην Καλιφόρνια, φαίνεται στο (σχήμα 29). Οι διακεκομμένες κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν τους χρόνους γύρω από τους οποίους το μπαλόνι κατέβηκε 5 μέτρα από το υποδεικνυόμενο ύψος .

Η απότομη μείωση της θερμοκρασίας στην αρχή προκαλείται από την ανύψωση του μπαλονιού στον αέρα από το επίπεδο του εδάφους στο μέγιστο ύψος των 50 m.

Ένας δεύτερος πειραματισμός για την μέτρηση της θερμοκρασίας έγινε τοποθετώντας ιδίου τύπου αισθητήρες σε κατακόρυφο ιστό σε αποστάσεις όμοιες με την διάταξη μπαλονιού (Σχήμα 28) δεξιά. Στις 27 Νοεμβρίου 2018, πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές μετρήσεων πάνω από γρασίδι στο ChapelField στο Πανεπιστήμιο του Maryland, CollegePark, Maryland, ΗΠΑ. Κατά τις πρώτες μετρήσεις, που έγιναν μεταξύ 11:00 και 12:45, το σύστημα τεσσάρων RTD τοποθετήθηκε στα 0.7 m, το πρώτο σύστημα οκτώ RTD ήταν στο 1.0 m και το δεύτερο σύστημα οκτώ RTD ήταν στο 1.5 m. Για το δεύτερο σύνολο μετρήσεων, το πρώτο σύστημα οκτώ RTD ήταν στο 1.0 m, το δεύτερο ήταν στα 2.0 m και το σύστημα τεσσάρων RTD ήταν στα 3.0 m και τα δεδομένα καταγράφηκαν μεταξύ 14:10 και 15:10 .

Ένα τρίτο πείραμα έλαβε χώρα στις 6 Δεκεμβρίου 2018 στο Shuttle Landing Facility του Διαστημικού Κέντρου Kennedy στην Φλόριντα των ΗΠΑ. Ο τηλεσκοπικός ιστός τοποθετήθηκε στην άσφαλτο του διαδρόμου και το πρώτο σύστημα οκτώ RTD τοποθετήθηκε στα 2.0 m, το δεύτερο στα 3.0 m και το σύστημα τεσσάρων RTD τοποθετήθηκε στα 6.25 m. Οι καταγραφές έγιναν μεταξύ 11:15 και 13:00.



Σχήμα 30 Προφίλ θερμοκρασίας που μετρήθηκαν με τρία συστήματα RTD σε τηλεσκοπικό ιστό στις (αριστερά) 27 Νοεμβρίου 2018 και (δεξιά) 6 Δεκεμβρίου 2018 [23]

Το προφίλ στα αριστερά δείχνει πάνω κάτω το ίδιο εύρος θερμοκρασίας για τα διαφορετικά χαμηλά ύψη. Το προφίλ στα δεξιά δείχνει μια αύξηση θερμοκρασίας κατά την μείωση ύψους, όπως θα περίμενε κανείς να είναι. Μια εξήγηση θα μπορούσε να είναι ότι τα ύψη των συστημάτων RTD (0.7 m, 1.0 m και 1.5 m) για το αριστερό προφίλ βρίσκονται όλα κοντά (εντός 1 m), ενώ τα ύψη των συστημάτων RTD για το προφίλ (2.0m, 3.0m και 6.25m) στα δεξιά απλώνονται σε ευρύτερο εύρος (πάνω από 4m) και πράγματι δείχνουν την αναμενόμενη αύξηση της θερμοκρασίας με μείωση του ύψους.

Η μέση τετραγωνική διαφορά θερμοκρασίας ισούται με τη συνάρτηση θερμοκρασίας  $D_T(R)$  και μπορεί να υπολογιστεί για κάθε ζεύγος ανιχνευτών από την σχέση [23]:

$$D_T(R) = \langle (T_1 - T_2) \rangle = C_T^2 R^{2/3} \quad (45)$$

όπου  $R$  είναι η απόσταση μεταξύ του ζεύγους ανιχνευτών RTD,  $T_1$  και  $T_2$  είναι οι θερμοκρασίες που μετρώνται σε ένα σημείο του χώρου από τα RTD στο ζεύγος ανιχνευτών, το  $\langle \dots \rangle$  υποδηλώνει έναν μέσο όρο συνόλου και  $C_T^2$  είναι η παράμετρος συνάρτησης θερμοκρασία. Η παράμετρος συνάρτησης δείκτη διάθλασης  $C_n^2$ , μπορεί να συσχετιστεί με την παράμετρο της συνάρτησης θερμοκρασίας  $C_T^2$  με την σχέση [23]:



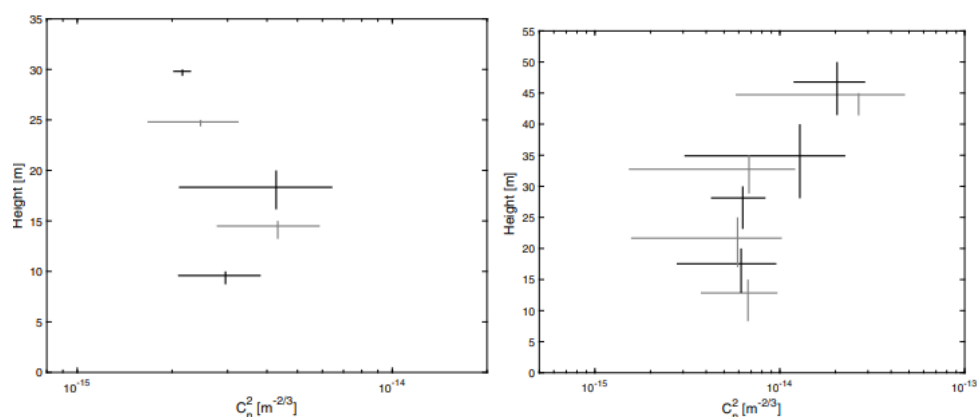
$$C_n^2 = \left( \frac{79 \cdot 10^{-6} P}{T^2} \right)^2 C_T^2 \quad (46)$$

όπου P είναι η πίεση σε mbar (που καταγράφηκε σε ύψος 2m μία φορά λόγω μικρών αποστάσεων μεταξύ των αισθητήρων) και T η απόλυτη θερμοκρασία σε Kelvin (με τους υδρατμούς να αγνοούνται).

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η θερμοκρασία καταγραφόταν κάθε 2 δευτερόλεπτα για κάθε μεμονωμένο ανιχνευτή RTD.

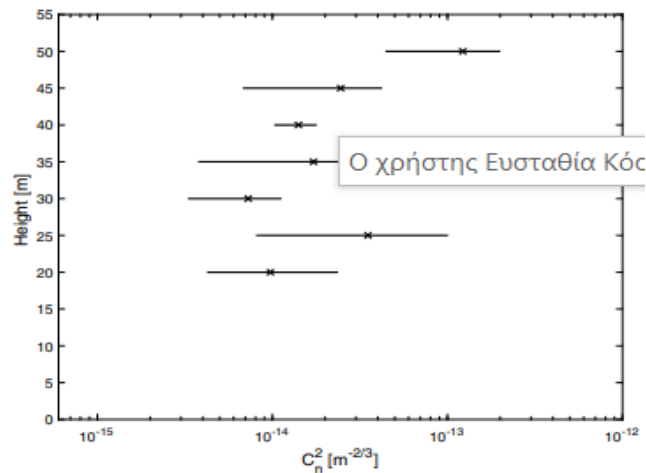
Date	Type	Pressure
25 Sep 2018	Πείραμα μπαλονιού	1021.6
26 Sep 2018	Πείραμα μπαλονιού	1015.1
27 Sep 2018	Πείραμα σε κατακόρυφο ιστό	1013.5
6 Dec 2018	Πείραμα σε κατακόρυφο ιστό	1025.8
7 Dec 2018	Πείραμα μπαλονιού	1027.6

Πίνακας 6 Μέση πίεση που καταγράφηκε κατά τις περιόδους μέτρησης, εκτός από τις 27 Νοεμβρίου 2018, όταν χρησιμοποιήθηκε η τυπική πίεση [23]



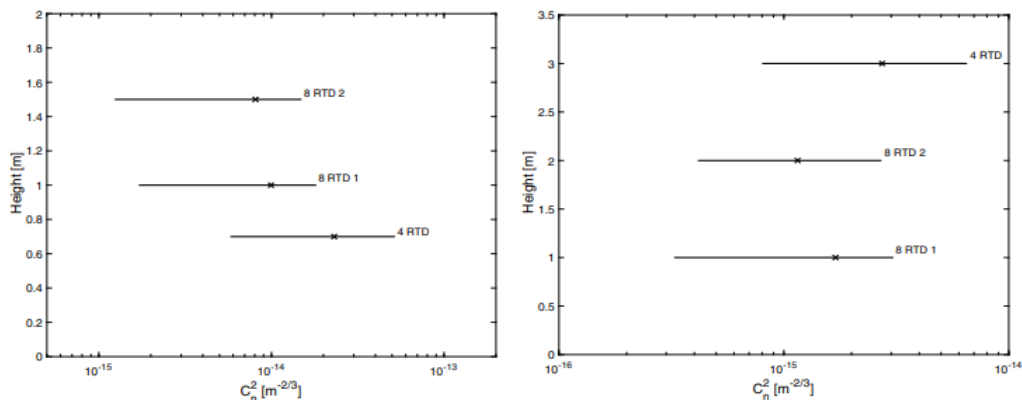
Σχήμα 31 Λήψη μετρήσεων στις 25 Σεπτεμβρίου 2018 στην Καλιφόρνια (αριστερά) και 26 Σεπτεμβρίου 2018 (δεξιά). Εύρος τιμών δείκτη διάθλασης σε σχέση με το ύψος [23]

Στο σχήμα (31) παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη διάθλασης  $C_n^2$  επηρεαζόμενες από τον δείκτη θερμοκρασίας  $C_T^2$  για τα διάφορα ύψη (για το πείραμα μπαλονιού). Όμοια συμβαίνει και στο σχήμα (32) που ακολουθεί.

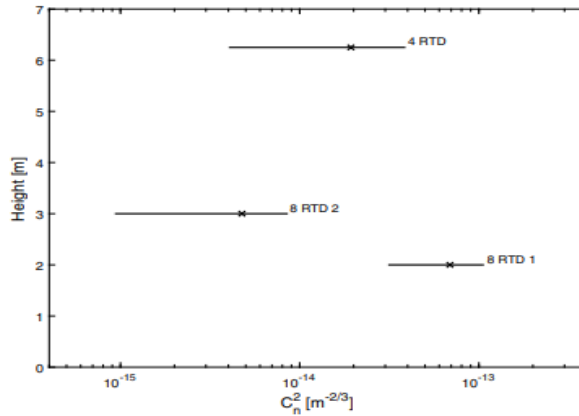


Σχήμα 32 Λήψη μετρήσεων στις 6 Δεκεμβρίου 2018, επηρεασμός δείκτη διάθλασης από το ύψος [23]

Για το πείραμα με την χρήση αισθητήρων στον ιστό οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη διάθλασης  $C_n^2$  παρουσιάζονται στα σχήματα (33) και (34).



Σχήμα 33 Λήψη μετρήσεων στις 7 Δεκεμβρίου 2018 στο Shuttle Landing Facility, Kennedy Space Κέντρο, Φλόριντα, Η.Π.Α (πείραμα σε ιστό), επηρεασμός δείκτη διάθλασης από το ύψος [23]



Σχήμα 34 Λήψη μετρήσεων στις 6 Δεκεμβρίου 2018 στο Shuttle Landing Facility, Kennedy Space Center, Florida, USA (πείραμα σε ιστό), επηρεασμός δείκτη διάθλασης από το ύψος [23]

Λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν είναι δυνατό να μετρηθούν οι θερμοκρασίες σε κάθε τόπο και χρόνο ξεχωριστά, προσπαθούμε να εξάγουμε συμπεράσματα μέσω εμπειρικών μοντέλων. Ένα από τα πιο πρόσφατα μοντέλα που μπορεί να εκτιμήσει αυτές τις τιμές είναι το μοντέλο HAP το οποίο προβλέπει τον δείκτη διάθλασης  $C_n^2$  κοντά στο έδαφος.

Το μοντέλο HAP μπορεί να προσδιορίσει τον δείκτη διάθλασης  $C_n^2$  από την σχέση [23]:

$$C_n^2(h) = M \left[ 0.00594 \left( \frac{U}{27} \right)^2 \left( 10^{-5}(h + h_s) \right)^{10} \exp\left(-\frac{h+h_s}{1000}\right) + 2.7 * 10^{-6} \exp\left(-\frac{h+h_s}{1500}\right) \right] + C_n^2(h_0) \left( \frac{h_0}{h} \right)^P \quad (47)$$

όπου το  $M$  είναι ένας συντελεστής κλιμάκωσης που για την συγκεκριμένη περίπτωση έχει την τιμή  $M=1$ ,  $h$  είναι το ύψος πάνω από το έδαφος,  $h_s$  είναι το ύψος του εδάφους πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας,  $h_0$  είναι το ύψος του οργάνου πάνω από το έδαφος (ύψος αναφοράς),  $U$  είναι η μέση ταχύτητα ανέμου σε μεγάλο υψόμετρο και  $p$  είναι η παράμετρος ισχύος, που δίνεται από την σχέση [23]:

$$P = \begin{cases} -0.11(12 - TH)^2 + 1.83(12 - TH) + 6.22 & 0.75 < TH < 3.5 \\ 1.45 - 0.02(TH - 6)^2 & 3.5 < TH < 8.5 \\ -0.048TH^2 + 0.68TH - 1.06 & 8.5 < TH < 11.25 \end{cases} \quad (48)$$

με την παράμετρο  $TH$  να προσδιορίζεται από την σχέση [23]:

$$TH = \frac{\text{Time} - \text{Sunrise}}{TP} \quad (49)$$

και την παράμετρο TP να προσδιορίζεται από την σχέση [23]:

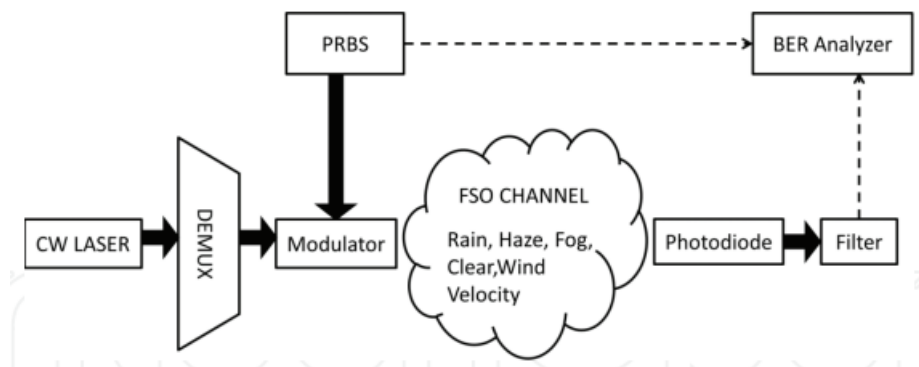
$$TP = \frac{\text{Sunset} - \text{Sunrise}}{12} \quad (50)$$

Οι παράμετροι (Time – Sunrise = Ανατολή) ηλίου και (Sunset – Sunrise = δύση ηλίου).

#### 4.2 Μοντέλα μελέτης τυρβώδους ροής, ανάλυση και απόδοση FSO συστημάτων

Σύμφωνα με μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες καιρού Ινδίας για τυρβώδη ροή, εφαρμόστηκαν μοντέλα τα οποία αναφέρονται στα υποκεφάλαια 4.2.1 έως 4.2.4 και αναφορικά εφαρμόστηκαν τα ακόλουθα:

- το τμήμα πομπού περιελάμβανε γεννήτρια ψευδοτυχαίας ακολουθίας bit (PRBS), γεννήτρια παλμών NRZ, ακολουθούμενη από διαμορφωτή Mach-Zehnder (MZM) και laser συνεχούς κύματος
- ο δέκτης αποτελούνταν από μια φωτοδίοδο APD και ένα χαμηλοπερατό φίλτρο Bessel. Η απόδοση της ζεύξης επικοινωνίας ελεγχόταν χρησιμοποιώντας αναλυτή BER. Το PRBS παράγει σήμα πληροφοριών με τη μορφή δυαδικών παλμών, οι οποίοι μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα κατευθύνοντάς το προς την γεννήτρια παλμών NRZ.



Σχήμα 35 Αρχιτεκτονική συστήματος επικοινωνίας SS-WDM-FSO [24]

Η ατμοσφαιρική εξασθένηση και η τυρβώδης ροή είναι ο κύριος λόγος διαταραχών στο κανάλι. Η ατμοσφαιρική εξασθένηση δίνεται από την σχέση [24]:

$$h_1 = e^{-\sigma L} \quad (51)$$

όπου το  $\sigma$  υποδηλώνει μήκος κύματος και  $L$  είναι η απόσταση διάδοσης.

Οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις λόγω τυρβώδους ροής ταξινομούνται ως ασθενείς, μέτριες, ισχυρές και κορεσμένες με βάση την διακύμανση του δείκτη διάθλασης και της ανομοιογένειας της ατμόσφαιρας.

Τα διαφορετικά μαθηματικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για να αντιπροσωπεύουν τα καθεστώτα αναταράξεων.

#### 4.2.1 Μοντέλο Lognormal

Η προσέγγιση Rytov πρώτης τάξης χρησιμοποιείται για να εκφράσει την ακτινοβολία ενός οπτικού κύματος που ταξιδεύει σε ατμοσφαιρικές αναταράξεις, όπως είναι το λογαριθμικό πλάτος πρώτης τάξης του πεδίου.

Ο αριθμός Rytov είναι μια θεμελιώδης παράμετρος κλιμάκωσης για τη διάδοση laser μέσω ατμοσφαιρικών αναταράξεων. Οι αριθμοί Rytov που είναι μεγαλύτεροι από 0.2 θεωρούνται γενικά ισχυρός σπινθηρισμός. Ένας αριθμός Rytov 0 θα έδειχνε ότι δεν υπάρχει στροβιλισμός, επομένως δεν υπάρχει σπινθηρισμός της δέσμης.

Καθώς όμως η ακτινοβολία κανονικοποιείται και το λογαριθμικό πλάτος υπακούει σε μια Gaussian κατανομή, μπορούμε να εκφράσουμε με αυτό το μοντέλο τα στατιστικά στοιχεία των διακυμάνσεων της ακτινοβολίας, για τον λόγο ότι χαρακτηρίζεται από ένα μεμονωμένο γεγονός σκέδασης και είναι το καταλληλότερο μοντέλο για συνθήκες ασθενών αναταράξεων. Η διακύμανση της ακτινοβολίας προσδιορίζεται από την σχέση [24]:

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_I^2}} \frac{1}{I} \exp\left(-\frac{(\ln(\frac{I}{I_0}) - E[I])^2}{2\sigma_I^2}\right), I \geq 0 \quad (52)$$

όπου  $\sigma_I^2$  είναι η διακύμανση Rytov και είναι η ακτινοβολία πεδίου σε τυρβώδες μέσο, ενώ η ένταση στον ελεύθερο χώρο (χωρίς αναταράξεις) αντιπροσωπεύεται ως  $I_0$  και  $E[I]$  είναι η μέση λογαριθμική ένταση.

### 4.2.2 Μοντέλο Negative exponential

Στο όριο των έντονων διακυμάνσεων της ακτινοβολίας (δηλαδή στο καθεστώς κορεσμού και πέρα) όπου το μήκος του συνδέσμου εκτείνεται σε αρκετά χιλιόμετρα, ο αριθμός των ανεξάρτητων σκεδάσεων γίνεται μεγάλος. Αυτό το καθεστώς κορεσμού ονομάζεται πλήρως ανεπτυγμένο καθεστώς κηλίδων. Η διακύμανση του πλάτους του πεδίου που διασχίζει το τυρβώδες μέσο σε αυτή την κατάσταση γενικά, επαληθεύεται πειραματικά και υπακούει στην κατανομή Rayleigh που συνεπάγεται αρνητικά εκθετικά στατιστικά στοιχεία για την ακτινοβολία.

Επομένως, η διακύμανση της ακτινοβολίας προσδιορίζεται από την σχέση [24]:

$$f(I) = \frac{1}{I_0} \exp\left(-\frac{I}{I_0}\right), I_0 > 0 \quad (53)$$

όπου  $E[I]=I_0$  είναι η μέση λαμβανόμενη ακτινοβολία.

### 4.2.3 Μοντέλο Gamma-gamma

Το μοντέλο αναταράξεων gamma - gamma βασίζεται στην διαδικασία διαμόρφωσης όπου η διακύμανση της ακτινοβολίας φωτός που διασχίζει την τυρβώδη ατμόσφαιρα υποτίθεται ότι αποτελείται από φαινόμενα μικρής κλίμακας (σκεδάση) και μεγάλης κλίμακας (διάθλαση). Οι δίνες μικρής κλίμακας υποτίθεται ότι διαμορφώνονται από δίνες μεγάλης κλίμακας. Συνεπώς, η λαμβανόμενη ακτινοβολία  $I$  ορίζεται ως το γινόμενο δύο στατιστικά ανεξάρτητων τυχαίων διεργασιών  $I_x$  και  $I_y$ .

Το μοντέλο gamma-gamma λειτουργεί με παραμέτρους σπινθηρισμού και η διακύμανση της ακτινοβολίας προσδιορίζεται από την σχέση [24]:

$$f_{I_S}(I_S) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I_S^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{(\alpha-\beta)}(2\sqrt{\alpha\beta I_S}) \quad (54)$$

όπου  $\alpha$  και  $\beta$  είναι ο ενεργός αριθμός τυρβωδών δινών μεγάλης και μικρής κλίμακας,  $\Gamma(\cdot)$  (για  $\alpha$  και  $\beta$  αντίστοιχα) είναι η συνάρτηση gamma και  $K_{(\alpha-\beta)}$  είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel του δεύτερου είδους τάξης  $(\alpha - \beta)$ .

Ο αποτελεσματικός αριθμός τυρβωδών δινών  $\alpha$  και  $\beta$  μεγάλης και μικρής κλίμακας για ένα κύμα που διαδίδεται σε κυλινδρικό χώρο δίνεται από τις σχέσεις [24]:

$$\alpha = \left[ \exp \left( \frac{0.49 \delta_n^2}{(1+0.18d^2+0.56\delta_n^{12/15})^{7/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (55)$$

και

$$\beta = \left[ \exp \left( \frac{0.51 \delta_n^2 (1+0.69\delta_n^{12/15})^{-5/6}}{(1+0.9d^2+0.62d^2\delta_n^{12/15})^{5/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (56)$$

όπου:

- $d = \sqrt{KD^2/4L}$ ,  $K=2\pi/\lambda$  (με  $L$  το μήκος οπτικού συνδέσμου και  $\lambda$  μήκος κύματος) και  $D$  η διάμετρος διαφράγματος δέκτη.
- $\delta_n^2$  είναι η διακύμανση Rytov και υπολογίζεται από την σχέση [24]:

$$\delta_n^2 = 0.5C_n^2 k^{7/6} L^{11/16} \quad (57)$$

με το  $C_n^2$  να αντιπροσωπεύει την παράμετρο του δείκτη διάθλασης.

Αυτό το μοντέλο ισχύει για όλα τα καθεστώτα αναταράξεων από αδύναμα έως ισχυρά.

#### 4.2.4 Μοντέλο M-κατανομής

Το μοντέλο αυτό συμπεριλαμβάνει ένα σύνολο μεγεθών εξασθένησης στο μεταδιδόμενο σήμα που υφίσταται διασκορπισμό, λόγω φυσικών αναταράξεων όπως βροχή, ομίχλη, καπνός, αιθαλομίχλη και βαριά σωματίδια σκόνης στο ατμοσφαιρικό κανάλι (τα οποία έχουμε αναφέρει εκτενώς στο κεφάλαιο 2). Τα συνδυασμένα αποτελέσματα της εξασθένησης λόγω ατμοσφαιρικών αναταράξεων και κακής ευθυγράμμισης λαμβάνονται υπόψη και η κατανομή  $M$  προσδιορίζει την διακύμανση της ακτινοβολίας με την σχέση [24]:

$$f_I(I) = \frac{g^2 A}{2I} \sum_{k=1}^{\beta} a_k \left( \frac{\alpha\beta}{\mu\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+k}{2}} G_{1,3}^{3,0} \left[ \frac{\alpha\beta}{\mu\beta + \Omega'} \frac{I}{A_0} \middle| \frac{g^2+1}{g^2, \alpha, k} \right] \quad (58)$$

όπου:

- $\mu=2b_0(1-\rho)$  είναι μια μεγάλης κλίμακας παράμετρος σκέδασης
- $\beta$  είναι η ποσότητα της παραμέτρου εξασθένησης
- $A_0$  είναι το κλάσμα της συλλεγόμενης ισχύος στο  $r=0$  (ακτινική απόσταση)
- $\Omega' = \Omega + 2\rho b_0 + 2\sqrt{2\rho b_0\Omega} \cos(\Phi_A + \Phi_B)$  η μέση ισχύς
- $\rho$  η ποσότητα ισχύος σκέδασης και έχει εύρος από 0 έως 1
- $\Phi_A$  και  $\Phi_B$  είναι οι ντετερμινιστικές φάσεις του (LOS) συστήματος.
- οι παράμετροι  $g$ ,  $A$  και  $a_k$  ορίζονται ως [24]

$$g = \frac{\omega_{zeq}}{2\sigma_s} \quad (59)$$

$$A = \frac{2\alpha^{\alpha/2}}{\mu^{1+\alpha/2}\Gamma(\alpha)} \left(\frac{\mu\beta}{\mu\beta+\Omega'}\right)^{\beta+\alpha/2} \quad (60)$$

$$a_k = \binom{\beta-1}{k-1} \frac{(\mu\beta+\Omega')^{1-0.5k}}{(k-1)!} \left(\frac{\Omega'}{\mu}\right)^{k-1} \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{0.5k} \quad (61)$$

όπου:

- $\sigma_s$  είναι η τυπική απόκλιση μετατόπισης σφάλματος κατάδειξης στον δέκτη
- $\omega_{zeq}$  είναι η ισοδύναμη ακτίνα δέσμης και μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις σχέσεις [24]:

$$u = \sqrt{\pi\alpha}/\sqrt{2}\omega_z \quad (62)$$

και

$$\omega_{zeq} = \omega_z^2 \sqrt{\pi} \operatorname{erf}(u) / 2u e^{-u^2} \quad (63)$$

με  $\omega_z$  να είναι η μέση ακτίνα στην απόσταση  $z$

- $a$  είναι η ακτίνα κυκλικού ανοίγματος ανίχνευσης.

Για το μοντέλο gamma-gamma δίνονται οι τιμές για τις παραμέτρους κατά περίπτωση ( $\rho=1, \Omega'=1$ ), ( $\rho=0, \Omega=0$  ή  $\beta=1$ ) και ( $\rho=0, \Omega=0$  ή  $\alpha \rightarrow \infty$ ).



#### 4.2.5 Τυρβώδης ροή λόγω ταχύτητας ανέμου

Η ατμοσφαιρική τυρβώδης ροή προκαλείται από ακανόνιστη αλλαγή του δείκτη διάθλασης στη διαδρομή διάδοσης του φωτός σε μια (LOS) ζεύξη. Αυτή η αλλαγή του δείκτη διάθλασης είναι το άμεσο τελικό αποτέλεσμα αυθαίρετων αποκλίσεων λόγω αλλαγής της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας από σημείο σε σημείο. Αυτές οι τυχαίες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας είναι συνάρτηση της ατμοσφαιρικής πίεσης, του υψομέτρου και της ταχύτητας του ανέμου.

Ο συνδυασμός θερμοκρασίας και ταχύτητας του ανέμου μας δίνει την συνολική εξασθένηση λόγω αναταράξεων του ανέμου.

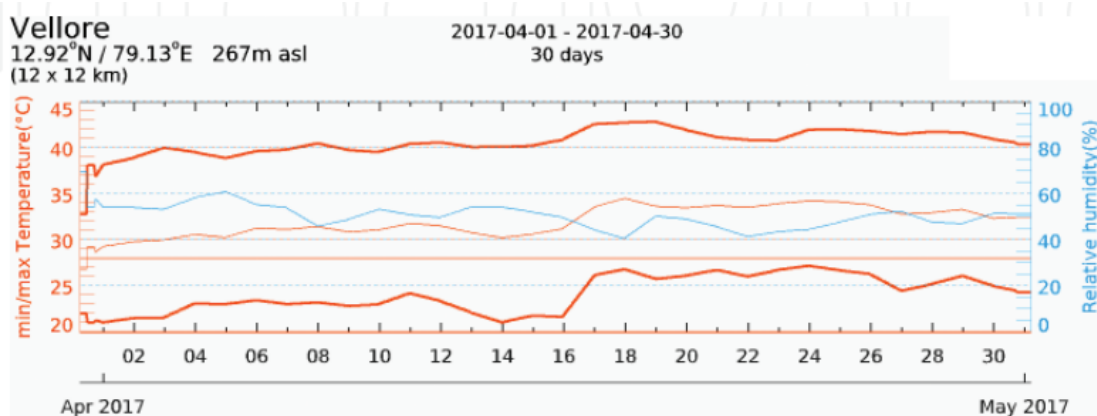
Οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις λόγω της ταχύτητας του ανέμου εισάγουν ριζικές διακυμάνσεις στον δείκτη διάθλασης που επηρεάζουν το σήμα διάδοσης FSO συστημάτων. Για να είναι εφικτή η ανάλυση της επίδρασης του ανέμου στο σύστημα FSO, πρέπει να ληφθούν υπόψη η τυρβώδης ενέργεια, η κατεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου. Η τυρβώδης ενέργεια του ανέμου σε κάθε κατεύθυνση μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση [24]:

$$E_t = \frac{1}{2N} \sum [(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2] \quad (64)$$

όπου  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ , είναι οι δεδομένες ταχύτητες ανέμου σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  είναι η αθροιστική ταχύτητα ανέμου σε οποιαδήποτε κατεύθυνση,  $N$  είναι ο αριθμός των δειγμάτων και  $E_t$  είναι η τυρβώδης ενέργεια. Η τυρβώδης ενέργεια αντιπροσωπεύει την τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου. Η εξασθένηση που προκαλείται από τις αναταράξεις μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:[24]

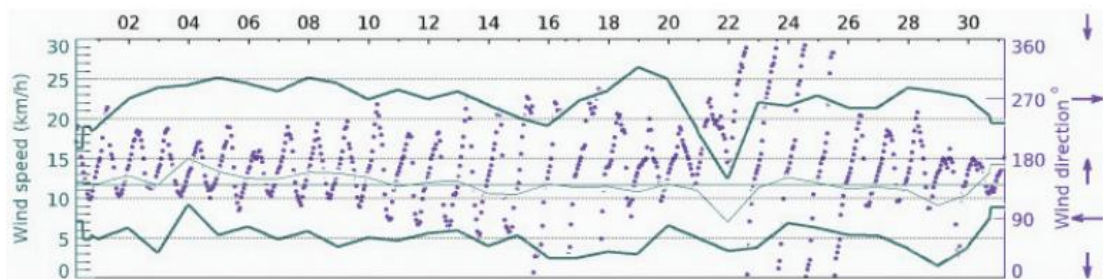
$$A = 70 - 73e^{-0.2867E_t} \quad (65)$$

Στα ακόλουθα διαγράμματα, όπως στο σχήμα (36) παρουσιάζονται η σχετική υγρασία, η ελάχιστη και η μέγιστη διακύμανση της θερμοκρασίας κατά τον Απρίλιο του 2017 στο Vellore της Ινδίας σε συντεταγμένες 12.92°N/79.13°E, στα 267 m υψόμετρο. Η ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία που επιτεύχθηκε τον Απρίλιο του 2017 ήταν 21 C° και 43 C°.



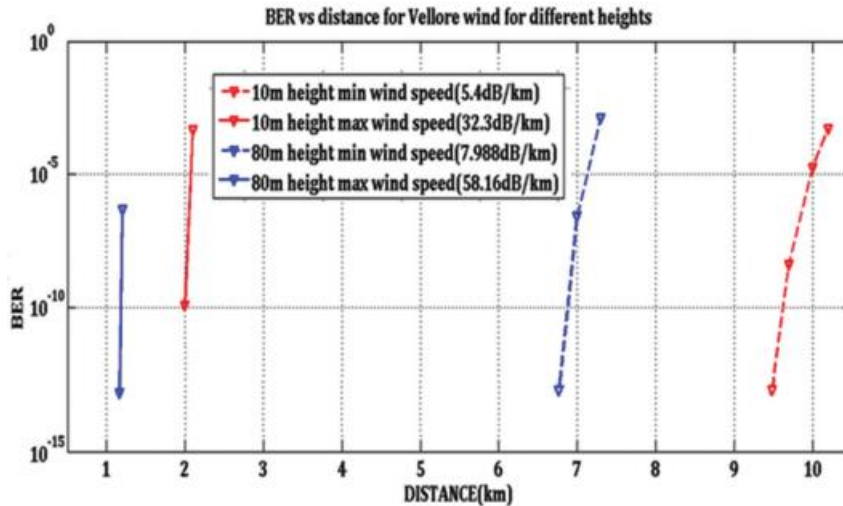
Σχήμα 36 Διακύμανση ελάχιστης μέγιστης θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας σε διάστημα 30 ημερών στο Vellore της Ινδίας Απρίλιος 2017 [24]

Στο σχήμα (37) απεικονίζεται η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου κατά τον Απρίλιο του 2017 στην ίδια περιοχή, ενώ η κατεύθυνση του ανέμου αναπαριστάται χρησιμοποιώντας τις γωνίες 0° για τον Νότο, 90° για την Δύση, 270° για τον Βορρά και 360° για την Ανατολή. Η ελάχιστη και μέγιστη ταχύτητα ανέμου που καταγράφηκε τον Απρίλιο του 2017 ήταν 2.5 και 26 km/h.

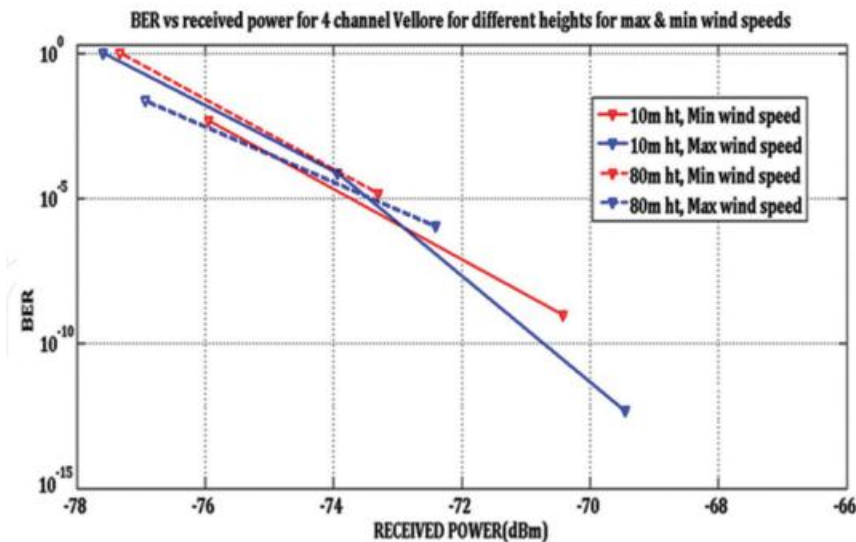


Σχήμα 37 Διακύμανση ταχύτητας και κατεύθυνσης ανέμου σε διάστημα 30 ημερών στο Vellore της Ινδίας Απρίλιος 2017 [24]

Στην περιοχή Vellore, από τον Ιούλιο έως τον Σεπτέμβριο είναι η εποχή των μουσώνων και λήφθηκαν υπόψη τα δεδομένα βροχοπτώσεων από τον Ιούλιο έως τον Σεπτέμβριο. Στον υπολογισμό όμως του BER (σφάλμα bit) εκτός της ταχύτητας ανέμου και του ποσοστού θερμοκρασίας υπεισέρχεται και ο παράγοντας ύψους κτηρίων (10-80 m), αλλά και απόστασης ζεύξης. Η μελέτη αυτή που έγινε στο Vellore της Ινδίας παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα του σχήματος (38).

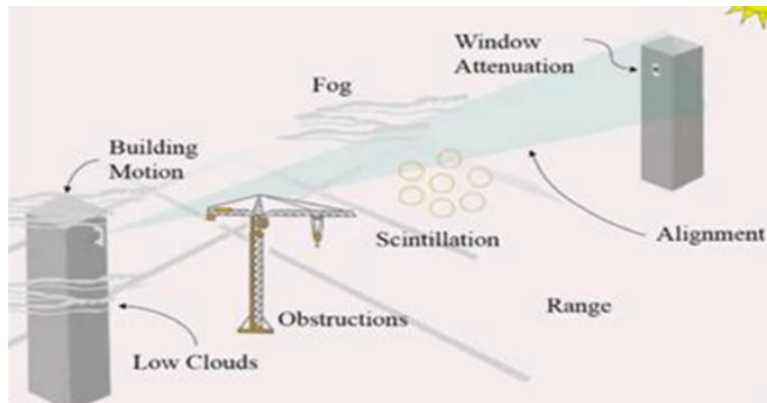


Σχήμα 38 BER ως προς την απόσταση για τις καιρικές συνθήκες στο Vellore που επηρεάζονται από την ταχύτητα του ανέμου και τα ύψη των κτιρίων για τετρακάναλο σύστημα SS-WDMFSO [24]



Σχήμα 39 BER έναντι λαμβανόμενης ισχύος για τις καιρικές συνθήκες στο Vellore που επηρεάζονται από την ταχύτητα του ανέμου και τα ύψη των κτιρίων [24]

Το BER έναντι της λαμβανόμενης ισχύος που φαίνεται στο σχήμα (39) είναι η ανάλυση της λαμβανόμενης ισχύος που έγινε στο Vellore της Ινδίας. Δείχνει πώς η λαμβανόμενη ισχύς μιας ζεύξης FSO επηρεάζεται από τα ύψη των κτιρίων σε διάφορες ταχύτητες ανέμου. Από το σχήμα (39), παρατηρείται ότι σε ύψος 10m, κοντά στη λαμβανόμενη ισχύ των 70dBm υπό την επίδραση της ελάχιστης ταχύτητας του ανέμου, το BER που καταγράφεται είναι  $10^{-9}$ . Κοντά στην λαμβανόμενη ισχύ των 72dBm, ο τεμαχισμός φάσματος δίνει μια ποιοτικά καλύτερη τιμή BER  $10^{-6}$  όταν το ύψος του κτιρίου είναι 80 m για μέγιστη ταχύτητα ανέμου.



Σχήμα 40 Τυπική απεικόνιση FSO συστήματος που επηρεάζεται από το ύψος κτιρίων, την θερμοκρασία και την ταχύτητα ανέμου [25]

## Κεφάλαιο 5

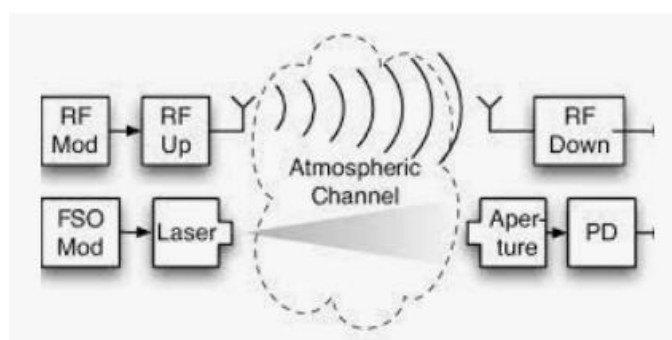
### Βελτίωση απόδοσης FSO συστημάτων με χρήση δευτερευόντων διατάξεων

Όπως είχαμε αναφέρει και στο κεφάλαιο 2.5 ένα FSO σύστημα είναι αρκετά αξιόπιστο και αποδοτικό, όταν τηρούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις κατά την διάρκεια λειτουργίας του:

- σταθερή τιμή δείκτη διάθλασης σε όλο το μήκος ζεύξης
- line of sight επικοινωνία
- μικρές διακυμάνσεις θερμοκρασίας
- χαμηλές ταχύτητες ανέμου
- καθαρός καιρικός χώρος (απουσία βροχής ομίχλης)
- απουσία εμποδίων στην γραμμή επικοινωνίας

Όμως ένα σύστημα FSO επικοινωνιών μπορεί να επηρεαστεί, αν οποιοδήποτε από τα παραπάνω δημιουργήσει διαταραχή ικανή να διακόψει την ομαλή λειτουργία του. Σε αυτή την περίπτωση όμως έρχονται σε άμεση εφαρμογή δευτερεύοντα συστήματα που προλαμβάνουν την ολική διακοπή της επικοινωνίας και την αποκαθιστούν μέσα από ένα σύστημα RF-FSO και ονομάζονται υβριδικά συστήματα FSO ή FSO/RF systems.

### 5.1 Υβριδικά συστήματα



Σχήμα 41 Τυπική διάταξη Υβριδικού FSO συστήματος[26]

Η βασική λειτουργία είναι η παράκαμψη του κυρίως καναλιού στο οποίο υφίσταται διαταραχή, αποκαθιστώντας τη ζεύξη με δευτερεύον RF-FSO κανάλι. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω πολλαπλών διαδρομών σε συχνότητες που εμείς επιθυμούμε ανάλογα με την μελέτη σχεδίασης του συστήματος.

Τα μεμονωμένα συστήματα FSO είναι πιο ευαίσθητα στις καιρικές συνθήκες λόγω

του ότι λειτουργούν σε ένα μήκος κύματος. Η πιο διαδεδομένη λύση τα τελευταία χρόνια είναι η χρήση FSO/Millimeter Wave (MMW) υβριδικών συστημάτων. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί την κύρια σύνδεση FSO στην κανονική λειτουργία και, για τις περιπτώσεις που η ζεύξη FSO δεν μπορεί να λειτουργήσει σωστά, το σύστημα χρησιμοποιεί το δευτερεύον εφεδρικό στοιχείο που είναι ένας δέκτης MMW .

Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η διαθεσιμότητα του συνδέσμου, με την διαφορά ότι η απόδοσή του είναι πολύ χαμηλότερη σε σχέση με την κύρια σύνδεση FSO έχοντας χαμηλότερους ρυθμούς bit. Η εφεδρική συχνότητα που χρησιμοποιούν τα περισσότερα υβριδικά συστήματα FSO στο εμπόριο είναι 2.4 GHz έως 10 GHz, για τον λόγο ότι σε αυτό το «παράθυρο» υπάρχουν κάποιες συχνότητες, όπου η ατμοσφαιρική απορρόφηση είναι πολύ χαμηλή.

Τα τελευταία χρόνια οι έρευνες έχουν στραφεί προς τα υβριδικά συστήματα ζεύξης με εφεδρικά κανάλια κοντά στα 60GHz, όπου η απόδοση του εφεδρικού καναλιού είναι αρκετά καλή και η ατμοσφαιρική απορρόφηση εξακολουθεί να είναι πολύ χαμηλή για συγκεκριμένες τιμές συχνότητας.

## **5.2 Μοντελοποίηση καναλιού ευρισκομένου σε ατμοσφαιρική τύρβη, εφαρμογή σε υβριδικά συστήματα**

Οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις προκαλούν τυχαίες αλλαγές στον ατμοσφαιρικό δείκτη διάθλασης, λόγω των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας μεταξύ της ατμόσφαιρας και του εδάφους. Μεταξύ πομπού και δέκτη όμως μεσολαβεί ο ατμοσφαιρικός χώρος που με τις τυχαίες αλλαγές του δείκτη διάθλασης προκαλεί εκτροπές στην δέσμη laser που μεταδίδεται. Οι τυχαίες εκτροπές της ακτινοβολίας οδηγούν σε χρονικές και χωρικές διακυμάνσεις του οπτικού σήματος στον δέκτη. Το φαινόμενο αυτό που ονομάζεται σπινθηρισμός, επηρεάζει την απόδοση, την διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία των συστημάτων επικοινωνίας FSO.

Το φαινόμενο του σπινθηρισμού είναι ικανό να εξαφανίσει το λαμβανόμενο σήμα και είναι απαραίτητη προϋπόθεση να προσομοιωθεί το οπτικό σήμα που φτάνει στον δέκτη, μέσω σωστής στατιστικής εκτίμησης κατανομής και της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (PDF probability density function) που περιγράφουν σωστά το εξασθενούντα στατιστικά στοιχεία για κάθε περιοχή μέσω πειραματικών μοντέλων, τα οποία και αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4 [27].

Ο δείκτης σπινθηρισμού ως ποσοτικό μέγεθος μπορεί να οριστεί από την σχέση [27]:

$$\sigma_1^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (66)$$

όπου:

- $I$  η ακτινοβολία του οπτικού σήματος στον δέκτη (μέση τιμή)
- $\langle \quad \rangle$  μέση τιμή

Στην περίπτωση ασθενούς σπινθηρισμού ο δείκτης σπινθηρισμού είναι ανάλογος με την διακύμανση Rytov και δίνεται από την σχέση [27]:

$$\sigma_{1,Rytov}^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{1/6} \quad (67)$$

όπου το  $C_n^2$  αντιπροσωπεύει την ισχύ τύρβης,  $k=2\pi/\lambda$  είναι ο κυματαριθμός, ενώ  $L$  το μήκος ζεύξης μεταξύ του πομπού και του δέκτη του συστήματος.

Ο χαρακτηρισμός ενός καναλιού ως γρήγορης ή αργής εξασθένησης, εξαρτάται μόνο από τον ρυθμό μετάδοσης bit του συνδέσμου. Για καλό ρυθμό bit έχουμε αργή εξασθένηση ενώ για χαμηλό ρυθμό bit έχουμε γρήγορη εξασθένηση.

Ένα υβριδικό σύστημα λειτουργεί με γνώμονα τον παράγοντα θορύβου σήματος SNR και την μέτρηση πιθανότητας διακοπής. Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2.5 αν ο δείκτης SNR πέσει κάτω από μία τιμή ανάλογη με την οριζόμενη του συστήματος τότε μεταπίπτει σε δευτερεύουσα ζεύξη RF-FSO. Η τιμή SNR χαρακτηρίζει την ευαισθησία του δέκτη και είναι άμεσα συνυφασμένη με την πιθανότητα διακοπής της σύνδεσης.

Οι παράμετροι ενός FSO συστήματος πρέπει να προσαρμόζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις του περιβάλλοντος που θα λειτουργήσει.

Η μέση χωρητικότητα ενός καναλιού είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος και αντιπροσωπεύει την εφικτή χωρητικότητα μιας οπτικής ζεύξης πραγματικού ελεύθερου χώρου. Είναι το πραγματικό ανώτερο όριο δεδομένων που μπορούν να διαδοθούν μέσω του καναλιού για τη συγκεκριμένη σύνδεση FSO σε συγκεκριμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Για τον λόγο ότι η ομίχλη είναι το σημαντικότερο φαινόμενο παρασιτικού περιβάλλοντος στα FSO συστήματα, για αυτή την εργασία θα θεωρείται ότι αναφερόμαστε μόνο στην περίπτωση της ομίχλης και ότι οι δέσμες δύνανται να

διαδοθούν σε κανάλια με πρόσθετο λευκό Gaussian θόρυβο (AWGN) χωρίς γεωμετρικές μετακινήσεις χώρου. Σύμφωνα με τα παραπάνω και δεδομένου ότι το κανάλι είναι εργοδικό η στατιστική προσέγγιση του καναλιού μπορεί να περιγραφεί από την σχέση [27]:

$$y = sx + n = nIx + n \quad (68)$$

όπου:

- $Y$  είναι το ηλεκτρικό σήμα στον δέκτη
- $s=nI$  είναι η στιγμιαία ένταση δέσμης
- $n$  πραγματική αναλογία μετατροπής φωτορρεύματος στον δέκτη
- $I$  κανονικοποιημένη ακτινοβολία
- $x$  είναι το διαμορφωμένο σήμα που είναι δυαδικό και λαμβάνει τιμές "0" ή "1"
- $n$  είναι ο Gaussian θόρυβος AWGN με μηδενικό μέσο όρο και διακύμανση  $\sigma^2=N_0/2$

Με τον όρο εργοδικό νοείται η σχεδόν αμετάβλητη χρονική και χωρική συμπεριφορά του καναλιού κατά μέσο όρο σε όλο το μήκος του.

Λόγω των τυχαίων διακυμάνσεων στον χώρο της ατμόσφαιρας ο λόγος ηλεκτρικού σήματος προς θόρυβο στον δέκτη έχει τυχαία συμπεριφορά και περιγράφεται από την σχέση [27]:

$$\gamma = \frac{s^2}{N_0} = (nI)^2/N_0 \quad (69)$$

Το μέσο ηλεκτρικό σήμα στο δέκτη δίνεται από την σχέση [27]:

$$\mu = (n\langle I \rangle)^2/N_0 \quad (70)$$

με  $\langle I \rangle$  να συμβολίζεται η μέση αναμενόμενη τιμή της έντασης ακτινοβολίας.

Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 3.3.1, η μέση αναμενόμενη τιμή έντασης ακτινοβολίας έχει την δυνατότητα να κανονικοποιηθεί στην μονάδα  $\langle I \rangle = 1$ , (θεωρώντας ότι η δέσμη ακολουθεί Gaussian κατανομή και δεν υπάρχουν γεωμετρικές απώλειες), τότε το SNR εξαρτάται από την ακτινοβολία και



περιγράφεται από την σχέση [27]:

$$I = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \quad (71)$$

Η μαθηματική υλοποίηση ενός στατιστικού μοντέλου επιτυγχάνεται μέσω της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας του (PDF probability density function) ως συνάρτηση της ακτινοβολίας στον δέκτη,  $f_I(I)$ .

Η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας  $P_{out}$  που προαναφέρθηκε, βάσει της οποίας χαρακτηρίζεται το όριο διακοπής της ζεύξης, δίνεται από την σχέση [27]:

$$P_{out} = Pr(\gamma \leq \gamma_{th}) = F_\gamma(\gamma_{th}) \quad (72)$$

όπου καθορίζει την πιθανότητα κατανομής με :

- $\gamma_{th}$  το κρίσιμο όριο ή όριο ευαισθησίας του δέκτη

Από το νόμο του Shannon η χωρητικότητα ενός καναλιού επικοινωνίας δίνεται από την σχέση [27]:

$$C = B \log_2(1 + \Gamma) \quad (73)$$

όπου  $B$  είναι το εύρος ζώνης του καναλιού και  $\Gamma$  το SNR στον δέκτη.

Από την σχέση (73) προκύπτει μόνο η στιγμιαία χωρητικότητα καναλιού η οποία για τις ανάγκες αυτής της εργασίας θεωρείται ακριβής.

Λόγω της τυχαιότητας όμως των διακυμάνσεων, οι περιπτώσεις αργής ή γρήγορης εξασθένησης μας προσδιορίζουν την σχετική χωρητικότητα του καναλιού. Έτσι για αργή εξασθένηση η σχέση (73) προσδιορίζει την χωρητικότητα χρήσης καναλιού και στην περίπτωση γρήγορης εξασθένησης μας προσδιορίζει την μέση χωρητικότητα του καναλιού.

Για τον προσδιορισμό όμως της μέσης εργοδικής χωρητικότητας σε όλο το μήκος του οπτικού καναλιού, από τις σχέσεις (71) και (73) προκύπτει η σχέση [27]:

$$\langle C \rangle = \int_0^\infty B \log_2 \left( 1 + \frac{(n)I^2}{N_0} \right) f_I(I) dI \quad (74)$$

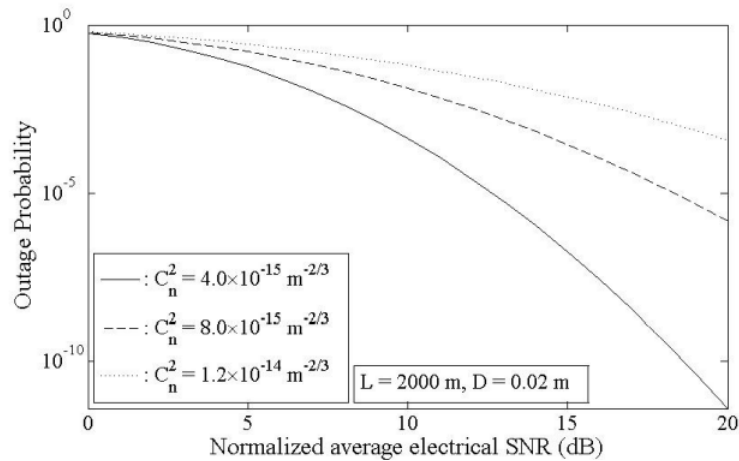
Μία σημαντική παράμετρος που απαιτεί υπολογισμό είναι η εκτίμηση ικανότητας διακοπής λειτουργίας. Στις περιπτώσεις αργής εξασθένησης, η ένταση της ακτινοβολίας στον δέκτη κυμαίνεται πολύ αργά σε σύγκριση με τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Σε αυτή την περίπτωση το κανάλι δεν θεωρείται εργοδικό και ο προσδιορισμός της μέσης χωρητικότητας δεν έχει πρακτική σημασία.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση το αντίστοιχο μέγεθος που μας δίνει πληροφορίες για την ευαισθησία του καναλιού είναι η χωρητικότητα διακοπής,  $C_{out}$ . Η χωρητικότητα διακοπής είναι το μέγεθος που προσδιορίζει την εγγυημένη χωρητικότητα καναλιού για τιμές χωρητικότητας ( $C > C_{out}$ ), σε ένα ποσοστό  $100 \times (1-r)$  των πραγματοποιήσεων του καναλιού, όπου η τιμή του  $r$  (με  $r \leq 1$ ) όταν είναι θετική αντιπροσωπεύει την πιθανότητα η στιγμιαία χωρητικότητα του καναλιού να είναι μικρότερη από την  $C_{out}$  και μπορεί να εκφραστεί με την σχέση [27]:

$$P_r[C < C_{out}] = r \quad (75)$$

και ισοδυναμεί με την σχέση [27]:

$$r = \int_0^{C_{out}} p_c(C) dC \quad (76)$$



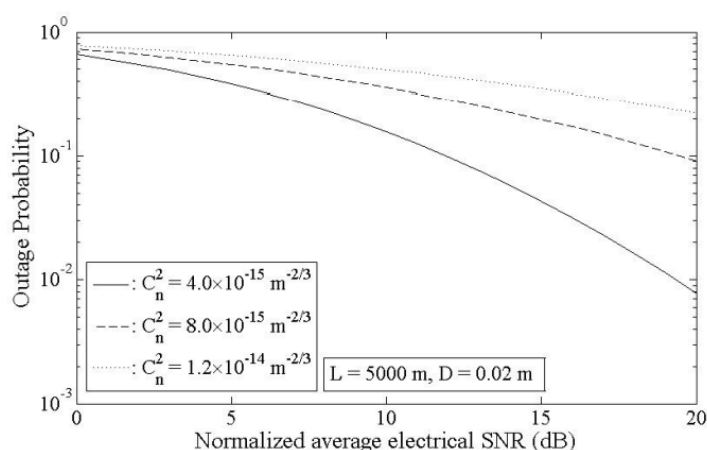
Σχήμα 42 Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας (outage probability)  $P_{out}$  έναντι κανονικοποιημένης μέσης ηλεκτρικής τιμής SNR για διαφορετικές τιμές  $C_n^2$  ( $L=2000\text{m}$ ) [27]

Στο (σχήμα 42) παρουσιάζεται η πιθανότητα διακοπής  $P_{out}$  μιας ζεύξης FSO μοντελοποιημένης με κανονική κατανομή καταγραφής για συνθήκες ασθενών αναταράξεων, ως συνάρτηση του κοινικοποιημένου μέσου ηλεκτρικού SNR στον

δέκτη,  $\mu/\gamma_{th}$  για διαφορετικές τιμές της ισχύος τύρβης  $C_n^2$ .

Το μήκος του συνδέσμου είναι  $L=2000m$ , η διάμετρος του ανοίγματος του δέκτη  $D=0.02m$  και το μήκος κύματος δέσμης  $\lambda=1.55m$

Όμοια παρουσιάζεται και στο σχήμα (43) ίδια ζεύξη με την διαφορά ότι το μήκος συνδέσμου είναι  $L=5000m$ .



Σχήμα 43 Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας (outage probability)  $P_{out}$  έναντι κανονικοποιημένης μέσης ηλεκτρικής τιμής SNR για διαφορετικές τιμές ισχύος τύρβης  $C_n^2$  ( $L=5000m$ ).[27]

Στα σχήματα (42) και (43) παρατηρείται πόσο σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η απόσταση στην αξιοπιστία του συστήματος για κανάλι όμοιων χαρακτηριστικών με την μόνη αλλαγή να είναι η απόσταση. Όσο αυξάνεται το μήκος υπάρχει σημαντική αύξηση πιθανότητας διακοπής της ζεύξης με τις ίδιες ατμοσφαιρικές συνθήκες.

### 5.2.1 Αποδοτικότητα Υβριδικών συστημάτων

Τα υβριδικά συστήματα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι ουσιαστικά δύο ξεχωριστά συστήματα FSO και RF-FSO, τα οποία λειτουργούν έχοντας ένα κοινό σημείο αναφοράς τον δείκτη θορύβου SNR. Η ίδια ορισμένη τιμή SNR, για την οποία το FSO σύστημα θα πάψει να λειτουργεί, ενεργοποιεί ένα δευτερεύον RF-FSO όπου θα αποκαταστήσει την επικοινωνία σε χαμηλότερους ρυθμούς bit.

Αφήνοντας όμως να εννοηθεί ότι όλες οι παράμετροι λειτουργίας του συστήματος είναι σταθερές θα μπορούσαμε θεωρητικά να υποθέσουμε πως ένα τέτοιο σύστημα θα μας έδινε λύση σε όλες της περιπτώσεις θορύβου και θα είχαμε αμετάβλητη αξιοπιστία. Αυτό πρακτικά είναι αδύνατο να συμβεί, διότι εκτός των καιρικών

συνθηκών, οι οποίες πιθανότατα μπορούν να προβλεφθούν, υπεισέρχονται παράγοντες γεωμετρικών συνθηκών λόγω φυσικής θέσης δέκτη (επιρροή ανέμου, κίνηση κτηρίου από δονήσεις κ.λ.π.). Όλα τα παραπάνω είναι ικανά να επηρεάσουν αρνητικά τον δείκτη SNR και στην συνέχεια να προκαλέσουν μείωση της αξιοπιστίας του συστήματός μας.

Για τον προσδιορισμό όμως των παραμέτρων που προκαλούν κακές ευθυγραμμίσεις λαμβάνονται υπόψη συνολικά όλες οι παράμετροι και για τον βέλτιστο προσδιορισμό υποθέτουμε ότι οι καιρικές συνθήκες αντιστοιχούν σε ισχυρές αναταράξεις. Σε αυτή την περίπτωση το καταλληλότερο μοντέλο είναι το μοντέλο K και περιγράφεται από την σχέση:[27]

$$f_{I,sway}(I) = \frac{\xi^2}{A_0 \xi^2} I^{\xi^2-1} \quad (77) \quad \text{με } 0 \leq I \leq A_0$$

όπου  $\xi^2$ , είναι ο λόγος μεταξύ της ισοδύναμης ακτίνας δέσμης στον δέκτη  $w_{eq}$ , και της τυπικής απόκλισης μετατόπισης σφάλματος κατάδειξης στον δέκτη. Τα  $w_{eq}$  και  $A_0$  προσδιορίζονται από τις σχέσεις [27]:

$$A_0 = [\text{erf}(u)]^2 \quad (78) \quad \text{με } u = \frac{\sqrt{\pi r}}{\sqrt{2} w_z} \quad (79)$$

και

$$w_{eq}^2 = \frac{w_z^2 \sqrt{\pi A_0}}{2u \exp(-u^2)} \quad (80)$$

όπου  $w_z$  είναι το πλάτος δέσμης στην απόσταση  $z$ .

Αν οι διακυμάνσεις της έντασης της ακτινοβολίας λόγω των ατμοσφαιρικών αναταράξεων αντιπροσωπεύουν το  $I_t$  και οι αντίστοιχες διακυμάνσεις λόγω της κακής ευθυγράμμισης το  $I_m$ , τότε η συνολική ένταση ακτινοβολίας στον δέκτη ισοδυναμεί με  $I = I_t * I_m$ .

Η αντίστοιχη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF probability density function) για τους δύο παράγοντες μπορεί να εκφραστεί μέσω της σχέσης [27]:

$$f_I = \int f_{I_t|I_t}(I|I_t) f_{I_t}(I_t) dI_t \quad (81)$$

όπου το  $f_{I|I_t}(I|I_t)$  είναι η υπό όρους πιθανότητα και εκφράζεται με την μορφή [27]:

$$f_{I|I_t}(I|I_t) = \frac{\xi^2}{A_0 \xi^2 I_t} \left(\frac{I}{I_t}\right)^{\xi^2-1} \quad (82) \quad \text{με } 0 \leq I \leq A_0 I_t$$

Η τελική μορφή συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, που προσδιορίζει την πιθανότητα διακοπής συμπεριλαμβανομένων και των παραγόντων κακής ευθυγράμμισης εκφράζεται από την σχέση [27]:

$$f_I(I) = \frac{a \xi^2}{A_0 \Gamma(\alpha)} G_{1,3}^{3,0} \left[ \frac{\alpha I}{A_0} \middle| \begin{matrix} \xi^2 \\ -1+\xi^2, \alpha-1, 0 \end{matrix} \right] \quad (83)$$

## Κεφάλαιο 6

### Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με τα συστήματα επικοινωνιών ελεύθερου χώρου FSO σε επίγειες ασύρματες οπτικές επικοινωνίες και προσπαθήσαμε να μελετήσουμε την τυρβώδη ροή σε σχέση με την απόδοση και την αξιοπιστία των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Όσον αφορά στην λειτουργία των FSO συστημάτων, στο κεφάλαιο 1 αναφερθήκαμε στους βασικούς τρόπους λειτουργίας, αλλά και στα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των τεχνολογικών συστημάτων που σχετίζονται με την λειτουργικότητά τους.

Στο κεφάλαιο 2 αναπτύχθηκαν οι βασικοί παράγοντες επηρεασμού ενός FSO συστήματος όπως η θερμοκρασία και η ομίχλη, όπου αναλύθηκαν τα μοντέλα υπολογισμού εξασθένησης για ομίχλη των Kruse, Kim, Al-Naboulsi και Ijaz. Επίσης έγινε αναφορά στο φαινόμενο της βροχής και στην εξασθένηση σήματος που μπορεί να προκαλέσει. Επιπλέον αναπτύχθηκε το θέμα των απωλειών λόγω γεωμετρίας καναλιού, ατμοσφαιρικών καταστάσεων, σπινθηρισμού και χιονόπτωσης καθώς και επιχειρήθηκε μια επιγραμματική αναφορά στο σύνολο των θετικών αλλά και αρνητικών παραγόντων ως προς τα FSO τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Στα κεφάλαια 3 και 4 αναπτύχθηκε αναλυτικά το φαινόμενο της τυρβώδους ροής όσον αφορά στις συνθήκες κατά τις οποίες μπορεί να λάβει χώρα το φαινόμενο αυτό και δόθηκε έμφαση στον τρόπο μελέτης, πρόβλεψης αλλά και αξιολόγησης του φαινομένου ως προς την απόδοση και την αξιοπιστία των FSO συστημάτων. Έγινε αναλυτική αναφορά στην χωροταξία των δεσμών laser αλλά και στην χωρική συμπεριφορά τους σε μία ζεύξη FSO. Επίσης παρουσιάστηκε ένα σύνολο μοντέλων μέσω των οποίων προσδιορίζεται η διακύμανση της ακτινοβολίας μιας δέσμης laser, αλλά και το ποσοστό αξιοπιστίας των FSO συστημάτων με γνώμονα τον αριθμό σφαλμάτων bit (BER). Τα μοντέλα που αναπτύσσονται είναι τα Longnormal, Negative exponential, Gamma-gamma και M κατανομής. Τέλος έγινε αναφορά στις επιπτώσεις της ταχύτητας του ανέμου αλλά και της υγρασίας σε σχέση με την θερμοκρασία σε ένα κανάλι FSO διάδοσης.

Στο κεφάλαιο 5 αναλύθηκε η ανάγκη της αξιοπιστίας ενός FSO συστήματος στις περιπτώσεις έντονων διαταραχών στο κανάλι διάδοσης όσον αφορά στην εξασφάλιση ζεύξης. Έγινε αναφορά στα υβριδικά συστήματα όσον αφορά στον τρόπο λειτουργίας, την αποδοτικότητά αλλά και τον τρόπο μοντελοποίησης ενός FSO καναλιού ως προς την πρόβλεψη για εξασφάλιση λειτουργίας μέσω της πιθανότητας

διακοπής της κύριας ζεύξης και αποκατάστασής της με δευτερεύουσα RF-FSO.

Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα FSO είναι αξιόπιστα όσον αφορά στην μεταφορά πληροφοριών σε υψηλούς ρυθμούς bit συνδυάζοντας πολύ χαμηλό κόστος έναντι αντίστοιχων RF συστημάτων για επίτευξη παρόμοιων ταχυτήτων. Η μεγαλύτερη δυσκολία είναι ο εντοπισμός και η πρόβλεψη των παραγόντων που επηρεάζουν μια FSO ζεύξη, καθώς εμφανίζουν μεγάλη ευαισθησία σε καιρικά φαινόμενα όπως ομίχλη, βροχή, χιόνι, αερολύματα κ.λ.π., αλλά και σε παράγοντες αστοχίας στόχευσης όπως (κακές ευθυγραμμίσεις που οφείλονται κυρίως σε δονήσεις των βάσεων που εδράζονται οι κεραίες λόγω ανέμων ή μετακινήσεων). Η πρόβλεψη επηρεασμών από καιρικά φαινόμενα, αλλά και από περιπτώσεις παραγόντων αστοχίας στόχευσης, μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα μέσω διαφόρων μοντέλων υπολογισμού τα οποία προβλέπουν την πτώση απόδοσης και έχουν αναφερθεί σε αυτή την εργασία. Οι περιπτώσεις όμως των συστημάτων που παρουσιάζουν υψηλές αναταραχές και ξεπερνούν τα όρια βιωσιμότητας όσο αναφορά στην εξασφάλιση της ζεύξης μπορούν να βελτιωθούν με την χρήση υβριδικών συστημάτων.

Τα υβριδικά συστήματα αποτελούν την πιο αξιόπιστη λύση ως προς την εξασφάλιση επικοινωνίας σε κανάλια με πολλές αναταράξεις με μόνο μειονέκτημα την μείωση ρυθμού bit. Τα τελευταία όμως χρόνια γίνονται προσπάθειες για βελτίωση του ρυθμού bit σε συχνότητες κοντά στα 60GHz, όπου η απόδοση του εφεδρικού καναλιού είναι αρκετά καλή και η ατμοσφαιρική απορρόφηση είναι πολύ χαμηλή για συγκεκριμένες τιμές συχνότητας. Είναι εύκολα αντιληπτό πως τα FSO συστήματα είναι πολύ ευάλωτα όσον αφορά στην λειτουργία τους και η ανάγκη για προσεγμένο σχεδιασμό είναι πολύ μεγάλη, καθώς θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη όλων των παραγόντων αναταραχής και εξασθένησης, όπως αναφέρθηκαν σε αυτή την εργασία. Παρόλα αυτά τα FSO συστήματα σε συνδυασμό με τα υβριδικά RF-FSO συστήματα αποτελούν την απόλυτη λύση στις περιπτώσεις όπου οι ενσύρματες ζεύξεις δεν είναι εφικτές και παρέχουν υψηλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα.

## Βιβλιογραφία

- [1]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel\\_zone](https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_zone)
- [2]. Ghassemlooy Z. and Popoola W.O., Terrestrial Free-Space Optical Communications, Mobile and Wireless Communications Network Layer and Circuit Level Design, Salma Ait Fares and Fumiyuki Adachi (Ed.), ISBN: 978-953-307-042-1, 2010
- [3]. [https://www.google.com/search?q=line+of+sight+telecommunication&rlz=1C1GCEA\\_enGR855GR855&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj-x5-yv-0AhW9QvEDHQmYDx4Q\\_AUoAXoECAEQAw&biw=1422&bih=990&dpr=0.9](https://www.google.com/search?q=line+of+sight+telecommunication&rlz=1C1GCEA_enGR855GR855&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj-x5-yv-0AhW9QvEDHQmYDx4Q_AUoAXoECAEQAw&biw=1422&bih=990&dpr=0.9)
- [4]. Σ. Κουρής, Στοιχεία Θεωρίας Κεραιών και Διάδοσης Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων, Κεφάλαια 8 και 9, Θεσσαλονίκη, 1984
- [5]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel\\_zone](https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_zone)
- [6]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Friis\\_transmission\\_equation](https://en.wikipedia.org/wiki/Friis_transmission_equation)
- [7]. Arun K. Majumdar, Free-space laser communication performance in the atmospheric channel, Journal of optical and fiber communication reports, 2, 345–396, DOI: 10.1007/s10297-005-0054-0, 2005
- [8]. Hennes Henniger, Otakar Wilfert, An Introduction to Free-space Optical Communications, RADIOENGINEERING, VOL. 19, NO. 2, June 2010
- [9]. Maged Abdullah Esmail, Habib Fathallah, Mohamed-Slim Alouini, Outdoor FSO Communications Under Fog: Attenuation Modeling and Performance Evaluation, IEEE Photonics Journal, Volume 8, Number 4, DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2592705, August 2016
- [10]. A.K Rahman , N Julai, C.B.M.Rashidi, Nurdiani Zamhari, S.K Sahari, N.A.A Mohtadzar, M.R. MSharip, Impact of rain weather over free space optic communication transmission, Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, Vol. 14, No.1, pp. 303-310, DOI: 10.11591/ijeecs.v14.i1.pp303-310, April 2019
- [11]. Mehdi ROUISSAT, A. Riad BORSALI, Mohammad E. CHIKH-BLED, Free Space Optical Channel Characterization and Modeling with Focus on Algeria Weather Conditions, I. J. Computer Network and Information Security, 3, pp 17-23, DOI: 10.5815/ijcnis.2012.03.03, 2012



- [12]. Aditi Malik, Preeti Singh, Free Space Optics: Current Applications and Future Challenges, International Journal of Optics, Volume 2015, ID 945483, 2015
- [13]. Hira Khalid, S. Sheikh Muhammad, H.E. Nistazakis, G.S. Tombras, Performance Analysis of Hard-Switching Based Hybrid FSO/RF System over Turbulence Channels, *Computation*, 7, 28, DOI:10.3390/computation7020028,2019
- [14]. Banibrata Bag, Akinchan Das, Imran Shafique Ansari, Ales Prokes, Chayanika Bose, Aniruddha Chandra, Performance Analysis of Hybrid FSO Systems Using FSO/RF-FSO Link Adaptation, *IEEE Photonics Journal*, Vol. 10, No. 3, DOI: 10.1109/JPHOT.2018.2837356m, June 2018
- [15]. Jiliang Zhang , Xiaojun Pan, Gaofeng Pan, Yiyuan Xie, Secrecy Analysis for Multi-Relaying RF-FSO Systems With a Multi-Aperture Destination, *IEEE Photonics Journal*, DOI: 10.1109/JPHOT.2020.2983078, Mar. 2020.
- [16]. Xiaoming Zhu, Joseph M. Kahn, Free-Space Optical Communication Through Atmospheric Turbulence Channels, *IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS*, VOL. 50, NO. 8, August 2002
- [17]. Ping He, Christopher G. Nunalee, Sukanta Basu, Mikhail A. Vorontsov, Steven T. Fiorino, Current Status and Challenges in Optical Turbulence Simulations in Various Layers of the Earth's Atmosphere, *The International Society for Optical Engineering*, Vol. 9224, DOI: 10.1117/12.2063023, October (2014).
- [18]. M. Ijaz, Shan Wu, Zhe Fan, W.O. Popoola, Z. Ghassemlooy, Study of the Atmospheric Turbulence in Free Space Optical Communications, *Optical Communications Research Group*, 2009
- [19]. Simin Feng, Herbert G. Winful, Physical origin of the Gouy phase shift, Department of Electrical Engineering and Computer Science, *OPTICS LETTERS*, Vol. 26, No. 8, April 15, 2001
- [20]. M.H. Mahdiah , M. Pournoury, Atmospheric turbulence and numerical evaluation of bit error rate (BER) in free-space communication, *Optics & Laser Technology*, Vol 42, pp 55-60, DOI:10.1016/j.optlastec.2009.04.017, 2010
- [21]. Javier Alda, Laser and Gaussian Beam Propagation and Transformation, *Encyclopedia of Optical Engineering*, DOI: 10.1081/E-EOE 120009751, January 2003
- [22]. Masud Mansuripur, Gaussian Beam Optics, *Optics and Photonics News*, January 2001

- [23]. Miranda Van Iersel, Daniel A. Paulson, Chensheng Wu, Nathaniel A. Ferlic, John R. Rzasa, Christopher C. Davis, Michael Walker, Mary Bowden, Jonathan Spsychalsky, Franklin Titus, Measuring the turbulence profile in the lower atmospheric boundary layer, *Applied Optics*, Vol. 58, No. 25. DOI: 10.1364/AO.58.006934, 2019
- [24]. Prabu Krishnan, Performance Analysis of FSO Systems over Atmospheric Turbulence Channel for Indian Weather Conditions, *Turbulence and Related Phenomena*, DOI: 10.5772/intechopen.80275, 2019
- [25]. [https://www.google.com/search?q=turbulence+in+fso+systems&tbm=isch&ved=2ahUKEwjostuDv\\_XzAhVYNuwKHXjyD9QQ2cCegQIABAA&oq=turbulence+in+fso+systems&gs\\_lcp=CgNpbWcQAzoECAAQQzoFCAAQgAQ6BggAEAcQHjoECAAQHjoECAAQEzoICAAQCBAeEBNQ6wFYIC9gpjJoAHAAeACAAbcBiAGIEJIBBDaUMTaYAQCgAQGqAQtnD3Mtd2l6LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=CP1YeiODtjssAf45LgDQ&bih=730&biw=1536&rlz=1C1GCEA\\_enGR975GR975#imgrc=z8o0no77FvdiWM](https://www.google.com/search?q=turbulence+in+fso+systems&tbm=isch&ved=2ahUKEwjostuDv_XzAhVYNuwKHXjyD9QQ2cCegQIABAA&oq=turbulence+in+fso+systems&gs_lcp=CgNpbWcQAzoECAAQQzoFCAAQgAQ6BggAEAcQHjoECAAQHjoECAAQEzoICAAQCBAeEBNQ6wFYIC9gpjJoAHAAeACAAbcBiAGIEJIBBDaUMTaYAQCgAQGqAQtnD3Mtd2l6LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=CP1YeiODtjssAf45LgDQ&bih=730&biw=1536&rlz=1C1GCEA_enGR975GR975#imgrc=z8o0no77FvdiWM).
- [26]. [https://www.google.com/search?q=hybrid+systems+in+fso+communication&rlz=1C1GCEA\\_enGR975GR975&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjrlsf1yfXzAhVZiP0HHU6JIQ\\_AUoAXoECAIQAw&biw=767&bih=663&dpr=1.25#imgrc=\\_Sm6ihOZUaAEmM](https://www.google.com/search?q=hybrid+systems+in+fso+communication&rlz=1C1GCEA_enGR975GR975&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjrlsf1yfXzAhVZiP0HHU6JIQ_AUoAXoECAIQAw&biw=767&bih=663&dpr=1.25#imgrc=_Sm6ihOZUaAEmM)
- [27]. H.E. Nistazakis, A. Katsis, G.S. Tombras, On the Reliability and Performance of FSO and hybrid FSO communication systems over turbulent channels, *Turbulence: Theory, Types and Simulation*, 2012