



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

**Επίδοση πολυβηματικών ασύρματων οπτικών  
συστημάτων**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Γιάννης Ν. Τοφής

**Επιβλέπων : Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος**  
Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2009





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

## Επίδοση πολυβηματικών ασύρματων οπτικών συστημάτων

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γιάννης Ν. Τοφής

**Επιβλέπων :** Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος  
Λέκτορας ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14η Ιουλίου 2009.

.....  
Α. Παναγόπουλος  
Λέκτορας ΕΜΠ

.....  
Ι. Κανελλόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Η. Αβραμόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2009

.....  
Γιάννης Ν. Τοφής

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

Copyright © Γιάννης Τοφής, 2009

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Κεντρικός στόχος της διπλωματικής μας εργασίας είναι η βελτίωση της επίδοσης των ασύρματων οπτικών συστημάτων με τη βοήθεια ενδιάμεσων επαναληπτών. Τα πολυβηματικά ασύρματα οπτικά συστήματα πετυχαίνουν την αύξηση της τάξης της διαφορικής λήψης του συνολικού συστήματος και ανάγονται σε ισχυρό εργαλείο καταπολέμησης των ατμοσφαιρικών στροβιλισμών που προκαλούν τους σπινθηρισμούς (scintillations).

Στο πρώτο κεφάλαιο, επιδοθήκαμε σε σχεδιαστικές θεωρήσεις ενός ασύρματου οπτικού συστήματος, όπως αυτές προδιαγράφονται από την ITU. Θεωρήσαμε όλους τους παράγοντες που υποβαθμίζουν την ποιότητα της ζεύξης, την απόσβεση που εισάγει καθένας απ' αυτούς και την συνεισφορά τους στον ισολογισμό ισχύος του συνολικού συστήματος.

Στη συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο, μελετήσαμε τις τεχνολογικές παραμέτρους ενός ασύρματου οπτικού συστήματος, την χρησιμότητα του στην υλοποίηση της δικτυακής υποδομής και τις δυνατότητες διείσδυσης της τεχνολογίας σε μητροπολιτικά και ακαδημαϊκά δίκτυα. Τέλος εξετάσαμε την ωριμότητα της τεχνολογίας, όπως αυτή έχει διαμορφωθεί σήμερα, μετά από πολλές προσπάθειες βελτίωσης της αξιοπιστίας της.

Κατόπιν, στο τρίτο κεφάλαιο, έγινε μοντελοποίηση του ασύρματου οπτικού συστήματος καθώς και του ασύρματου καναλιού με τη βοήθεια δύο στατιστικών κατανομών, της λογαριθμοκανονικής για συνθήκες ασθενών ατμοσφαιρικών αναταραχών και της Gamma-Gamma για μέτριες έως έντονες ατμοσφαιρικές αναταραχές. Μελετήθηκαν τόσο η σειριακή όσο και η παράλληλη αναμετάδοση με χρήση επαναληπτών αποκωδικοποίησης και προώθησης (DF) καθώς και επαναληπτών ενίσχυσης και προώθησης (AF). Περαιτέρω μελετήθηκε η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για την περιοχή των ασθενών ατμοσφαιρικών διαταραχών και έγιναν προσομοιώσεις για την περίπτωση των επαναληπτών αποκωδικοποίησης και προώθησης (DF) και έγιναν συγκρίσεις με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Επίσης μελετήθηκε ο ρυθμός υπέρβασης στάθμης και ο μέσος χρόνος διαλείψεων, δύο παράγοντες που βοηθούν στην επιλογή του ρυθμού μετάδοσης bit, του μήκους της κωδικής λέξης και του σχήματος κωδικοποίησης ενός οπτικού ασύρματου συστήματος.

## Λέξεις Κλειδιά

Ασύρματα οπτικά συστήματα, συνεργατική διαφορική λήψη, ατμοσφαιρικοί στροβιλισμοί, σπινθηρισμοί, διάδοση, απόσβεση, κανάλια διαλείψεων, lasers, αξιοπιστία.

## **Abstract**

The goal of this diploma thesis is the study of the performance of Free Space Optical (FSO) systems assisted with relays. These systems increase the order of diversity of the whole system and can be reduced to a powerful mitigation tool for FSO systems operating under atmospheric turbulence channels.

In the first chapter, we study design considerations as these are recommended by ITU-R Stud Group 3. All factors that downgrade the quality of an optical link have been analytically presented as well as the attenuation introduced by each of these and their contribution to the estimation of the link budget of the whole system.

Next, in the second chapter, the technology parameters of an FSO system and its usefulness to the materialization of the network infrastructure have been discussed, especially their penetration to the Metropolitan area networks (MANs) and Campus Area Networks (CANs). Furthermore, the maturity of the technology is examined, as it is modeled nowadays, after many improvement efforts considering their reliability.

Finally, in the third chapter, the performance of an FSO system with relays is considered. The channel model is described using two statistical distributions, the lognormal distribution for weak atmospheric turbulence regime and the Gamma-Gamma for the moderate to strong atmospheric turbulence regime. Both serial and parallel relaying schemes have been examined, equipped with amplify-and-forward (AF) and decode-and-forward (DF) modes. In addition, the outage probability for the weak turbulence regime has been analytically calculated and simulations for the DF mode have also been performed. Extensive comparisons with the analytical expressions have also been presented. Moreover, the expected number of fades below a prescribed threshold and the mean fade time are presented. These two factors are of great importance for choosing the bit rate, the length of the coded word and the coding scheme of an FSO system. Some useful conclusions are drawn.

## **Key Words**

Free space optics (FSO) systems, cooperative diversity, atmospheric turbulence, scintillation, propagation, attenuation, fading channels, lasers, reliability.

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Λέκτορα κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο καθώς και τους συνεργάτες του κ. Δημήτριο Σκραπαρλή (PhD) και κ. Βασίλειο Σακαρέλο (υποψήφιο διδάκτορα), που με τη βοήθειά τους, τις υποδείξεις και κατευθύνσεις τους, συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

## Πίνακας Περιεχομένων

### Κεφάλαιο 1: Μέθοδοι και δεδομένα που απαιτούνται για τη σχεδίαση

επίγειων οπτικών ζεύξεων ελεύθερου χώρου.....	10
1. Εισαγωγή.....	10
2. Αρχικές θεωρήσεις στη σχεδίαση των FSO ζεύξεων.....	11
2.1 Καιρικές συνθήκες.....	11
2.2 Χαρακτηριστικά δρόμου διάδοσης.....	12
2.3 Τοποθέτηση πομπού.....	12
2.4 Ατμοσφαιρική θεώρηση.....	12
2.5 Ειδική ατμοσφαιρική απόσβεση λόγω απορρόφησης και σκέδασης $\gamma_{atmo}$ .....	14
2.6 Μοριακή απορρόφηση.....	14
2.7 Μοριακή σκέδαση.....	16
2.8 Απορρόφηση αερολυμάτων.....	17
2.9 Σκέδαση αερολυμάτων.....	19
2.10 Σπινθηρισμοί.....	24
2.11 Γεωμετρική απόσβεση.....	27
2.12 Υπολογισμός της ειδικής απόσβεσης λόγω ομίχλης $\gamma_{fog}$ (σκέδαση Mie).....	28
2.13 Εξασθένιση λόγω βροχής.....	28
2.14 Απόσβεση λόγω χιονιού.....	29
3. Επιπτώσεις του περιβάλλοντος φωτός.....	30
4. Αθροιστική συνάρτηση κατανομής της απόσβεσης.....	32
5. Υβριδικά συστήματα FSO.....	33
6. Μετρήσεις ορατότητας.....	34
Βιβλιογραφία 1 <sup>ο</sup> Κεφαλαίου.....	37

### Κεφάλαιο 2: Τα ασύρματα οπτικά δίκτυα ως μία δυναμικά αναδυόμενη

τεχνολογία στις τηλεπικοινωνίες.....	38
Βιβλιογραφία 2 <sup>ο</sup> Κεφαλαίου.....	46

### Κεφάλαιο 3: Ασύρματες οπτικές επικοινωνίες με χρήση επαναληπτών.....

3.1 Εισαγωγή.....	47
-------------------	----



3.2 Μοντελοποίηση του ασύρματου οπτικού συστήματος.....	49
3.3 Μοντελοποίηση καναλιού.....	51
3.3.1 Λογαριθμοκανονικό Μοντέλο.....	51
3.3.2 Gamma Gamma μοντέλο.....	53
3.3.3 Αναμετάδοση με αποκωδικοποίηση και προώθηση (DF).....	57
3.3.4 Αναμετάδοση ενίσχυσης και προώθησης (AF).....	58
3.4 Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας (Outage Probability).....	60
3.4.1 Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για αναμετάδοση αποκωδικοποίησης και προώθησης (DF) για την περιοχή ασθενών σπινθηρισμών.....	61
3.4.2 Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για αναμετάδοση ενίσχυσης και προώθησης (AF) για την περιοχή ασθενών σπινθηρισμών.....	65
3.5 Αναμενόμενος αριθμός διαλείψεων ανά δευτερόλεπτο και μέσος χρόνος διαλείψεων.....	69
3.5.1 Lognormal Κατανομή.....	69
3.5.2 Προσέγγιση του αναμενόμενου αριθμού διαλείψεων για φωτεινή ένταση που ακολουθεί Gamma-Gamma κατανομή.....	70
3.6 Ανάλυση και επεξεργασία της εμβέλειας και της επίδοσης του συστήματος.....	71
Παράρτημα Α.3.1.....	79
Παράρτημα Α.3.2.....	88
Βιβλιογραφία 3 <sup>ο</sup> Κεφαλαίου.....	90

# Κεφάλαιο 1

## Μέθοδοι και δεδομένα που απαιτούνται για τη σχεδίαση επίγειων οπτικών ζεύξεων ελευθέρου χώρου

### 1 Εισαγωγή

Σε αυτό το πρώτο και εισαγωγικό μέρος της διπλωματικής μας εργασίας παρουσιάζουμε κάποια εισαγωγικά στοιχεία και κάποιες μεθόδους πρόβλεψης για τη διάδοση και τη σχεδίαση ασύρματων επίγειων οπτικών συστημάτων ελευθέρου χώρου (FSO systems) όπως αυτές προδιαγράφονται στις συστάσεις της ITU. Εξετάζουμε μεθόδους υπολογισμού της απόσβεσης υπό συνθήκες καθαρού ουρανού, ομίχλης καθώς και κατακρημνίσεις λόγω βροχής και χιονιού.

Σημειώνουμε ότι στις οπτικές επικοινωνίες ελευθέρου χώρου χρησιμοποιείται το οπτικό και υπέρυθρο φάσμα, το οποίο είναι διαθέσιμο-ελεύθερο φάσμα για επίγειες ραδιοεπικοινωνίες, με την έννοια του ότι δεν έχει παραχωρηθεί για χρήση συγκεκριμένων υπηρεσιών.

Εισαγωγικά αναφέρουμε ότι για τη σχεδίαση των FSO ζεύξεων πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλές επιδράσεις που περιλαμβάνουν τις απώλειες λόγω ατμοσφαιρικής απορρόφησης, τις σκεδάσεις και τους στροβιλισμούς, τα μικροκλιματικά περιβάλλοντα και τις τοπικές επιδράσεις, την απόσταση των ζεύξεων και την έλλειψη ευθυγράμμισης μεταξύ πομπού και δέκτη. Ζητήματα όπως η επιλογή του μήκους κύματος, του ρυθμού μετάδοσης, θέματα προστασίας της όρασης και η περιβάλλουσα ηλιακή ακτινοβολία πρέπει επίσης να θεωρηθούν.

Η λειτουργία των συστημάτων FSO απαιτεί την οπτική επαφή (Line of Sight – LOS) μεταξύ πομπού και δέκτη. Ένεκα της παραλληλισμένης και εξαπλωμένης δέσμης που χρησιμοποιούν τα συστήματα FSO, απαιτείται η απόσταση οποιουδήποτε εμποδίου από το κέντρο της δέσμης να είναι μεγαλύτερη από την ακτίνα της. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα RF συστήματα στα οποία απαιτείται καθαρότητα μόνο της 1<sup>ης</sup> ζώνης Fresnel.

Το κυριότερο μειονέκτημα των FSO συστημάτων είναι η τρωτότητα στις ατμοσφαιρικές επιδράσεις όπως η απόσβεση και οι σπινθηρισμοί, οι οποίοι μπορούν να μειώσουν την διαθεσιμότητα της ζεύξης. Επίσης η στενότητα της δέσμης laser που

χρησιμοποιείται επιτάσσει την απόλυτη ευθυγράμμιση μεταξύ πομπού και δέκτη γεγονός που είναι πιο σημαντικό απ' ότι στα συστήματα RF.

Μια παράμετρος κλειδί στην σχεδίαση των FSO ζεύξεων είναι η εκτίμηση του ισολογισμού ισχύος. Το περιθώριο διαλείψεων της ζεύξης,  $M_{link}$  (dB), το οποίο είναι η διαθέσιμη ισχύς πάνω από την ευαισθησία του δέκτη, μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{geo} - A_{atmo} - A_{scintillation} - A_{system} \quad (1.1)$$

όπου:

$P_e$  (dBm): η συνολική ισχύς του πομπού

$S_r$  (dBm): ευαισθησία του δέκτη η οποία επίσης εξαρτάται από το εύρος ζώνης (ρυθμός μετάδοσης)

$A_{geo}$  (dB): η γεωμετρική απόσβεση της ζεύξης που οφείλεται στη διεύρυνση της δέσμης με την αύξηση της απόστασης.

$A_{atmo}$  (dB): ατμοσφαιρική απόσβεση λόγω απορρόφησης και σκέδασης

$A_{scintillation}$  (dB): εξασθένιση που οφείλεται στους ατμοσφαιρικούς στροβίλους

$A_{system}$  (dB): αντιπροσωπεύει όλες τις απώλειες που εξαρτώνται από το σύστημα, συμπεριλαμβανομένης της κακής ευθυγράμμισης της δέσμης, τις οπτικές απώλειες του δέκτη, τις απώλειες λόγω εκτροπής της δέσμης, τη μείωση της ευαισθησίας του δέκτη λόγω του περιβάλλοντος φωτός (ηλιακή ακτινοβολία) κτλ.

Ο καθορισμός και υπολογισμός αυτών των όρων και της αρχικής θεώρησης για τη σχεδίαση μιας FSO ζεύξης δίνονται παρακάτω.

## 2 Αρχικές θεωρήσεις στη σχεδίαση των FSO ζεύξεων

Η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας για τη ζεύξη είναι ένα σημαντικό θέμα για την επιτυχή λειτουργία ενός συστήματος FSO. Η εγκατάσταση μιας FSO ζεύξης πρέπει να υπολογίσει τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες, τα φυσικά εμπόδια και τις επιφάνειες του εδάφους κατά μήκος της διαδρομής και τις ρυθμίσεις κατά την εγκατάσταση για εξασφάλιση βέλτιστης απόδοσης.

### 2.1 Καιρικές συνθήκες

Οι καιρικές συνθήκες και ειδικά το τοπικό κλίμα που επικρατεί στις γειτονικές με τη ζεύξη περιοχές, θα επηρεάζει την εμφάνιση χιονιού, βροχής, ψεκάδων ομίχλης,

ομίχλης με ορατότητα μεγαλύτερη από 2 Km (haze), αερολύματα και σκόνης/άμμου, που θα οδηγήσουν στην απορρόφηση και σκέδαση του μεταδιδόμενου σήματος.

## 2.2 Χαρακτηριστικά δρόμου διάδοσης

- Φυσικά εμπόδια μεταξύ του πομπού και του δέκτη πρέπει σαφέστατα να αποφεύγονται. Αξίζει να σημειωθεί ότι μεγάλα δέντρα μπορούν να αυξάνουν το ύψος τους 0.5 έως 1 m ανά χρόνο και να αλλάζουν την πυκνότητα του φυλλώματός τους κατά τη διάρκεια του χρόνου.
- Ζεύξεις ανάμεσα σε κτήρια πρέπει να λαμβάνουν υπόψη θερμικά ανοίγματα εξαερισμού που μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του δρόμου διάδοσης και να προκαλέσουν στροβιλισμούς (turbulence) που με τη σειρά τους μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένους σπινθηρισμούς στο λαμβανόμενο σήμα.
- Η τοπογραφία και το είδος της επιφάνειας κάτω από μια FSO ζεύξη μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την επίδοσή της. Ζεύξεις κατά μήκος ποτάμιων κοιλάδων ή κατά μήκος περιοχών ανοικτής θαλάσσης, θα εμφανίζουν συχνά αυξημένα φαινόμενα ομίχλης. Κτηριακές κατασκευές κάτω από τη ζεύξη δύνανται να προκαλέσουν πρόσθετη θερμική δραστηριότητα στο αέρα πάνω απ' αυτά, η οποία δραστηριότητα μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένους σπινθηρισμούς στο λαμβανόμενο σήμα.

## 2.3 Τοποθέτηση πομπού

Τα συστήματα FSO έχουν δέσμη πολύ στενού πλάτους και έτσι η ακριβής ευθυγράμμιση του πομπού και του δέκτη είναι καιρία. Όποια έλλειψη ευθυγράμμισης προκαλεί σημαντική απώλεια σήματος. Η βάση του τηλεσκοπίου πρέπει να είναι σταθερή και κατευθείαν τοποθετημένη σε ουσιαστικούς τοίχους ή στην κορυφή μιας ξεχωριστής κολώνας, γεγονός θεμελιώδες για την αξιόπιστη επίδοση του συστήματος. Η κίνηση ως αποτέλεσμα του διαφορικής θερμικής διαστολής ή λόγω κτυπημάτων του ανέμου, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί.

## 2.4 Ατμοσφαιρική θεώρηση

Ένεκα της φύσης και της σύστασης της ατμόσφαιρας οι οπτικές ζεύξεις (FSO links) υπόκεινται σε σωρεία υποβαθμίσεων που αφορούν την ποιότητα της ζεύξης. Έτσι

απορροφήσεις και σκεδάσεις που έγκεινται στην αλληλεπίδραση του φωτός με τη συστατικά της ατμόσφαιρας (διάφορα είδη μορίων και αιωρούμενων σωματιδίων, τα λεγόμενα αερολύματα) δημιουργούν μια σειρά από φαινόμενα τα περισσότερα από τα οποία είναι γνωστά από τις συμβατικές ασύρματες επικοινωνίες:

- Συχνοεπιλεκτική απορρόφηση:

Η ατμοσφαιρική απορρόφηση συμπεριφέρεται ``επιλεκτικά`` ως προς τα μήκη κύματος που απορροφά περισσότερο λόγω των ατόμων και μορίων που περιέχει και του διαφορετικού έργου εξόδου και ενεργειακού διακένου που χαρακτηρίζει το κάθε συστατικό. Έτσι κάποια μήκη κύματος, δηλαδή κάποια φωτόνια συγκεκριμένης ενέργειας, δεσμεύονται από κάποια άτομα της ατμόσφαιρας και συμβάλλουν στη διέγερση τους με αποτέλεσμα αυτά να εξαλείφονται και να δημιουργούνται καινούργια, μεγαλύτερου μήκους κύματος και χαμηλότερης ενέργειας (λόγω αποδιέγερσης σε ενδιάμεσες στάθμες), ενώ ταυτόχρονα εκλύεται θερμότητα.

- Σκέδαση:

Η ατμοσφαιρική σκέδαση είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης φωτονίων και ατόμων ή μορίων στο μέσο διάδοσης. Η σκέδαση προκαλεί μια γωνιακή ανακατανομή που έχει παρόμοιο αποτέλεσμα με την πολυδιαδρομική διάδοση στα ασύρματα ραδιοκύματα, δηλαδή μια αλλαγή στη φάση των διαδιδόμενων κυμάτων ενώ μπορεί να προκαλέσει και διεύρυνση συχνότητας.

- Ατμοσφαιρικοί σπινθηρισμοί (scintillations):

Προκαλούνται από θερμικές αναταραχές-αναταράξεις ένεκα συνεχών κινήσεων και ακανόνιστων μεταβολών των αέριων μαζών ή στροβιλισμών (turbulence) εντός του μέσου διάδοσης που έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία τυχαία κατανομημένων κυψελών μεταβλητού μεγέθους (10cm – 1 Km), θερμοκρασίας και δείκτη διάθλασης. Αυτά προκαλούν σκέδαση, πολύοδη διάδοση και μεταβλητές γωνίες άφιξης. Έτσι το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος διακυμαίνεται.

Οι σπινθηρισμοί προκαλούν επίσης παραμόρφωση του μετώπου του κύματος με αποτέλεσμα την αποκέντρωση (defocusing) της δέσμης.

Προσθετικά, η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να επηρεάσει την επίδοση της οπτικής ζεύξης όταν ο ήλιος είναι συννεφιακός στην κατεύθυνση της ζεύξης.

## 2.5 Ειδική ατμοσφαιρική απόσβεση λόγω απορρόφησης και σκέδασης $\gamma_{atmo}$

Η ειδική ατμοσφαιρική απόσβεση  $\gamma_{atmo}$  (dB/Km) μπορεί να γραφτεί σαν το άθροισμα δύο όρων:

$$\gamma_{atmo} = \gamma_{clear\_air} + \gamma_{excess} \quad (1.2)$$

όπου:

$\gamma_{clear\_air}$ : ειδική απόσβεση κάτω από καθαρό ουρανό (λόγω της παρουσίας αέριων μορίων)

$\gamma_{excess}$ : ειδική απόσβεση λόγω της περιστασιακής παρουσίας ομίχλης, υδρονέφωσης, νεφελωμάτων, ψιλόβροχου, βροχής, χιονιού, χαλαζιού κτλ.

Η ατμόσφαιρα είναι ένα χρονομεταβλητό μέσο μετάδοσης και έτσι το  $\gamma_{atmo}$  είναι μια στοχαστική διαδικασία. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται και από την εξίσωση 1.1, τα επιβαλλόμενα όρια που αφορούν την διαθεσιμότητα του συστήματος και τα αποτελέσματά της θεωρούνται γενικά στατιστικά. Το περιθώριο διαλείψεων,  $M_{link}$ , αντιπροσωπεύει την ποσότητα της απόσβεσης που μπορεί να γίνει ανεκτή από συγκεκριμένο σύστημα με συγκεκριμένο μήκος ζεύξης.

## 2.6 Μοριακή απορρόφηση

Η μοριακή απορρόφηση όπως ειπώθηκε αναλυτικά και παραπάνω οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ της οπτικής ακτινοβολίας και των ατόμων – μορίων του μέσου ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $A_r$ , κτλ.) και είναι αυτή που προκαλεί κυρίως την εξασθένιση καθαρού αέρα,  $\gamma_{clear\_air}$ . Ο συντελεστής απορρόφησης οφείλεται στο είδος και τη συγκέντρωση των μορίων του αερίου. Οι φασματικές μεταβολές του συντελεστή απορρόφησης καθορίζουν το φάσμα απορρόφησης. Η μορφή αυτού του φάσματος οφείλεται στις πιθανές ενεργειακές στάθμες του αερίου που προκύπτουν από τις μεταβάσεις των ηλεκτρονίων, τις ταλαντώσεις των ατόμων και την περιστροφή των μορίων. Η αύξηση της πίεσης ή της θερμοκρασίας τείνει να διευρύνει τη φασματική απορρόφηση, με τη διέγερση υψηλότερων ενεργειακών σταθμών και με το φαινόμενο Doppler. Η μοριακή απορρόφηση είναι ένα επιλεκτικό φαινόμενο που έχει ως αποτέλεσμα σχετικά διαυγή ατμοσφαιρικά παράθυρα κατάλληλα για διάδοση και σχετικά σκοτεινές μπάντες συχνοτήτων με έντονο το φαινόμενο της ατμοσφαιρικής απορρόφησης.

Τα διαυγή παράθυρα στο οπτικό φάσμα είναι:

- Ορατό και πολύ κοντινό υπέρυθρο: από 0.4 σε 1.4  $\mu\text{m}$
- Κοντινό υπέρυθρο ή υπέρυθρο: από 1.4 έως 1.9  $\mu\text{m}$  και 1.9 έως 2.7  $\mu\text{m}$
- Μέσο υπέρυθρο ή υπέρυθρο II: από 2.7 έως 4.3  $\mu\text{m}$  και 4.5 έως 5.2  $\mu\text{m}$
- Μακρινό υπέρυθρο ή υπέρυθρο III: από 8 έως 14  $\mu\text{m}$
- Ακραίο υπέρυθρο ή υπέρυθρο IV: από 16 έως 28  $\mu\text{m}$ .

Τα αέρια μόρια έχουν κβαντισμένες ενεργειακές στάθμες και μπορούν να απορροφούν ενέργεια ή φωτόνια υπό την επίδραση προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και να διεγερθούν από ένα αρχικό ενεργειακό επίπεδο  $e_i$  σ' ένα υψηλότερο  $e_f$ . Έτσι η εκπεμπόμενη ενέργεια εξασθενίζει από την απώλεια αυτών των φωτονίων.

Αυτή η διαδικασία συμβαίνει όταν η συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος αντιστοιχεί ακριβώς σε μία από τις συχνότητες συντονισμού (resonance frequencies) του υπό εξέταση μορίου οι οποίες δίνονται από την:

$$u_0 = \frac{e_f - e_i}{h} \quad (1.3)$$

Όπου  $u_0$ : η συχνότητα του προσπίπτοντος (Hz)

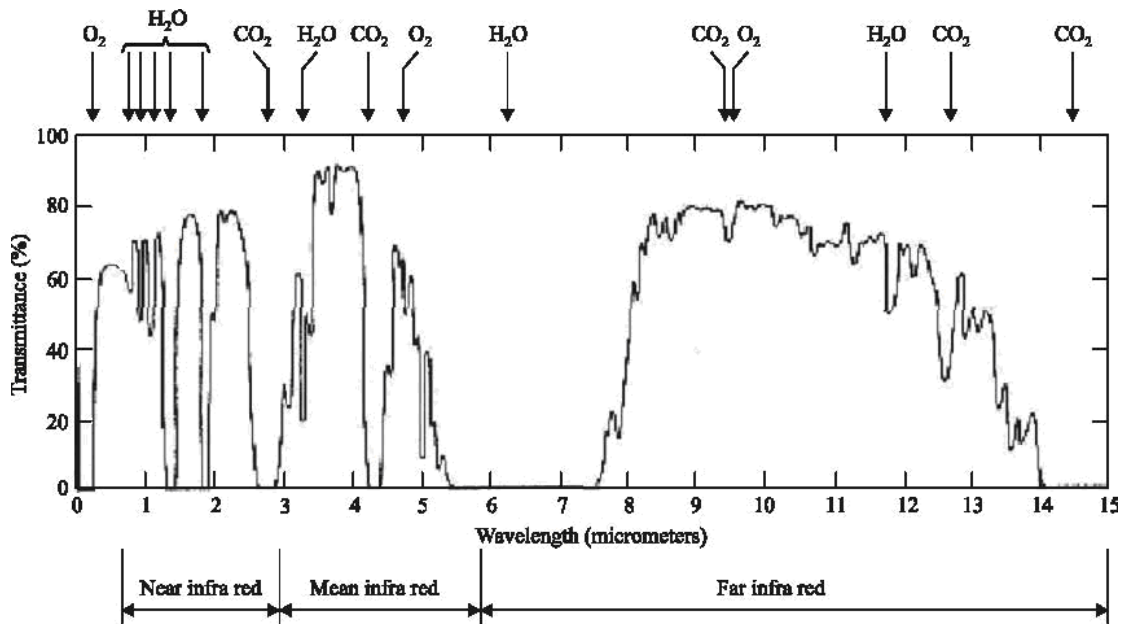
$h$ : η σταθερά του Planck,  $h = 6.6262 \cdot 10^{-34}$  J-s.

Οι θεμελιώδεις παράμετροι που καθορίζουν την απορρόφηση που παράγεται από τον μοριακό συντονισμό είναι:

- οι πιθανές ενεργειακές στάθμες για κάθε είδος μορίου
- η πιθανότητα μετάβασης ενός ηλεκτρονίου από την ενεργειακή στάθμη  $e_i$  στην  $e_f$
- η ένταση των γραμμών συντονισμού στο φάσμα και
- το φυσικό προφίλ της κάθε συνιστώσας

Γενικά το προφίλ κάθε γραμμής απορρόφησης τροποποιείται από το φαινόμενο Doppler, όταν τα μόρια κινούνται σχετικά με το προσπίπτον κύμα, και από τις συγκρούσεις ένεκα της αλληλεπίδρασης των μορίων. Αυτά τα φαινόμενα οδηγούν σε φασματική διεύρυνση των φυσικών συνιστωσών του κάθε μορίου.

Για συγκεκριμένα μόρια , όπως το διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub>, τους υδρατμούς (H<sub>2</sub>O), το άζωτο (N<sub>2</sub>) και το οξυγόνο (O<sub>2</sub>), τα προφίλ των φασματικών συνιστωσών απορρόφησης μπορεί να εκτείνονται αρκετά μακριά από την κεντρική γραμμή. Αυτή η ιδιότητα οδηγεί σε μια συνέχεια της απορρόφησης. Το Σχήμα 1 παρακάτω απεικονίζει την μετρηθείσα ονομαστική ατμοσφαιρική μετάδοση λόγω των μοριακών απορροφήσεων σε μια οριζόντια ζεύξη 1820 m στο επίπεδο της θάλασσας.



Σχήμα 1: Ατμοσφαιρική διάδοση (μετάδοση) λόγω ατμοσφαιρικής απορρόφησης

Συχνά τα μήκη κύματος των lasers επιλέγονται εντός των ατμοσφαιρικών παραθύρων μετάδοσης κι' έτσι το  $\gamma_{clear\_air}$  είναι αμελητέο. Τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται στα FSO συστήματα είναι κοντά στα 690, 780 και 1550 nm. Παρόλα αυτά, σε σύγκριση με τις σχετικά αμόλυντες προαστιακές περιοχές, οι εφαρμογές σε πυκνοκατοικημένες περιοχές με υψηλή περιεκτικότητα σε αερολύματα μπορεί να εκμεταλλευτούν κάποιο διαφορετικό μήκος κύματος.

## 2.7 Μοριακή σκέδαση

Η μοριακή σκέδαση οφείλεται στην αλληλεπίδραση του φωτός με τα σωματίδια της ατμόσφαιρας των οποίων το μέγεθος είναι μικρότερο από το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός. Η σκέδαση από αέρια μόρια της ατμόσφαιρας (σκέδαση Rayleigh) συμβάλλει στη συνολική εξασθένιση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.



Ο συντελεστής απόσβεσης λόγω της μοριακής σκέδασης,

$$\beta_m(\lambda) = \frac{24\pi^3}{\rho\lambda^4} 10^3 \left( \frac{[n(\lambda)]^2 - 1}{[n(\lambda)]^2 + 2} \right) \left( \frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} \right) \quad (1.4)$$

Όπου:

$\beta_m(\lambda)$ : ο μοριακός συντελεστής σκέδασης ( $\text{Km}^{-1}$ )

$\lambda$ : μήκος κύματος ( $\mu\text{m}$ )

$\rho$ : μοριακή πυκνότητα ( $\text{m}^{-3}$ )

$\delta$ : συντελεστής αποπόλωσης του αέρα ( $\cong 0.03$ )

$n(\lambda)$ : συντελεστής διάθλασης του αέρα

Μία προσεγγιστική τιμή του  $\beta_m(\lambda)$  είναι:

$$\beta_m(\lambda) = A\lambda^{-4} \quad (1.5)$$

Όπου:

$$A = 1.09 * 10^{-3} \frac{PT_0}{P_0T} \quad (1.6)$$

και  $P$ : ατμοσφαιρική πίεση (mbar)

$P_0$ : 1013 mbar

$T$ : ατμοσφαιρική θερμοκρασία (K) και

$T_0$ : 273.15 K

Η μοριακή σκέδαση είναι αμελητέα στα μήκη κύματος του υπέρυθρου και η σκέδαση Rayleigh κύρια επηρεάζει τα υπεριώδη μέχρι τα ορατά μήκη κύματος. Το γαλάζιο χρώμα του φόντου του καθαρού ουρανού οφείλεται σε αυτού του τύπου τη σκέδαση.

## 2.8 Απορρόφηση αερολυμάτων

Τα αερολύματα είναι εξαιρετικά μικρά στερεά ή υγρά σωματίδια που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα και πέφτουν με πολύ μικρή ταχύτητα (πάγος, σκόνη, καπνός κτλ.) Το μέγεθός τους κινείται ανάμεσα στα  $10^{-2}$  και  $100\mu\text{m}$ . Σωματίδια ομίχλης, σκόνης και σταγονιδίων αφρού των θαλάσσιων κυμάτων (ψεκάδες κύματος) είναι παραδείγματα των αερολυμάτων.

Τα αερολύματα επηρεάζουν τις συνθήκες της ατμοσφαιρικής εξασθένησης λόγω της χημικής του φύσης, του μεγέθους τους και της συγκέντρωσής τους. Σε θαλάσσια περιβάλλοντα, τα αερολύματα αποτελούνται κυρίως από σταγονίδια νερού (αφρός, ομίχλη, ψιλοβρόχι και βροχή), κρυστάλλους από αλάτι και διάφορα σωματίδια που προέρχονται από την υφαλοκρηπίδα. Το είδος και η πυκνότητα αυτών των σωματιδίων εξαρτάται από την απόσταση και τα χαρακτηριστικά των γειτονικών ακτών.

Ο συντελεστής απόσβεσης λόγω της απορρόφησης από τα αερολύματα,  $\alpha_n(\lambda)$  ( $\text{Km}^{-1}$ ), είναι:

$$\alpha_n(\lambda) = 10^5 \int_0^{\infty} Q_a \left( \frac{2\pi r}{\lambda}, n'' \right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr \quad (1.7)$$

Όπου  $\lambda$ : μήκος κύματος ( $\mu\text{m}$ )

$dN(r)/dr$ : η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου ( $\text{cm}^{-4}$ )

$n''$ : το φανταστικό μέρος του συντελεστή ανάκλασης,  $n$ , του θεωρούμενου αερολύματος

$r$ : ακτίνα των σωματιδίων ( $\text{cm}$ )

$Q_a \left( \frac{2\pi r}{\lambda}, n'' \right)$ : διατομή απορρόφησης για δεδομένο τύπο αερολύματος

Η θεωρία της σκέδασης αερολυμάτων (Mie theory) προβλέπει για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ότι περιθλάται από σφαιρικά σωματίδια. Η διατομή απορρόφησης ( $Q_a$ ) και σκέδασης ( $Q_d$ ) -που εισάγεται παρακάτω-, εξαρτάται από το μέγεθος του σωματιδίου, τον δείκτη διάθλασης και το μήκος κύματος του προσπίπτοντος. Ο συντελεστής διάθλασης των αερολυμάτων εξαρτάται από τη χημική σύστασή τους και το μήκος κύματος. Αναπαριστάται σαν  $n = n' + n''$ , όπου το  $n'$  είναι συνάρτηση της σκεδαζόμενης ποσότητας του σωματιδίου και το  $n''$  είναι συνάρτηση της απορρόφησης του σωματιδίου.

Στην ορατή και κοντά υπέρυθρη φασματική περιοχή, το φανταστικό μέρος του συντελεστή ανάκλασης είναι εξαιρετικά χαμηλό και μπορεί να αμεληθεί στον υπολογισμό της συνολικής απόσβεσης. Στην περίπτωση του μακρινού υπέρυθρου, το φανταστικό μέρος του συντελεστή διάθλασης πρέπει να συνυπολογιστεί.

## 2.9 Σκέδαση αερολυμάτων

Η σκέδαση αερολυμάτων (σκέδαση Mie) συμβαίνει όταν το μέγεθος του σωματιδίου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός. Η εξασθένιση είναι συνάρτηση της συχνότητας και της ορατότητας και η ορατότητα σχετίζεται με την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων. Αυτό το φαινόμενο αποτελεί τον πιο περιοριστικό παράγοντα για ανάπτυξη των οπτικών συστημάτων ελευθέρου χώρου σε μεγάλες αποστάσεις. Στην οπτική περιοχή, το φαινόμενο αυτό προκαλείται κυρίως από υδρονέφωση και ομίχλη. Η εξασθένιση στην οπτική περιοχή μπορεί να φτάσει τα 300dB/km σε αντίθεση με την περιοχή μηκών κύματος της τάξης των mm, όπου η εξασθένιση είναι τυπικά μερικά dB/Km.

Ο συντελεστής εξασθένισης λόγω της σκέδασης αερολυμάτων  $\beta_n(\lambda)$  ( $\text{Km}^{-1}$ ), είναι:

$$\beta_n(\lambda) = 10^5 \int_0^{\infty} Q_d \left( \frac{2\pi r}{\lambda}, n' \right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr \quad (1.8)$$

Όπου  $\lambda$ : μήκος κύματος ( $\mu\text{m}$ )

$dN(r)/dr$ : η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου ( $\text{cm}^{-4}$ )

$n'$ : το πραγματικό μέρος του συντελεστή ανάκλασης,  $n$ , του θεωρούμενου αερολύματος

$r$ : ακτίνα των σωματιδίων ( $\text{cm}$ )

$Q_d \left( \frac{2\pi r}{\lambda}, n'' \right)$ : διατομή σκέδασης για δεδομένο τύπο αερολύματος

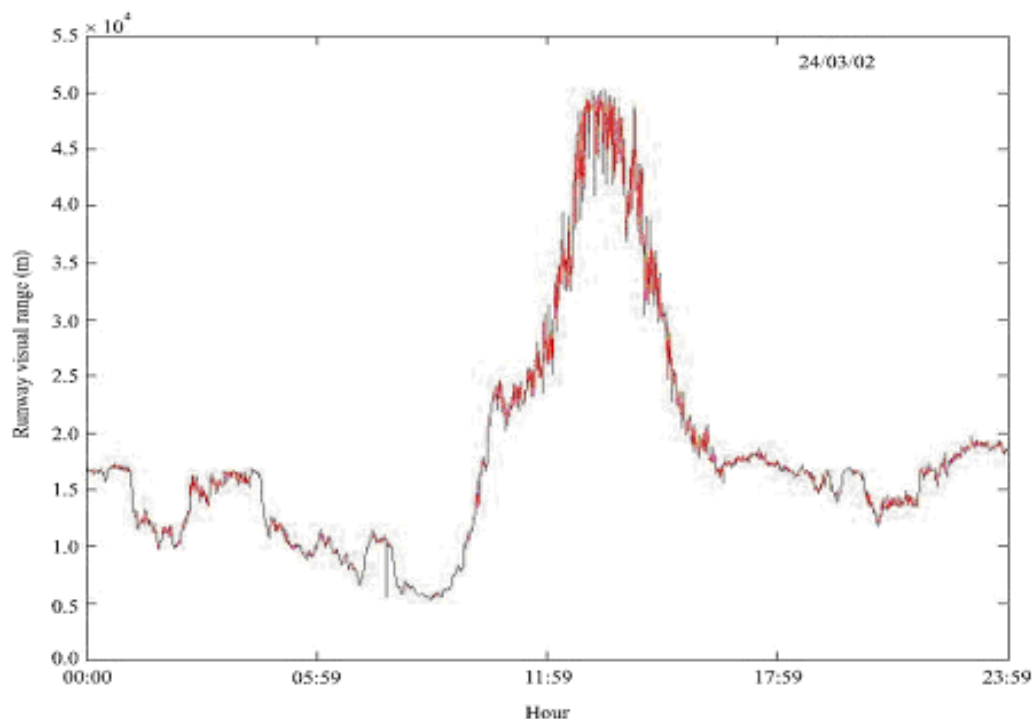
Η θεωρία Mie προβλέπει τον συντελεστή σκέδασης  $Q_d$  λόγω αερολυμάτων, υποθέτοντας ότι τα σωματίδια είναι σφαιρικά και ικανοποιητικά διαχωρισμένα έτσι ώστε το σκεδαζόμενο πεδίο να μπορεί να υπολογιστεί υποθέτοντας σκέδαση μακρινού πεδίου.

Η διατομή σκέδασης  $Q_d$  εξαρτάται έντονα από το μέγεθος των αερολυμάτων συγκρινόμενο με το μήκος κύματος και είναι πολύ συχνοεπιλεκτική συνάρτηση για σωματίδια των οποίων η ακτίνα είναι μικρότερη ή ίση με το μήκος κύματος. Φτάνει την μέγιστη τιμή (3.8) για ακτίνα σωματιδίου ίση με το μήκος κύματος, περίπτωση στην οποία η σκέδαση είναι μέγιστη. Καθώς το μέγεθος του σωματιδίου αυξάνει, η διατομή σκέδασης προσεγγίζει ασυμπτωτικά την τιμή 2.

Αφού η συγκέντρωση των αερολυμάτων, η σύσταση και η κατανομή του μεγέθους τους μεταβάλλεται χρονικά και χωρικά, είναι δύσκολο να προβλεφθεί η καθυστέρηση που οφείλεται σ' αυτά. Παρόλο που η συγκέντρωσή τους είναι στενά συνδεδεμένη με την οπτική ορατότητα, δεν υπάρχει μοναδική κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων για δοθείσα ορατότητα.

Η ορατότητα χαρακτηρίζει την διαφάνεια της ατμόσφαιρας όπως αυτή υπολογίζεται από ανθρώπινη παρατήρηση. Μετρείται από την Οπτική Έκταση Διαδρόμου (Runway Visual Range - RVR) που είναι στην μετεωρολογία η απόσταση στην οποία ο πιλότος ενός αεροπλάνου μπορεί να δει τα φώτα που καθορίζουν τους διαδρόμου ενός αεροδρομίου [3] ή η απόσταση για την οποία μια φωτεινή δέσμη πρέπει να ταξιδέψει διαμέσου της ατμόσφαιρας έτσι ώστε η έντασή της (ή η φωτεινή της ροή) να μειωθεί κατά 0.05 φορές από την αρχική της τιμή. Δίνεται στα Μετεωρολογικά Τηλεγραφήματα / METAR και μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια είτε μετρητών διαχύσεως (diffusimeter) είτε μετρητών διάδοσης/μετάδοσης (transmissometer).

Το Σχήμα 2 απεικονίζει ένα παράδειγμα των μεταβολών της Οπτικής Έκτασης Διαδρόμου στην La Turbie της Γαλλίας κατά τη διάρκεια μια μέρας με υψηλή ορατότητα.



Σχήμα 2: Παράδειγμα των μεταβολών της Οπτικής Έκτασης Διαδρόμου στην La Turbie της Γαλλίας κατά τη διάρκεια μια μέρας με υψηλή ορατότητα.

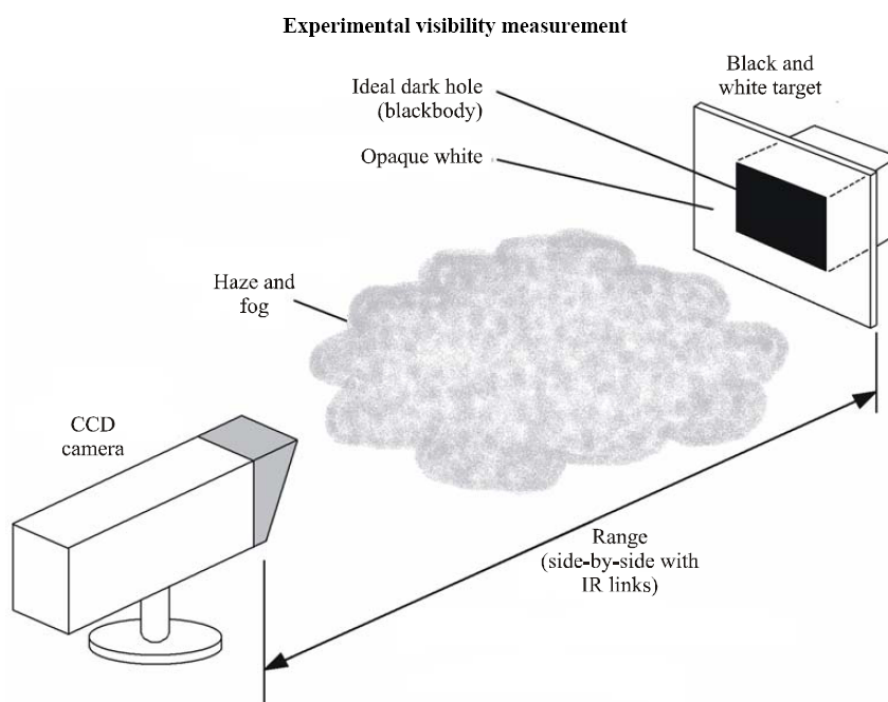
Εναλλακτικά, η ορατότητα κατά μήκος του δρόμου διάδοσης μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας μια charge-coupled device (CCD) camera και ένα μαύρο και άσπρο στόχο αναφοράς. Για αυτή την μέθοδο, το οπτικό εύρος (visual range)  $V_r$ , δίνεται από:

$$V_r = \frac{\ln(0.02)}{\ln(C/C_0)} d \quad (1.9)$$

Όπου  $C$  είναι η μετρούμενη αντίθεση (contrast) μεταξύ των περιοχών μαύρου και άσπρου του στόχου,  $C_0$  είναι η πραγματική αναλογία της αντίθεσης του στόχου (μετράται κοντά σε αυτόν) και  $d$  είναι η απόσταση από τον στόχο. Η τιμή του  $C$  δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{L_w - L_b}{L_w + L_b} = 0.02 = e^{-b_{EX} \cdot V_r} \quad (1.10)$$

Όπου  $L_w$  και  $L_b$  είναι η φωτεινότητα των άσπρων και μαύρων μερών του στόχου αντίστοιχα,  $b_{EX}$  είναι ο συντελεστής εξάλειψης και  $V_r$  το οπτικό εύρος. Το Σχήμα 3 απεικονίζει τον ιδανικό στόχο, ο οποίος αποτελείται από ένα άσπρο πλαίσιο με μια κοιλότητα στο κέντρο, της οποίας ολόκληρη η (εσωτερική – εντός της τρύπας) επιφάνεια είναι μαύρη για την αποφυγή οποιασδήποτε άμεσα σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.



Σχήμα 3: Ο ιδανικός στόχος

Όλα τα οπτικά χαρακτηριστικά των αερολυμάτων και ιδιαίτερα της ομίχλης, σχετίζονται με την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως η παράμετρος κλειδί για τον καθορισμό των φυσικών και οπτικών ιδιοτήτων της ομίχλης.

Γενικά η κατανομή αυτή αντιπροσωπεύεται από αναλυτικές συναρτήσεις όπως η λογαριθμική για τα αερολύματα και την τροποποιημένη κατανομή gamma για την ομίχλη. Η τελευταία χρησιμοποιείται ευρέως στην μοντελοποίηση διαφόρων τύπων ομίχλης και νεφώσεων και δίνεται από:

$$N(r) = ar^a \exp(-br) \quad (1.11)$$

όπου  $N(r)$  είναι ο αριθμός των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα αύξησης της ακτίνας  $r$  και του  $a$  ενώ  $a$  και  $b$  είναι παράμετροι που χαρακτηρίζουν την κατανομή μεγέθους του σωματιδίου.

Τυπικές παράμετροι της τροποποιημένης gamma κατανομής δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1: Διάφορες παράμετροι της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων για πυκνή και μετριασμένη ομίχλη:

	$a$	$a$	$b$	$N(\text{cm}^{-3})$	$W(\text{g/m}^3)$	$r_m (\mu\text{m})$	$V(\text{m})$
Πυκνή ομίχλη	3	0.027	0.3	20	0.37	10	130
Μετριασμένη ομίχλη	6	607.5	3	200	0.02	2	450

Όπου:

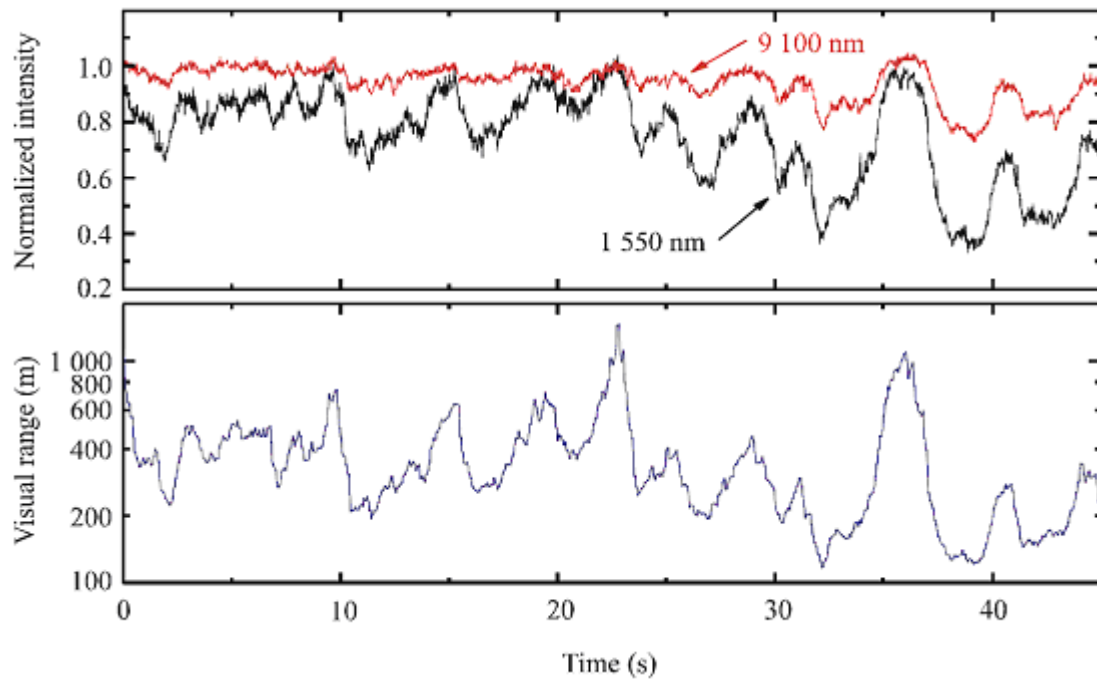
$N$ : ο συνολικός αριθμός των σωματιδίων νερού ανά μονάδα όγκου ( $\text{cm}^3$ )

$r_m$ : ακτίνα ( $\mu\text{m}$ ) για την οποία η κατανομή παρουσιάζει μέγιστο

$W$ : περιεχόμενο του υγρού σε νερό ( $\text{g/m}^3$ )

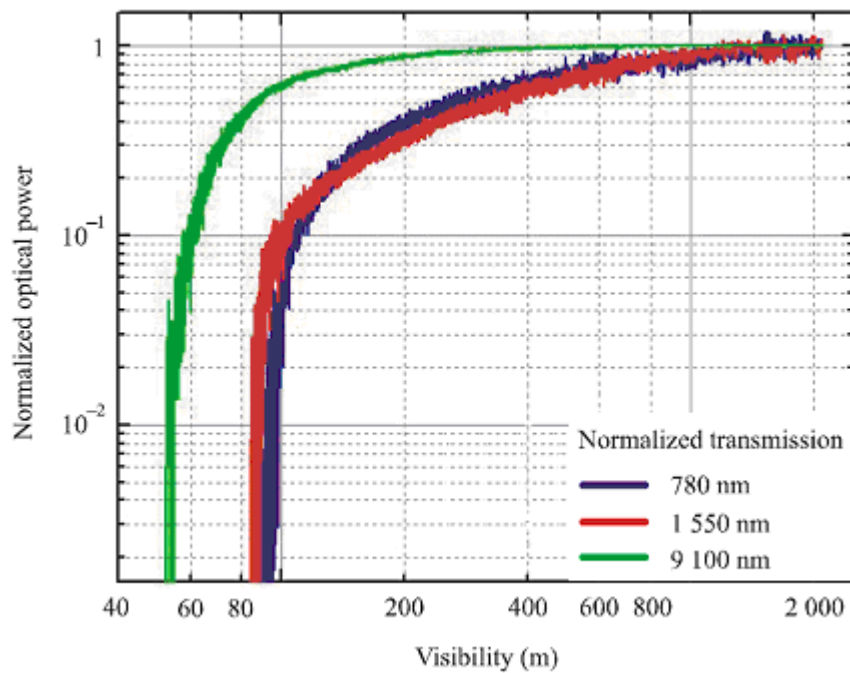
$V$ : ορατότητα σχετιζόμενη με το είδος της υγρασίας (m)

Η λαμβανόμενη στάθμη του σήματος μπορεί να υποστεί σημαντικές βραχύχρονες διακυμάνσεις λόγω των μεταβολών της ορατότητας. Το Σχήμα 4 παριστάνει τις κανονικοποιημένες λαμβανόμενες εντάσεις μιας μακρινής και μιας μέσης υπέρυθρης ζεύξης, μαζί με την ορατότητα της κατά τη διάρκεια μικρών χρονοσχημάτων.



Σχήμα 4: Κανονικοποιημένες λαμβανόμενες εντάσεις μιας μακρινής και μιας μέσης υπέρυθρης ζεύξης, μαζί με την ορατότητα της κατά τη διάρκεια μικρών χρονοσχισμών.

Το σχήμα 5 δείχνει την κανονικοποιημένη οπτική ισχύ σαν συνάρτηση της οπτικής εμβέλειας, μετρημένη στα 780 nm, 1550 nm και 9100 nm.

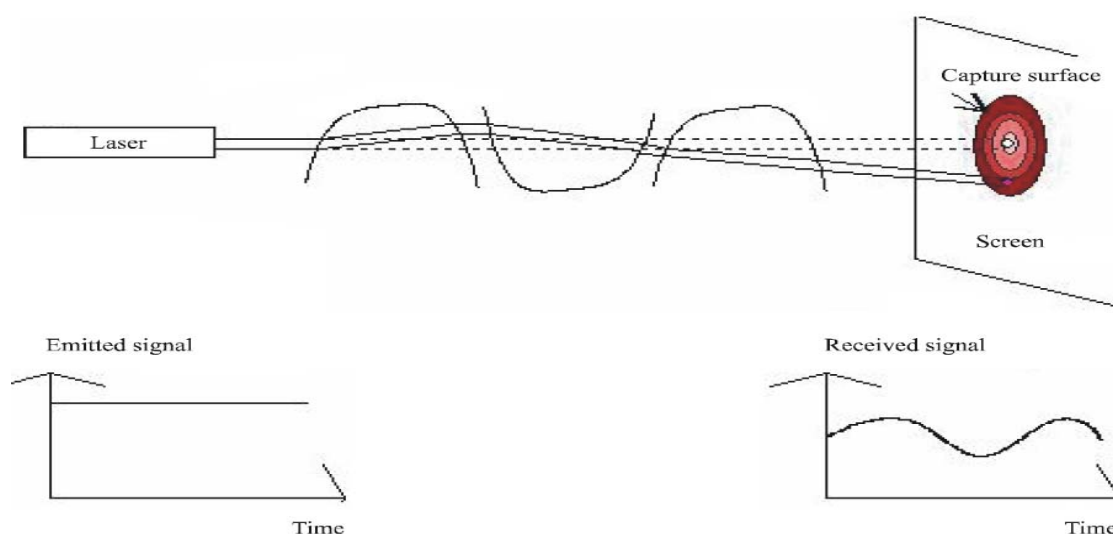


Σχήμα 5: Κανονικοποιημένη οπτική ισχύ σαν συνάρτηση της οπτικής εμβέλειας, μετρημένη στα 780 nm, 1550 nm και 9100 nm.

Σε πολλές περιπτώσεις πυκνής ομίχλης, η κατανομή των σωματιδίων δεν είναι ομοιόμορφη. Σε αυτή την περίπτωση, οι ζεύξεις μακρινού υπέρυθρου μπορούν να παράσχουν μεγαλύτερη διαθεσιμότητα γιατί τα 10μm του μήκους κύματος μπορούν να υπερνικήσουν τις απώλειες σε πυκνή ομίχλη και να διατηρήσουν την διαθεσιμότητα της ζεύξης ενώ μικρότερα μήκη κύματος αδυνατούν.

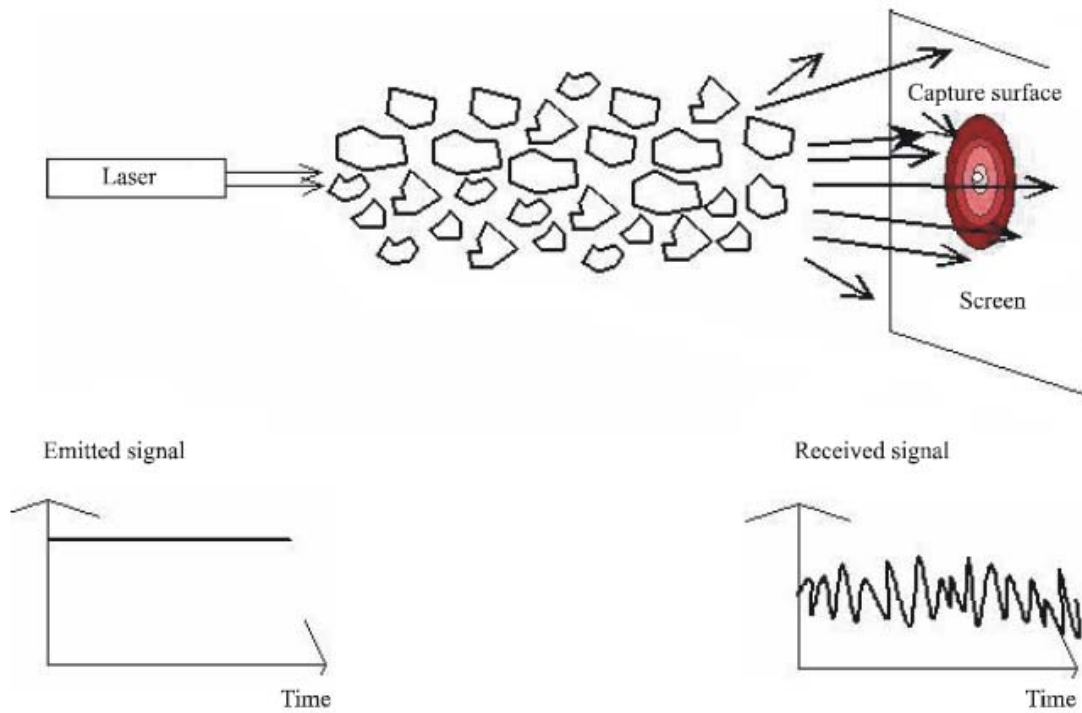
## 2.10 Σπινθηρισμοί

Τυχαίες κατανεμημένες κυψέλες ή κελιά (cells ή rockets) διαφορετικού δείκτη διάθλασης μπορούν να σχηματιστούν εντός του μέσου διάδοσης κάτω από την επίδραση στροβιλισμών. Αυτά τα κελιά προκαλούν σκέδαση, πολυόδευση και μεταβολές στη γωνία άφιξης, προκαλώντας διακυμάνσεις στη στάθμη του λαμβανόμενου κύματος με συχνότητες από 0.01 έως 200 Hz. Οι μεταβολές του μετώπου του κύματος προκαλούν όμοια, χρονομεταβλητή εστίαση και απόκλιση της φωτεινής δέσμης. Αυτές οι διακυμάνσεις του σήματος ονομάζονται σπινθηρισμοί. Το πλάτος και η συχνότητα των σπινθηρισμών εξαρτώνται από το μέγεθος των κελιών συγκρινόμενο με τη διάμετρο της δέσμης. Τα παρακάτω σχήματα παριστάνουν αυτό το αποτέλεσμα καθώς και τις μεταβολές (σε μήκος και συχνότητα) του λαμβανόμενου σήματος. Η δέσμη παρεκκλίνει (Σχήμα 6) όταν οι ανομοιογένειες είναι μεγάλες συγκρινόμενες με τη διατομή της δέσμης και η δέσμη διευρύνεται (Σχήμα 7) όταν οι ανομοιογένειες είναι μικρές συγκρινόμενες με τη διατομή της δέσμης. Ο συνδυασμός των πιο πάνω ανομοιογενειών έχει ως αποτέλεσμα τους σπινθηρισμούς (Σχήμα 8).

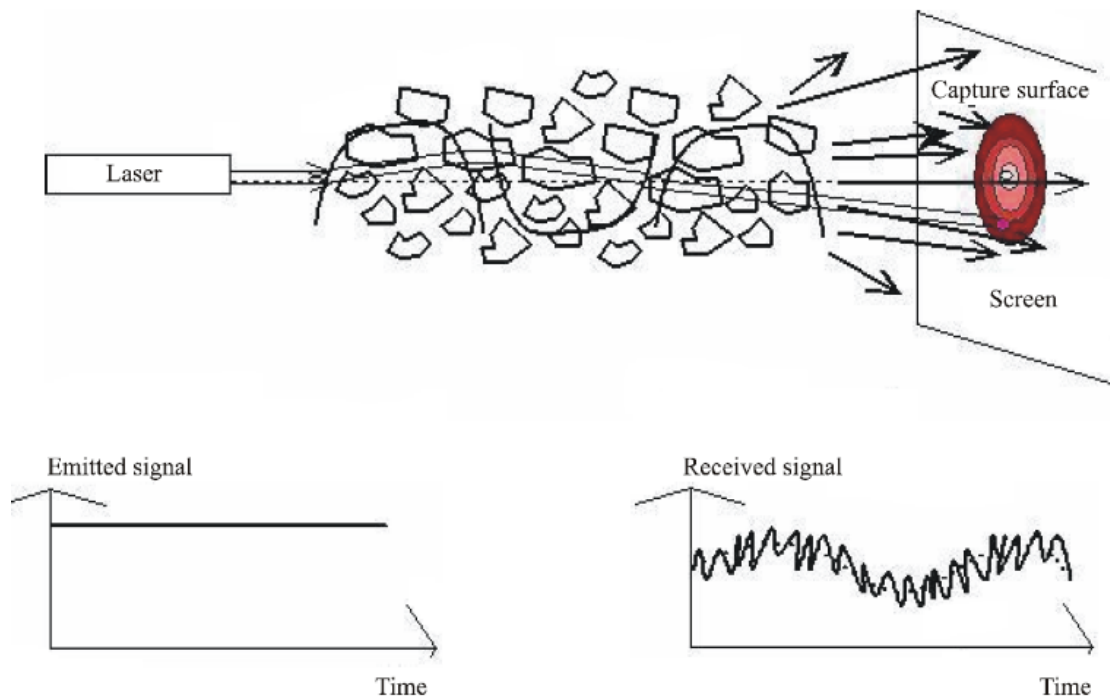


Σχήμα 6: Παρέκκλιση της δέσμης όταν οι ανομοιογένειες είναι μεγάλες συγκρινόμενες με τη διατομή της δέσμης





Σχήμα 7: όταν οι ανομοιογένειες είναι μεγάλες συγκρινόμενες με τη διατομή της δέσμης



Σχήμα 8: Ο συνδυασμός των πιο πάνω ανομοιογενειών

Τα αποτελέσματα των τροποσφαιρικών σπινθηρισμών μελετούνται γενικά από τον λογάριθμο του πλάτους  $\chi$  (dB) του παρατηρούμενου σήματος (``log-amplitude``), που ορίζεται ως η σχέση σε dB μεταξύ του στιγμιαίου πλάτους και της μέσης τιμής του

πλάτους του σήματος. Η ένταση και ο ρυθμός των διακυμάνσεων (η συχνότητα των σπινθηρισμών) αυξάνουν με το μήκος κύματος. Για επίπεδο κύμα και ασθενείς διακυμάνσεις, η διασπορά των σπινθηρισμών  $\sigma_\chi^2$  (dB<sup>2</sup>) μπορεί να εκφραστεί από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_\chi^2 = 0.124 \cdot k^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot L^{11/6} \quad (1.12)$$

όπου:

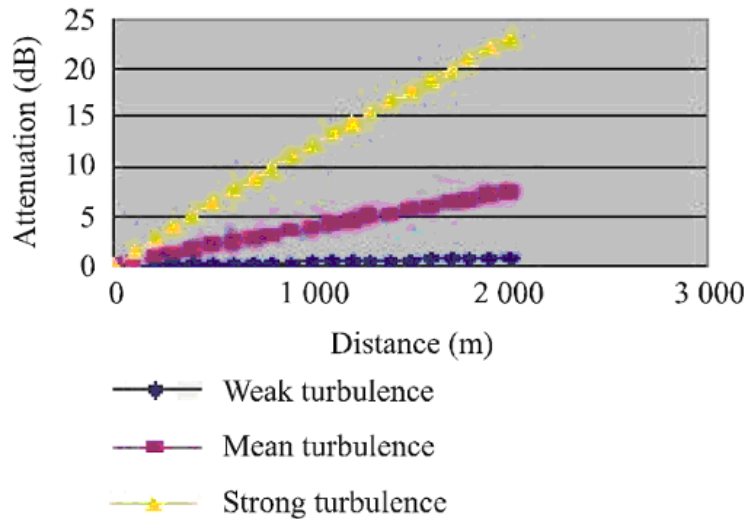
$k=2\pi/\lambda$ : το μήκος κύματος (m<sup>-1</sup>)

$L$ : το μήκος της ζεύξης (m)

$C_n^2$ : δομική παράμετρος του συντελεστή διάθλασης (m<sup>-2/3</sup>)

Οι σπινθηρισμοί έχουν μέγιστη τιμή τα  $4\sigma_\chi$  και η απόσβεση λόγω σπινθηρισμών είναι  $2\sigma_\chi$ . Για έντονες αναταραχές (turbulence), παρατηρείται ο κόρος της διασποράς που δίνεται από την παραπάνω σχέση. Η παράμετρος  $C_n^2$  έχει διαφορετική τιμή στα οπτικά μήκη κύματος παρά στα μήκη κύματος της τάξης των mm. Οι σπινθηρισμοί στα τελευταία οφείλονται πρώτιστα στις διακυμάνσεις λόγω υγρασίας ενώ στα οπτικά μήκη κύματος είναι κυρίως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Στα χιολιοστομετρικά μήκη κύματος, το  $C_n^2$  είναι προσεγγιστικά ίσο με  $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$  (γενικά στα χιολιοστομετρικά μήκη κύματος το  $C_n^2$  είναι μεταξύ των  $10^{-14}$  και  $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ ) και στα οπτικά μήκη κύματος η τιμή του  $C_n^2$  είναι προσεγγιστικά ίση με  $2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  για ασθενείς διαταραχές (γενικά στα οπτικά μήκη κύματος το  $C_n^2$  είναι μεταξύ  $10^{-16}$  και  $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ ).

Το παρακάτω σχήμα παριστάνει τη μεταβολή της απόσβεσης μιας οπτικής δέσμης μήκους κύματος 1550 nm για ασθενείς, μέσες και έντονες διαταραχές σε απόσταση μέχρι τα 2000m. Σαφέστατα, η απόσβεση αυξάνει καθώς οι διαταραχές αυξάνουν.



Σχήμα 9: Μεταβολή της απόσβεσης μιας οπτικής δέσμης μήκους κύματος 1550 nm για ασθενείς, μέσες και έντονες διαταραχές σε απόσταση μέχρι τα 2000m.

Οι σπινθηρισμοί μπορούν να μειωθούν με τη χρήση είτε πολλαπλά μεταδιδόμενων δεσμών είτε με δέκτες με μεγάλα ανοίγματα (apertures). Επίσης προκειμένου να μειώσουμε τις επιπτώσεις των σπινθηρισμών σε μια διαδρομή διάδοσης, τα συστήματα FSO δεν πρέπει να εγκαθίστανται κοντά σε θερμές επιφάνειες. Επειδή οι σπινθηρισμοί μειώνονται με το υψόμετρο, συνίσταται τα συστήματα FSO να εγκαθίστανται λίγο ψηλότερα από το την κορυφή της στέγης (>1m) και μακριά από πλευρικούς τοίχους, αν η εγκατάσταση λαμβάνει χώρα σε περιβάλλον που ομοιάζει με ερημικό.

Τα περιθώρια διαλείψεων που προσδιορίζονται για την αντιστάθμιση της απόσβεσης λόγω ομίχλης ή βροχής μπορούν επίσης να αντισταθμίσουν τις επιπτώσεις των σπινθηρισμών.

## 2.11 Γεωμετρική απόσβεση

Ακόμα και σε συνθήκες καθαρού ουρανού η δέσμη αποκλίνει και σαν αποτέλεσμα αυτού, ο δέκτης λαμβάνει μικρότερη ισχύ σήματος. Η απόσβεση λόγω της διασποράς της δέσμης με την αύξηση του μήκους της ζεύξης καλείται γεωμετρική απόσβεση και δίνεται από τον τύπο:

$$A_{\text{geo}}(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{S_d}{S_{\text{capture}}} \right) \quad (1.13)$$

όπου:

$S_{\text{capture}}$ : επιφάνεια συλλογής του δέκτη ( $m^2$ )

$S_d$ : περιοχή επιφανείας της μεταδιδόμενης δέσμης σε μήκος  $d$ . η οποία προσεγγίζεται από:  $S_d = \frac{\pi}{4}(d \cdot \theta)^2$  όπου  $\theta$ : η απόκλιση της δέσμης (mrad) και  $d$ : η απόσταση ανάμεσα σε πομπό και δέκτη (Km).

Είναι πιθανόν σε μικρές ζεύξεις, η επιφάνεια συλλογής του δέκτη να είναι μεγαλύτερη από το εμβαδόν της δέσμης. Σ' αυτές τις περιπτώσεις η τιμή του  $A_{geo}$  πρέπει να τεθεί στο μηδέν καθώς όλη η ενέργεια της δέσμης συλλέγεται.

## 2.12 Υπολογισμός της ειδικής απόσβεσης λόγω ομίχλης $\gamma_{fog}$ (σκέδαση Mie)

Αφού η αναλυτική προσέγγιση δεν είναι συχνά πρακτική για τον υπολογισμό της εξασθένισης λόγω της σκέδασης Mie, υιοθετήθηκαν εμπειρικοί μέθοδοι από την κοινότητα των FSO σύμφωνα με τις οποίες ο συντελεστής απόσβεσης λόγω της σκέδασης Mie σχετίζεται με την ορατότητα.

Μια εμπειρική σχέση που έχει αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της ειδικής απόσβεσης λόγω ομίχλης  $\gamma_{fog}$  (dB/Km) είναι:

$$\gamma_{fog}(\lambda) = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda}{550nm} \right)^{-q} \quad (1.14)$$

όπου:

$V$ : η ορατότητα (Km)

$\lambda$ : το μήκος κύματος (nm)

$q$ : συντελεστής που εξαρτάται από την κατανομή του μεγέθους των σκεδαζόμενων σωματιδίων. Έχει υπολογιστεί από πειραματικά δεδομένα και δίνεται από:

$$q = \begin{cases} 1.6, & V > 50 \text{ km} \\ 1.3, & 6\text{km} < V < 50 \text{ km} \\ 0.585V^{1/3}, & V < 6 \text{ km} \end{cases} \quad (1.15)$$

Για να βρούμε την τιμή της απόσβεσης που υπερβαίνεται για συγκεκριμένο ποσοστό του χρόνου  $p$  (π.χ για συγκεκριμένη πιθανότητα), χρειάζεται η τιμή της ορατότητας που δεν υπερβαίνει αυτό το ποσοστό  $p$  για την εξίσωση 1.14.

## 2.13 Εξασθένιση λόγω βροχής

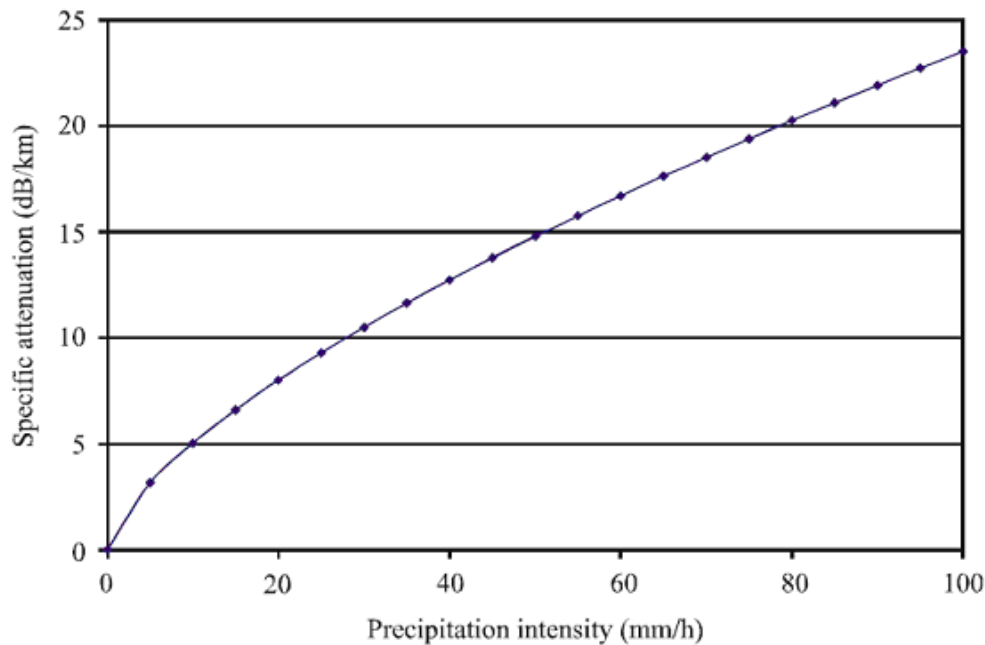
Η ειδική απόσβεση (dB/Km) από βροχή προσεγγίζεται γενικά από τη σχέση:

$$\gamma_{rain} = k \cdot R^\alpha \quad (1.16)$$

Όπου:

$R(p)$ : ο ρυθμός βροχόπτωσης (mm/h) ο οποίος υπερβαίνεται για δεδομένο ποσοστό του μέσου έτους,  $p$ , και για κάθε περιοχή. Η εξίσωση 1.16 δίνει την ειδική απόσβεση που υπερβαίνεται για χρονικό ποσοστό  $p$ . Οι παράμετροι  $k$  και  $a$  εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της βροχής και δίνονται σε πίνακες.

Το Σχήμα 10 απεικονίζει τυπικές μεταβολές της ειδικής απόσβεσης (dB/Km) λόγω των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων που παρατηρήθηκαν στο οπτικό και το υπέρυθρο φάσμα.



Σχήμα 10: Τυπικές μεταβολές της ειδικής απόσβεσης (dB/Km) λόγω των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων που παρατηρήθηκαν στο οπτικό και το υπέρυθρο φάσμα.

## 2.14 Απόσβεση λόγω χιονιού

Η ειδική απόσβεση (dB/Km) λόγω χιονιού σαν συνάρτηση του ρυθμού χιονόπτωσης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\gamma_{snow} = a \cdot S^b \quad (1.17)$$

Όπου:

$\gamma_{snow}$ : ειδική απόσβεση (db/Km) που οφείλεται στο χιόνι

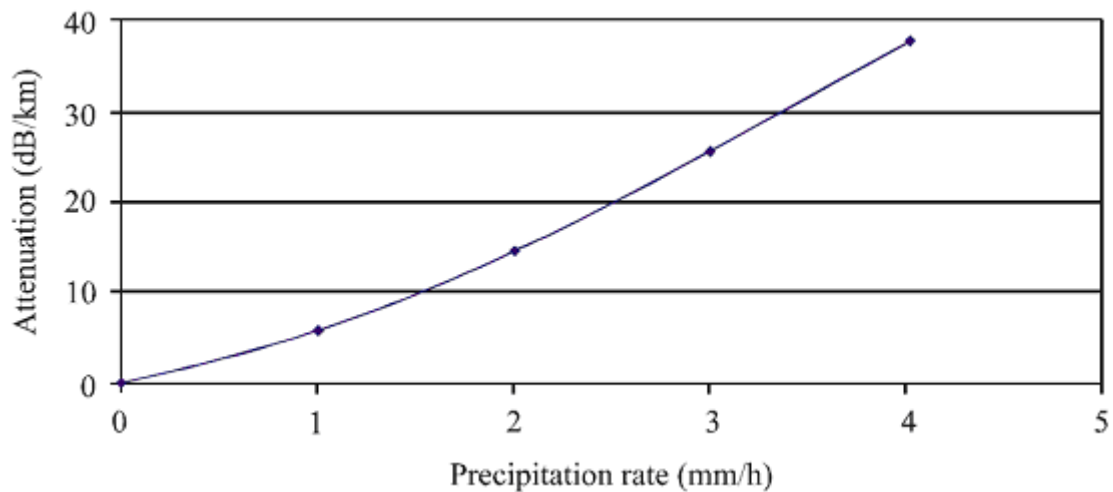
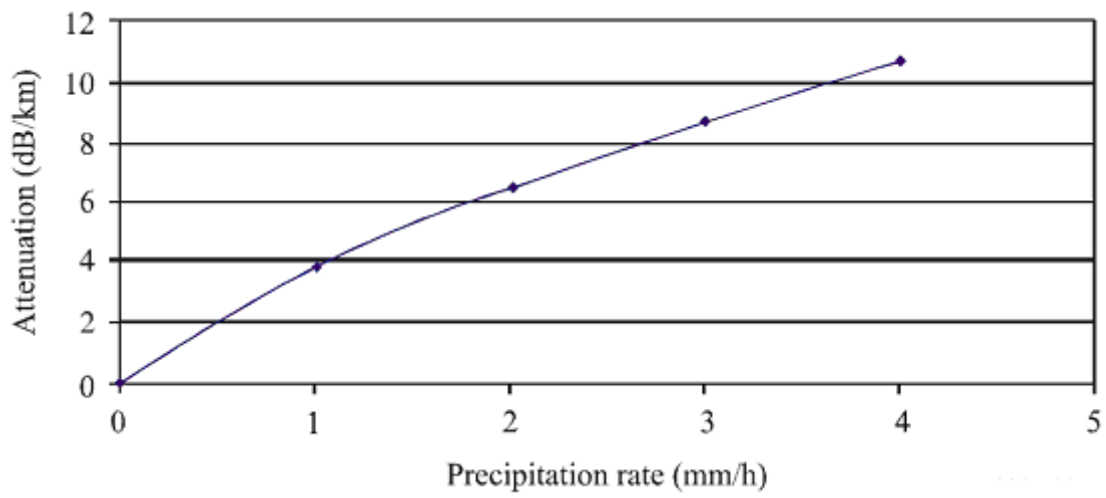
$S$ : ο ρυθμός χιονόπτωσης (mm/h)

$a$  και  $b$ : συναρτήσεις του μήκους κύματος,  $\lambda$  (nm) και δίνονται από τον πίνακα 2:

Πίνακας 2

	$a$	$b$
Υγρό χιόνι	$0.0001023\lambda_{nm}+3.7855466$	0.72
Στεγνό χιόνι	$0.0000542\lambda_{nm}+5.4958776$	1.38

Η εκτιμώμενη εξασθένιση ως συνάρτηση της χιονόπτωσης για  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  απεικονίζεται στα Σχήματα 11 και 12:



Σχήματα 11 και 12: εκτιμώμενη εξασθένιση ως συνάρτηση της χιονόπτωσης για  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$

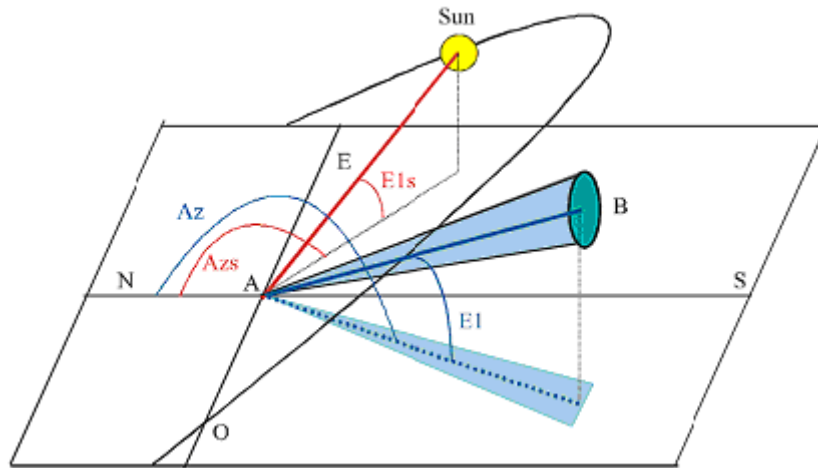
### 3. Επιπτώσεις του περιβάλλοντος φωτός

Η ηλιακή σύζευξη (solar conjunction) συμβαίνει όταν ο ήλιος ή μια εικόνα του ήλιου προερχόμενη από ανάκλαση είναι μέσα ή κοντά στο στιγμιαίο πεδίο προβολής (Instantaneous Field of View – IFOV-) ενός οπτικού δέκτη. Το λαμβανόμενο IFOV είναι γενικά το πολύ τόσο μεγάλο, όσο η απόκλιση της δέσμης κατά την διάδοση. Ο

σκοπός είναι να υπολογιστεί η πιθανότητα για την οποία η θέση του ήλιου είναι παράλληλη στην οπτική ζεύξη και η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας που εισχωρεί μέσα στον δέκτη είναι μεγαλύτερη από την ισχύ που λαμβάνεται από τον πομπό.

Η ηλιακή παρεμβολή συχνά μειώνεται διαμορφώνοντας κατάλληλα τη θέση του δέκτη έτσι ώστε να είναι πάντοτε εκτός άξονα (off-axis).

Το παρακάτω σχήμα παριστάνει τη γεωμετρία της ηλιακής διαδρομής στον ουρανό σε σχέση με την FSO ζεύξη (A ο δέκτης, B ο πομπός).



Σχήμα 13: Γεωμετρία της ηλιακής διαδρομής στον ουρανό σε σχέση με την FSO ζεύξη (A ο δέκτης, B ο πομπός).

Η ισχύς που ακτινοβολείται από τον ήλιο,  $P_{radiated}$  ( $W/m^2$ ) ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_{radiated} = 1200 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - E_{ls}\right) \quad (1.18)$$

όπου  $E_{ls}$  είναι το ηλιακό ύψος (rad).

Η ληφθείσα ισχύς δίνεται από:

$$P_{solar} = F_{solar} \cdot P_{radiated} \cdot S_{capture} \cdot W_{receiver} / 100 \quad (1.19)$$

όπου:

$F_{solar}$ : ηλιακή ισχύς ως συνάρτηση του μήκους κύματος

$S_{capture}$ : περιοχή επιφάνειας συλλογής του δέκτη ( $m^2$ )

$W_{receiver}$ : το εύρος ζώνης του δέκτη (nm)

$F_{solar}$ : μοντελοποιείται από την ακόλουθη προσαρμοστική καμπύλη:

$$F_{solar} = 8.97 \times 10^{13} \lambda^5 - 4.65 \times 10^9 \lambda^4 + 9.37 \times 10^{-6} \lambda^3 - 9.067 \times 10^{-3} \lambda^2 + 4.05 \lambda - 5.70 \quad (1.20)$$

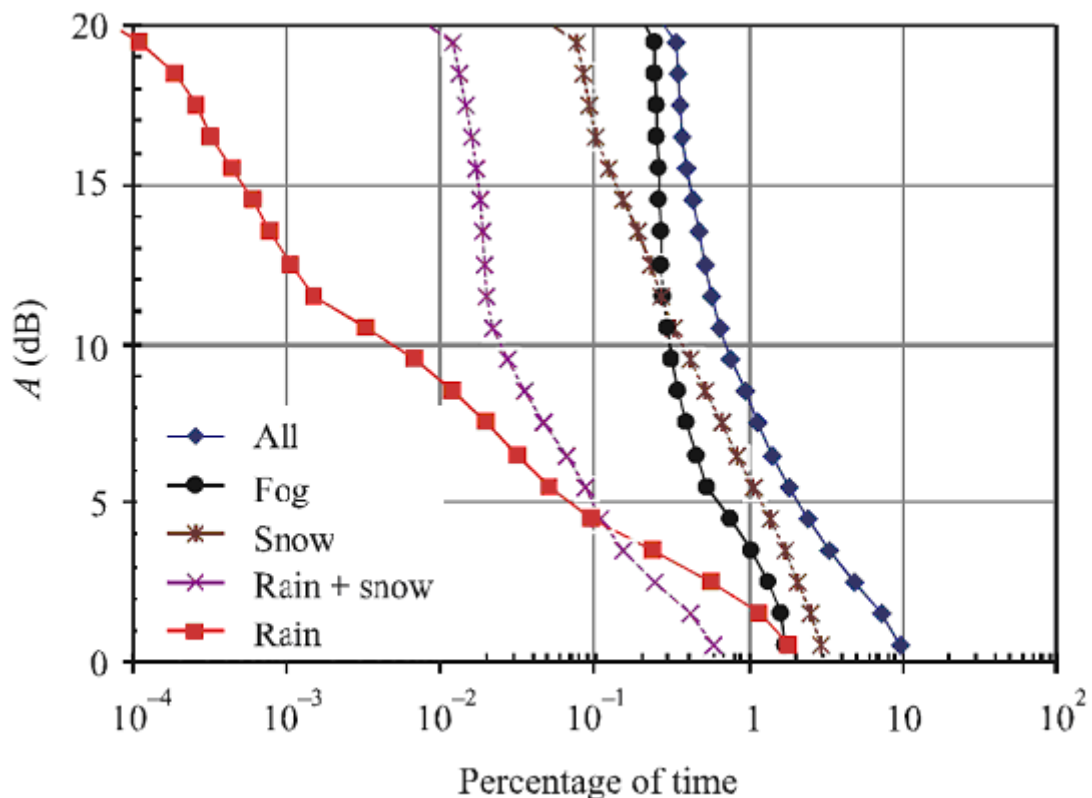
όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος (mm).

#### 4. Αθροιστική συνάρτηση κατανομής της απόσβεσης

Στο Σχήμα 14 παριστάνονται οι αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής της απόσβεσης για μήκος κύματος 850 nm σε 850 m διαδρομή διάδοσης που οφείλονται:

- σε όλους τους υδρομετεωρίτες
- ομίχλη
- βροχή
- βροχή και χιόνι
- χιόνι

Η μετρήσεις έγιναν στην Πράγα κατά τη διάρκεια ενός χρόνου. Όλα τα γεγονότα διαλείψεων ταξινομήθηκαν σύμφωνα με τις μετεωρολογικές συνθήκες που προκαλούν ένα συγκεκριμένο γεγονός διάλειψης. Οι μετεωρολογικές συνθήκες προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας μια φωτογραφία της περιοχής μεταξύ του πομπού και του δέκτη και χρησιμοποιώντας δεδομένα από ένα αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που βρισκόταν κοντά στην δέκτη. Τα συμβάντα διάλειψης που προκλήθηκαν από την ομίχλη και το χιόνι ήταν τα πιο σοβαρά.



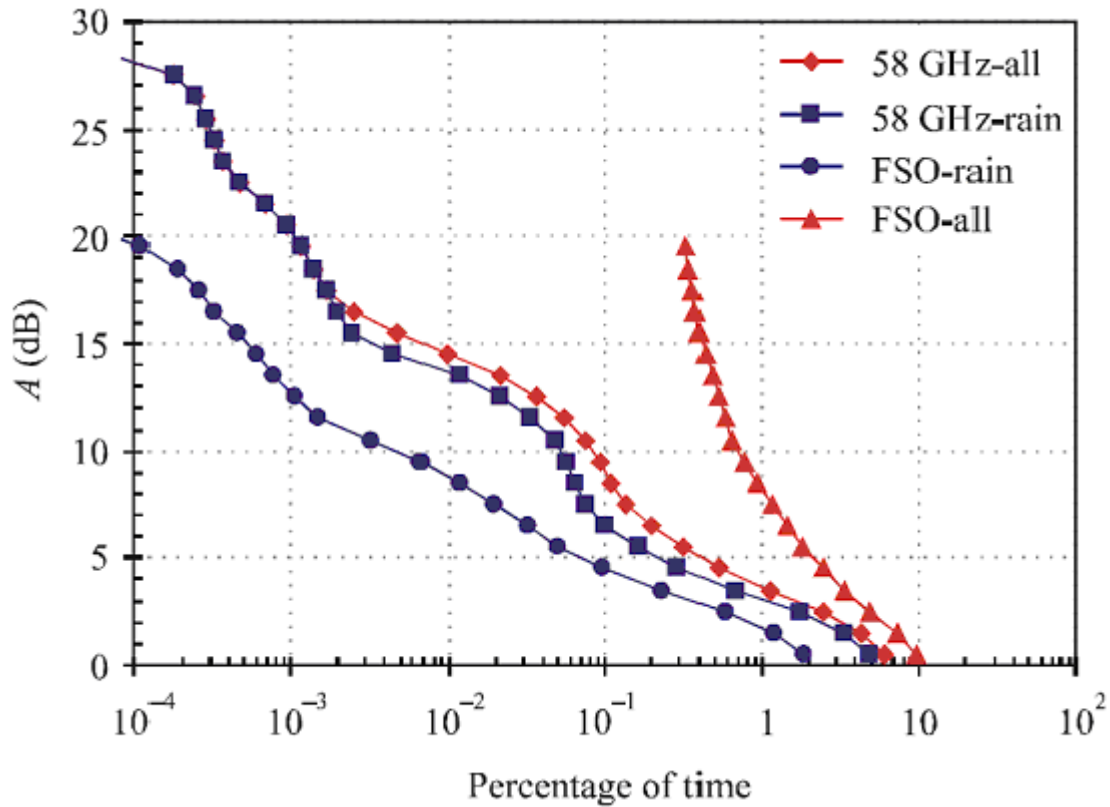
Σχήμα 14: Αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής της απόσβεσης για μήκος κύματος 850 nm σε 850 m διαδρομή διάδοσης.



## 5. Υβριδικά συστήματα FSO

Το σχήμα 15 συγκρίνει μετρήσεις απόσβεσης στα 58 GHz με μία οπτική ζεύξη στην ίδια διαδρομή διάδοσης που υπόκειται μόνο σε βροχή και σε όλους τους υδρομετεωρίτες. Η οπτική διαδρομή έχει μικρότερη εξασθένιση από το κύμα των 58 GHz κατά τη διάρκεια της βροχής. Τα υβριδικά ράδιο-οπτικά (RF/FSO) συστήματα μπορούν να βελτιώσουν την επίδοση της ασύρματης οπτικής (FSO) ζεύξης εκμεταλλευόμενα το γεγονός ότι ένας ραδιόδρομος υπόκειται σε εξασθένιση από τη βροχή αλλά είναι αναισθητός στην ομίχλη. Σε αντίθεση, μια οπτική διαδρομή υπόκειται σε έντονη εξασθένιση από την ομίχλη και είναι σχετικά αναισθητή στη βροχή.

Στο Σχήμα 15 απεικονίζονται ετήσιες αθροιστικές κατανομές που δίνουν μια εκτίμηση της επίδοσης του υποθετικού υβριδικού RF/FSO συστήματος. Θεωρούμε ένα υβριδικό σύστημα όπου οι RF και οι οπτικοί δρόμοι έχουν το ίδιο περιθώριο διαλείψεων,  $M_{link} = 20$  dB και χρησιμοποιείται μια απλή τεχνική διαφορικής λήψης έτσι ώστε τόσο το RF μέρος όσο και το FSO μέρος του συστήματος να είναι ενεργοποιημένα, εξαρτώμενα από τις στιγμιαίες τιμές απόσβεσης της RF και οπτικής διαδρομής. Υποτίθεται ότι το RF κομμάτι του συστήματος μετριάξει τις επιπτώσεις απουσία βροχής και το FSO κομμάτι μετριάξει τις επιπτώσεις της βροχής. Έτσι τα δύο μέρη λειτουργούν επικουρικά μετριάζοντας τις επιπτώσεις των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων και βελτιώνοντας την επίδοση του συστήματος.



Σχήμα 15: Ετήσιες αθροιστικές κατανομές που δίνουν μια εκτίμηση της επίδοσης του υποθετικού υβριδικού RF/FSO συστήματος.

Η σχέση διαθεσιμότητας (availability ratio- AR) ενός υβριδικού συστήματος υπολογίζεται από τα FSO χαρακτηριστικά βροχής τα οποία παρουσιάζονται στην Πίνακα 3.

Πίνακας 3

Σύστημα	Σχέση διαθεσιμότητας (AR) %
FSO τμήμα (850 nm)	99.7
RF τμήμα (58 GHz)	99.999
Υβριδικό RF/FSO	99.9999

## 6. Μετρήσεις ορατότητας

Η ορατότητα (Visibility –  $V$  [Km] ) ορίζεται ως η απόσταση από ένα αντικείμενο όπου η αντίθεση (contrast) της εικόνας του πέφτει 2% της πραγματικής της τιμής. Μετράται στα 550 nm, σε μήκος κύματος που αντιστοιχεί στο μέγιστο της έντασης του ηλιακού φάσματος και δίνεται από την σχέση του Koschmieder:

$$V(Km) = \frac{3.192}{\gamma_{550nm}} \quad (1.21)$$

όπου  $\gamma_{550nm}$  είναι ο συντελεστής εξάλειψης (extinction coefficient) του μέσου (ατμόσφαιρας και αερολυμάτων).

Ο διεθνής κώδικας ορατότητας που καθορίζει την εξασθένιση (dB/Km) για διάφορες κλιματικές συνθήκες παριστάνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4

International visibility code				
Weather conditions	Precipitation		Visibility (m)	Attenuation (dB/km)
		mm/h		
Dense fog			0	
Thick fog			50	315
Moderate fog			200	75
Light fog			500	28.9
Very light fog	Storm	100	770	18.3
			1 000	13.8
Light mist	Strong rain	25	1 900	6.9
			2 000	6.6
Very light mist	Average rain	12.5	2 800	4.6
			4 000	3.1
Clear air	Light rain	2.5	5 900	2
			10 000	1.1
Very clear air	Drizzle	0.25	18 100	0.6
			20 000	0.54
			23 000	0.47
			50 000	0.19

**Αναφορές:**

- [1] ITU-R Recommendation P.1814-1, “Prediction methods required for the design of terrestrial free-space optical links”, Geneva 2007
- [2] ITU-R Recommendation P.1817-1, “Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links”, Geneva 2007
- [3] <http://www.meteoclub.gr/themata/meteopedia>

## Κεφάλαιο 2

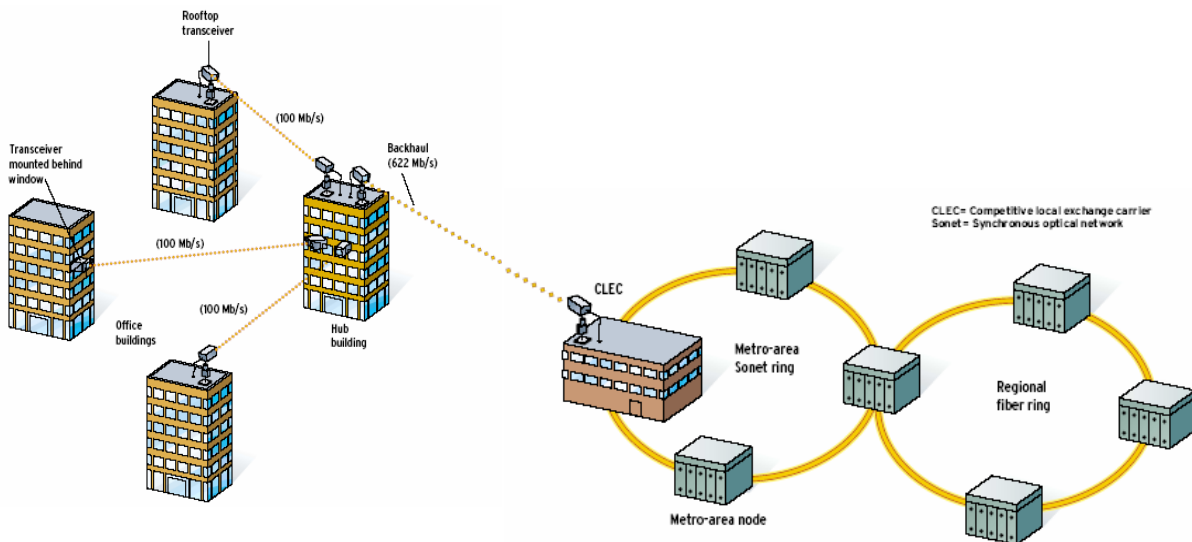
### Τα ασύρματα οπτικά δίκτυα ως μία δυναμικά αναδύομενη τεχνολογία στις τηλεπικοινωνίες

Τα ασύρματα οπτικά δίκτυα είναι μια τεχνολογία με πολλές εφαρμογές τόσο για κοντινές όσο και για μακρινές αποστάσεις. Από τις ενδο-δορυφορικές στις ενδο-κτηριακές ζεύξεις, τα συστήματα FSO προσφέρουν πολλές λύσεις και λειτουργούν σε συνεργασία με άλλα RF συστήματα και συστήματα καλωδίωσης, αυξάνοντας την διαθεσιμότητα του συνολικού συστήματος.

Το κύριο και καίριο σύμφυτο χαρακτηριστικό τους είναι η απουσία καλωδίωσης που προσφέρει άμεση, γρήγορη και οικονομική εγκατάσταση. Πρόσθετα, λειτουργούν σε μη αδειοδοτημένο μέρος του φάσματος, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την εγκατάστασή τους, χωρίς τις χρονοβόρες διαδικασίες και τη γραφειοκρατία που ταλαιπωρεί άλλα αντίστοιχα συστήματα που χρειάζονται αδειοδότηση. Παράλληλα ο εξοπλισμός τους μπορεί να αφαιρεθεί και να ξαναχρησιμοποιηθεί σε άλλο μέρος (ανακύκλωση εξοπλισμού) ενώ χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλό εύρος ζώνης.

Παρόλη την δυναμική αυτή, τα συστήματα FSO παρουσιάζουν κάποιες αδυναμίες. Ένεκα της χρήσης του αέρα ως μέσο διάδοσης, η επίδοση και αξιοπιστία τους μειώνονται αρκετά. Η παρουσία ομίχλης, σκόνης, άμμου και θερμότητας μπορούν να προκαλέσουν σαφή υποβάθμιση ή ακόμα και διακοπή της ζεύξης. Επίσης, η μέγιστη εμβέλεια των συστημάτων αυτών είναι κάποια χιλιόμετρα αλλά πρακτικές εφαρμογές έχουν δείξει ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων, ζεύξεις των 200 – 500m παρέχουν επίδοση σε ικανοποιητικό βαθμό.

Η πράξη έχει δείξει πως η τεχνολογία των FSO συστημάτων ταιριάζει περισσότερο σε εφαρμογές όπου επικρατούν συνθήκες καθαρού ουρανού, μικρά μήκη ζεύξεων όπως συνδέσεις τελικού χρήστη (last mile connections ή end user access) σε ευρυζωνικά δίκτυα κορμού και ζεύξεις κορμού μεταξύ κτηρίων σε μητροπολιτικά δίκτυα (MAN) ή δίκτυα πανεπιστημιούπολης (CAN) (σχήμα 1), [1].



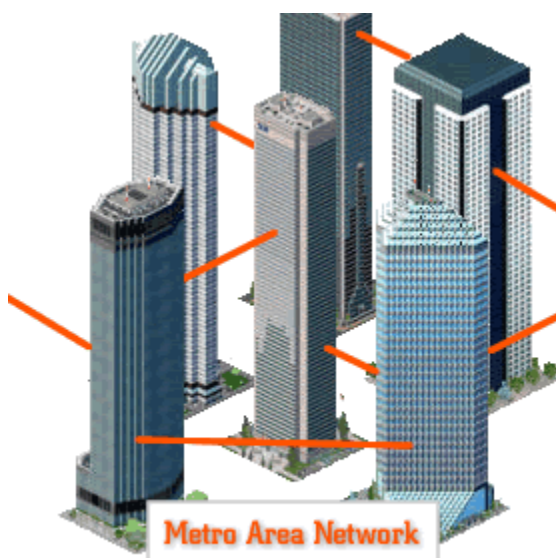
Σχήμα 1. Παράδειγμα πρόσβασης τελικού χρήστη στο δίκτυο κορμού με χρήση FSO.

Επίσης γίνεται χρήση της τεχνολογίας αυτής για προσωρινά δίκτυα, όπου τα πλεονεκτήματα της γρήγορης εγκατάστασης και της μεταφοράς του δικτύου σε σχετικά μικρό χρόνο αντισταθμίζουν το μερικό έλλειμμα αξιοπιστίας. Προσθετικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε στρατηγικές υλοποιήσεις ή υλοποιήσεις υψηλής κινητικότητας αλλά και πάλι εγείρονται θέματα αξιοπιστίας και δυνατότητας αυτόνομης λειτουργίας των FSO συστημάτων, χωρίς τη χρήση υβριδικής λύσης που να συνδυάζει την τεχνολογία FSO με άλλη τεχνολογία διάδοσης (τυπικά κύματα χιλιοστομετρικού μήκους κύματος).

Το ενδιαφέρον όσον αφορά τα FSO συστήματα εστιάζεται κυρίως στο τοπικά δίκτυα (LANs) και σε μερικές περιπτώσεις στα μητροπολιτικά (MANs) – π.χ το κλείσιμο ενός μικρού κενού σε ένα (οπτικό) δακτύλιο-. Όσον αφορά τα συστήματα αξιοσημείωτων αποστάσεων, αποτελεί σχεδιαστικό στόχο η μεγιστοποίηση των ενδιάμεσων επαναληπτών που παρεμβάλλονται μεταξύ των πόλεων με τη δημιουργία ενός πλέγματος από κόμβους - επαναλήπτες όπως εξηγείται με λεπτομέρεια στη συνέχεια σε ένα παράδειγμα μιας τέτοιας τοπολογίας. Αυτή ακριβώς η θεώρηση είναι που καθιστά δυνατή την ευρυζωνική τοπική πρόσβαση.

Η εκρηκτική ζήτηση για πρόσβαση στο διαδίκτυο και οι πολύ απαιτητικές σε εύρος ζώνης υπηρεσίες πολυμέσων ανέδειξαν την ευρυζωνική τοπική πρόσβαση σε εξέχον ζήτημα στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες. Το τοπικό δίκτυο πρόσβασης είναι το δίκτυο εκείνο που συνδέει τους πελάτες στο τοπικό κέντρο μεταγωγής.

Στο σημείο αυτό θα περιγράψουμε [2] ένα τοπικό δίκτυο πρόσβασης αποτελούμενο από μικρούς, πυκνά τοποθετημένους κόμβους μεταγωγής πακέτου, διασυνδεδεμένους με εστιασμένες FSO ζεύξεις σε μια τοπολογία κατά την οποία, από την πηγή μέχρι και τον προορισμό, μεσολαβούν ενδιάμεσοι κόμβοι (multihop arrangement). Κάθε μεταγωγέας (switch), υποστηρίζει ένα πελάτη ο οποίος μπορεί να είναι ένα συγκρότημα με γραφεία (το οποίο μπορεί να περιέχει συμβατικά ιδιωτικά τηλεφωνικά κέντρα –PBXs- και τοπικά δίκτυα δεδομένων –Lans-), ένας πικνοκυβελωτός σταθμός βάσης ή και τα δύο. Το τοπικό δίκτυο πρόσβασης είναι υπεύθυνο για την οικονομική και αξιόπιστη επέκταση της υπηρεσίας ευρυζωνικής τοπικής πρόσβασης από το άκρο της υποδομής ενός γραφείου ή από τον αποπολυπλέκτη του οπτικού δακτυλίου χωρίς να απαιτείται εγκατάσταση νέας θαμμένης οπτικής καλωδίωσης. Η χωρητικότητα ενός πολυβηματικού πλέγματος ορίζεται ως ο μέγιστος αριθμός των εικονικών συνδέσεων που μπορούν να μεταφερθούν στο σημείο πρόσβασης της υποδομής, έτσι ώστε, ανεξάρτητα από την κατανομή της κίνησης ανάμεσα στους πελάτες, να υποστηρίζονται όλες οι εγγυήσεις για την ποιότητα υπηρεσιών.



Powered by SONAbeam - a leading FSO Solution

Η αλματώδης ανάπτυξη του διαδικτύου και η εισαγωγή νέων υπηρεσιών πολυμέσων που είναι προσβάσιμες απ' αυτό, αυξάνουν την ανάγκη για οικιακή και εμπορική ευρυζωνική τοπική πρόσβαση. Το νέο απελευθερωμένο τοπίο στις τηλεπικοινωνίες αυξάνει τον ανταγωνισμό και επιτάσσει την δημιουργία δικτύων ευρυζωνικής τοπικής πρόσβασης. Καθώς η ευρυζωνική πρόσβαση έχει γίνει πλέον θεσμός, οι ασύρματες υπηρεσίες φωνής πρέπει να αναπτυχθούν για να μπορούν να υποστηρίξουν απαιτητικές υπηρεσίες πολυμέσων στους κινητούς χρήστες.

Έτσι αποτελεί μείζονα πρόκληση η παροχή ευρυζωνικής τοπικής πρόσβασης με ικανοποιητική χωρητικότητα και εξασφαλισμένη ποιότητα υπηρεσιών (QoS) στους τελικούς χρήστες. Τα συστήματα πρόσβασης με βάση την οπτική ίνα μπορούν να παράσχουν αυτή τη ζητούμενη χωρητικότητα αλλά σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να καταστούν οικονομικά ασύμφορα. Ο ευρυζωνικός ασύρματος τοπικός βρόγχος

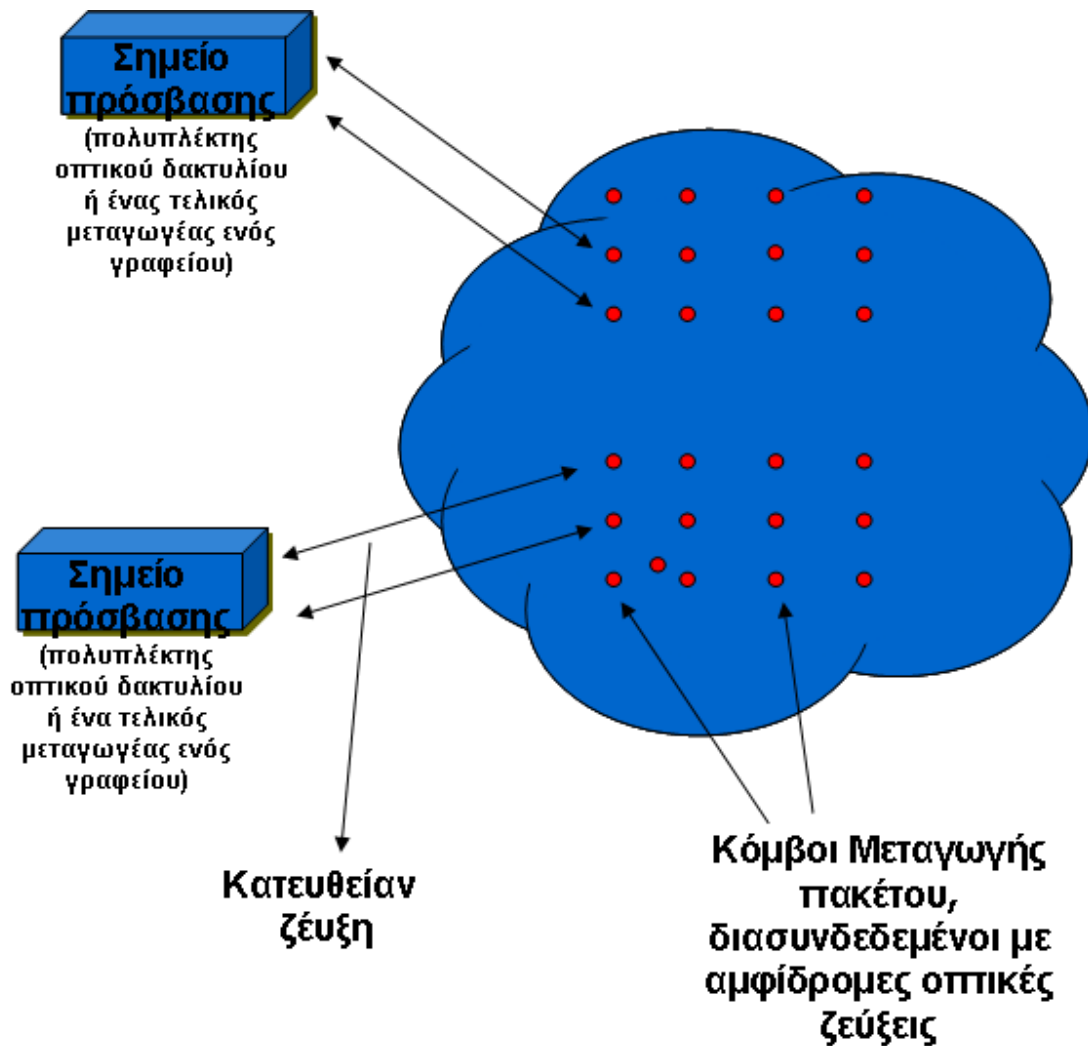


(Broadband Wireless Local Loop –BQLL), εκτός του ότι είναι οικονομικός στην εγκατάσταση και συντήρηση, παρέχει τη χωρητικότητα που χρειάζεται για την υποστήριξη ευρυζωνικών υπηρεσιών πολυμέσων στο σπίτι και το γραφείο και μπορεί να συνδέσει πεζούς και μηχανοκίνητους κινητούς χρήστες.

Στη συνέχεια εξετάζουμε μια στρατηγική για αξιόπιστη και οικονομική ανάπτυξη μιας πλατφόρμας ευρυζωνικής πρόσβασης. Η κύρια ιδέα βρίσκεται στο παρακάτω σχήμα, το οποίο και περιγράφουμε λεπτομερώς. Στον πυρήνα του, το ευρυζωνικό μας δίκτυο πολλαπλής πρόσβασης αποτελείται από μικρούς κόμβους μεταγωγής πακέτου που είναι γεωγραφικά διεσπαρμένοι αλλά πυκνά τοποθετημένοι. Κάθε κόμβος υποστηρίζει ένα πελάτη, ο οποίος μπορεί να είναι ένα κτήριο που περιέχει ιδιωτικά τηλεφωνικά κέντρα και τοπικά δίκτυα δεδομένων, σταθμό βάση πικο-κυψελών ή και τα δύο μαζί και μπορεί ιδανικά να τοποθετηθεί στην κορυφή του κτηρίου ή του σταθμού βάσης. Προσθετικά, προκειμένου να παρέχουμε πρόσβαση στους ένοικους των σπιτιών/γραφείων μέσα στο κτήριο-πελάτη, ένας κόμβος που εξυπηρετεί ένα σταθμό βάσης πικο-κυψέλης παρέχει υπηρεσίες στους κινητούς χρήστες της περιοχής εμβέλειάς του.

Οι κόμβοι μεταγωγής πακέτου είναι διασυνδεδεμένοι με ένα πυκνό πλέγμα εστιασμένων αμφίδρομων FSO ζεύξεων, καθένας απόλυτα ικανός να αντεπεξέλθει στις μηχανικές και ατμοσφαιρικές διαταραχές λόγω του μικρού φυσικού μήκους της ζεύξης. Η κίνηση που παράγεται από τους πελάτες αυτών των κόμβων τελικά μεταφέρεται από το πολυβηματικό οπτικό πλέγμα σε μία πόρτα πρόσβασης (είσοδος/έξοδος) της ενσύρματης υποδομής (π.χ σε ένα πολυπλέκτη οπτικού δακτυλίου ή ένα τελικό μεταγωγέα ενός γραφείου). Έτσι με αυτή την προσέγγιση της πυκνής δόμησης των κόμβων μεταγωγής επιτυγχάνεται αξιοπιστία της ζεύξης, μια και η κύρια εξασθένιση λόγω ομίχλης είναι σχεδόν αμελητέα λόγω της μικρής απόστασης, ενώ τα περιθώρια της ζεύξης (ακρίβεια στόχευσης, εύρος δέσμης, εστίαση, lasers μεγάλης ισχύος, ευαισθησία του φωτοανιχνευτή) γίνονται πιο χαλαρά.

Η τοπολογία του δικτύου πλέγματος μπορεί να αναπαρασταθεί ιδανικά από ένα ορθογωνικό πλέγμα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [σχήμα 2], όπου η κάθε διασταύρωση αντιπροσωπεύει ένα κόμβο μεταγωγής πακέτου. Το πλέγμα συνδέεται με το σημείο πρόσβασης του ασύρματου δικτύου μ' ένα μικρό αριθμό απευθείας ζεύξεων από τους κόμβους που είναι γεωγραφικά εγγύτερα στο σημείο πρόσβασης. Έτσι κάθε σημείο πρόσβασης εξυπηρετεί κάποια σχετικά μικρή περιοχή μέσω FSO ζεύξεων που καλύπτουν την περιοχή αυτή.



Σχήμα 2. Η βασική αρχιτεκτονική του ευρυζωνικού δικτύου πρόσβασης

Έτσι, μια σχετικά ευρεία περιοχή μπορεί να εξυπηρετηθεί ασύρματα από κάθε σημείο πρόσβασης του δικτύου. Οι μικροί κόμβοι μεταγωγής πακέτου αναπτύσσονται με ικανοποιητική πυκνότητα ούτως ώστε κάθε οπτική ζεύξη να έχει ικανοποιητικά μικρό μήκος. Κάθε μεταγωγέας είναι μέγιστης διαστατικότητας 5 x 5 (τέσσερις FSO ζεύξεις – μια προς κάθε γειτονικό-πλεγματικό κόμβο- και μία ζεύξη, που δεν φαίνεται, στο καλωδιωμένο κτήριο ή τον σταθμό βάσης πικο-κυψελών.

Προκειμένου να υπολογίσουμε τη συνολική χωρητικότητα ενός τέτοιου ευρυζωνικού δικτύου πρόσβασης, θεωρούμε τηλεπικοινωνιακή κίνηση μιας μόνο κατηγορίας. Ο ρυθμός μετάδοσης σε κάθε κατεύθυνση είναι τέτοιος, για τη δοθείσα κατηγορία κίνησης, έτσι ώστε να μπορούν να υποστηριχτούν  $C$  εικονικές συνδέσεις, κάθε μια με εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Παρόμοια, υποθέτουμε πως κάθε απευθείας ζεύξη μπορεί να υποστηρίξει  $C$  εικονικές συνδέσεις ενώ ο πελάτης  $i$  ενός κόμβου

δημιουργεί και τερματίζει  $T_i$  εικονικές συνδέσεις, όπου για κάθε κόμβο  $T_i < C$ . Έτσι η χωρητικότητα του ευρυζωνικού μας δικτύου πρόσβασης, ορίζεται ως ο μέγιστος αριθμός των εικονικών συνδέσεων με εγγυημένο QoS που μπορεί αυτό να μεταφέρει σ' ένα σημείο πρόσβασης, ανεξάρτητα με την κατανομή των κλήσεων μεταξύ των πελατών (εφόσον ο πελάτης δεν παράγει/λαμβάνει περισσότερες από  $C$  κλήσεις, όπου  $C$  είναι η χωρητικότητα μιας ζεύξης –single link-).

Σημειώνουμε ότι θεωρούμε δίκτυο πρόσβασης με ομοιόμορφη κίνηση μιας κατηγορίας. Έτσι, αναφερόμενοι στο σχήμα 1 και υποθέτοντας  $K$  απευθείας ζεύξεις που καταλήγουν στα σημεία πρόσβασης η χωρητικότητα του ευρυζωνικού δικτύου πρόσβασης δίνεται από:

$$C_{NET} = \begin{cases} KC, 1 \leq K \leq 5 \\ 5C, K > 5 \end{cases}$$

### Ωρίμανση της τεχνολογίας

Ένεκα του γεγονότος ότι το κανάλι διάδοσης των FSO συστημάτων δεν είναι ελέγξιμο, τα περιθώρια βελτίωσης της τεχνολογίας αυτής αφορούν στο μεν φυσικό στρώμα, μεθόδους που να καταπραΰνουν τις ατμοσφαιρικές και μηχανικές διαταραχές και στο δε επίπεδο δικτύου υλοποιήσεις λογικών αποφάσεων σε σχέση με την αποθήκευση σε προσωρινή μνήμη (Buffer), την αναμετάδοση ή την αναδρομολόγηση της κίνησης σε περίπτωση μη προσπελάσιμης ζεύξης.

**Εξοπλισμός:** Η μεταβλητότητα των ατμοσφαιρικών συνθηκών κατά μήκος μια διαδρομής διάδοσης καθιστά επιθυμητή τη χρήση διαφορετικών μηκών κύματος σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Έτσι ανακύπτει η ερώτηση κατά πόσον η επίδοση μιας FSO ζεύξης μπορεί να βελτιωθεί με την προσαρμοστική αλλαγή του μήκους κύματος της πηγής έτσι ώστε αυτό να προσαρμόζεται στις τρέχουσες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Τα κβαντικά κλιμακωτά lasers (Quantum cascade lasers – QCL) για παράδειγμα μπορούν να συντονιστούν σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος του μακρινού υπερύθρου (4-20  $\mu\text{m}$ ) που περιλαμβάνει τα γνωστά παράθυρα μικρής απορρόφησης (βλέπε μέρος Α της διπλωματικής εργασίας). Ο προσαρμοστικός (ανά)συντονισμός στο βέλτιστο για τη διάδοση μήκος κύματος -που ανταποκρίνεται δυναμικά στις καιρικές συνθήκες- μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας είτε ένα laser είτε μια γκάμα lasers σταθερού μήκους κύματος. Σε κάθε περίπτωση ο

προσαρμοστικός συντονισμός μπορεί να συμβάλει στην βελτίωση της επίδοσης της ζεύξης [3].

Στην πλευρά του δέκτη, προκύπτει ότι ο θερμικός θόρυβος μιας γκάμας μικρών φωτοανιχνευτών, είναι μικρότερος από το θόρυβο ενός μεγάλου ανιχνευτή με ισοδύναμο οπτικό πεδίο. Έτσι μια σημαντική βελτίωση στην επίδοση των FSO ανιχνευτών είναι πιθανή με τη χρήση πολλών ανιχνευτών με μικρό άνοιγμα (aperture).

Η σκέδαση από την ομίχλη και τη σκόνη προκαλεί διεύρυνση του παλμού που οδηγεί σε διασυμβολική παρεμβολή. Έτσι, έχει προταθεί ένας προσαρμοστικός ισοσταθμιστής απόφασης με ανάδραση (decision feedback adaptive equalizer) για την καταπολέμηση αυτού του φαινομένου, αλλά μόνο για χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης [4].

Περαιτέρω, η προσαρμοστική οπτική μπορεί να χρησιμοποιήσει αισθητήρες μήκους κύματος, και διαμορφώσιμους καθρέφτες και φακούς για την μείωση της παραμόρφωσης που υφίσταται το μέτωπο του FSO κύματος από τις μεταβολές του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας, οδηγώντας σε σημαντική βελτίωση του BER λόγω αυτών των σπινθηρισμών της ατμόσφαιρας [5].

Αξίζει να σημειωθεί ότι πολλά εμπορικά προϊόντα FSO χρησιμοποιούν συστήματα ελέγχου υπόδειξης-στίξης και ανίχνευσης (pointing and tracking control systems) για την αντιστάθμιση των αποκλίσεων ευθυγράμμισης, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3. Οπτική ζεύξη αποτελούμενη από 8 δέσμες laser, ονομαστικού ρυθμού μετάδοσης 1 Gbit/s σε απόσταση περί τα 2km. Ο δέκτης είναι ένα μεγάλο πιάτο στη μέση ενώ οι 8 πομποί laser βρίσκονται εκατέρωθεν του. Στην πάνω δεξιά πλευρά της διάταξης υπάρχει ο ``μονόφθαλμος`` (monocular), ένα σύστημα που σε συνεργασία με μια ηλεκτρομηχανολογική διάταξη 2 αξόνων, βοηθά στην ευθυγράμμιση των 2 κεφαλών του κάθε πομποδέκτη.

Παρακάτω παραθέτουμε πίνακα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός εμπορικού συστήματος FSO, σημείου προς σημείο (point to point):

#### **FSO-100 Series**

Μήκος ζεύξης  
 Ταχύτητα μετάδοσης  
 Συσκευή μετάδοσης  
 Μήκος κύματος του laser  
 Ισχύς εξόδου του laser  
 Κλάση ασφαλείας του laser  
 Συσκευή δέκτη  
 Αυτορυθμιζόμενη ευθυγράμμιση  
 Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας  
 Ισχύς  
 Κατανάλωση ισχύος  
 Περιβάλλον εγκατάστασης  
 Διαστάσεις  
 Βάρος

#### **FSO-130 Type SFP**

100-1000m  
 1.25Gbps  
 Laser Diode  
 785±15nm  
 Approx. 11mW  
 Class 1M  
 Si APD  
 Yes (Horizontal: ±1.2° \_ Vertical: ±1.2° \_)  
 -20°\_C -+50°\_C  
 100-240VAC 50/60Hz  
 Approx. 20W  
 Indoor or outdoor (Weatherproof : IP56)  
 246(W) x 168(H) x 487(D)mm  
 Approx. 8Kg

## **Αναφορές:**

[1] T. Garlington, MAJ Joel Babbitt and G. Long, ``Analysis of Free Space Optics as a Transmission Technology``, WP No. AMSEL-IE-TS-05001, March 2005.

[2] A. Acampora, V. Krishnamurthy, ``A Broadband Wireless Access Network Based on Mesh-Connected Free-Space Optical Links``, IEEE Personal Communications, pp. 62-65, October 1999.

[3] H. Manor and S. Arnon, ``Performance of an Optical Wireless Communication System as a Function of Wavelength``, Applied Optics, pp. 4285-94, July 2003.

[4] M. Ahronovich and S. Arnon, ``Performance Improvement of Optical Wireless Communication through Cloud by a Decision Feedback Equalizer``, IEEE 2002 Annual Conf., Tel-Aviv, Israel.

[5] R.K. Tyson, ``Bit Error Rate for Free Space Adaptive Optics Laser Communications``, JOSA, vol. 19, no. 4, pp. 753-58, Apr. 2002.

## Κεφάλαιο 3

### Ασύρματες οπτικές επικοινωνίες με χρήση επαναληπτών

#### 3.1 Εισαγωγή

Στο τρίτο μέρος της διπλωματικής μας εργασίας εξετάζουμε ασύρματες οπτικές ζεύξεις υποβοηθούμενες από επαναλήπτες (Relay assisted FSO Communications) ως ένα ισχυρό εργαλείο κατά των διαλείψεων σε κανάλια που υποφέρουν από ατμοσφαιρικές αναταραχές και στροβιλισμούς (turbulence). Εξετάζουμε τόσο την σειριακή (πολυβηματική-multihop μετάδοση) όσο και την παράλληλη (cooperative diversity) αναμετάδοση σε συνδυασμό με κόμβους ενίσχυσης και προώθησης (Amplify and Forward – AF) και κόμβους αποκωδικοποίησης και προώθησης (Decode and Forward – DF). Θεωρούμε μια συνολική μοντελοποίηση καναλιού που λαμβάνει υπόψη τόσο τις απώλειες μονοπατιού όσο και τις παραγόμενες αναταραχές που ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή. Αφού, όπως θα εξετάσουμε αναλυτικά παρακάτω, η διασπορά των διαλείψεων εξαρτάται από την απόσταση, εκμεταλλευόμαστε το γεγονός αυτό με χρήση επαναληπτών, μειώνοντας έτσι την απόσταση μεταξύ των διαδοχικών κόμβων και δημιουργώντας μικρότερα βήματα-άλματα (hops), βελτιώνουμε σημαντικά την επίδοση του συστήματος. Στο παρόν εξετάζουμε την βελτίωση της επίδοσης του συστήματος FSO με τη χρήση αυτών των σχημάτων αναμετάδοσης θεωρώντας την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας (Outage Probability -  $P_{out}$ ) και επιβεβαιώνουμε την ισχύ αυτών των εκφράσεων για την  $P_{out}$  με χρήση Monte Carlo προσομοίωσης και των πακέτων λογισμικού Matlab και Mathematica.

Το γεγονός ότι, για ζεύξεις μεγαλύτερες από 1 Km, οι παραγόμενες ατμοσφαιρικές διαταραχές αποτελούν κύριο περιοριστικό παράγοντα για τα FSO συστήματα, οδήγησε σε κατά καιρούς προσπάθειες για ανάπτυξη τεχνικών που να μετριάζουν την επίδραση αυτού του φαινομένου. Έτσι προτάθηκαν τεχνικές κωδίκων διόρθωσης λαθών, υπολογισμού ακολουθίας μέγιστης πιθανοφάνειας και χωρικής διαφορικής λήψης. Απ' αυτές τις τεχνικές η χωρική διαφορική λήψη παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον λόγω της μειωμένης πολυπλοκότητάς της. Η χωρική διαφορική λήψη περιλαμβάνει τη χρήση πολλαπλών εκπομπών και/ή ανοιγμάτων λήψης (receive apertures) και έχει μελετηθεί εκτεταμένα στην περιοχή των ραδιοεπικοινωνιών προτού να εφαρμοστεί στις FSO επικοινωνίες. Στο παρόν εξετάζουμε μια άλλη

συναφή ιδέα με τη χωρική διαφορική λήψη, την συνεταιριστική ή συνεργατική (cooperative) διαφορική λήψη η οποία σημειωτέων, έχει και πάλι πρωτοχρησιμοποιηθεί στις ραδιοεπικοινωνίες πριν την εφαρμογή της στις FSO επικοινωνίες.

Η συνεργατική (cooperative) διαφορική λήψη έχει πρόσφατα εισαχθεί σαν ένας εναλλακτικός τρόπος υλοποίησης των πλεονεκτημάτων της χωρικής διαφορικής λήψης [16]. Η κύρια ιδέα πάνω στην οποία βασίζεται η συνεταιριστική ή συνεργατική (cooperative) διαφορική λήψη είναι το γεγονός ότι στα ασύρματα ραδιοκάναλια (radio channels), το εκπεμπόμενο σήμα από τον κόμβο της πηγής λαμβάνεται και από άλλους κόμβους είτε στην περιοχή του πομπού είτε στην περιοχή του δέκτη, οι οποίοι κόμβοι μπορούν να παίζουν τον ρόλο του επαναλήπτη ή του συνεργάτη. Έτσι η πηγή μαζί με τους συνεργάτες της μπορούν από κοινού να επεξεργαστούν και να εκπέμψουν την πληροφορία της πηγής, δημιουργώντας έτσι μια εικονική σειρά από κεραίες παρόλο που κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος μόνο με μια κεραία.

Η πολυβηματική μετάδοση (multihop transmission) αποτελεί ένα εναλλακτικό – υποβοηθούμενο από επαναλήπτες- σχήμα το οποίο χρησιμοποιεί τους επαναλήπτες σε σειριακό σχηματισμό. Τέτοιου είδους σχήματα χρησιμοποιούνται για να διευρύνουν την κάλυψη του όλου συστήματος (για πομπούς περιορισμένης ισχύος εκπομπής) και δεν προσφέρουν βελτίωση της επίδοσης έναντι των διαλείψεων σε ασύρματα ραδιοπεριβάλλοντα, δηλαδή δεν αυξάνουν την τάξη της διαφορικής λήψης.

Αντίθετα στα FSO συστήματα, λόγω του ότι η διασπορά των διαλείψεων εξαρτάται από την απόσταση, το σειριακό σχήμα μπορεί να συμβάλει στην βελτίωση της επίδοσης του συστήματος και στην αύξηση της τάξης της διαφορικής λήψης, όπως φαίνεται από την ανάλυση τόσο των αριθμητικών, όσο και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσής μας.

Επίσης θεωρούμε την παράλληλη αναμετάδοση ως πιθανή εναλλακτική της σειριακής. Είναι φανερό πως η ευρυεκπομπή (broadcast), έτσι όπως αυτή συναντάται στα ασύρματες ραδιοζεύξεις δεν υφίσταται στις FSO ζεύξεις, οι οποίες βασίζονται στην μετάδοση οπτικής επαφής (Line of Sight) μέσω κατευθυντικών δεσμών. Μ' αυτό τον τρόπο δημιουργείται μια τεχνητή ευρυεκπομπή με τη χρήση πολλαπλών ανοιγμάτων μετάδοσης (Transmitter Apertures) με κατεύθυνση τους κόμβους επαναληπτών κι' έτσι προτείνεται ένα παράλληλο σχήμα μετάδοσης.



### 3.2 Μοντελοποίηση του ασύρματου οπτικού συστήματος

Θεωρούμε ένα FSO σύστημα υποβοηθούμενο από επαναλήπτες για το οποίο το εκπεμπόμενο σήμα από τον κόμβο πηγής διαδίδεται μέσα από  $N$  σειριακούς ή παράλληλους επαναλήπτες προτού ανιχνευθεί στον κόμβο προορισμού. Το σύστημα που εξετάζουμε χρησιμοποιεί διαμόρφωση έντασης και απευθείας ανίχνευσης (Intensity Modulation/Direct-Detection) που χρησιμοποιεί BPPM (Binary Pulse Position Modulation). Σε τέτοια συστήματα ο πομπός εκπέμπει κατά τη μισή διάρκεια του bit BPPM και δεν εκπέμπει κατά το άλλο μισό. Ο δέκτης ολοκληρώνει το ανιχνεύσιμο φωτόνιο τόσο κατά τη διάρκεια εκπομπής του πομπού (κατά τη μισή διάρκεια του BPPM bit – χρονοσχιμή σήματος) όσο και κατά την διάρκεια μη εκπομπής (πάνω στο υπόλοιπο μισό του BPPM bit – χρονοσχιμή απουσίας σήματος) και λαμβάνει το διάνυσμα των προκύπτουσων ηλεκτρικών σημάτων:

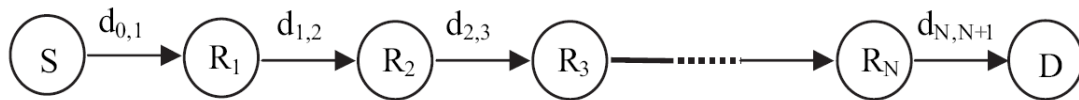
$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r^s \\ r^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RT_b(P_s + P_b) + n^s \\ RT_b P_b + n^n \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

όπου  $r^s$  και  $r^n$  είναι τα λαμβανόμενα ηλεκτρικά σήματα που αντιστοιχούν στις χρονοσχιμές σήματος και χρονοσχιμές απουσίας σήματος του BPPM παλμού,  $P_s$  και  $P_b$  είναι αντίστοιχα η οπτική ισχύς σήματος και ισχύς του περιβάλλοντος που προσπίπτει στον φωτοανιχνευτή,  $T_b$  είναι η διάρκεια του bit (χρονοσχιμή σήματος + χρονοσχιμή απουσίας σήματος) και  $R=nq/hf$  είναι η αποκρισιμότητα του φωτοανιχνευτή:  $n$  είναι η κβαντική αποδοτικότητα του φωτοανιχνευτή,  $q$  το φορτίο του ηλεκτρονίου,  $h$  είναι η σταθερά του Planck και  $f$  η οπτική συχνότητα. Επίσης  $n^s$  και  $n^n$  στην 3.1, είναι οι όροι του προσθετικού θορύβου κατά την διάρκεια παρουσίας και απουσίας σήματος αντίστοιχα. Θεωρούμε δέκτες περιορισμένου περιβαλλοντικού θορύβου για τους οποίους κυρίαρχος είναι ο θόρυβος βολής που προκλήθηκε από την ακτινοβολία του περιβάλλοντος (τα άλλα είδη θορύβων όπως θερμικός, σκοτεινός και εξαρτημένος από το σήμα θόρυβος θεωρούνται αμελητέοι). Έτσι ο παράγοντας του θορύβου μοντελοποιείται σαν ανεξάρτητος του σήματος λευκός προσθετικός Gaussian θόρυβος, μηδενικής μέσης τιμής και διασποράς  $\sigma_n^2 = N_0/2$ . Αυτή είναι μια καλή προσέγγιση όταν η ένταση του φωτός που προσπίπτει στον φωτοανιχνευτή είναι αρκετά μεγάλη.

Στο Σχήμα 1 βλέπουμε την σειριακή αναμετάδοση, όπου η πηγή εκπέμπει ένα διαμορφωμένο κατά ένταση σήμα σε ένα κόμβο – επαναλήπτη.

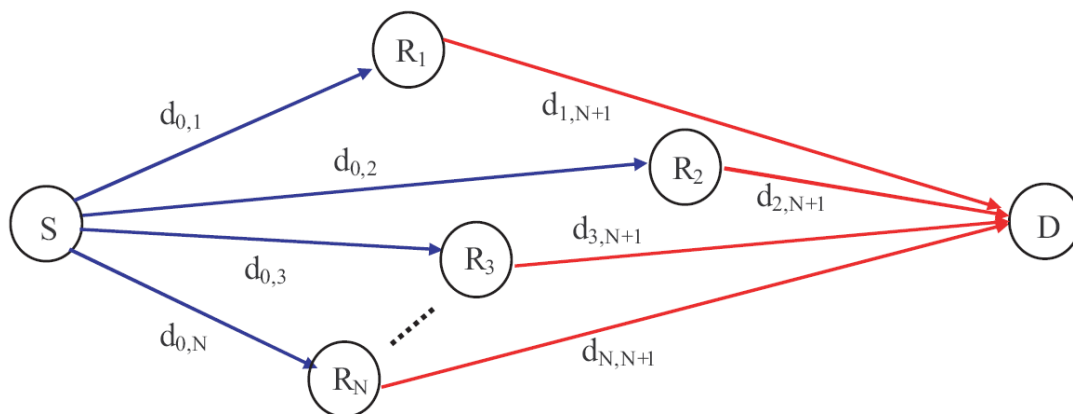
Υποθέτοντας DF αναμετάδοση, ο επαναλήπτης αποκωδικοποιεί το σήμα μετά από την κατευθείαν ανίχνευση, το διαμορφώνει με BPPM και το εκπέμπει ξανά στον επόμενο επαναλήπτη.

Υποθέτοντας τώρα AF αναμετάδοση, ο επαναλήπτης δεν εκτελεί οποιαδήποτε αποκωδικοποίηση στο σήμα και μετά από πολλαπλασιασμό με ένα κατάλληλο παράγοντα κλίμακας, απλά το προωθεί στον επόμενο επαναλήπτη. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η πληροφορία να φτάσει στον κόμβο προορισμού.



Σχήμα 1. Σχηματισμός σειριακής FSO αναμετάδοσης

Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται το σχήμα παράλληλης αναμετάδοσης. Αφού όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, η ευρυεκπομπή δεν είναι δυνατή λόγω της φύσης των FSO τηλεπικοινωνιών, η πηγή είναι εξοπλισμένη με πολλαπλούς πομπούς laser με το κάθε laser να σκοπεύει τον αντίστοιχο κόμβο αναμετάδοσης. Ο κόμβος της πηγής εκπέμπει το ίδιο σήμα στους  $N$  επαναλήπτες. Έτσι αναλόγως της μεθόδου αναμετάδοσης (DF ή AF), οι επαναλήπτες είτε αποκωδικοποιούν και ξαναστέλνουν το σήμα κωδικοποιημένο, είτε το κλιμακώνουν (ενισχύουν μέχρι ενός κατωφλίου) και το προωθούν στον τελικό προορισμό. Πρέπει να σημειωθεί ότι, σε αντίθεση με τις ασύρματες ραδιοεπικοινωνίες, η distributed space-time block κωδικοποίηση που γίνεται από τους επαναλήπτες δεν χρειάζεται στην περίπτωσή μας λόγω της εξασφαλισμένης ορθογωνιότητας των λαμβανόμενων διαθλόμενων αντιγράφων (diffraction patterns) από τα σε ικανοποιητικό βαθμό διαχωρισμένα ανοίγματα του εκπομπού [2],[3].



Σχήμα 2. Σχηματισμός παράλληλης FSO αναμετάδοσης

### 3.3 Μοντελοποίηση καναλιού

Θεωρούμε ένα συνολικό μοντέλο καναλιού όπου λαμβάνονται υπόψη τόσο οι απώλειες μονοπατιού όσο και οι διαλείψεις από παραγόμενες αναταραχές (turbulence induced) της ατμόσφαιρας. Ο λόγος των απωλειών μονοπατιού για μια FSO ζεύξη με μήκος  $d$ , μπορεί να εκφραστεί ως:

$$l = \frac{A_{TX} A_{RX}}{(\lambda d)^2} e^{-\sigma d} \quad (3.2)$$

όπου  $\sigma$  ο συντελεστής απόσβεσης που εξαρτάται από την ορατότητα,  $A_{TX}$ ,  $A_{RX}$  και  $\lambda$  είναι το άνοιγμα του πομπού, το άνοιγμα του δέκτη και το οπτικό μήκος κύματος αντίστοιχα.

Όπως έχει αναλυθεί και στο πρώτο μέρος της διπλωματικής μας, ένας κύριος παράγοντας που επιδρά αρνητικά στην επίδοση του ασύρματου οπτικού μας συστήματος (lasercom system), είναι οι σπινθηρισμοί που προκαλούνται από αναταράξεις και στροβιλισμούς (turbulence) στην ατμόσφαιρα, ως απότοκο της διάδοσης της δέσμης διαμέσου της. Πιο ειδικά, οι σπινθηρισμοί αυτοί μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια ισχύος στον δέκτη και τελικά σε διαλείψεις του λαμβανόμενου σήματος κάτω από ένα ορισμένο κατώφλι. Η αξιοπιστία ενός οπτικού συστήματος που λειτουργεί κάτω από τέτοιες συνθήκες μπορεί να συναχθεί από ένα μαθηματικό μοντέλο για την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) ενός σήματος με τυχαίες διαλείψεις. Σκοπός είναι η χρήση μιας βατής συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της ισχύος, κάτω από τέτοιες ατμοσφαιρικές αναταραχές. Επίσης είναι βολικό οι ελεύθερες παράμετροι αυτής της pdf μπορούν να συσχετισθούν κατευθείαν από τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους και η pdf που θα χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση των τυχαίων διαλείψεων να έχει κλειστή μορφή. Κατά τα τελευταία χρόνια πολλά μοντέλα pdf έχουν προταθεί για την για την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος, με διαφορετικό βαθμό επιτυχίας. Επικρατέστερα μοντέλα για την λαμβανόμενη ισχύ, κρίνονται τα μοντέλα της λογαριθμοκανονικής pdf για ασθενείς αναταραχές και της κατανομής Gamma Gamma για μέτριες έως έντονες ατμοσφαιρικές αναταραχές.

#### 3.3.1 Λογαριθμοκανονικό Μοντέλο

Κάτω από συνθήκες ασθενών διακυμάνσεων της ισχύος, προκύπτει από πειραματικά δεδομένα [4] και είναι γενικά αποδεκτό ότι οι διαλείψεις ένεκα αναταραχών και στροβιλισμών (turbulence) ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή. Ειδικότερα

από τις [5] και [6] προκύπτει ότι μετρήσεις των ροών κατώτερης τάξης της κανονικοποιημένης ισχύος κάτω από συνθήκες ασθενών ατμοσφαιρικών αναταραχών συμφωνούν με τις αντίστοιχες τιμές που προβλέπονται από το λογαριθμοκανονικό μοντέλο. Επίσης, σύμφωνα με την θεωρία του Kolmogorov (Andreous και Philips, 1998), αν οι ατμοσφαιρικές αναταραχές είναι ομοιογενείς και ιστροπικές, στην περιοχή των ασθενών διακυμάνσεων, τότε η pdf του λαμβανόμενου σήματος είναι λογαριθμοκανονική.

Θεωρώντας τη διάδοση του φωτός δια μέσου ενός μεγάλου αριθμού στοιχείων της ατμόσφαιρας όπου το καθένα προκαλεί μια ανεξάρτητη, όμοια κατανομημένη καθυστέρηση φάσης και σκέδαση, τότε από το κεντρικό οριακό θεώρημα η κατανομή του λογαριθμικού πλάτους  $\chi$  είναι κανονική:

$$f(\chi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\chi^2}} \exp\left\{-\frac{(\chi - E[\chi])^2}{2\sigma_\chi^2}\right\} \quad (3.3)$$

όπου  $E[\chi]$  ( $=\mu_\chi$  από δω και στο εξής) είναι ο συνολικός μέσος όρος του λογαριθμικού πλάτους  $\chi$ .

Θεωρώντας το  $a = \exp(\chi)$  ως το πλάτος των διαλείψεων του καναλιού (channel fading amplitude), τότε αυτό περιγράφεται από την λογαριθμοκανονική pdf που δίνεται από:

$$f(a) = \frac{1}{a\sqrt{2\pi\sigma_\chi^2}} \exp\left\{-\frac{(\ln(a) - \mu_\chi)^2}{2\sigma_\chi^2}\right\} \quad (3.4)$$

Εναλλακτικά, θεωρώντας την σχέση του λογαριθμικού πλάτους  $\chi$  με την ένταση του φωτός  $I$  που δίνεται από:

$$I = I_0 \exp(2\chi - E[\chi]) \quad (3.5)$$

Από τις 3.3 και 3.5 προκύπτει ότι η μέση ένταση του φωτός είναι:

$$E[I] = E[I_0 \exp(2\chi - E[\chi])] = I_0 \exp(2\sigma_\chi^2) \quad (3.6)$$

Έτσι η κατανομή της έντασης του φωτός που παράγεται από τις αναταραχές της ατμόσφαιρας (turbulence) είναι λογαριθμοκανονική:

$$f(I) = \frac{1}{2I} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\chi^2}} \exp\left\{-\frac{[\ln(I) - \ln(I_0)]^2}{8\sigma_\chi^2}\right\} \quad (3.7)$$

Επιστρέφοντας πίσω στο πλάτος διαλείψεων  $a$ , το κανονικοποιούμε έτσι ώστε  $E[a^2] = 1 \Rightarrow \exp(2\mu_\chi + 4\sigma_\chi^2/2) = 1 \Rightarrow 2\mu_\chi + 4\sigma_\chi^2/2 = 0 \Rightarrow \mu_\chi = -\sigma_\chi^2$  (3.8)

Αυτό εξασφαλίζει ότι η διάλειψη δεν αποσβένει ούτε ενισχύει την μέση ισχύ. Για την περιοχή την ασθενών ατμοσφαιρικών αναταραχών η διασπορά του λογαριθμικού

πλάτους εξαρτάται, εκτός από το μήκος  $d$  της ζεύξης που αναφέραμε προηγούμενα, από τον κυματικό αριθμό ( $k$ ) και την δομική παράμετρο του δείκτη διάθλασης ( $C_n^2$ ) και δίνεται από:

$$\sigma_\chi(d) = 0.124k^{7/6}C_n^2d^{11/6} \quad (3.9)$$

### 3.3.2 Gamma Gamma μοντέλο

Για ισχυρές συνθήκες ατμοσφαιρικών αναταράξεων ή διαταραχές που οφείλονται στις κινήσεις συνεχούς μεταβολής και ακανόνιστες κινήσεις του αέρα ή στροβιλισμούς (turbulence conditions) προτείνεται η Gamma-Gamma Κατανομή, η οποία είναι μια πολλαπλασιαστική τυχαία διαδικασία (ή διαδικασία διαμόρφωσης) που χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει τόσο μικρής όσο και μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικές διακυμάνσεις (fluctuations).

Προκειμένου να υπολογίσουμε τις παραμέτρους αυτής της κατανομής χρησιμοποιώντας μόνο μετρήσιμες τιμές των  $C_n^2$  (refractive index structure parameter ή Rytov variance) και inner scale  $l_0$ . Χρησιμοποιούμε και παρουσιάζουμε μια ευρηστική θεωρία για τους σπινθηρισμούς (heuristic theory of scintillation) που εφαρμόζεται για διάδοση οπτικών σημάτων για όλες τις συνθήκες διακύμανσης της φωτεινής έντασης [5],[6],[7].

Ένα οπτικό σήμα διαδιδόμενο μέσα από ατμοσφαιρικές αναταραχές θα υπόκειται σε διακυμάνσεις φωτεινής ισχύος (σπινθηρισμούς), λόγω των μικρών διακυμάνσεων του δείκτη διάθλασης που συχνά αποκαλείται οπτική διαταραχή (optical turbulence).

Θεωρητικές και πειραματικές μελέτες της διακύμανσης της φωτεινής έντασης παρουσιάζουν το δείκτη σπινθηρισμών:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (3.10)$$

όπου  $I$  είναι η φωτεινή ένταση (irradiance or intensity).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι συνθήκες ασθενών διακυμάνσεων οδηγούν σε εκφράσεις για τον δείκτη σπινθηρισμών που είναι ανάλογες της διασποράς Rytov:

$$\sigma_I^2(d) = 1.23k^{7/6}C_n^2d^{11/6} \quad (3.11)$$

όπου  $k=2\pi/\lambda$  ο οπτικός κυματαριθμός,  $\lambda$  το μήκος κύματος και  $d$  το μήκος της διαδρομής διάδοσης μεταξύ πομπού και δέκτη. Για τιμές μικρότερες της μονάδας η διασπορά Rytov είναι ο δείκτης σπινθηρισμών ενός επίπεδου κύματος χωρίς την

παρουσία φαινομένων εσωτερικής κλίμακας (inner scale effects) ενώ για τιμές μεγαλύτερες της μονάδας θεωρείται ως μέτρο ισχύος (ή έντασης) των οπτικών διακυμάνσεων.

Κάτω από ασθενείς συνθήκες διακυμάνσεων ο δείκτης σπινθηρισμών (3.10), αυξάνει με την αύξηση της διασποράς Rytov (3.11). Ο δείκτης σπινθηρισμών συνεχίζει να αυξάνει κάτω από συνθήκες ασθενών διακυμάνσεων και φτάνει σε μια μέγιστη τιμή μεγαλύτερη της μονάδας (μερικές φορές ίση με 5 ή 6) σε συνθήκες τυχαίας εστίασης (random focusing).

Με τη αύξηση του μήκους της διαδρομής ή την ισχυροποίηση της ανομοιογένειας, το φαινόμενο εστίασης ή εστιακό φαινόμενο (focusing effect) εξασθενεί από πολλαπλές αυτό-παρεμβολές (self-interference) και σιγά-σιγά οι διακυμάνσεις αρχίζουν να μειώνονται και φτάνουν στον κορεσμό, με την τιμή του δείκτη σπινθηρισμών να προσεγγίζει τη μονάδα από πάνω.

Η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας του λαμβανόμενου οπτικού σήματος μοντελοποιείται ως γινόμενο  $I=xy$ , όπου το  $x$  προκύπτει από τις μεγάλης κλίμακας και το  $y$  από τις μικρής κλίμακας αναταραχές. Υποθέτουμε ότι τα  $x$  και  $y$  είναι στατιστικά ανεξάρτητες τυχαίες διαδικασίες για τις οποίες η ροπή δεύτερης τάξης της φωτεινής έντασης είναι:

$$\langle I^2 \rangle = \langle x^2 \rangle \langle y^2 \rangle = (1 + \sigma_x^2)(1 + \sigma_y^2) \quad (3.12)$$

Όπου  $\sigma_x^2$  και  $\sigma_y^2$  είναι η κανονικοποιημένη διασπορά των  $x$  και  $y$ , αντίστοιχα. Για ευκολία στην ανάλυσή μας θεωρούμε  $\langle I \rangle = 1$ . Από τις σχέσεις 3.10 και 3.12 προκύπτει ο δείκτης σπινθηρισμών:

$$\sigma_I^2 = (1 + \sigma_x^2)(1 + \sigma_y^2) - 1 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_x^2 \sigma_y^2 \quad (3.13)$$

Οι μικρής κλίμακας συνεισφορές στους σπινθηρισμούς σχετίζονται με τα κελιά στροβιλισμών (turbulent cells) που είναι μικρότερα από τη ζώνη Fresnel  $R_F = (L/k)^{1/2}$  ή την ακτίνα συνοχής  $\rho_0$ , όποια από τις δύο είναι η μικρότερη. Οι μεγάλης κλίμακας διακυμάνσεις της φωτεινής έντασης προκαλούνται από κελιά στροβιλισμών μεγαλύτερα από την πρώτη ζώνη Fresnel ή τον δίσκο διασποράς  $L/k\rho_0$ , όποιο από τα δύο είναι το μεγαλύτερο. Υπό συνθήκες ισχυρών

διακυμάνσεων, τα χωρικά κελιά το μέγεθος των οποίων είναι μεταξύ της ακτίνας συνοχής ( $\rho_0$ ) και του δίσκου διασποράς ( $L/k\rho_0$ ), συνεισφέρουν λίγο στους σπινθηρισμούς. Αυτό συμβαίνει γιατί, ένεκα της απώλειας της χωρικής συνοχής, μόνο τα πολύ μεγάλα κελιά κοντά στον πομπό έχουν κάποιο εστιακό αποτέλεσμα στον φωτισμό των μικρών περιθλαστικών κυττάρων πλησίον του δέκτη και τελικά ακόμα και αυτά τα μεγάλα κελιά αδυνατούν να προκαλέσουν εστίαση ή απόκλιση της δέσμης. Όταν συμβεί αυτή η απώλεια της συνοχής, ο φωτισμός των μικρών κυττάρων είναι στατιστικά άρτια κατανεμημένος και οι διακυμάνσεις του διαδιδόμενου κύματος προκαλούνται λόγω της τυχαίας παρεμβολής ενός μεγάλου αριθμού σκεδαστών περίθλασης των μικρών κυττάρων.

Προκειμένου να αναπτυχθεί ένα μοντέλο συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας συνεπές με την παραπάνω θεωρία, γίνεται η υπόθεση ότι τόσο οι μεγάλης κλίμακας, όσο και οι μικρής κλίμακας διακυμάνσεις της φωτεινής έντασης ακολουθούν Gamma κατανομή, δηλαδή

$$p_x(x) = \frac{\alpha(\alpha x)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-\alpha x), x > 0, \alpha > 0 \quad (3.14)$$

$$p_y(y) = \frac{\beta(\beta y)^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \exp(-\beta y), y > 0, \beta > 0 \quad (3.15)$$

όπου  $\Gamma(x)$  είναι η συνάρτηση Gamma.

Σταθεροποιώντας το  $x$  και γράφοντας  $y = I/x$ , παράγουμε την υπό συνθήκη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

$$p_y(I/x) = \frac{\beta(\beta I/x)^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \exp(-\beta I/x), I > 0 \quad (3.16)$$

Στη οποία το  $x$  είναι η υπό συνθήκη μέση τιμή του  $I$ . Για να παράξουμε την άνευ συνθήκης κατανομή της φωτεινής έντασης ακτινοβολίας υπολογίζουμε το

$$p(I) = \int_0^{\infty} p_y(I/x) p_x(x) dx = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}[2(\alpha\beta I)^{1/2}], I > 0 \quad (3.17)$$

Όπου  $K_\mu(x)$  είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel δεύτερου είδους.

Ονομάζουμε την παραπάνω σχέση 3.17 ως τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της Gamma-Gamma κατανομής.

Η παράμετρος  $\alpha$  αντιπροσωπεύει τον ενεργό αριθμό των μεγάλης κλίμακας κελιών της διαδικασίας σκέδασης και η παράμετρος  $\beta$  όμοια, τον ενεργό αριθμό των μικρής κλίμακας κελιών. Τα  $\alpha$  και  $\beta$  σύμφωνα με [13], [14], δίνονται από τις σχέσεις:

$$\alpha = \left[ \exp \left( \frac{0.49\beta_0^2}{(1+0.18d^2+0.56\beta_0^{12/5})^{7/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (3.18)$$

$$\beta = \left[ \exp \left( \frac{0.51\beta_0^2}{(1+0.9d^2+0.62d^2\beta_0^{12/5})^{5/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (3.19)$$

όπου  $\beta_0^2 = 0.5C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$  είναι η διασπορά Rytov για επίπεδο κύμα στη θεωρία ασθενών σπινθηρισμών και  $d = (kD^2/4L)^{1/2}$  η παράμετρος που χαρακτηρίζει τη διάμετρο του ανοίγματος του δέκτη. Και πάλι εδώ το  $k = 2\pi/\lambda$  είναι ο οπτικός κυματικός αριθμός,  $\lambda$  το μήκος κύματος,  $C_n^2$  η δομική παράμετρος του δείκτη διάθλασης και  $D$  η διάμετρος του ανοίγματος του δέκτη. Σύμφωνα με την [15], η πιθανότητα ο στιγμιαίος σηματοθορυβικός λόγος  $\gamma$  να βρίσκεται κάτω από ένα ορισμένο κατώφλι  $\gamma_{th}$  (δηλαδή η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της Gamma κατανομής) δίνεται από:

$$F_\gamma(\gamma_{th}) = \frac{(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sqrt[4]{\left(\frac{\gamma_{th}}{\gamma}\right)^{\alpha+\beta}} \times G_{1,3}^{2,1} \left[ \alpha\beta \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{\gamma}} \left| \begin{matrix} 1 - \frac{\alpha+\beta}{2} \\ \frac{\alpha-\beta}{2}, \frac{\beta-\alpha}{2}, -\frac{\alpha+\beta}{2} \end{matrix} \right. \right] \quad (3.20)$$

Όταν οι οπτικές διαταραχές είναι ασθενείς, ο ενεργός αριθμός των κελιών με μέγεθος μικρότερο και μεγαλύτερο από την πρώτη ζώνη Fresnel είναι μεγάλος, με αποτέλεσμα  $\alpha \gg 1$  και  $\beta \gg 1$ . Όσον οι διακυμάνσεις της φωτεινής ισχύος αυξάνονται και προσεγγίζεται η περιοχή εστίασης (ή η συνθήκη εστίασης-focusing regime) και οι δύο παράμετροι της 3.17 μειώνονται σημαντικά. Πέρα από την περιοχή εστίασης και προσεγγίζοντας την περιοχή του κορεσμού, βρίσκουμε ότι  $\beta \rightarrow 1$ , υποδηλώνοντας ότι ο ενεργός αριθμός των μικρής κλίμακας κελιών τελικά μειώνεται στη μονάδα, υπολογισμένος από την εγκάρσια χωρική συνοχή της ακτίνας του οπτικού κύματος. Από την άλλη, ο ενεργός αριθμός των διακριτών σκεδαστών περίθλασης  $\alpha$  αυξάνεται ξανά με την αύξηση της ισχύς των διαταραχών και τελικά γίνεται απεριόριστος στην περιοχή του κορεσμού.



Από την 3.17 βρίσκουμε ότι  $\langle I^2 \rangle = (1+1/\alpha)(1+1/\beta)$  και έτσι συσχετίζουμε τις παραμέτρους αυτής της κατανομής με τους μικρής και μεγάλης κλίμακας σπινθηρισμούς σύμφωνα με

$$\alpha = \frac{1}{\sigma_x^2}, \quad \beta = \frac{1}{\sigma_y^2} \quad (3.21)$$

Ακολούθως ο συνολικός δείκτης σπινθηρισμών που δίνεται από την 3.13 συσχετίζεται με αυτές τις παραμέτρους με την

$$\sigma_I^2 = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha\beta} \quad (3.22)$$

### 3.3.3 Αναμετάδοση με αποκωδικοποίηση και προώθηση (DF)

Στην DF αναμετάδοση, ο επαναλήπτης αποκωδικοποιεί το σήμα μετά την κατευθείαν ανίχνευση, το διαμορφώνει με μια οπτική ισχύ  $P$  και το εκπέμπει ξανά στον επόμενο επαναλήπτη (ή στον προορισμό κατά το τελευταίο βήμα), μόνο αν ο λαμβανόμενος σηματοθορυβικός λόγος ξεπερνά ένα δοθέν κατώφλι αποκωδικοποίησης. Αυτό το κατώφλι χρειάζεται για να αποφευχθεί η εσφαλμένη μετάδοση ψηφίων.

Κατά τη σειριακή αναμετάδοση, το λαμβανόμενο σήμα στον  $i^{\text{στο}}$  κόμβο ( $i=1,2,\dots,N+1$ ) δίνεται από:

$$\mathbf{r}_i = \begin{bmatrix} r_i^s \\ r_i^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RT_b(Pg_{i-1,i} + P_b) + n_i^s \\ RT_b P_b + n_i^n \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

όπου  $r_i^s$  και  $r_i^n$  είναι τα λαμβανόμενα σήματα που αντιστοιχούν στις χρονοσχισμές παρουσίας και απουσίας σήματος αντίστοιχα του BPPM παλμού. Στην 3.23 το  $g_{i-1,i}$  είναι το κέρδος καναλιού της ζεύξης που συνδέει τους κόμβους  $(i-1)$  και  $i$ , και  $P$  είναι η μέση εκπεμπόμενη οπτική ισχύς του κάθε πομπού κάθε επαναλήπτη, η οποία  $P$  σχετίζεται με τη συνολική εκπεμπόμενη ισχύ ( $P_t$ ) με τη σχέση  $P=P_t/(N+1)$  για σειριακή αναμετάδοση. Είναι προφανές ότι η ισχύς του οπτικού σήματος που προσπίπτει στον φωτοανιχνευτή δίνεται τώρα σαν  $P_s = Pg_{i-1,i}$ . Το κέρδος του καναλιού που συνδέει τον  $i$  με τον  $j$  κόμβο,  $g_{i,j}$  ( $i,j=0,1,\dots,N+1$ ), μπορεί να διατυπωθεί ως

$$g_{i,j} = \alpha_{i,j}^2 L_{i,j} \quad (3.24)$$

όπου  $\alpha_{i,j}^2$  είναι το πλάτος διαλείψεων ένεκα των ατμοσφαιρικών αναταραχών ενώ το  $L_{i,j} = l(d_{i,j})/l(d_{0,N+1})$  δηλώνει τις κανονικοποιημένες απώλειες μονοπατιού για εύρος βήματος μεταξύ του  $i$  και  $j$  κόμβου σε σχέση με την απόσταση της κατευθείαν ζεύξης ανάμεσα στην πηγή και τον προορισμό δηλ. την  $d_{0,N+1}$ .

Στην παράλληλη αναμετάδοση, κάθε κόμβος επαναλήπτη λαμβάνει το εκπεμπόμενο σήμα από το αντίστοιχο άνοιγμα του πομπού που σκοπεύει προς το μέρος του. Το λαμβανόμενο σήμα στον επαναλήπτη  $i$  δίνεται από:

$$\mathbf{r}_i = \begin{bmatrix} r_i^s \\ r_i^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RT_b (Pg_{0,i} + P_b) + n_i^s \\ RT_b P_b + n_i^n \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

όπου η μέση οπτική ισχύς για κάθε άνοιγμα πομπού μπορεί να προκύψει από την διαίρεση της ολικής εκπεμπόμενης ισχύος με τον αριθμό των ανοιγμάτων εκπομπής σε αναμετάδοση παράλληλου σχηματισμού, δηλ.  $P = P_t/(2N)$ . Οι κόμβοι των επαναληπτών αποκωδικοποιούν τα λαμβανόμενα σήματα μετά από την κατευθείαν ανίχνευση, τα διαμορφώνουν με BPPM και ταυτόχρονα τα εκπέμπουν ξανά στον προορισμό. Στον προορισμό, υποθέτουμε ένα μεγάλο οπτικό πεδίο του δέκτη που να επιτρέπει σε όλα τα εκπεμπόμενα οπτικά πεδία από τους διαφορετικούς κόμβους επαναληπτών να ανιχνευτούν ταυτόχρονα. Έστω ότι το  $D$  δηλώνει το αποκωδικοποιημένο σύνολο, το οποίο είναι το σύνολο των επαναληπτών που έχουν αποκωδικοποιήσει το σήμα επιτυχώς (δηλ. το λαμβανόμενο SNR υπερβαίνει το κατώφλι). Το λαμβανόμενο σήμα στον προορισμό είναι υπέρθεση των λαμβανόμενων οπτικών ισχύων που εκτέμφθηκαν από το αποκωδικοποιημένο σύνολο  $D$  και δίνεται από:

$$\mathbf{r}_{N+1} = \begin{bmatrix} r_{N+1}^s \\ r_{N+1}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RT_b \left( \sum_{i \in D} Pg_{i,N+1} + P_b \right) + n_{N+1}^s \\ RT_b P_b + n_{N+1}^n \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

### 3.3.4 Αναμετάδοση ενίσχυσης και προώθησης (AF)

Στην αναμετάδοση ενίσχυσης και προώθησης, ο επαναλήπτης πρώτα κανονικοποιεί το λαμβανόμενο σήμα  $\mathbf{r}_i = \begin{bmatrix} r_i^s \\ r_i^n \end{bmatrix}$  με ένα παράγοντα  $E[r_i^s + r_i^n]$  για να εξασφαλίσει την

ενότητα της μέσης ισχύος. Ο επαναλήπτης στη συνέχεια διαμορφώνει το κανονικοποιημένο σήμα με οπτική ισχύ  $P$  και το εκπέμπει ξανά στον επόμενο επαναλήπτη (ή στον προορισμό μέσω του τελευταίου βήματος). Σαν αποτέλεσμα, η μέση εκπεμπόμενη ισχύς για κάθε επαναλήπτη παραμένει σταθερή και ίση με  $P$ . Περαιτέρω, προκειμένου να βελτιώσουμε την αποδοτικότητα ισχύος, ο επαναλήπτης μειώνει την στάθμη του λαμβανόμενου σήματος πριν την κανονικοποίηση, για να αφαιρέσει την φωτεινή μεροληψία που οφείλεται στο περιβάλλον, δηλ. τον όρο  $RT_bP_b$ , ο οποίος δεν περιέχει πληροφορία. Εν τούτοις, μειώνοντας την στάθμη του σήματος κατά  $RT_bP_b$ , μπορεί να καταλήξουμε σε αρνητικό σήμα. Έτσι, αυτή η διαδικασία μεροληψίας (bias operation) μπορεί να χρειάζεται να πραγματοποιηθεί με τέτοιο τρόπο που να εξασφαλίζει ότι το σήμα που πρόκειται να διαμορφωθεί δεν είναι αρνητικό.

Θεωρώντας τις διαδικασίες αφαίρεσης μεροληψίας και της κανονικοποίησης, το λαμβανόμενο σήμα στον κόμβο  $i$  ( $i=1,2,\dots,N+1$ ) για σειριακή αναμετάδοση δίνεται από:

$$\mathbf{r}_i = \begin{bmatrix} r_i^s \\ r_i^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{i-1}g_{i-1,i}r_{i-1}^s + RT_bP_b - A_i' + n_i^s \\ a_{i-1}g_{i-1,i}r_{i-1}^n + RT_bP_b - A_i' + n_i^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{i-1}g_{i-1,i}r_{i-1}^s + A_i + n_i^s \\ a_{i-1}g_{i-1,i}r_{i-1}^n + A_i + n_i^n \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

όπου  $A_i = RT_bP_b - A_i' = -\min\{a_{i-1}g_{i-1,i}r_{i-1}^s + n_i^s, a_{i-1}g_{i-1,i}r_{i-1}^n + n_i^n\}$  είναι ο όρος της μεροληψίας ενίσχυσης και προώθησης (AF) που περιλαμβάνει τη φωτεινή μεροληψία που οφείλεται στο περιβάλλον,  $RT_bP_b$ , και την διαδικασία μεροληψίας (bias operation) ( $-A_i'$ ) που οδηγεί στην βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας του συστήματος. Στην πράξη, ο κόμβος-επαναλήπτης εκτελεί αυτή την διαδικασία μεροληψίας απλά μειώνοντας την στάθμη των λαμβανόμενων σημάτων στις BPPM χρονοσχιστές σήματος και μη, μέχρις ότου μία απ' αυτές να φτάσει το μηδέν. Πρέπει να σημειώσουμε ότι αυτή η διαδικασία μεροληψίας δεν προκαλεί απώλεια πληροφορίας γιατί η πληροφορία περιέχεται στην διαφορά στάθμης σήματος μεταξύ της χρονοσχιστής σήματος και της χρονοσχιστής απουσίας σήματος, η οποία παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μεροληψίας, αφού τα δύο σήματα μειώνονται κατά την ίδια ποσότητα. Στην 3.27, ο παράγοντας ενίσχυσης στον κόμβο  $(i-1)$ ,  $a_{i-1}$  ( $i=2,3,\dots,N+1$ ), ορίζεται ως:

$$a_{i-1} = \frac{RT_bP}{\rho_{i-1}} \quad (3.28)$$

όπου  $\rho_{i-1} = E[r_{i-1}^s + r_{i-1}^n]$  είναι ο κανονικοποιημένος όρος. Σημειώνουμε ότι, όσον αφορά το σήμα που εκπέμπεται από την πηγή, η κανονικοποίηση δεν λαμβάνει χώρα, δηλ.  $a_0 = RT_b P$ .

Το λαμβανόμενο σήμα στον προορισμό δίνεται από:

$$\mathbf{r}_{N+1} = \begin{bmatrix} r_{N+1}^s \\ r_{N+1}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \prod_{i=0}^N a_i g_{i,i+1} + \sum_{j=1}^N (n_j^s + A_j) \prod_{i=j}^N a_i g_{i,i+1} + n_{N+1}^s \\ \sum_{j=1}^N (n_j^n + A_j) \prod_{i=j}^N a_i g_{i,i+1} + n_{N+1}^n \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Στην παράλληλη αναμετάδοση, οι επαναλήπτες λαμβάνουν το εκπεμπόμενο σήμα από τα αντίστοιχα ανοίγματα του πομπού που σκοπεύουν στην κατεύθυνσή τους και ταυτόχρονα το εκπέμπουν ξανά με την κατάλληλη κανονικοποίηση και τις διαδικασίες μεροληψίας. Το λαμβανόμενο σήμα στο επαναλήπτη  $i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) προκύπτει:

$$\mathbf{r}_i = \begin{bmatrix} r_i^s \\ r_i^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RT_b P g_{0,i} + A_i + n_i^s \\ A_i + n_i^n \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

και το λαμβανόμενο σήμα στον προορισμό είναι:

$$\mathbf{r}_{N+1} = \begin{bmatrix} r_{N+1}^s \\ r_{N+1}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N a_0 a_i g_{0,i} g_{i,N+1} + a_i g_{i,N+1} (n_i^s + A_i) + n_{N+1}^s \\ \sum_{i=1}^N a_i g_{i,N+1} (n_i^n + A_i) + n_{N+1}^n \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

### 3.4 Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας (Outage Probability)

Οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις έχουν ως αποτέλεσμα πολύ αργές διαλείψεις στα συστήματα FSO. Ο χρόνος συνοχής του καναλιού είναι περίπου 1-100ms, έτσι οι διαλείψεις παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια εκατοντάδων χιλιάδων έως και εκατομμυρίων διαδοχικών bits για τυπικούς ρυθμούς μετάδοσης. Για τέτοια -σχεδόν σταθερά κανάλια- όπου τα λάθη που προκαλούνται από τις διαλείψεις δεν είναι πλέον ανεξάρτητα, η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας αποτελεί κατάλληλη μετρική για αξιολόγηση της επίδοσης του συστήματος. Δηλώνουμε το  $C(\alpha')$  ως την στιγμιαία χωρητικότητα που αντιστοιχεί σε πραγματοποίηση καναλιού τέτοια ώστε  $\alpha = \alpha'$ , που είναι συνάρτηση του στιγμιαίου ηλεκτρικού SNR  $\gamma$ . Για ένα Γκαουσιανό κανάλι για το οποίο ο μέσος όρος της συνιστώσας σήματος του λαμβανόμενου σήματος είναι

$m^s$  και της συνιστώσας απουσίας σήματος  $m^n$ , έχουμε  $r^s \sim N\left(m^s, \frac{\sigma_n^2}{2}\right)$  και

$r^n \sim N\left(m^n, \frac{\sigma_n^2}{2}\right)$ . Το στιγμιαίο ηλεκτρικό SNR μπορεί να οριστεί ως:

$$\gamma = \frac{(m^s - m^n)^2}{\sigma_n^2} \quad (3.32)$$

Η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για ρυθμό μετάδοσης  $R_0$  δίνεται από [9]:

$$P_{out}(R_0) = \Pr(C(\gamma) < R_0) \quad (3.33)$$

Αφού  $C(\cdot)$  αυξάνει μονοτονικά σε σχέση με το  $\gamma$ , η 3.33 μπορεί να γραφεί ως:

$$P_{out}(R_0) = \Pr(\gamma < \gamma_{th}) \quad (3.34)$$

όπου  $\gamma_{th} = C^{-1}(R_0)$  είναι το SNR κατωφλίου. Αν το SNR υπερβαίνει το  $\gamma_{th}$ , δεν συμβαίνει διακοπή λειτουργίας και το σήμα μπορεί να αποκωδικοποιηθεί με αυθαίρετα μικρή πιθανότητα λάθους στον δέκτη. Σημειώνουμε ότι το προαναφερθέν κατώφλι για την επιτυχή αποκωδικοποίηση του σήματος κατά την DF αναμετάδοση, είναι ίσο με το  $\gamma_{th}$ .

#### 3.4.1 Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για αναμετάδοση αποκωδικοποίησης και προώθησης (DF) για την περιοχή ασθενών σπινθηρισμών

Κατά την DF αναμετάδοση, η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας της κάθε ενδιάμεσης ζεύξης μπορεί να οδηγήσει στη διακοπή λειτουργίας του σχήματος αναμετάδοσης. Έτσι, ο υπολογισμός της διακοπής λειτουργίας για κάθε ενδιάμεση ζεύξη είναι απαραίτητος για να υπολογιστεί η από άκρο σε άκρο επίδοση. Πρώτα υπολογίζουμε την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας μίας ενδιάμεσης ζεύξης μίας εισόδου-μίας εξόδου (Single-input Single-output – SISO - link) που αποτελεί και το δομικό μέρος τόσο του σειριακού όσο και του παράλληλου σχήματος αναμετάδοσης.

Χρησιμοποιώντας την 3.32, το λαμβανόμενο ηλεκτρικό SNR για την ενδιάμεση SISO ζεύξη που συνδέει τον κόμβο  $i$  με τον κόμβο  $j$  προκύπτει:

$$\gamma = \frac{R^2 T_b^2 P^2 g_{i,j}^2}{N_0} \quad (3.35)$$

Εισάγοντας την 3.35 στην 3.34, η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας της SISO ζεύξης προκύπτει:

$$P_{out,SISO} = \Pr \left( g_{i,j} < \sqrt{\frac{\gamma_{th} N_0}{R^2 T_b^2 P^2}} \right) \quad (3.36)$$

Αντικαθιστώντας τον ορισμό  $g_{i,j} = \alpha_{i,j}^2 L_{i,j}$  στην 3.36 λαμβάνουμε την:

$$P_{out,SISO}(d_{i,j}) = \Pr \left( \alpha_{i,j}^2 < \frac{N'}{L_{i,j} P_M} \right) \quad (3.37)$$

όπου  $N' = N + 1$  για σειριακή αναμετάδοση και  $N' = 2N$  για παράλληλη αναμετάδοση. Στην 3.37, το  $P_M$  δηλώνει το περιθώριο διαλείψεων και ορίζεται ως

$P_M = \frac{P_t}{P_{th}}$ , όπου το  $P_{th}$  δηλώνει ένα κατώφλι για την απαιτούμενη ισχύ εκπομπής που

χρειάζεται έτσι ώστε εγγυημένα να μην συμβαίνει διακοπή λειτουργίας στην κατευθείαν, άνευ διαλείψεων ζεύξη, από την πηγή στον προορισμό. Έτσι το περιθώριο διαλείψεων μπορεί να εκφραστεί ως

$$P_M = \sqrt{\frac{P_t^2 R^2 T_b^2}{N_0 \gamma_{th}}} \quad (3.38)$$

θεωρώντας από την 3.35 ότι  $P_{th} = \sqrt{\frac{\gamma_{th} N_0}{R^2 T_b^2 g_{i,j}}}$ , με το  $g_{i,j} = \alpha_{i,j}^2 L_{i,j} = 1$  αφού  $\alpha_{i,j}^2 = 1$

λόγω της απουσίας διαλείψεων σύμφωνα με την ορισμό, ενώ  $L_{i,j} = l(d_{i,j}) / l(d_{0,N+1}) = 1$  και πάλι αφού  $l(d_{i,j}) = l(d_{0,N+1})$  για κατευθείαν ζεύξη.

Στην 3.37 και για την περιοχή των ασθενών ατμοσφαιρικών αναταραχών, το  $\alpha_{i,j}^2$  είναι λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή με μέσο όρο  $2\mu_\chi(d_{i,j})$  και διασπορά  $2\sigma_\chi(d_{i,j})$ .

Έτσι η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας μπορεί να γραφεί χρησιμοποιώντας την αθροιστική συνάρτηση κατανομής της λογαριθμοκανονικής κατανομής ως:

$$P_{out,SISO}(d_{i,j}) = Q \left( \frac{\ln \left( \frac{L_{i,i+1} P_M e^{2\mu_\chi(d_{i,i+1})}}{N'} \right)}{2\sigma_\chi(d_{i,i+1})} \right) \quad (3.39)$$

όπου  $Q(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_x^\infty \exp(-u^2/2) du$ .

Έχοντας τώρα στη διάθεσή μας την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας της SISO ζεύξης, μπορούμε να εξάγουμε την από άκρο σε άκρο πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για σειριακή και παράλληλη αναμετάδοση.

**1) Σειριακή αναμετάδοση:** Στη σειριακή αναμετάδοση, η διακοπή λειτουργίας συμβαίνει όταν οποιοδήποτε από τις ενδιάμεσες SISO ζεύξεις αποτύχει. Έτσι η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για το από άκρο σε άκρο σχήμα μπορεί να δοθεί ως:

$$P_{out} = \Pr\left(\bigcup_{i=0}^N \{\gamma_i < \gamma_{th}\}\right) \quad (3.40)$$

όπου  $\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_N$  είναι τα SNRs των ενδιάμεσων SISO καναλιών με μήκη  $d_{0,1}, d_{1,2}, \dots, d_{N,N+1}$ . Η 3.40 μπορεί να γραφεί σαν:

$$P_{out} = 1 - \Pr\left(\bigcap_{i=0}^N \{\gamma_i > \gamma_{th}\}\right) = 1 - \prod_{i=0}^N (1 - P_{out,SISO}(d_{i,i+1})) \quad (3.41)$$

Αντικαθιστώντας την 3.39 στην 3.41, η από άκρο σε άκρο πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για το σειριακό σχήμα αναμετάδοσης προκύπτει:

$$P_{out} = 1 - \prod_{i=0}^N \left( 1 - Q \left( \frac{\ln \left( \frac{L_{i,i+1} P_M e^{2\mu_\chi(d_{i,i+1})}}{N+1} \right)}{2\sigma_\chi(d_{i,i+1})} \right) \right) \quad (3.42)$$

**2.) Παράλληλη αναμετάδοση:** Στην παράλληλη αναμετάδοση, η διακοπή λειτουργίας μιας εκ των ενδιάμεσων SISO ζεύξεων δεν οδηγεί απαραίτητα σε διακοπή της λειτουργίας του σχήματος αναμετάδοσης. Σ' αυτό το σχήμα, διακοπή λειτουργίας συμβαίνει εάν είτε το αποκωδικοποιημένο σύνολο  $D$  είναι κενό είτε αποτύχει η ζεύξη πολλαπλών εισόδων – μίας εξόδου (Multiple Input – Single Output – MIMO) μεταξύ των επαναληπτών που πέτυχαν να αποκωδικοποιήσουν το σήμα και του προορισμού. Το λαμβανόμενο SNR για τη ζεύξη MISO μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\gamma = \frac{R^2 T_b^2 P^2 \left( \sum_{i \in D} g_{i,N+1} \right)}{N_0} \quad (3.43)$$

Εισάγοντας την 3.43 στην 3.34, η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας της ζεύξης MISO προκύπτει:

$$P_{out,MISO} = \Pr\left(\sum_{i \in D} g_{i,N+1} < \sqrt{\frac{\gamma_{th} N_0}{R^2 T_b^2 P^2}}\right) = \Pr\left(\sum_{i \in D} L_{i,N+1} \alpha_{i,N+1}^2 < \frac{2N}{P_M}\right) \quad (3.44)$$

Το άθροισμα με βάρη των λογαριθμοκανονικών τυχαίων μεταβλητών προσεγγίζεται ως λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ταιριάσματος των ροπών [10], [11], [12], δηλ.  $b = \exp(\xi) \approx \sum_{i \in D} L_{i,N+1} \alpha_{i,N+1}^2$ . Ο λογαριθμοκανονικός παράγοντας  $\xi$  ορίζεται ως τυχαία μεταβλητή κανονικής κατανομής με μέσο όρο  $\mu_\xi$  και διασπορά  $\sigma_\xi^2$  που αντίστοιχα μπορεί να γραφεί ως:

$$\mu_\xi(\bar{d}_D) = \ln \sum_{i \in D} L_{i,N+1} - \frac{\sigma_\xi^2(\bar{d}_D)}{2} \quad (3.45)$$

$$\sigma_\xi^2(\bar{d}_D) = \ln \left( 1 + \frac{\sum_{i \in D} L_{i,N+1} \left( e^{4\sigma_\xi^2(d_{i,N+1})-1} \right)}{\left( \sum_{i \in D} L_{i,N+1} \right)^2} \right) \quad (3.46)$$

Η μέση τιμή και η διασπορά του παράγοντα λογαριθμικού πλάτους  $\xi$  είναι συνάρτηση του  $\bar{d}_D$  που είναι το σύνολο όλων των αποστάσεων μεταξύ των επαναληπτών που αποκωδικοποιήθηκαν και του προορισμού (δηλ.  $d_{i,N+1} \in \bar{d}_D, \forall i \in D$ ). Χρησιμοποιώντας την αθροιστική συνάρτηση κατανομής της λογαριθμοκανονικής κατανομής, η 3.44 μπορεί να προσεγγιστεί ως:

$$P_{out,MISO}(\bar{d}_D) \approx \Pr\left(\beta < \frac{2N}{P_M}\right) = Q\left(\frac{\ln(P_M / 2N) + \mu_\xi(\bar{d}_D)}{\sigma_\xi(\bar{d}_D)}\right) \quad (3.47)$$

Για παράλληλο σχήμα αναμετάδοσης με  $N$  επαναλήπτες, το αποκωδικοποιημένο σύνολο αποτελείται από  $2^N$  πιθανότητες. Έστω  $S(i)$  να δηλώνει το πιθανό σύνολο  $i$  και  $\Pr(S(i))$  να δηλώνει την πιθανότητα του γεγονότος  $\{D = S(i)\}$ . Η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για το παράλληλο σχήμα αναμετάδοσης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$P_{out} = \sum_{i=1}^{2^N} P_{out,MISO}(\bar{d}_D) \Pr(S(i)) \approx \sum_{i=1}^{2^N} \left[ \prod_{j \in S(i)} (1 - P_{out,SISO}(d_{0,j})) \times \prod_{j \notin S(i)} P_{out,SISO}(d_{0,j}) \right] P_{out,MISO}(\bar{d}_{S(i)}) \quad (3.48)$$

Αντικαθιστώντας τις 3.39 και 3.47 στην 3.48, η από άκρο σε άκρο πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για το παράλληλο σχήμα αναμετάδοσης προκύπτει:



$$P_{out} \approx \sum_{i=1}^{2^N} \left[ \prod_{j \in S(i)} \left( 1 - Q \left( \frac{\ln \left( \frac{L_{0,j} P_M e^{2\mu_x}}{2N} \right)}{2\sigma_\chi(d_{0,j})} \right) \right) \times \prod_{j \notin S(i)} Q \left( \frac{\ln \left( \frac{L_{0,j} P_M e^{2\mu_x}}{2N} \right)}{2\sigma_\chi(d_{0,j})} \right) \right] Q \left( \frac{\ln \left( \frac{P_M e^{\mu_\xi}}{2N} \right)}{\sigma_\xi(d_{S(i)})} \right) \quad (3.49)$$

### 3.4.2 Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για αναμετάδοση ενίσχυσης και προώθησης (AF) για την περιοχή ασθενών σπινθηρισμών

Στην AF αναμετάδοση, οι ενδιάμεσοι επαναλήπτες προωθούν το σήμα χωρίς οποιαδήποτε αποκωδικοποίηση. Έτσι, αντί να εξεταστεί το SNR σε κάθε ενδιάμεση SISO ζεύξη, εξετάζεται το συνολικό SNR στον προορισμό για τον υπολογισμό της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας.

**1.) Σειριακή AF αναμετάδοση:** Το λαμβανόμενο σήμα στον προορισμό για σειριακή AF αναμετάδοση δίνεται από την

$$\mathbf{r}_{N+1} = \begin{bmatrix} r_{N+1}^s \\ r_{N+1}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \prod_{i=0}^N a_i \mathbf{g}_{i,i+1} + \sum_{j=1}^N (n_j^s + A_j) \prod_{i=j}^N a_i \mathbf{g}_{i,i+1} + n_{N+1}^s \\ \sum_{j=1}^N (n_j^n + A_j) \prod_{i=j}^N a_i \mathbf{g}_{i,i+1} + n_{N+1}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \prod_{i=0}^N a_i \mathbf{g}_{i,i+1} + A_{acc} + n_{acc}^s \\ A_{acc} + n_{acc}^n \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

όπου  $n_{acc}^s$  και  $n_{acc}^n$  είναι οι όροι του αθροιστικού θορύβου οι οποίοι ορίζονται ως

$$n_{acc}^s = \sum_{j=1}^N n_j^s \prod_{i=j}^N a_i \mathbf{g}_{i,i+1} + n_{N+1}^s \quad \text{και} \quad n_{acc}^n = \sum_{j=1}^N n_j^n \prod_{i=j}^N a_i \mathbf{g}_{i,i+1} + n_{N+1}^n, \quad \text{ενώ ο όρος } A_{acc} \text{ δηλώνει}$$

τον όρο αθροιστικής μεροληψίας και δίνεται από  $A_{acc} = \sum_{j=1}^N A_j \prod_{i=j}^N a_i \mathbf{g}_{i,i+1}$ . Με χρήση

των 3.35 και 3.50 το λαμβανόμενο SNR στον προορισμό δίνεται από:

$$\gamma = \frac{\prod_{i=0}^N \alpha_i^2 \mathbf{g}_{i,i+1}^2}{N_0 \left( \sum_{j=1}^N \prod_{i=j}^N \alpha_i^2 \mathbf{g}_{i,i+1}^2 + 1 \right)} \quad (3.51)$$

Ορίζοντας:

$$v_j = \frac{\prod_{i=0}^j \alpha_i^2 \mathbf{g}_{i,i+1}^2}{(RT_b)^2 P^2} \quad (3.52)$$

μπορούμε να ξαναγράψουμε την 3.51 ως:

$$\gamma = \frac{(RT_b)^2 P^2 (v_0^{-1} + v_1^{-1} + \dots + v_N^{-1})^{-1}}{N_0} \quad (3.53)$$

όπου τα  $v_j$  είναι λογαριθμοκανονικές τυχαίες μεταβλητές, αφού οποιοδήποτε γινόμενο ανεξάρτητων λογαριθμοκανονικών τυχαίων μεταβλητών ακολουθεί επίσης λογαριθμοκανονική κατανομή. Έστω  $v_i = \exp(\kappa_i)$ , τότε  $\kappa_i$  είναι κανονική τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή:

$$\mu_\kappa(i) = \ln \left( L_{0,1}^2 \prod_{j=1}^i a_j^2 L_{j,j+1}^2 \right) - 4 \sum_{j=0}^i \sigma_x^2(d_{j,j+1}) \quad (3.54)$$

και διασπορά:

$$\sigma_\kappa^2(i) = 16 \sum_{j=0}^i \sigma_x^2(d_{j,j+1}) \quad (3.55)$$

Από την άλλη πλευρά, η συνδιακύμανση (covariance) μεταξύ των  $\kappa_i$  και  $\kappa_j$  μπορεί να ληφθεί ως  $\sum_\kappa(i, j) = \sigma_\kappa^2(\min(i, j))$ . Αφού η δύναμη (θετική ή αρνητική) μίας λογαριθμοκανονικής τυχαίας μεταβλητής ακολουθεί επίσης λογαριθμοκανονική κατανομή, το άθροισμα των  $v_j$  μπορεί να προσεγγιστεί σαν λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή, δηλ.  $\exp(\varepsilon) \approx \sum_{j=0}^N v_j^{-1}$ . Έτσι, το  $\gamma$  μπορεί να προσεγγιστεί ως προς μια λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή ως:

$$\gamma \approx (RT_b)^2 P^2 \exp(-\varepsilon) / N_0 \quad (3.56)$$

όπου η μέση τιμή και η διασπορά της κανονικά κατανομημένης τυχαίας μεταβλητής  $\varepsilon$  είναι:

$$\mu_\varepsilon = \ln \left( \sum_{i=0}^N \exp(\sigma_\kappa^2(i) / 2 - \mu_\kappa(i)) \right) - \sigma_\varepsilon^2 / 2 \quad (3.57)$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = \ln \left( 1 + \frac{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \exp\left(\frac{\sigma_\kappa^2(i) + \sigma_\kappa^2(j)}{2} - \mu_\kappa(i) - \mu_\kappa(j)\right) \left(e^{\sum_\kappa(i,j)} - 1\right)}{\left(\sum_{i=0}^N \exp\left(\frac{\sigma_\kappa^2(i)}{2} - \mu_\kappa(i)\right)\right)^2} \right) \quad (3.58)$$

Αντικαθιστώντας την 3.56 στην 3.34, η από άκρο σε άκρο πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για AF σειριακό σχήμα αναμετάδοσης προκύπτει ως:

$$P_{out} \approx \Pr \left( \exp(-\varepsilon) < \frac{\gamma_{th} N_0}{(RT_b)^2 P^2} \right) = \Pr \left( \exp(-\varepsilon) < \frac{(N+1)^2}{P_M^2} \right) = Q \left( \frac{\ln(P_M^2)/(N+1)^2 - \mu_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon} \right) \quad (3.59)$$

**1.) Παράλληλη AF αναμετάδοση:** Το λαμβανόμενο στον προορισμό σήμα για παράλληλη AF αναμετάδοση δίνεται από την:

$$\mathbf{r}_{N+1} = \begin{bmatrix} r_{N+1}^s \\ r_{N+1}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N a_0 a_i g_{0,i} g_{i,N+1} + a_i g_{i,N+1} (n_i^s + A_i) + n_{N+1}^s \\ \sum_{i=1}^N a_i g_{i,N+1} (n_i^n + A_i) + n_{N+1}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N a_0 a_i g_{0,i} g_{i,N+1} + A_{acc} + n_{acc}^s \\ A_{acc} + n_{acc}^n \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

όπου ορίζουμε τον αθροιστικό παράγοντα θορύβου ως  $n_{acc}^s = \sum_{i=1}^N a_i g_{i,N+1} n_i^s + n_{N+1}^s$ ,

$n_{acc}^n = \sum_{i=1}^N a_i g_{i,N+1} n_i^n + n_{N+1}^n$  και τον αθροιστικό παράγοντα μεροληψίας ως

$A_{acc} = \sum_{i=1}^N a_i g_{i,N+1} A_i$ . Με χρήση των 3.32 και 3.60 το λαμβανόμενο SNR στον

προορισμό δίνεται από:

$$\gamma = \frac{\left( RT_b P \sum_{i=1}^N a_i g_{i,N+1} g_{0,i} \right)^2}{N_0 \left( \sum_{i=1}^N a_i^2 g_{i,N+1}^2 + 1 \right)} \quad (3.61)$$

Οι όροι του αθροίσματος στον αριθμητή και τον παρονομαστή της 3.61 μπορούν να προσεγγιστούν ως μία λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή, δηλ.

$\exp(\omega_1) \approx \sum_{i=1}^N a_i g_{i,N+1} g_{0,i}$  και  $\exp(\omega_2) \approx \sum_{i=1}^N a_i^2 g_{i,N+1}^2$ . Έτσι η 3.61 γίνεται:

$$\gamma \approx \frac{R^2 T_b^2 P^2 \exp(2\omega_1)}{N_0 (\exp(\omega_2) + 1)} \quad (3.62)$$

Το λογαριθμικό ζευγάρι  $(\omega_1, \omega_2)$  ακολουθεί συσχετισμένη διμεταβλητή κανονική κατανομή [13]. Η μέση τιμή και ο πίνακας συνδιακύμανσης ορίζονται αντίστοιχα ως:

$$\mu_1 = \ln \sum_{i=1}^N a_i L_{0,i} L_{i,N+1} - \sigma_1^2 / 2 \quad (3.63)$$

$$\mu_2 = \ln \sum_{i=1}^N a_i^2 L_{i,N+1}^2 e^{4\sigma_\chi^2(d_{i,N+1})} - \sigma_2^2 / 2 \quad (3.64)$$

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & \sigma_2^2 \end{pmatrix} \quad (3.65)$$

όπου  $\sigma_1^2$ ,  $\sigma_2^2$  και  $\sigma_{12}$  δίνονται από:

$$\sigma_1^2 = \ln \left( 1 + \frac{\sum_{i=1}^N a_i^2 L_{0,i}^2 L_{i,N'}^2 \left( e^{4(\sigma_\chi^2(d_{0i}) + \sigma_\chi^2(d_{i,N'}))} - 1 \right)}{\left( \sum_{i=1}^N a_i L_{0,i} L_{i,N'} \right)^2} \right) \quad (3.66)$$

$$\sigma_2^2 = \ln \left( 1 + \frac{\sum_{i=1}^N a_i^4 L_{i,N'}^4 \left( e^{24\sigma_\chi^2(d_{i,N'})} - e^{8\sigma_\chi^2(d_{i,N'})} \right)}{\left( \sum_{i=1}^N a_i^2 L_{i,N'}^2 e^{4\sigma_\chi^2(d_{i,N'})} \right)^2} \right) \quad (3.67)$$

$$\sigma_{12} = \ln \left( 1 + \frac{\sum_{i=1}^N a_i^3 L_{0,i} L_{i,N'}^3 \left( e^{12\sigma_\chi^2(d_{i,N'})} - e^{4\sigma_\chi^2(d_{i,N'})} \right)}{\left( \sum_{i=1}^N a_i^2 L_{i,N'}^2 e^{4\sigma_\chi^2(d_{i,N'})} \right) \left( \sum_{i=1}^N a_i L_{0,i} L_{i,N'} \right)} \right) \quad (3.68)$$

όπου  $N' = N + 1$ . Αντικαθιστώντας την 3.62 στην 3.34, η από άκρο σε άκρο πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για AF παράλληλο σχήμα αναμετάδοσης προκύπτει χρησιμοποιώντας την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διμεταβλητής κανονικής κατανομής, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{aligned} P_{out} &= \Pr \left( \frac{\exp(2\omega_1)}{\exp(\omega_2) + 1} < \frac{2N}{P_M} \right) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\omega_0} \frac{1}{2\pi\sqrt{|\Sigma|}} \exp \left( -\frac{\sigma_2^2(\omega_1 - \mu_1)^2 + \sigma_1^2(\omega_2 - \mu_2)^2 - 2\sigma_{12}(\omega_1 - \mu_1)(\omega_2 - \mu_2)}{2|\Sigma|} \right) d\omega_2 d\omega_1 \end{aligned} \quad (3.69)$$

Το πάνω όριο του εσωτερικού ολοκληρώματος της 3.69 εκφράζεται ως  $\omega_0 = \ln(2N(\exp(\omega_2) + 1)/P_M)/2$ .

Κλειστή μορφή της 3.69 δεν είναι διαθέσιμη.

### 3.5 Αναμενόμενος αριθμός διαλείψεων ανά δευτερόλεπτο και μέσος χρόνος διαλείψεων

Ο αναμενόμενος αριθμός διαλείψεων ανά δευτερόλεπτο είναι ίσος με τον αριθμό των αρνητικών μεταβάσεων (δηλαδή μεταβάσεων από υψηλότερα επίπεδα ισχύος του λαμβανόμενου σήματος σε χαμηλότερα ή μετάβαση αρνητικής κλίσης) κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο κατωφλίου. Όταν ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR) στην έξοδο του ανιχνευτή είναι ικανοποιητικά υψηλός, η συνεισφορά του θορύβου στον αναμενόμενο αριθμό διαλείψεων μπορεί να αμεληθεί. Σ' αυτή την περίπτωση ο αναμενόμενος αριθμός διαλείψεων ανά δευτερόλεπτο δίνεται από:

$$\langle n(I_T) \rangle = 0.5 \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{I}| p_{I,\dot{I}}(I_T, \dot{I}) d\dot{I} \quad (3.70)$$

όπου  $p_{I,\dot{I}}(I, \dot{I})$  είναι η από κοινού συνάρτηση πυκνότητα πιθανότητας της φωτεινής έντασης  $I$  και της χρονικής της παραγώγου  $\dot{I}$ , ενώ  $I_T$  είναι το επίπεδο κατωφλίου για τη φωτεινή ένταση. Για όποια κατανομή της φωτεινής έντασης, η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της μπορεί να γραφεί ως:

$$p_{I,\dot{I}}(I, \dot{I}) = p_I(I) p_{\dot{I}}(\dot{I} | I) \quad (3.71)$$

Όπου  $p_I(I)$  είναι η pdf της φωτεινής έντασης και  $p_{\dot{I}}(\dot{I} | I)$  είναι η υπό συνθήκη PDF για τη χρονική της παράγωγο. Αν οι δύο προηγούμενες pdf είναι στατιστικά ανεξάρτητες τότε η υπό συνθήκη pdf του  $\dot{I}$  μπορεί να ελαττωθεί στην άνευ συνθήκης pdf  $p_{\dot{I}}(\dot{I})$ .

Ο μέσος χρόνος διαλείψεων παριστάνει τον μέσο χρόνο κατά τον οποίο η φωτεινή ένταση παραμένει κάτω από το ορισμένο επίπεδο κατωφλίου,  $I_T$ . Υπολογίζεται από το λόγο της πιθανότητας διάλειψης και τον αναμενόμενο αριθμό λαθών ανά δευτερόλεπτο:

$$\langle t(I_T) \rangle = \frac{\text{Pr}(I \leq I_T)}{\langle n(I_T) \rangle} \quad (3.72)$$

#### 3.5.1 Lognormal Κατανομή

Η από κοινού pdf της κανονικοποιημένης φωτεινής έντασης που ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή και της χρονικής της παραγώγου δίνεται από την

$$p_{I,i}(I, \dot{I}) = \frac{1}{I\sigma_{\ln I}\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(I) + 0.5\sigma_{\ln I}^2]^2}{2\sigma_{\ln I}^2}\right\} \times \frac{1}{2bI\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\dot{I}^2}{8b^2I^2}\right), I > 0 \quad (3.73)$$

Όπου  $b$  η τυπική απόκλιση της χρονικής παραγώγου μιας Γκαουσιανής τυχαίας διαδικασίας. Το πρώτο μέρος της παραπάνω έκφρασης είναι η λογαριθμοκανονική pdf και το υπόλοιπο η υπό συνθήκη PDF της  $\dot{I}$ . Ο αναμενόμενος αριθμός των διαλείψεων για φωτεινή ένταση που ακολουθεί λογαριθμοκανονική PDF εξάγεται με την εισαγωγή της παραπάνω σχέσης στην 3.70 που καταλήγει στην[4]:

$$\langle n(F_T) \rangle = v_0 \exp\left[-\frac{(0.5\sigma_{\ln I}^2 - 0.23F_T)^2}{2\sigma_{\ln I}^2}\right] \quad (3.74)$$

Όπου  $v_0$  η ψευδό-συχρότητα που ορίζεται ως:

$$v_0 = \frac{b}{\pi\sigma_{\ln I}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-\frac{B_{\ln I}''(0)}{B_{\ln I}(0)}} [Hz] \quad (3.75)$$

όπου  $B_{\ln I}(\tau)$  είναι η συνάρτηση συνδιακύμανσης της  $\ln I$  (log-irradiance).  $B_{\ln I}''(\tau)$  είναι η δεύτερη παράγωγος της συνάρτησης συνδιακύμανσης όσον αφορά το  $\tau$ , και  $F_T$  ο αριθμός των db κάτω από τη μέση ένταση ακτινοβολίας:

$$F_T = 10 \log_{10} \left( \frac{\langle I(0, L) \rangle}{I_T} \right) [dB] \quad (3.76)$$

### 3.5.2 Προσέγγιση του αναμενόμενου αριθμού διαλείψεων για φωτεινή ένταση που ακολουθεί Gamma-Gamma κατανομή

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε αντίστοιχα με προηγουμένως [4]:

$$p_{I,i}(I, \dot{I}) = \frac{1}{\sqrt{4\pi b^2}} \frac{\alpha^\alpha \beta^\beta}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\beta-3/2} \int_0^\infty \frac{x^{\alpha-\beta-1/2}}{\sqrt{I+x^2}} \times \exp\left[-\alpha x - \frac{\beta I}{x} - \frac{\dot{I}^2 x}{4b^2 I(I+x^2)}\right] dx \quad (3.77)$$

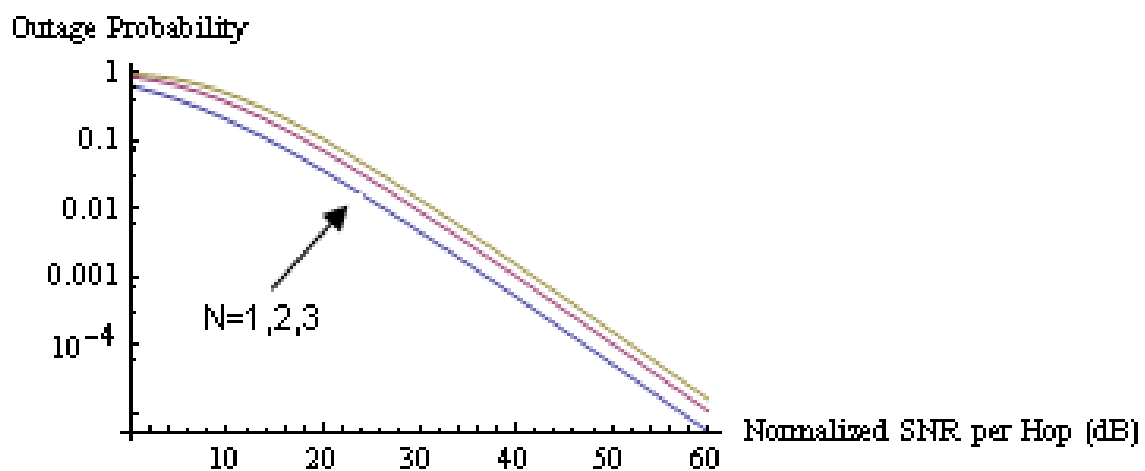
Έτσι καταλήγουμε στον αναμενόμενο αριθμό των διαλείψεων για τη φωτεινή ένταση που ακολουθεί GG κατανομή:

$$\langle n(I_T) \rangle = \frac{\sqrt{\pi}\sigma_{\ln I} v_0 \alpha^\alpha \beta^\beta}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I_T^{\beta-1/2} \int_0^\infty x^{\alpha-\beta-3/2} \sqrt{I+x^2} \times \exp\left[-\alpha x - \frac{\beta I_T}{x}\right] dx \quad (3.78)$$

Το  $\langle n(F_T) \rangle$  παράγεται με την εισαγωγή της σχέσης  $I_T = \exp(-0.23F_T)$  στην 3.78.

### 3.6 Ανάλυση και επεξεργασία της εμβέλειας και της επίδοσης του συστήματος

Στο παρακάτω σχήμα έχουμε σχεδιάσει την αναλυτική καμπύλη της από άκρο σε άκρο πιθανότητας διακοπής λειτουργίας σαν συνάρτηση του  $\bar{\gamma}/\gamma_{th}$  για DF επαναλήπτες, υποθέτοντας Gamma Gamma κανάλια για διάφορες τιμές του N. Σημειώνουμε ότι το N εν προκειμένω, παριστάνει τον αριθμό των ισαπεχόντων επαναληπτών, με τη μεταξύ τους απόσταση σταθερή και ανεξάρτητη του N. Επομένως εδώ πέρα απεικονίζουμε την χρησιμότητα της χρήσης επαναληπτών σαν μεθόδου διεύρυνσης της εμβέλειας του συστήματός μας και όχι ως τρόπο καταπολέμησης των διαλείψεων. Η καμπύλη προκύπτει από τις 3.20 και 3.41 (για  $\alpha=4$  και  $\beta=2$  για όλα τα άλματα) χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες μονοπατιού, όπως αυτό έχει τηρηθεί στην προηγούμενη ανάλυσή μας.



Σχήμα 3: Απ' άκρη σ' άκρη πιθανότητα ενός N-βηματικού FSO (N=1,2 και 3) συστήματος πάνω από Gamma-Gamma κανάλια συναρτήσει του  $\bar{\gamma}/\gamma_{th}$ .

Για τη δημιουργία του παραπάνω σχήματος χρησιμοποιήθηκε το μαθηματικό λογισμικό πακέτο "Mathematica".

Το Σχήμα 3 φανερώνει την υποβάθμιση της επίδοσης του συστήματος με την αύξηση της συνολικής απόστασης που καλύπτει, δηλ. με την διεύρυνση της εμβέλειάς του με προσθήκη επιπλέον, ισαπέχοντων επαναληπτών.

Στη συνέχεια του παρόντος, παρουσιάζουμε και συγκρίνουμε θεωρητικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοίωσης για την επίδοση του συστήματος για

συνθήκες ασθενών διακυμάνσεων και για την μοντελοποίηση που ακολουθήσαμε προηγούμενα για τη λογαριθμοκανονική κατανομή, με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου “Matlab”.

Συγκεκριμένα εξετάζουμε την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του συστήματος (outage probability) μέσα από τις παραχθείσες εκφράσεις και την προσομοίωση Monte Carlo.

Θεωρήσαμε FSO σύστημα με μήκος κύματος  $\lambda=1550$  nm που να λειτουργεί υπό συνθήκες καθαρού ουρανού με ορατότητα 10Km [βλ. κεφάλαιο 1- διεθνής κώδικας ορατότητας]. Υποθέτουμε ατμοσφαιρική απόσβεση 0.43 dB/Km, δηλαδή συντελεστή απόσβεσης – ο οποίος εξαρτάται από την ορατότητα-  $\sigma \approx 0.1$ ) και δομική σταθερά (structure constant)  $Cn^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ . Το εύρος της ζεύξης (δηλ. η απόσταση μεταξύ πηγής και προορισμού) είναι  $d_{0,N+1} = 5$  Km. Για την περίπτωση της σειριακής αναμετάδοσης, θεωρούμε ότι οι διαδοχικοί κόμβοι ισαπέχουν μεταξύ τους ενώ στην περίπτωση της παράλληλης αναμετάδοσης, οι επαναλήπτες βρίσκονται στο μέσο του μονοπατιού, ανάμεσα σε πηγή και προορισμό.

Το Σχήμα 4 παρουσιάζει την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των τερματικών κόμβων του συστήματος (end to end outage probability), δηλαδή την πιθανότητα διακοπής της ζεύξης μεταξύ πηγής και προορισμού για ένα FSO σύστημα σειριακής αναμετάδοσης που χρησιμοποιεί τεχνολογία αποκωδικοποίησης και προώθησης (Decode and forward – DF) για 0,1 και 2 παρεμβάλλοντες επαναλήπτες ( $N=0,1,2$ ). Παρουσιάζουμε αναλυτικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την εξίσωση 3.42 την οποία και επαναλαμβάνουμε για ευκολία:

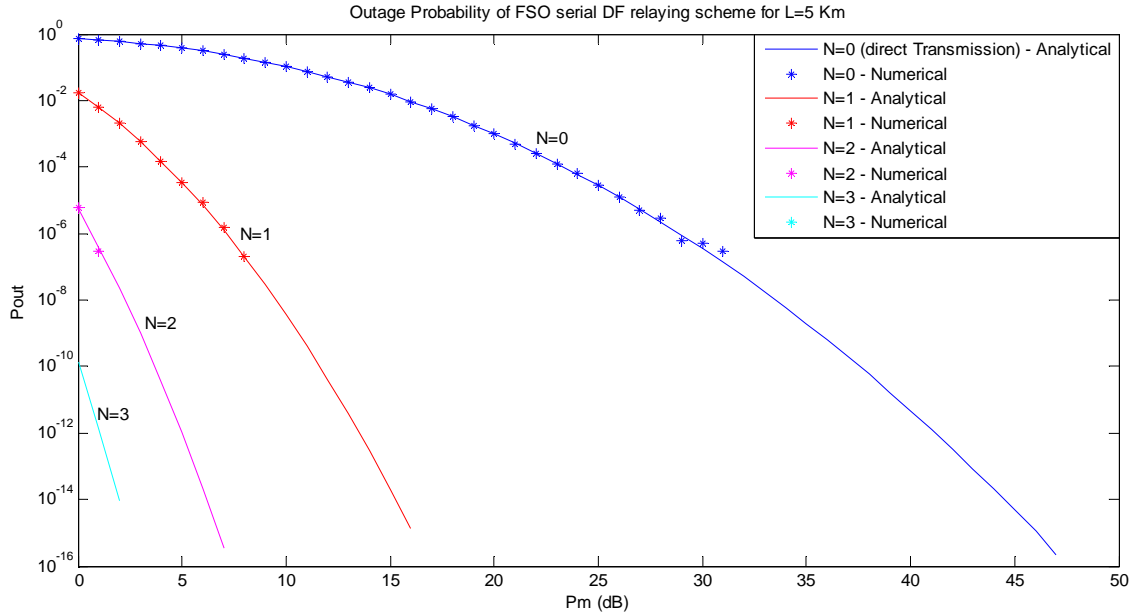
$$P_{out} = 1 - \prod_{i=0}^N \left( 1 - Q \left( \frac{\ln \left( \frac{L_{i,i+1} P_M e^{2\mu_{\chi}(d_{i,i+1})}}{N+1} \right)}{2\sigma_{\chi}(d_{i,i+1})} \right) \right)$$

μαζί με αποτελέσματα που προκύπτουν από την Monte Carlo προσομοίωση της εξίσωσης 3.34:

$$P_{out}(R_0) = \Pr(\gamma < \gamma_{th})$$

όπου  $R_0$  ο ρυθμός μετάδοσης που σχετίζεται με αυτή την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας.





Σχήμα 4: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας ενός FSO DF σειριακού συστήματος για ζεύξη μήκους 5 Km.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, η εξίσωση 3.42 ταυτίζεται απόλυτα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι η σειριακή αναμετάδοση βελτιώνει σημαντικά την επίδοση του συστήματος. Σε σύγκριση με την απευθείας ζεύξη, δηλαδή τη ζεύξη χωρίς την διαμεσολάβηση κάποιου επαναλήπτη ( $N=0$ ), και για την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας  $10^{-6}$  που αποτελεί και σχεδιαστικό στόχο, παρατηρούμε βελτιώσεις στην επίδοση του συστήματος (Margin Gain) της τάξης των 21.78 dB, 28.26 db και 28.91 dB για  $N=1,2$  και 3 αντίστοιχα. Αυτό το κέρδος μπορεί να ποσοτικοποιηθεί ως  $\text{Margin Gain}(N) = P_m(P_{out}, N=0) - P_m(P_{out}, N)$ .

Πρέπει να τονίσουμε ότι αυτό το σημαντικό κέρδος στην επίδοση του συστήματος είναι απόρροια της δυνατότητας που παρέχουν οι ενδιάμεσοι κόμβοι να εκμεταλλεύονται την εξάρτηση του λογαριθμικού πλάτους της διασποράς (log-amplitude variance). Όπως παρατηρούμε και από τη σχέση 3.9:

$$\sigma_{\chi}^2(d) = 0.124k^{7/6}C_n^2d^{11/6}$$

η διασπορά του λογαριθμικού πλάτους αυξάνει εκθετικά (σχεδόν με τη δεύτερη δύναμη) με την απόσταση ( $d$ ). Έτσι παρεμβάλλοντας ένα επαναλήπτη, διασπούμε την αρχική ζεύξη σε δύο άλλες με τη μισή απόσταση της αρχικής και έτσι επιτυγχάνουμε μείωση της διασποράς του λογαριθμικού πλάτους  $\chi$ , σχεδόν στο  $1/4$  της αρχικής. Με τον ίδιο τρόπο, εισάγοντας δύο ενδιάμεσους επαναλήπτες, διαιρούμε την αρχική

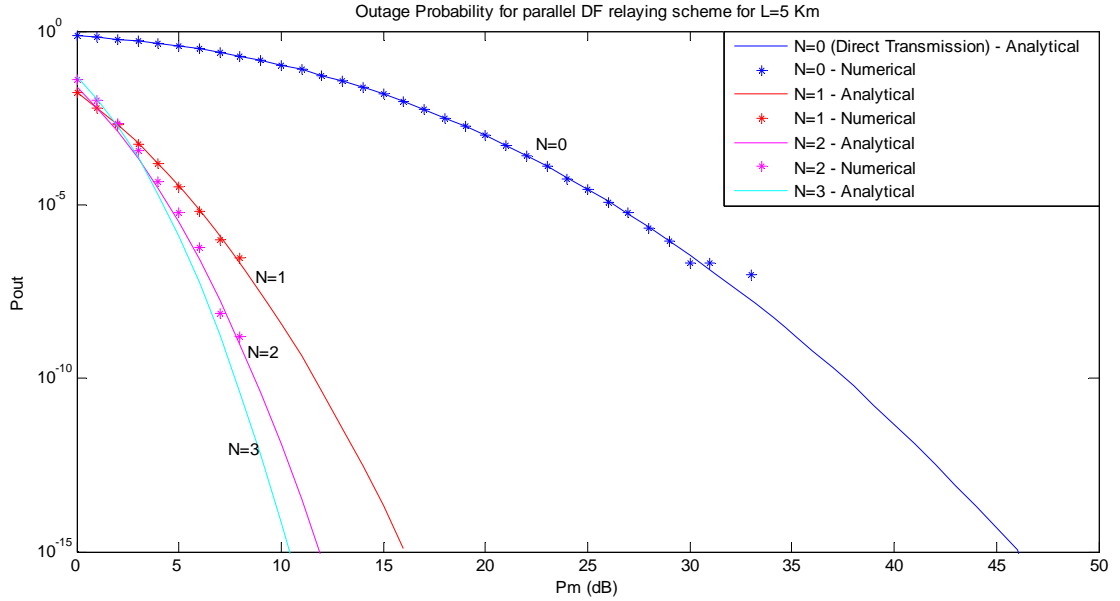
απόσταση στα τρία και ελαττώνουμε το  $\sigma_\chi^2(d)$  στο 1/9 της αρχικής του τιμής. Με αυτό τον τρόπο εισάγεται εδώ τεχνητά το πλεονέκτημα της διαφορικής λήψης το οποίο έχει παρόμοια επίδραση στην μείωση του  $\sigma_\chi^2(d)$  με την φυσική διαφορική λήψη, κατά την οποία τοποθετούνται μαζί διαφορετικός αριθμός ανοιγμάτων (apertures). Όσο αυξάνει ο αριθμός των ανοιγμάτων, τόσο περισσότερο μειώνεται το  $\sigma_\chi^2(d)$ .

Βέβαια αξίζει να σημειώσουμε ότι μεγάλη διαφορά στην επίδοση του συστήματος παρατηρείται με την τοποθέτηση του πρώτου επαναλήπτη. Αν και το  $\sigma_\chi^2(d)$  μειώνεται σχεδόν με τη δεύτερη δύναμη της απόστασης και εκ πρώτης όψεως θα λέγαμε ότι η τοποθέτηση επιπλέον επαναληπτών θα αύξανε δραματικά την επίδοση, αυτό δεν συμβαίνει όπως φαίνεται και από το σχήμα, γιατί από κάποιο σημείο και μετά η τιμή του  $\sigma_\chi^2(d)$  μειώνεται σε βαθμό που η απόσβεση που εισάγει να είναι αμελητέα σε σχέση με το σύνολο των υπόλοιπων αποσβέσεων και έτσι η διαφορά στην επίδοση που παρατηρείται είναι μικρή. Έτσι η τοποθέτηση επιπλέον επαναληπτών καθίσταται ασύμφορη μια και το κέρδος σε περιθώριο διαλείψεων είναι δυσανάλογα μικρό.

Το Σχήμα 5 παρουσιάζει την από άκρο σε άκρο πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για ένα FSO DF σύστημα για παράλληλη αναμετάδοση και  $N=0,1,2$ . Παρουσιάζουμε αναλυτικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την 3.49:

$$P_{out} \approx \sum_{i=1}^{2^N} \left[ \prod_{j \in S(i)} \left( 1 - Q \left( \frac{\ln \left( \frac{L_{0,j} P_M e^{2\mu_\chi}}{2N} \right)}{2\sigma_\chi(d_{0,j})} \right) \right) \right] \times \prod_{j \notin S(i)} \left[ Q \left( \frac{\ln \left( \frac{L_{0,j} P_M e^{2\mu_\chi}}{2N} \right)}{2\sigma_\chi(d_{0,j})} \right) \right] \left[ Q \left( \frac{\ln \left( \frac{P_M e^{\mu_\xi}}{2N} \right)}{\sigma_\xi(d_{S(i)})} \right) \right]$$

μαζί με τα αποτελέσματα της Monte Carlo προσομοίωσης της 3.34. Παρόλο που η εξίσωση 3.49 βασίζεται σε προσέγγιση, παρατηρούμε μεγάλη ταύτιση των αναλυτικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων:



Σχήμα 5: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας ενός FSO DF παράλληλου συστήματος για ζεύξη μήκους 5 Km.

Σημειώνουμε πως για  $N=1$  η επίδοση του σειριακού και του παράλληλου συστήματος συμπίπτουν όπως αναμενόταν άλλωστε, ενώ μπορεί να επιβεβαιωθεί με την σύγκριση των 3.42 και 3.49.

Έτσι για  $N=1$  η 3.42 δίνει:

$$P_{out} = 1 - [1 - P_{out, \text{siso}}(d_{0,1})] \times [1 - P_{out, \text{siso}}(d_{1,2})] = 1 - [1 - P_{out, \text{siso}}(d_{0,1})]^2 = 1 - [1 - P_{out, \text{siso}}(d_{1,2})]^2 = 1 - [1 - P_{out, \text{siso}}(L/2)]^2 = 2P_{out, \text{siso}}(L/2) - [P_{out, \text{siso}}(L/2)]^2$$

ενώ η 3.49 δίνει:

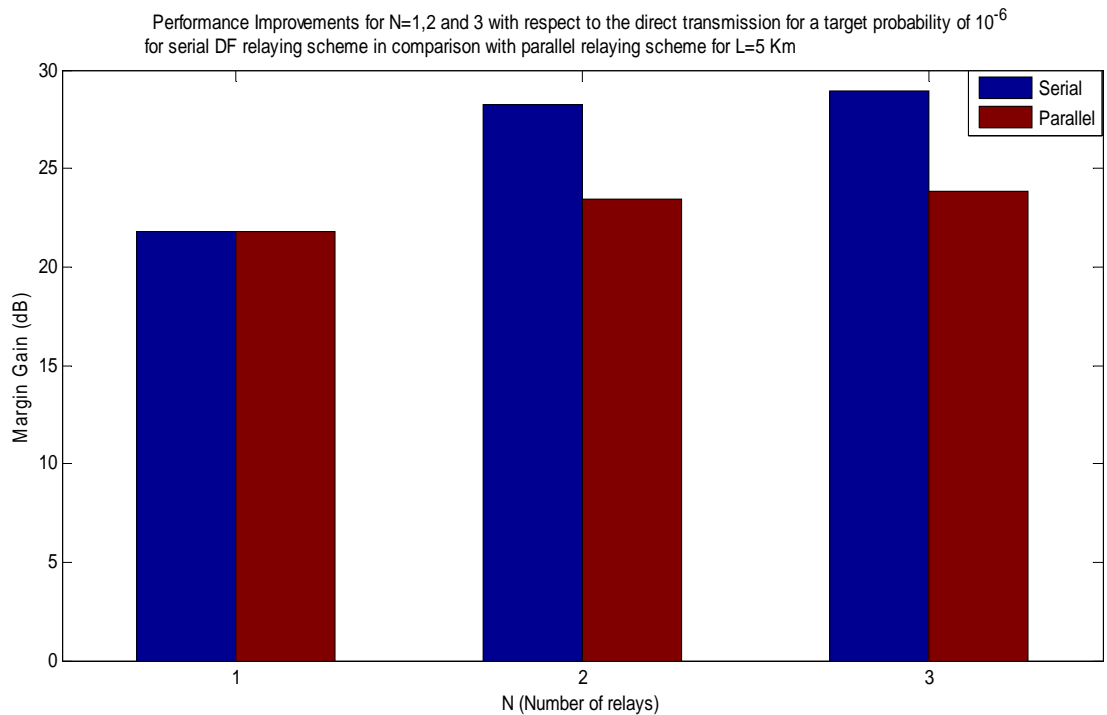
$$P_{out} = [1 - P_{out, \text{siso}}(d_{0,1})] \times P_{out, \text{MISO}}(d_{1,2}) + P_{out, \text{siso}}(d_{0,1}) = 2P_{out, \text{siso}}(L/2) - [P_{out, \text{siso}}(L/2)]^2,$$

αφού  $P_{out, \text{MISO}}(d_{1,2}) = P_{out, \text{siso}}(d_{1,2}) = P_{out, \text{siso}}(d_{0,1}) = P_{out, \text{siso}}(L/2)$  για  $N=1$ .

Θεωρώντας το Σχήμα 5, παρατηρούμε ότι, με χρήση ενός, δύο και τριών επαναληπτών στο παράλληλο σχήμα αναμετάδοσης έχουμε βελτίωση της επίδοσης κατά 22.77 dB, 23.45 και 23.84 αντίστοιχα σε σχέση με την απευθείας ζεύξη με στόχο πιθανότητα διακοπής λειτουργίας ίσης με  $10^{-6}$ .

Σημειώνουμε ότι το κέρδος επίδοσης της παράλληλης αναμετάδοσης είναι μικρότερο από αυτό της σειριακής για  $N>1$ , αφού η πρώτη (με μόνο 2 βήματα) εκμεταλλεύεται σε λιγότερο βαθμό την εξάρτηση από την απόσταση. Γι' αυτό το λόγο παρατηρούμε πως για  $N>1$  η βελτίωση της ζεύξης είναι μικρή αφού η απόσταση και συνεπώς το

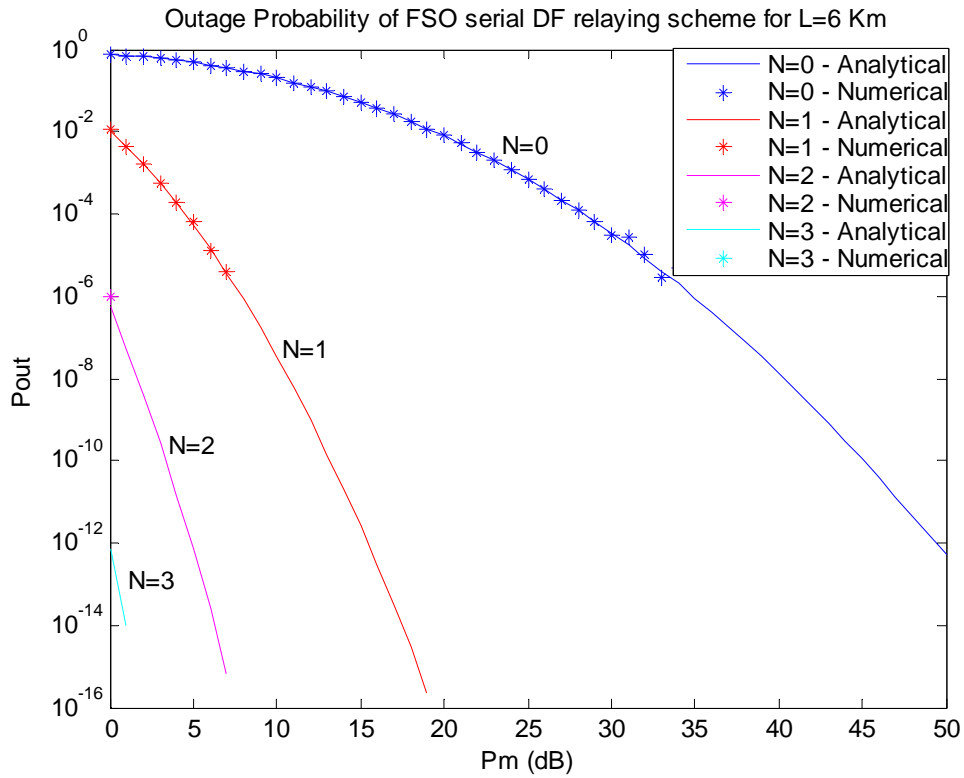
$\sigma_z^2(d)$  παραμένουν τα ίδια. Αυτό που βελτιώνει έστω και λίγο την επίδοση της ζεύξης -μετά τον υποδιπλασιασμό της απόστασης της άμεσης ζεύξης- είναι η μικρότερη πιθανότητα να τεθούν ταυτόχρονα εκτός λειτουργίας οι διαφορικές διαδρομές του οπτικού σήματος τη στιγμή που (για  $N > 1$ ) το  $\sigma_z^2(d)$  δεν αλλάζει με την αύξηση του  $N$ . Αυτή η διαφορά στην επίδοση ανάμεσα στο σειριακό και το παράλληλο σχήματος αναμετάδοσης σκιαγραφείται στο παρακάτω ραβδόγραμμα:



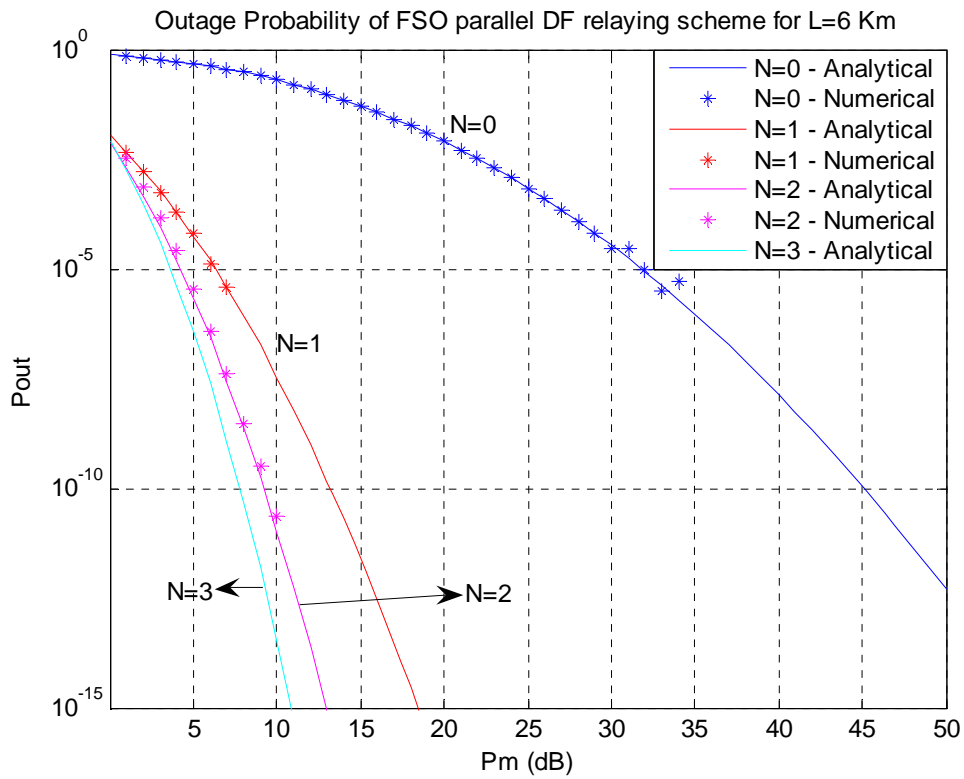
Σχήμα 6: Σύγκριση της επίδοσης του σειριακού και του παράλληλου σχήματος DF αναμετάδοσης σε σχέση με την κατευθείαν ζεύξη για απόσταση ζεύξης ίση με 5 Km.

Στην συνέχεια μελετάμε την επίδοση μιας ζεύξης με απόσταση  $L=6$  Km και όλες τις άλλες παραμέτρους της αμετάβλητες.

Σ' αυτή την περίπτωση η πιθανότητα της από άκρο σε άκρο διακοπής λειτουργίας για το σειριακό και παράλληλο σχήμα αναμετάδοσης απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα:

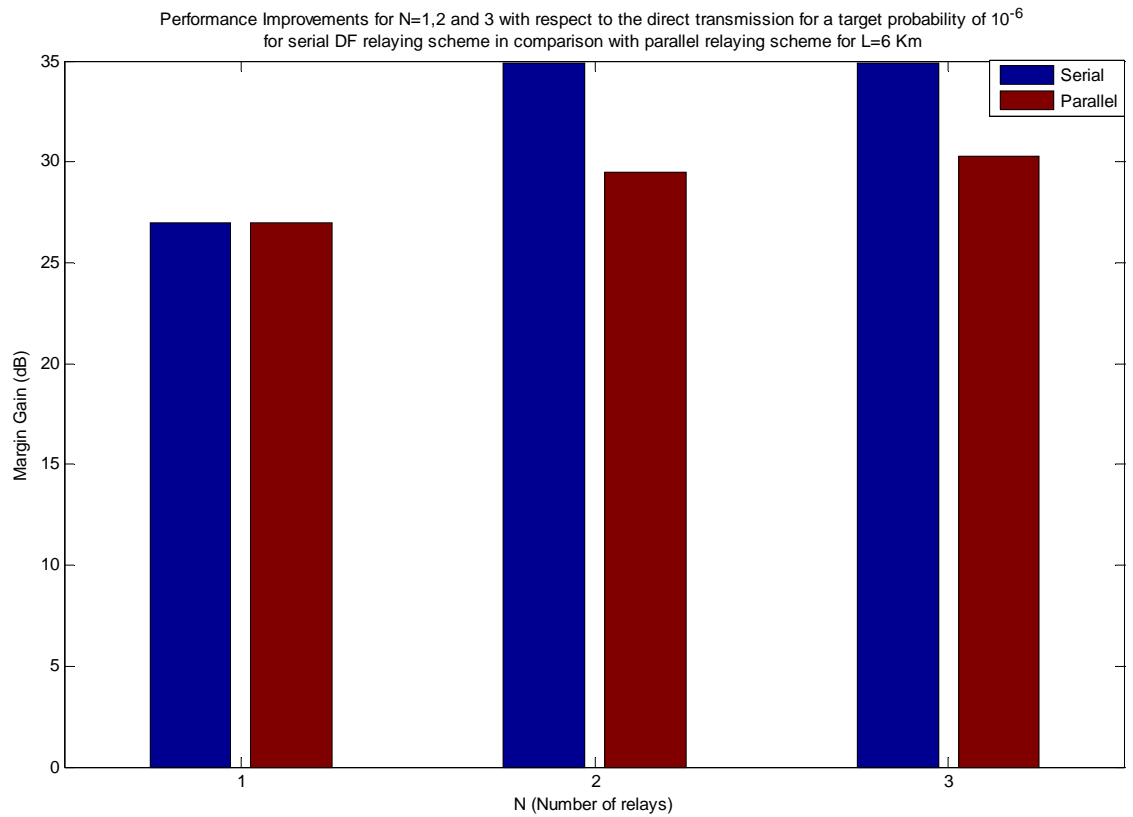


Σχήμα 7: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας ενός FSO DF σειριακού συστήματος για ζεύξη μήκους 6 Km.



Σχήμα 8: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας ενός FSO DF παράλληλου συστήματος για ζεύξη μήκους 6 Km.

Η βελτίωση της απόδοσης του κάθε σχήματος σε σχέση με την κατευθείαν ζεύξη δίνεται στο παρακάτω ραβδόγραμμα:



Σχήμα 9: Σύγκριση της επίδοσης του σειριακού και του παράλληλου σχήματος DF αναμετάδοσης σε σχέση με την κατευθείαν ζεύξη για απόσταση ζεύξης ίση με 6 Km.

## Παράρτημα Α.3 Κεφαλαίου 3

### A.3.1 Κώδικας Matlab για την παραγωγή των προηγούμενων προσομοιώσεων:

1. Συνάρτηση υπολογισμού των απωλειών μονοπατιού σε σχέση με τον αριθμό των αριθμό των ενδιάμεσων ισαπέχοντων επαναληπτών και της μεταξύ του απόστασης:

```
function [PathLoss]=L(N) % Estimation of Path Loss in Physical Units given atmospheric
attenuation of 0.43dB/Km
PathLoss=10^(-0.43*5/(N+1)) / 10^(-0.43*5);
end
```

Κώδικας 1.1

2. Συνάρτηση υπολογισμού της διασποράς του λογαριθμικού πλάτους, και πάλι ως συνάρτηση του αριθμού των ενδιάμεσων επαναληπτών:

```
function v=Var(N)
Cn=10^-7; % Structure constant - Given by the author
v=0.124*(2*pi/(1550*10^-9))^(7/6)*Cn^2*(5000/(N+1))^(11/6);
```

Κώδικας 1.2

3. Συνάρτηση που εξομοιώνει την πιθανότητα λάθους για σειριακή αναμετάδοση:

```
function [errors]=ask_errorsFSO_new(M,N,Pm,m,v,num_sim_blocks)

tot_errors=0;

for j=1:N+1
    errors(j)=0;
end

for j=1:N+1

    for sim_block=1:num_sim_blocks

        alpha=lognrnd(m,sqrt(v),1,M); % Vector LOG-Normal random numbers with parameters m,v
        alpha_sq=alpha.^2;
```

```

err=alpha_sq < ((N+1)/(L(N)*(10^(Pm/10))));
block_erros=sum(err);
errors(j)=errors(j)+block_erros;

%   err_mimo=bhta< 2*N/(10^Pm/10);
%   block_errors_mimo=sum(err_mimo);
%   errors_mimo(j)=errors_mimo(j)+block_errors_mimo;

end

%   for i=1:M-tot_errors
%   if ( alpha_sq(i)< ((N+1)/(L(N)*(10^(Pm/10))))) )
%       errors(j)=errors(j)+1;
%   end
%   end
end
end

```

### Κώδικας 1.3

4. Κύρια συνάρτηση που καλεί τις προηγούμενες και παράγει το γράφημα για τη σειριακή αναμετάδοση:

```

clear all;
M=10^5; % Number of simulated bits
num_sim_blocks=1;

Tb=1/(5*10^9);
Sampling_rate=10^4;

N=0; % N denotes the number of relays in serial scheme.

v=Var(N);
m=-v;

for Pm=0:50 % in dB
    Prod=1; % Initialization the product (for i=0 to N )
    errors=ask_errorsFSO_new(M,N,Pm,m,v,num_sim_blocks); % Call of the function that
    estimates the errors per simulation
    PoutSim(Pm+1)=errors(1)/(M*num_sim_blocks);
end

```



```

for k=2:N+1
    PoutSim(Pm+1)=PoutSim(Pm+1)+errors(k)/(M*num_sim_blocks);
end

EN(Pm+1)=Pm; % Vector containing the values of Pm i.e 1-50 dB

Prod=(0.5+0.5*erf(log(L(N)*10^(Pm/10)*exp(2*m)/(N+1))/(2*sqrt(2*v))))^(N+1);
% %   for j=0:N % Loop for the estimation of Pout for each Pm
% %       Prod=Prod*(0.5-0.5*erf(-log(L(N)*10^(Pm/10)*exp(2*m)/(N+1))/(2*sqrt(2*v))))); %
Product of the Expr. 24
% %   end
Pout(Pm+1)=1-Prod;
mean_fade_time(Pm+1)=Pout(Pm+1)*M*num_sim_blocks*Tb;
Expected_Number_Fades(Pm+1)=exp(-(0.5*(2*v)^2-0.23*10^(Pm/10))^2/(2*(2*v)^2));
end

semilogy(EN,Pout,'b',EN,PoutSim,'b*');grid; % Plot in Semilogy axes
figure;
% semilogy(EN,Expected_Number_Fades,'g');
% figure;
% semilogy(EN,mean_fade_time,'m');

xlabel('Pm (dB)');
ylabel('Pout');
title(['Outage Probability of FSO serial DF relaying scheme']);

```

#### Κώδικας 1.4

### 5. Συνάρτηση που εξομοιώνει την πιθανότητα λάθους για παράλληλη αναμετάδοση και $N=1$ :

```

function [errors,errors_miso]=ask_errorsFSO_new(M,N,Pm,m,v,num_sim_blocks)
tot_errors=0;

j=1;
errors(j)=0;
errors_miso(j)=0;

% for j=1:N+1
%   errors(j)=0;

```

```

% end

% for j=1:N+1

    for sim_block=1:num_sim_blocks

        alpha=lognrnd(m,sqrt(v),1,M-tot_errors); % Vector LOG-Normal random numbers with
%parameters m,v
        alpha_sq=alpha.^2;

        err=alpha_sq < ((2*N)/(L(N)*(10^(Pm/10))));
        block_errs=sum(err);
        errors(j)=errors(j)+block_errs;

        alpha=lognrnd(m,sqrt(v),1,M); % Vector LOG-Normal random numbers with parameters m,v
        alpha_sq=alpha.^2;
        bhta=L(1)*alpha_sq;

        err_miso=bhta < 2*N/(10^(Pm/10));
        block_errors_miso=sum(err_miso);
        errors_miso(j)=errors_miso(j)+block_errors_miso;

    end

%   for i=1:M-tot_errors
%       if ( alpha_sq(i) < ((N+1)/(L(N)*(10^(Pm/10)))) )
%           errors(j)=errors(j)+1;
%       end
%   end
    tot_errors=tot_errors+errors(j);
% end

```

### Κώδικας 1.5

6. Κύρια συνάρτηση που παράγει το γράφημα για την παράλληλη αναμετάδοση και για  $N=1$ :

```

clear all;
M=10^7; % Number of simulated bits
num_sim_blocks=1;

N=1;
D=1;% N denotes the number of relays in serial scheme.

v=Var(1);
m=-v;

for Pm=0:50 % in dB

    [errors,errors_miso]=ask_errorsFSO_new(M,N,Pm,m,v,num_sim_blocks); % Call of the
function that estimates the errors per simulation
    %BER(Pm)=(N+1)*errors/M; % BER = the Pout(Outage Probability) for the simulation
    %BER(Pm)=(errors(1))/M + (errors(2))/(M);
    Pout_asiso_sim=(errors(1))/(M*num_sim_blocks);
    Pout_miso_sim=(errors_miso(1))/(M*num_sim_blocks);
    Pout_sim(Pm+1)=(Pout_asiso_sim)^D+(1-Pout_asiso_sim)*Pout_miso_sim;

    EN(Pm+1)=Pm; % Vector containing the values of Pm i.e 1-50 dB

    Pout_asiso=0.5-0.5*erf(log(L(1)*10^(Pm/10)*exp(2*m)/(2*N))/(2*sqrt(2*v)));

    %Pout(Pm)=Pout_asiso^N;

    vx=Var_x(1,v);
    mx=log(D*L(1))-vx/2;
    Pout_miso_1=0.5-0.5*erf((log(10^(Pm/10)/(2*N))+mx)/(sqrt(2*vx)));

    Pout(Pm+1)=Pout_asiso^N+(1-Pout_asiso)^D*Pout_miso_1;

    %% for j=0:N % Loop for the estimation of Pout for each Pm
    %% Prod=Prod*(0.5-0.5*erf(-log(L(N)*10^(Pm/10)*exp(2*m)/(N+1))/(2*sqrt(2*v)))); %
Product of the Expr. 24
    %% end

```

```

end

semilogy(EN,Pout,'r',EN,Pout_sim,'r*');grid; % Plot in Semilogy axes

xlabel('Pm (dB)');
ylabel('Pout');
title(['Outage Probability for DF parallel relaying scheme for N=1 and 10^6 samples']);

```

### Κώδικας 1.6

#### 7. Συνάρτηση που εξομοιώνει την πιθανότητα λάθους για παράλληλη αναμετάδοση και N=2:

```

function [errors,errors_miso]=ask_errorsFSO_new(M,N,Pm,m,v,num_sim_blocks)

tot_errors=0;

errors=0;
errors_miso(1)=0;
errors_miso(2)=0;
% for j=1:N+1
% errors(j)=0;
% end

% for j=1:N+1

for sim_block=1:num_sim_blocks

alpha=lognrnd(m,sqrt(v),1,M-tot_errors); % Vector LOG-Normal random numbers with
parameters m,v
alpha_sq=alpha.^2;

err=alpha_sq < (2*N/(L(1)*(10^(Pm/10))));
block_errs=sum(err);
errors=errors+block_errs;

```

```

alpha=lognrnd(m,sqrt(v),1,M); % Vector LOG-Normal random numbers with parameters m,v
alpha_sq=alpha.^2;
bhta=L(1)*alpha_sq;

err_miso=bhta< 2*N/(10^(Pm/10));
block_errors_miso=sum(err_miso);
errors_miso(1)=errors_miso(1)+block_errors_miso;

alpha_1_3=lognrnd(m,sqrt(v),1,M); % Vector LOG-Normal random numbers with parameters
alpha_2_3=lognrnd(m,sqrt(v),1,M);
bhta=L(1)*alpha_1_3.^2+L(1)*alpha_2_3.^2;

err_miso_2=bhta< 2*N/(10^(Pm/10));
block_errors_miso_2=sum(err_miso_2);
errors_miso(2)=errors_miso(2)+block_errors_miso_2;

end

% for i=1:M-tot_errors
%   if ( alpha_sq(i)< ((N+1)/(L(N)*(10^(Pm/10)))) )
%       errors(j)=errors(j)+1;
%   end
% end
tot_errors=tot_errors+errors;
% end

```

### Κώδικας 1.7

8. Κύρια συνάρτηση που παράγει το γράφημα για τη παράλληλη αναμετάδοση και  $N=2$ :

```

clear all;
M=10^5; % Number of simulated bits
num_sim_blocks=1;

```

```

N=2;
D=2;% N denotes the number of relays in serial scheme.

v=Var(1);
m=-v;

for Pm=0:50 % in dB

    [errors,errors_miso]=ask_errorsFSO_new(M,N,Pm,m,v,num_sim_blocks); % Call of the
%function that estimates the errors per simulation
    %BER(Pm)=(N+1)*errors/M; % BER = the Pout(Outage Probability) for the simulation
    %BER(Pm)=(errors(1))/M + (errors(2))/(M);
    Pout_asiso_sim=(errors(1))/(M*num_sim_blocks);
    Pout_miso_sim_1=(errors_miso(1)+errors(1))/(M*num_sim_blocks);
    Pout_miso_sim_2=(errors_miso(2))/(M*num_sim_blocks);
    Pout_sim(Pm+1)=(Pout_asiso_sim)^2+2*(1-
Pout_asiso_sim)*Pout_asiso_sim*Pout_miso_sim_1+(1-Pout_asiso_sim)^2*Pout_miso_sim_2;

    % total_errors=errors(1);
    % for k=2:2
    % Pout_sim(Pm)=Pout_sim(Pm)+errors(k)/((M-total_errors)*num_sim_blocks);
    % total_errors=total_errors+errors(k);
    % end

    EN(Pm+1)=Pm; % Vector containing the values of Pm i.e 1-50 dB

    Pout_asiso=0.5-0.5*erf(log(L(1)*10^(Pm/10)*exp(2*m)/(2*N))/(2*sqrt(2*v)));

    %Pout(Pm)=Pout_asiso^N;

    vx=Var_x(1,v);
    mx=log(1*L(1))-vx/2;
    Pout_miso_1=0.5-0.5*erf((log(10^(Pm/10)/(2*N))+mx)/(sqrt(2*v*x)));

    vx=Var_x(2,v);
    mx=log(2*L(1))-vx/2;
    Pout_miso_2=0.5-0.5*erf((log(10^(Pm/10)/(2*N))+mx)/(sqrt(2*v*x)));

```

```

Pout(Pm+1)=Pout_asiso^2+2*(1-Pout_asiso)*Pout_asiso*Pout_miso_1+(1-
Pout_asiso)^2*Pout_miso_2;

%% %   for j=0:N % Loop for the estimation of Pout for each Pm
%% %           Prod=Prod*(0.5-0.5*erf(-log(L(N)*10^(Pm/10)*exp(2*m))/(N+1))/(2*sqrt(2*v)))); %
Product of the Expr. 24
%% %   end

end

semilogy(EN,Pout,'m',EN,Pout_sim,'m*');grid; % Plot in Semilogy axes

xlabel('Pm (dB)');
ylabel('Pout');
title(['Outage Probability for parallel DF relaying scheme for N=2 and 10^6 samples']);

```

### Κώδικας 1.8

### A.3.2 Λογαριθμοκανονική κατανομή

Η στατιστική κατανομή οποιασδήποτε τυχαίας μεταβλητής (TM) της οποίας ο λογάριθμος είναι κανονικά κατανεμημένος αποτελεί την λογαριθμοκανονική κατανομή. Αν  $\chi$  είναι τυχαία μεταβλητή κανονικά κατανεμημένη με παραμέτρους  $\mu_\chi$  και  $\sigma_\chi$  ( $\chi \sim N(\mu_\chi, \sigma_\chi^2)$ ), τότε η  $\alpha = \exp(\chi)$  έχει λογαριθμοκανονική κατανομή ( $\alpha \sim \text{Log-N}(\mu_\chi, \sigma_\chi^2)$ ). Παρόμοια, αν η  $\alpha$  έχει λογαριθμοκανονική κατανομή τότε η  $\ln(\alpha)$  ακολουθεί κανονική κατανομή με παραμέτρους  $\mu_\chi$  και  $\sigma_\chi$ . Η βάση της λογαριθμικής συνάρτησης δεν έχει σημασία. Έτσι αν  $\log_a(\alpha)$  ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή, τότε και η  $\log_b(\alpha)$  ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή για όποιο θετικό αριθμό  $a, b \neq 1$ .

Μια μεταβλητή μπορεί να μοντελοποιηθεί ως λογαριθμοκανονική αν μπορεί να θεωρηθεί ως γινόμενο ικανού αριθμού ανεξάρτητων τυχαίων θετικών μεταβλητών έτσι ώστε να ικανοποιείται το κεντρικό οριακό θεώρημα. Για παράδειγμα, στις ασύρματες επικοινωνίες, η εξασθένιση που προκαλείται από την σκίαση ή τις αργές διαλείψεις από τυχαία αντικείμενα θεωρείται συχνά λογαριθμοκανονική.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) της λογαριθμοκανονικής κατανομής είναι η:

$$f(a) = \frac{1}{a\sqrt{2\pi\sigma_\chi^2}} \exp\left\{-\frac{(\ln(a) - \mu_\chi)^2}{2\sigma_\chi^2}\right\} \quad (\text{A.3.1})$$

για  $a > 0$ . Πρέπει να σημειωθεί πως το  $\mu_\chi$  είναι και η μεσαία τιμή (median) της TM  $\ln(a)$ , γεγονός που αποτελεί συχνά παράγοντα σύγχυσης, γιατί το  $\mu_\chi$  είναι η μεσαία τιμή της  $N(\mu_\chi, \sigma_\chi)$ .

Σημειώνουμε επίσης πως η διαφορά της pdf της κανονικής κατανομής με αυτή της λογαριθμοκανονικής είναι μόνο η αντικατάσταση του  $a$  με το  $\ln a$ , αλλά και ένας παράγοντας  $a$  στον παρονομαστή  $a\sqrt{2\pi\sigma_\chi^2}$  λόγω αλλαγής της μεταβλητής από  $a$  σε  $\ln a$ .

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής δίνεται από:

$$0.5 + 0.5 \operatorname{erf}\left[\frac{(\ln(x) - \mu)}{2\sigma^2}\right] \quad (\text{A.3.2})$$



Οι ροπές της λογαριθμοκανονικής κατανομής μπορούν να υπολογιστούν από την γεννήτρια συνάρτηση ροπών η οποία δίνεται από:

$$E(\alpha^n) = \exp(n\mu_\chi + n^2\sigma_\chi^2/2) \quad (\text{A.3.3})$$

Έτσι η μέση τιμή της λογαριθμοκανονικής κατανομής δίνεται από:

$$e^{\mu_\chi + \sigma_\chi^2/2} \quad (\text{A.3.4})$$

και η διασπορά από:

$$\text{Var}(\alpha) = \left( e^{\sigma_\chi^2} - 1 \right) e^{2\mu_\chi + \sigma_\chi^2} \quad (\text{A.3.5})$$

### Συναφείς κατανομές:

- Αν  $\alpha_m \sim \text{Log-N}(\mu_\chi, \sigma_{\chi,m}^2)$ ,  $m=1,2,\dots,n$  είναι ανεξάρτητες ΤΜ που ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή με την ίδια παράμετρο  $\mu_\chi$  και με διασπορά  $\sigma_{\chi,m}^2$  η κάθε μια και  $Y = \prod_{m=1}^n \alpha_m$ , τότε η  $Y$  ακολουθεί επίσης λογαριθμοκανονική κατανομή και είναι  $Y \sim \text{Log-N}(n\mu_\chi, \sum_{m=1}^n \sigma_{\chi,m}^2)$ .
- Αν  $\alpha_m \sim \text{Log-N}(\mu_\chi, \sigma_{\chi,m}^2)$ ,  $m=1,2,\dots,n$  είναι ανεξάρτητες ΤΜ που ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους  $\mu_{\chi,m}$  και  $\sigma_{\chi,m}^2$  και  $Y = \sum_{m=1}^n X_m$ , τότε η  $Y$  δεν έχει έκφραση σε κλειστή μορφή αλλά μπορεί εύλογα να προσεγγιστεί από μια άλλη λογαριθμοκανονική κατανομή  $Z$  με παραμέτρους:

$$\sigma_Z^2 = \log \left[ \frac{\sum e^{2\mu_{\chi,m} + \sigma_{\chi,m}^2} (e^{\sigma_{\chi,m}^2} - 1)}{\left( \sum e^{\mu_{\chi,m} + \sigma_{\chi,m}^2/2} \right)^2} + 1 \right] \quad (\text{A.3.6})$$

$$\mu_Z = \log \left( \sum e^{\mu_{\chi,m} + \sigma_{\chi,m}^2/2} \right) - \frac{\sigma_Z^2}{2} \quad (3.1)$$

## Αναφορές:

- [1] M. Safari and M. Uysal, "Relay-Assisted Free-Space Optical Communications," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 7, No 12, December 2008.
- [2] S. G. Wilson, M. Brandt-Pearce, Q. Cao, and M. Baedke, "Optical repetition MIMO transmission with multipulse PPM," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 23, no. 9, p. 1901-1909, Sept. 2005.
- [3] M. Safari and M. Uysal, "Do we really need OSTBC for free-space optical communication with direct detection," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 11, Nov. 2008.
- [4] F. S. Vetelino, C. Young, and L. Andrews, "Fade statistics and aperture averaging for Gaussian beam waves in moderate-to-strong turbulence," *Applied Optics*, Vol. 46, No. 18, 20 June 2007.
- [5] L. C. Andrews, R. L. Phillips, C. Y. Hopen, and M. A. Al-Habash, "Theory of optical scintillation," *J. Opt. Soc. Am. A* 16, 1417–1429 (1999).
- [6] L. C. Andrews, R. L. Phillips, and C. Y. Hopen, "Aperture averaging of optical scintillations: power fluctuations and the temporal spectrum", *Waves Random Media* 10, 53–70, 2000.
- [7] L. C. Andrews, R. L. Phillips, and C. Y. Hopen, "Scintillation model for a satellite communication link at large zenith angles," *Opt. Eng.* 39, 3272–3280, 2000.
- [8] S. Dolinar, D. Divsalar, J. Hamkins, and F. Pollara, "Capacity of pulseposition modulation (PPM) on Gaussian and Webb channels," *JPL TMO Progress Report*, vol. 42-142, pp. 1-31, Apr.-June 2000.
- [9] E. Biglieri, J. Proakis, and S. Shamai, "Fading channels: information theoretic and communications aspects," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 44, no. 6, pp. 2619-2692, Oct. 1998.
- [10] S. M. Navidpour, M. Uysal, and M. Kavehrad, "BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 8, p. 2813-2819, Aug. 2007.
- [11] L. F. Fenton, "The sum of lognormal probability distributions in scatter transmission systems," *IRE Trans. Commun.*, vol. COM-8, pp. 57-67, Mar. 1960.
- [12] [http://en.wikipedia.org/wiki/Log-normal\\_distribution](http://en.wikipedia.org/wiki/Log-normal_distribution)
- [13] M. A. Al-Habash, L. C. Andrews, and R. L. Philips, "Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media," *Optical Engineering*, vol. 40, pp. 1554–1562, Aug. 2001.
- [14] "Performance bounds for coded free-space optical communications through atmospheric turbulence channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, pp. 1233–1239, Aug. 2003.
- [15] T. A. Tsiftsis, H. G. Sandalidis, G. K. Karagiannidis and N. C. Sagias, "Multihop Free-Space Optical Communications Over Strong Turbulence Channels," *IEEE* 2006
- [16] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [17] <http://www.mlahanas.de/Math/Lognormal.htm>
- [18] <http://en.wikipedia.org>