



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

**Οπτικές Δορυφορικές Ζεύξεις:  
Φαινόμενα Διάδοσης και Διαφορισμός Θέσης**

Διπλωματική Εργασία  
του  
**Χαράλαμπου Γ. Βλάχου**

**Επιβλέπων:** Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.





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

**Οπτικές Δορυφορικές Ζεύξεις:  
Φαινόμενα Διάδοσης και Διαφορισμός Θέσης**

Διπλωματική Εργασία  
του  
**Χαράλαμπου Γ. Βλάχου**

**Επιβλέπων:** Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 17<sup>η</sup> Ιουνίου 2024

.....  
Αθανάσιος  
Παναγόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος  
Φικιώρης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος  
Ματσόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Χαράλαμπος Γ. Βλάχος

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

Copyright © Χαράλαμπος Γ. Βλάχος, 2024

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 στον 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

Η παρούσα διπλωματική εργασία, λαμβάνοντας υπόψη τις τρέχουσες εξελίξεις στην τεχνολογία των οπτικών επικοινωνιών και τα πλεονεκτήματα που αυτές παρέχουν έναντι των συμβατικών επικοινωνιών στη ζώνη των ραδιοσυχνοτήτων, επιχειρεί να παραθέσει συγκεντρωτικά τις δυσχέρειες που παρουσιάζονται κατά τη διάδοση σε δορυφορικά οπτικά συστήματα επικοινωνιών και τους διαθέσιμους τρόπους αντιμετώπισης αυτών. Για το σκοπό αυτό, αρχικά αναλύονται όλοι οι παράμετροι εκείνοι που εισάγουν διαλείψεις στο σύστημα και πηγάζουν από την παρουσία της γήινης ατμόσφαιρας. Εν συνεχεία παρατίθενται οι κυριότερες κατηγορίες τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων, οι οποίες αυξάνουν την ευρωστία του συστήματος, τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στα συστήματα κβαντικής φωτονικής τεχνολογίας, αναλύοντας δυνατότητες που προσφέρουν και πιθανές εφαρμογές. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω γίνεται προσομοίωση απόδοσης του διαύλου για δορυφορικά οπτικά συστήματα και εφαρμόζεται απλό μοντέλο για την επίδοση συστήματος διαφορισμού θέσης. Τέλος εξάγονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

Λέξεις – Κλειδιά: Οπτικές Δορυφορικές Επικοινωνίες, Ατμόσφαιρα, Τεχνικές Άμβλυνσης Διαλείψεων, Διαφορισμός, Διαφορική Προστασία, Κβαντική Φωτονική

## Abstract

The scope of this Diploma thesis, considering the current developments in optical communications technology and the advantages they provide over conventional communications in the radio frequency band, attempts to summarize the difficulties encountered during the propagation of satellite optical communications systems and the available ways dealing with them. For this purpose, initially all the parameters that cause fading in the system and originate from the presence of the Earth's atmosphere are analyzed. Following the main categories of fading mitigation techniques are listed, which increase system robustness, availability, reliability. Special reference is made to quantum photonic technology systems, analyzing the possibilities they offer and potential applications. Considering the above, the channel performance is simulated for satellite optical systems and a simple model is applied for the performance of a spatial diversity system. Finally, the conclusions obtained are drawn.

Keywords: Optical Satellite Communications, Atmosphere, Fading Mitigation Techniques, Diversity, Diversity Protection, Quantum Photonics

## Ευχαριστίες

*Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο τόσο για την ανάθεση ενός τόσο επίκαιρου, πολύπλευρου και ενδιαφέροντος θέματος ως αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής μου εργασίας όσο και για την καθοδήγηση και τις χρήσιμες συμβουλές που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου και τους κοντινούς μου ανθρώπους οι οποίοι με την υποστήριξή τους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση των στόχων μου.*





## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract .....	6
Ευχαριστίες.....	7
Κατάλογος Εικόνων .....	11
Κατάλογος Πινάκων.....	12
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	13
Κεφάλαιο 2: Επίδραση της Ατμόσφαιρας.....	15
2.1 Ατμοσφαιρική Απορρόφηση .....	16
2.2 Γεωμετρική Απώλεια και Διάθλαση.....	18
2.3 Σκέδαση.....	20
2.3.1 Σκέδαση Rayleigh.....	20
2.3.2 Σκέδαση Mie .....	22
2.3.3 Συγκεντρωτικά Rayleigh και Mie σκέδαση από αερολύματα.....	24
2.3.4 Σκέδαση ανεξάρτητη του μήκους κύματος .....	26
2.4 Ατμοσφαιρικές Αναταράξεις .....	28
2.4.1 Σπινθηρισμός πλάτους (Amplitude scintillation).....	34
2.4.2 Αλλαγή γωνίας άφιξης.....	36
2.4.3 Περιπλάνηση δέσμης (Beam wander).....	37
2.4.4 Εξάπλωση δέσμης (Beam spreading).....	39
2.5 Κάλυψη Νεφών.....	39
2.5.1 Εκτίμηση της περιεκτικότητας των νεφών σε υγρό νερό .....	41
2.5.2 Υπολογισμός απόσβεσης που εισάγουν τα νέφη .....	44
2.5.3 Περαιτέρω μελέτη νεφών.....	49
Κεφάλαιο 3: Τεχνικές Άμβλυσης Διαλείψεων – Διαφορισμός Θέσης.....	55
3.1 Εξισορρόπηση Διαφράγματος (Aperture Averaging).....	55
3.2 Τεχνικές Διαφορισμού .....	56
3.3 Χρήση Αναμεταδότη.....	62
3.4 Προσαρμοστικά Οπτικά.....	62
3.5 Μορφοποίηση .....	64
3.6 Κωδικοποίηση.....	69
3.7 Απόρριψη Θορύβου Περιβάλλοντος .....	70
3.8 Υβριδικά συστήματα RF/MMW/FSO .....	71
3.9 Επανεκπομπή.....	72
3.10 Αναδρομολόγηση .....	72

Κεφάλαιο 4: Κβαντική Φωτονική.....	75
4.1 Το πρωτόκολλο BB84.....	75
4.1.1 Μετάδοση κβαντικών ψηφίων.....	75
4.1.2 Δημιουργία κβαντικού κλειδιού.....	76
4.1.3 Διόρθωση σφαλμάτων.....	77
4.2 Μετάδοση κβαντικού κλειδιού σε FSO.....	77
Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση Απόδοσης Διαύλου.....	79
5.1 Μοντέλο Προσομοίωσης και Στόχοι Προσομοίωσης.....	79
5.1.1 Ανάλυση Μοντέλου και παραδοχές.....	80
5.2 Υλοποίηση των σεναρίων.....	81
5.2.1 Μελέτη Διαφόρων σημείων στην Ευρώπη.....	81
5.2.2 Εφαρμογή Τεχνικών Διαφορισμού για κάλυψη των Βαλκανίων.....	84
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα.....	95
Αναφορές.....	97

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Αναπαράσταση δορυφορικού συστήματος οπτικών επικοινωνιών .....	13
Εικόνα 2: Ατμοσφαιρική απορρόφηση κατά μήκος κατακόρυφης διαδρομής .....	16
Εικόνα 3: Απορρόφηση για συχνότητες άνω των 10 THz κατά μήκος κατακόρυφης διαδρομής .....	17
Εικόνα 4: Ακτινοβολία Ουρανού .....	21
Εικόνα 5: Σύγκριση απόσβεσης Rayleigh και Mie σκέδασης .....	22
Εικόνα 6: Παράμετρος $C_n^2$ συναρτήσει του ύψους για 3 διαφορετικές τιμές ταχύτητας ανέμου και αναταράξεων στην επιφάνεια του εδάφους .....	30
Εικόνα 7: Μήκος συνοχής σε ατμοσφαιρικές αναταράξεις .....	31
Εικόνα 8: Ισοπλανητική γωνία .....	32
Εικόνα 9: Περιπλάνηση δέσμης και σπινθηρισμός λόγω ατμοσφαιρικών αναταράξεων .....	39
Εικόνα 10: Τα διάφορα είδη νεφών αναλόγως του ύψους σχηματισμού τους .....	40
Εικόνα 11: Χωρικός χάρτης των ILWC ενός OGS .....	41
Εικόνα 12: ILWC συσχετισμένο χωρικά και χρονικά για τις στιγμές α) $t=t_0$ , b) $t=t_0+30$ min, c) $t=t_0+60$ min .....	44
Εικόνα 13: Χρονοσειρά LWC κάθετης έκτασης νεφών .....	45
Εικόνα 14: Χρονοσειρά Απόσβεσης λόγω νεφών για συχνότητα 40 GHz .....	48
Εικόνα 15: Χρονοσειρά Απόσβεσης λόγω νεφών στα 1550 nm .....	48
Εικόνα 16: Παράθυρα εκπομπής οπτικού σταθμού στη Νεμέα .....	49
Εικόνα 17: Πιθανότητα μη ύπαρξης νεφών στην LOS για 10 σταθμούς στην Ελλάδα .....	50
Εικόνα 18: Συλλογική Πιθανότητα μη ύπαρξης νεφών .....	50
Εικόνα 19: Στατιστική κατανομή απόσβεσης νεφών ανά μήνα βάση στοιχείων 5 ετών στο Τόκυο... ..	51
Εικόνα 20: Στατιστική κατανομή απόσβεσης νεφών ανά μήνα βάση στοιχείων 5 ετών στη Σεντάι ..	51
Εικόνα 21: Στατιστικά αποτελέσματα μοντέλου .....	52
Εικόνα 22: Εξεταζόμενες περιοχές OGS .....	60
Εικόνα 23: CFLOS και Ακτίνα συνοχής για τους υπό μελέτη σταθμούς .....	61
Εικόνα 24: Συγκεντρωτική πιθανότητα OGSN .....	61
Εικόνα 25: Συμβατικό σύστημα προσαρμοστικού οπτικού .....	63
Εικόνα 26: Δομή συμβόλου στο DHPIM με (a) $H_0$ και (b) $H_1$ επικεφαλίδες .....	67
Εικόνα 27: Αναπαράσταση της Μετάδοσης .....	77
Εικόνα 28: Αναπαράσταση δικτύου επίγειων σταθμών, UAV και δορυφόρων .....	78
Εικόνα 29: Διάφορα σημεία στην Ευρώπη που μελετήθηκαν μέσω της προσομοίωσης .....	82
Εικόνα 30: Ωρες ηλιοφάνειας στην περιοχή της Ευρώπης .....	84
Εικόνα 31: Περιοχή Ενδιαφέροντος και ευρύτερες περιοχές των OSG .....	85
Εικόνα 32: Εναλλακτικές θέσεις για το OGS1 .....	86
Εικόνα 33: Εναλλακτικές θέσεις για το OGS2 .....	87
Εικόνα 34: Εναλλακτικές θέσεις για το OGS3 .....	88
Εικόνα 35: Εναλλακτικές θέσεις για το OGS4 .....	89
Εικόνα 36: Εναλλακτικές θέσεις για το OGS5 .....	90
Εικόνα 37: Εναλλακτικές θέσεις για το OGS6 .....	91

## Κατάλογος Πινάκων

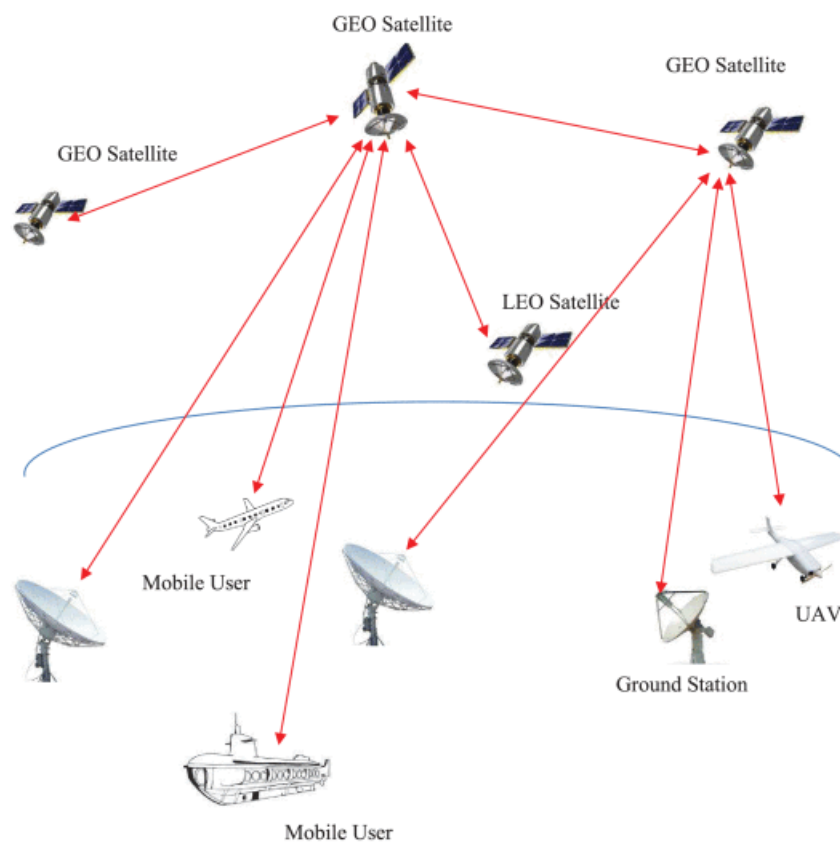
Πίνακας 1: Καθορισμένα αστρονομικά φίλτρα για συχνότητες άνω των 15 THz .....	17
Πίνακας 2: Είδη σκέδασης .....	20
Πίνακας 3: Ακτινοβολία ουρανού σε συγκεκριμένες συχνότητες .....	21
Πίνακας 4: Συντελεστής διατομής σκέδασης Rayleigh, $\sigma_R$ και συντελεστής Mie σκέδασης στο επίπεδο της θάλασσας $\beta_A(0)$ .....	25
Πίνακας 5: Πυκνότητα αριθμού αερολυμάτων $n_A$ και πυκνότητα ατμοσφαιρικού αριθμού $n_R$ .....	26
Πίνακας 6: Παράμετροι $a, b$ για υγρό και ξηρό χιόνι .....	28
Πίνακας 7: Είδη νεφών καθώς και η κατακόρυφη έκτασή τους .....	46
Πίνακας 8: Οι παράμετροι της κατανομής μεγέθους σωματιδίων των σταγονιδίων των νεφών ....	47
Πίνακας 9: Αντιστοίχιση για 4-PPM και 4-PIM .....	66
Πίνακας 10: Σύγκριση των διαφόρων παραλλαγών PPM ( $A$ , πλάτος παλμού, $R_b$ , ρυθμός δεδομένων και $\alpha$ , ακέραιος) .....	68
Πίνακας 11: Αποτελέσματα προσομοίωσης για τα σημεία που φαίνονται στην Εικόνα 29 .....	82
Πίνακας 12: Αποτελέσματα προσομοίωσης των εναλλακτικών θέσεων για το OGS1 .....	86
Πίνακας 13: Αποτελέσματα προσομοίωσης των εναλλακτικών θέσεων για το OGS2 .....	87
Πίνακας 14: Αποτελέσματα προσομοίωσης των εναλλακτικών θέσεων για το OGS3 .....	88
Πίνακας 15: Αποτελέσματα προσομοίωσης των εναλλακτικών θέσεων για το OGS4 .....	89
Πίνακας 16: Αποτελέσματα προσομοίωσης των εναλλακτικών θέσεων για το OGS5 .....	90
Πίνακας 17: Αποτελέσματα προσομοίωσης των εναλλακτικών θέσεων για το OGS6 .....	91
Πίνακας 18: Επιλεγμένοι σταθμοί για τις περιοχές των Βαλκανίων που μελετήθηκαν .....	92
Πίνακας 19: Συνδυαστική Πιθανότητα για τους επιλεγμένους σταθμούς (Joint CFOS) .....	92

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η πρόοδος στις τεχνολογίες της πληροφορίας και των επικοινωνιών καθώς η αυξανόμενη ζήτηση για πρόσβαση σε υπηρεσίες, δεδομένα και πολυμέσα έχει οδηγήσει σε συμφόρηση στο χρησιμοποιούμενο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων (RF). Πλέον όλο και περισσότεροι είναι οι χρήστες της τεχνολογίας (κινητά, υπολογιστές κλπ.) που διαθέτουν πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Επιπρόσθετα ο όγκος των δεδομένων που διακινούνται διαρκώς αυξάνεται είτε πρόκειται για διακίνηση πολυμέσων (πχ. παρακολούθηση ενός βίντεο), είτε πρόκειται για τον έλεγχο συστημάτων (πχ. IoT- Internet of Things) είτε για οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή. Επιπλέον η μετάβαση στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα 5<sup>ης</sup> Γενιάς (5G) προϋποθέτει την ύπαρξη μιας ισχυρής βάσης ικανής να υποστηρίξει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης σε πολλαπλά τερματικά.

Δημιουργείται λοιπόν η ανάγκη για τη μετάβαση από το συμβατικό φορέα ραδιοσυχνοτήτων στον οπτικό φορέα. Αυτό διότι ο οπτικός φορέας παρουσιάζει μια σειρά πλεονεκτημάτων όπως είναι οι υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων που παρέχει καθώς και η δυνατότητα χρησιμοποίησης του οπτικού φάσματος χωρίς περιορισμούς καθώς δεν προκαλείται συμφόρηση φάσματος.



Εικόνα 1: Αναπαράσταση δορυφορικού συστήματος οπτικών επικοινωνιών [1]

Ήδη στις οπτικές ενσύρματες επικοινωνίες η οπτική ίνα έχει κερδίσει σημαντικό έδαφος έναντι των συστημάτων χαλκού. Όσον αφορά τις οπτικές ασύρματες επικοινωνίες (OWC-Optical Wireless Communication) αυτές μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες εσωτερικού και εξωτερικού χώρου. Οι οπτικές ασύρματες επικοινωνίες εξωτερικού χώρου, γνωστές και ως οπτική επικοινωνία ελευθέρου χώρου (FSO) διακρίνονται περαιτέρω σε επίγειες και δορυφορικές. Τα πλεονεκτήματα που παρέχει το FSO σύστημα έναντι των RF είναι πάρα πολλά και μεταξύ άλλων τα παρακάτω [1]:

- Υψηλότερο διαθέσιμο εύρος ζώνης
- Χαμηλότερες απαιτήσεις ισχύος
- Μικρότερες διαστάσεις κεραιών
- Χρήση φάσματος χωρίς άδεια
- Υψηλότερη κατευθυντικότητα
- Υψηλότερη ασφάλεια υποκλοπής

Παρά τα πλεονεκτήματα των FSO συστημάτων προκύπτουν και κάποιες προκλήσεις όπως η στενή απόκλιση δέσμης η οποία απαιτεί αυστηρά συστήματα κατάδειξης, η εξασθένιση που προκαλείται από τις απρόβλεπτες ατμοσφαιρικές συνθήκες καθώς και η παρουσία της ηλιακής ακτινοβολίας που εισάγει αθέμιτο θόρυβο περιβάλλοντος.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη των δορυφορικών FSO με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης της ατμόσφαιρας στην οπτική δέσμη κατά τη διέλευση της μέσα από αυτή καθώς και τη συγκεντρωτική παρουσίαση τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων που εισάγονται.

Συγκεκριμένα στο παρόν Κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στις οπτικές επικοινωνίες ελευθέρου χώρου και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα των FSO έναντι των RF συστημάτων. Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται κατηγοριοποίηση και ανάλυση της επίδρασης της ατμόσφαιρας, παρουσιάζοντας αναλυτικά μοντέλα υπολογισμού. Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι τεχνικές εκείνες που στοχεύουν στην άμβλυνση των διαλείψεων που εισάγονται από την ατμόσφαιρα. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται προσομοίωση απόδοσης του διαύλου σε πιθανές τοποθεσίες εγκατάστασης επίγειου σταθμού και εφαρμόζονται τεχνικές άμβλυνσης διαλείψεων για την επίτευξη της επιθυμητής διαθεσιμότητας. Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται ειδική αναφορά στην κβαντική φωτονική τεχνολογία και τις δυνατότητες που προσφέρει. Τέλος στο Κεφάλαιο 6 εξάγονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία.

## Κεφάλαιο 2: Επίδραση της Ατμόσφαιρας

Από τις σημαντικότερες προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει ένα σύστημα Οπτικών Επικοινωνιών Ελευθέρου Χώρου, Free Space Optics (FSO), είναι η επίδραση της ατμόσφαιρας. Η λειτουργία των FSO συστημάτων επηρεάζεται από την ατμόσφαιρα σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι τα συμβατικά συστήματα του φάσματος των ραδιοσυχνοτήτων (RF) και αυτό διότι αξιοποιούν φάσμα σε μεγαλύτερες φέρουσες συχνότητες. Το αποτέλεσμα είναι το μήκος κύματος να είναι πολύ μικρότερο από ότι στα RF συστήματα και μάλιστα συγκρίσιμο με τα μόρια της ατμόσφαιρας με τα οποία συνεπώς αλληλεπιδρά πιο εύκολα. Συγκεκριμένα στα FSO συστήματα το παράθυρο μετάδοσης είναι στην περιοχή μήκους κύματος 700nm έως 1600nm ενώ το αντίστοιχο παράθυρο μετάδοσης είναι στα 30mm έως 3m για τα RF συστήματα [1].

Η ατμόσφαιρα επιδρά στο οπτικό σήμα που διαδίδεται από το έδαφος προς το δορυφόρο ή αντίστροφα με τρόπο τυχαίο τόσο ως προς το χώρο όσο και ως προς το χρόνο. Η τυχειότητα έγκειται στους διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επικρατούν (βροχή, ομίχλη, χιονόπτωση κλπ.) σε συνδυασμό με τη εκάστοτε σχετική θέση επίγειου οπτικού σταθμού, optical ground station (OGS), και του δορυφόρου. Επιπλέον τυχειότητα υπεισέρχεται και από την κατάσταση της ατμόσφαιρας (θερμοκρασία, πίεση κλπ.) στα διάφορα στρώματα της και για διάφορες τοποθεσίες και χρονικές σχισμές όπως θα αναλυθεί πιο κάτω. Οι αιτίες απωλειών που προκαλούνται στο σήμα μπορούν να διακριθούν στις εξής κατηγορίες :

- Ατμοσφαιρική Απορρόφηση
- Γεωμετρική Απώλεια και Διάθλαση
- Σκέδαση
- Ατμοσφαιρικές Αναταράξεις
- Κάλυψη Νεφών

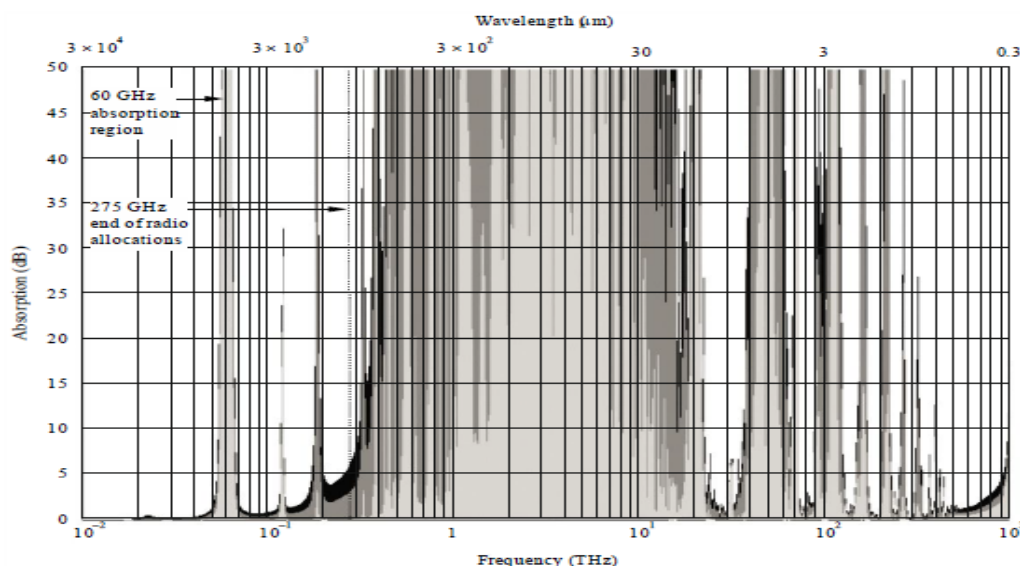
Αξίζει να αναφερθεί ότι οι επιδράσεις των παραπάνω φαινομένων δεν συνεισφέρουν στην απόσβεση του σήματος με την ίδια βαρύτητα. Επιπλέον διαφορετική είναι η επίπτωση κατά την ανερχόμενη (Uplink) και κατερχόμενη (Downlink) ζεύξη.

Οι απώλειες που συναντά το σήμα κατά την ανερχόμενη ζεύξη είναι πολύ μεγαλύτερες από ότι στην κατερχόμενη. Αυτό συμβαίνει διότι σε περίπτωση ανερχόμενης ζεύξης η πηγή διαταραχών, δηλαδή η ατμόσφαιρα, βρίσκεται πλησίον της πηγής εκπομπής του σήματος το οποίο αντιστοιχεί σε μοντέλο σφαιρικού κύματος. Αντιθέτως στην κατερχόμενη ζεύξη η πηγή διαταραχών βρίσκεται πλησίον του δέκτη το οποίο αντιστοιχεί σε μοντέλο επίπεδου κύματος [1].

## 2.1 Ατμοσφαιρική Απορρόφηση

Η διάδοση του σήματος στην ατμόσφαιρα προκαλεί απώλειες που οφείλονται στην απορρόφηση μέρους της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από ατμοσφαιρικά αέρια και τα οποία μεταξύ άλλων είναι:  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  και αρκετά CFCs. Επίσης η απορρόφηση εξαρτάται ισχυρά από το μήκος κύματος και συνεπώς και από τη συχνότητα καθώς και από τις επικρατούσες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Ο ακριβής υπολογισμός της απορρόφησης είναι δυνατός αξιοποιώντας την σύσταση ITU-R P.676 [2]. Η μελέτη ωστόσο ενός μεγάλου εύρους φάσματος από 10THz έως 1000 THz (30μm έως 0.3 μm) καθιστά αυτή τη διαδικασία εξαιρετικά πολύπλοκη. Για το λόγο αυτό πιο εύκολη καθίσταται η μελέτη της απορρόφησης από την σύσταση ITU-R P.1621 [3].

Στην σύσταση ITU-R P.1621 δίνεται σχηματικά (Εικόνα 2) η απορρόφηση που προκύπτει από την διάδοση μέσω της ατμόσφαιρας για τρεις κατακόρυφες διαδρομές που αντιστοιχούν σε τρία διαφορετικά υψόμετρα επίγειων οπτικών σταθμών (OGS). Οι μαύρες περιοχές των διαγραμμάτων αντιστοιχούν σε OGS στο επίπεδο της θάλασσας και το οποίο εκπέμπει σε καθορισμένη ατμόσφαιρα όπως δίνεται στην σύσταση ITU-R P.835 [4]. Οι σκούρες γκρι περιοχές αντιστοιχούν σε OGS το οποίο εκπέμπει σε υψόμετρο 2km πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Τέλος οι ανοιχτές γκρι περιοχές αντιστοιχούν σε OGS το οποίο εκπέμπει σε υψόμετρο 5km πάνω από το επίπεδο της θάλασσας.



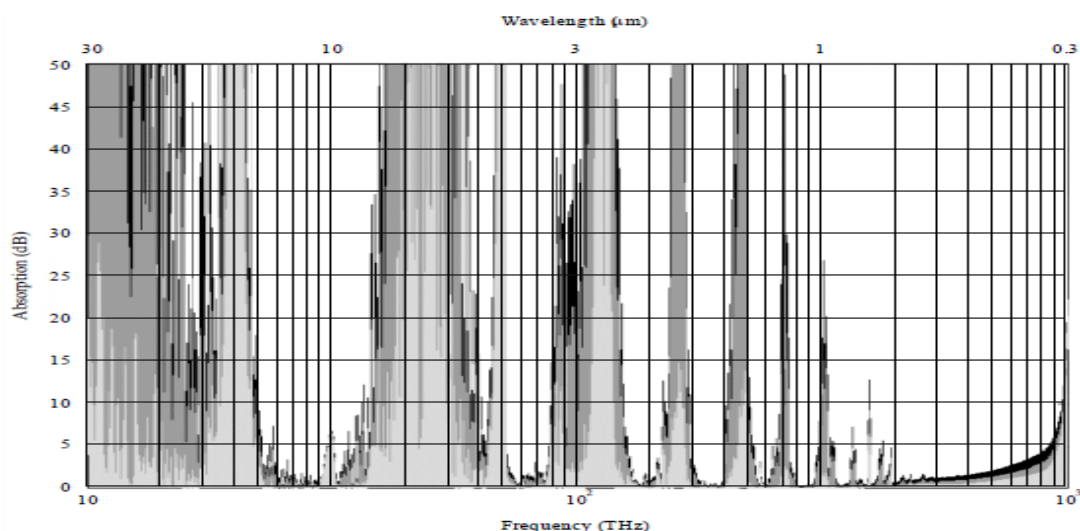
Εικόνα 2: Ατμοσφαιρική απορρόφηση κατά μήκους κατακόρυφης διαδρομής [3]

Από την Εικόνα 2 γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι σχεδόν σε όλες τις συχνότητες από 1 THz έως 10 THz (300μm έως 30μm) και εκτός κάποιων τοποθεσιών με ξηρό κλίμα σε μεγάλο υψόμετρο, η ατμόσφαιρα προκαλεί μεγάλη απορρόφηση καθιστώντας το παράθυρο αυτό αδιάφανο για τη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Από 10 THz και έπειτα οι συνθήκες βελτιώνονται και υπάρχουν



αρκετά παράθυρα διάδοσης με συνθήκες κατάλληλες ώστε να χαρακτηριστούν διαφανή για την μετάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Τα παράθυρα αυτά αποτυπώνονται καλύτερα στην Εικόνα 3 όπου έχουν απομονωθεί συχνότητες άνω των 10 THz.



Εικόνα 3: Απορρόφηση για συχνότητες άνω των 10 THz κατά μήκος κατακόρυφης διαδρομής [3]

Η μελέτη του παραπάνω διαγράμματος καθιστά πιο εύκολη την ανεύρεση παραθύρων διάδοσης με χαμηλή ατμοσφαιρική απορρόφηση. Για την καλύτερη ταυτοποίηση αυτών των παραθύρων μπορεί να αξιοποιηθεί η σύσταση ITU-R P.1622 [5]. Σύμφωνα με τη σύσταση αυτή τα παράθυρα χαμηλής απορρόφησης καθορίζονται από την αστρονομική κοινότητα από καθορισμένα φίλτρα τα οποία δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Καθορισμένα αστρονομικά φίλτρα για συχνότητες άνω των 15 THz [5]

Φίλτρο	Q	N	M	L'	L	K	H
Κεντρική συχνότητα (THz)	15	30	63	79	86	136	180
Μήκος κύματος (μm)	20.25	10.1	4.80	3.80	3.50	2.20	1.65
Εύρος ζώνης (THz)	15.2	18.2	15.9	14.7	17.3	30.1	33.3
(μm)	6.50	5.70	1.20	0.70	0.70	0.48	0.30

Φίλτρο	J	I <sub>J</sub>	I <sub>S</sub>	R	V	B	U
Κεντρική συχνότητα (THz)	240	330	370	430	560	700	830
Μήκος κύματος (μm)	1.25	0.90	0.80	0.70	0.54	0.43	0.36
Εύρος ζώνης (THz)	74.7	90.5	115.1	138.1	93.2	164.5	163.6
(μm)	0.38	0.24	0.24	0.22	0.09	0.10	0.07

Οι κεντρικές συχνότητες παρέχουν μια εκτίμηση της περιοχής του φάσματος που μπορεί να αξιοποιηθεί από ζεύξεις Γης- διαστήματος λαμβάνοντας υπόψη

μόνο τα απορροφητικά χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας. Οι τέσσερις υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων αντιπροσωπεύουν μια συνέχεια ορατού και υπεριώδους φάσματος με σχετικά χαμηλή απορρόφηση και όχι διακριτές περιοχές χαμηλής απορρόφησης. Επιπλέον με δεδομένη την εξάρτηση της απορρόφησης από την τοπική θερμοκρασία, την πίεση και τη χημική σύσταση της ατμόσφαιρας, το εύρος ζώνης των φίλτρων δεν ανταποκρίνεται απαραίτητα σε εύρος ζώνης χαμηλής απορρόφησης.

Φυσικά για την αποτελεσματική μελέτη της απορρόφησης σε συγκεκριμένη περιοχή είναι απαραίτητο να ληφθούν και να αξιολογηθούν κατάλληλες μετρήσεις πριν την εγκατάσταση του επίγειου σταθμού.

## 2.2 Γεωμετρική Απώλεια και Διάθλαση

Γεωμετρική Απώλεια: Ακόμη και σε συνθήκες καθαρού ουρανού η δέσμη ακτινοβολίας αποκλίνει και συνεπώς μετά από απόσταση διάδοσης  $d$ , ο δέκτης λαμβάνει σήμα μειωμένης ισχύος λόγω εξάπλωσης της δέσμης [6]. Η απόσβεση του σήματος λόγω εξάπλωσης της δέσμης δίνεται στη σχέση (2.1):

$$A_{geo} (dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{S_d}{S_{capture}} \right) \quad (2.1)$$

Όπου,  $S_{capture}$  η επιφάνεια σύλληψης του δέκτη,  $S_d$  η επιφάνεια της δέσμης σε απόσταση  $d$  και η οποία δίνεται από τη σχέση (2.2):

$$S_d = \frac{\pi}{4} (d \cdot \theta)^2 \quad (m^2) \quad (2.2)$$

Όπου  $\theta$ , η απόκλιση της γωνίας (mrad) και  $d$ , η απόσταση πομπού-δέκτη (km). Σε περιπτώσεις όπου η επιφάνεια σύλληψης του δέκτη είναι μεγαλύτερη από την επιφάνεια της δέσμης ( $S_{capture} > S_d$ ) η απόσβεση θεωρείται μηδέν αφού όλη η ενέργεια συσσωρεύεται από τον δέκτη. Γίνεται αντιληπτό πως όσο μεγαλύτερη η απόσταση πομπού και δέκτη τόσο μεγαλύτερη είναι και η εξάπλωση της δέσμης. Ο σχεδιασμός του συστήματος ως προς τη γεωμετρική απόσβεση απαιτεί σωστή επιλογή της γωνίας απόκλισης ώστε η δέσμη ακτινοβολίας να είναι αρκετά εξαπλωμένη ώστε να φθάνει στο δέκτη με την απαιτούμενη πιθανότητα τηρώντας παράλληλα την απαίτηση σε ενέργεια εκπομπής εντός ορίων. Μια αναλυτική μελέτη της γεωμετρικής απώλειας για διάφορες FSO συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων γίνεται στο [7].

Διάθλαση: Πέραν την γεωμετρικής απόσβεσης η διάδοση υπόκειται σε περαιτέρω απώλειες που οφείλονται σε διάθλαση λόγω μεταβολών της πυκνότητας της ατμόσφαιρας. Το αποτέλεσμα για συστήματα σε συχνότητες

μεταξύ 20THz και 375 THz και για διαδρομή Γης-διαστήματος είναι η γωνιακή μετατόπιση στην κατεύθυνση της διαδρομής διάδοσης. Η διάθλαση είναι συνάρτηση του μήκους κύματος, της γωνίας ανύψωσης καθώς και των συνθηκών θερμοκρασίας και πίεσης κατά τη διαδρομή διάδοσης [3].

Θεωρώντας ότι στην ατμόσφαιρα επικρατούν οι ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης και για δεδομένη τοποθεσία, εισάγεται ο ενεργός ατμοσφαιρικός δείκτης διάθλασης  $n_{eff}$ , ο οποίος υπολογίζεται προσεγγιστικά για συχνότητες άνω των 150 THz (μήκη κύματος  $< 2\mu\text{m}$ ) σε θερμοκρασία  $T=15^\circ\text{C}$  και πίεση  $P=1013.25\text{ hPa}$  από τη σχέση (2.3):

$$n_{eff} = 1 + 10^{-8} \left( 6432.8 + \frac{2949810}{146 - \lambda_{vac}^{-2}} + \frac{25540}{41 - \lambda_{vac}^{-2}} \right) \quad (2.3)$$

Όπου  $\lambda_{vac}$ , το μήκος κύματος στο κενό ( $\mu\text{m}$ ). Η προσαρμογή του ενεργού ατμοσφαιρικού δείκτη διάθλασης σε άλλες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης μπορεί να γίνει από τη σχέση (2.4):

$$n_{eff}(T, P) = 1 + (n_{eff} - 1) \frac{1.162P(1 + P(0.7868 - 0.0113T))10^{-6}}{760.4696(1 + 0.0366T)} \quad (2.4)$$

Όπου  $T$ , η θερμοκρασία ( $^\circ\text{C}$ ) και  $P$ , η ατμοσφαιρική πίεση ( $\text{hPa}$ ). Ο ενεργός δείκτης διάθλασης,  $n_{eff}$ , διαφέρει από τον πραγματικό δείκτη διάθλασης,  $n$ , και η χρήση του είναι ικανοποιητική στην πράξη καθώς κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης ο πραγματικός δείκτης διάθλασης  $n$ , μεταβάλλεται διαρκώς και η αναλυτική προσέγγιση καθίσταται πολύπλοκη.

Αντιθέτως ο  $n_{eff}$ , δίνει μια προσέγγιση του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας συνολικά και επομένως τα συστήματα που λειτουργούν στις συχνότητες 150 THz έως 375 THz μπορούν να συγκλίνουν την δέσμη στο δέκτη αξιοποιώντας μια αρχική εκτίμηση όπως προκύπτει από το νόμο του Snell. Η αλλαγή συνεπώς στη γωνία ανύψωσης δίνεται από τη σχέση (2.5):

$$\theta_{obs} = \cos^{-1} \left( \frac{\cos(\theta_t)}{n_{eff}(T, P)} \right) \quad (2.5)$$

Όπου  $\theta_{obs}$ , η παρατηρούμενη γωνία ανύψωσης,  $\theta_t$ , η πραγματική γωνία ανύψωσης και  $n_{eff}(T, P)$ , ο ενεργός ατμοσφαιρικός δείκτης διάθλασης όπως υπολογίστηκε από τη σχέση (2.4).

## 2.3 Σκέδαση

Η σκέδαση του φωτός αφορά την αλλαγή κατεύθυνσης μέρους της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από σωματίδια παρόντα στη διαδρομή διάδοσης και είναι μια ακόμη αιτία απωλειών σε ένα σύστημα FSO.

Το είδος της σκέδασης προκύπτει από τη σύγκριση του μήκους κύματος με το μέγεθος των σωματιδίων [3]. Με βάση αυτό προκύπτουν τρία είδη σκέδασης:

- Σκέδαση Rayleigh
- Σκέδαση Mie
- Σκέδαση ανεξάρτητη του μήκους κύματος

Στον Πίνακα 2 φαίνεται το είδος της σκέδασης αναλόγως του μεγέθους των σωματιδίων  $r$ , σε σχέση με το μήκος κύματος  $\lambda$ . Δίνεται επίσης η προσεγγιστική σχέση μεταξύ του συντελεστή εξασθένησης του σκεδαστή  $Q(\lambda)$  και του μήκους κύματος καθώς και τα αίτια εμφάνισης του συγκεκριμένου είδους σκέδασης.

Πίνακας 2: Είδη σκέδασης [6]

Είδος σκέδασης	Rayleigh	Mie	Ανεξάρτητη $\lambda$
Σύγκριση	$r \ll \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$	$r = \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{-1.6}$ έως $Q(\lambda) \sim \lambda^0$	$r \gg \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^0$
Αίτια	Μόρια αέρα Καταχνιά	Καταχνιά Ομίχλη Αερολύματα	Ομίχλη Βροχή Χιόνι Χαλάζι

### 2.3.1 Σκέδαση Rayleigh

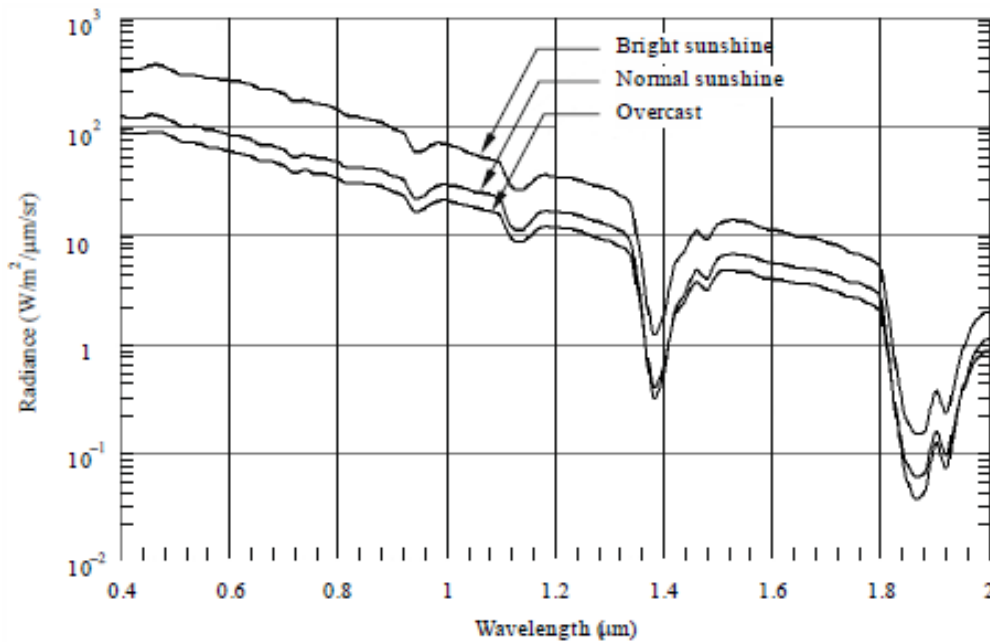
Όπως φάνηκε και από τον Πίνακα 2 η σχέση εξάρτησης  $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$  δείχνει ότι η συμβολή της σκέδασης Rayleigh στην συνολική απόσβεση είναι αμελητέα για συχνότητες κάτω των 375 THz (μήκος κύματος μεγαλύτερο των 0.8μm). Ωστόσο για μεγαλύτερες συχνότητες η απόσβεση αυξάνεται σημαντικά και σε συχνότητα περίπου 1000 THz (0.3 μm) η επίδραση της σκέδασης Rayleigh στην απόσβεση του σήματος γίνεται συγκρίσιμη με αυτή της σκέδασης Mie.

Το πιο σημαντικό αποτέλεσμα της σκέδασης Rayleigh είναι η εισαγωγή απόσβεσης με τη μορφή θορύβου περιβάλλοντος στους δέκτες. Ο θόρυβος περιβάλλοντος υφίσταται τόσο κατά την ανερχόμενη όσο και κατά την κατερχόμενη ζεύξη. Η κύρια πηγή θορύβου στην περίπτωση ανερχόμενης ζεύξης από επίγειο σταθμό προς το διάστημα είναι η σκέδαση Rayleigh που προκαλείται από την ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της μέρας. Ο σταθμός στο διάστημα επίσης υφίσταται θόρυβο από την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης ωστόσο αυτό δεν οφείλεται στη σκέδαση Rayleigh.

Αγνοώντας τα υπόλοιπα φαινόμενα ο θόρυβος περιβάλλοντος που φθάνει στους δέκτες δίνεται από τη σχέση (2.6)

$$P_{back} = \frac{\pi\theta_r^2 A_r \Delta\lambda H}{4} \quad (W) \quad (2.6)$$

Όπου  $\theta_r$ , οπτικό πεδίο του δέκτη (rad),  $A_r$ , επιφάνεια του δέκτη ( $m^2$ ),  $\Delta\lambda$ , εύρος ζώνης του δέκτη ( $\mu m$ ) και  $H$ , ακτινοβολία ( $W/m^2/\mu m/sr$ ). Η ακτινοβολία του ουρανού σε διάφορες συνθήκες φαίνεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4: Ακτινοβολία Ουρανού [3]

Αντίστοιχα για τις κύριες συχνότητες ενδιαφέροντος σε οπτικές επικοινωνίες άνω των 20 THz η ακτινοβολία δίνεται από τον Πίνακα 3. Μια λογική τιμή ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι περίπου  $1 \times 10^{-9} W/m^2/\mu m/sr$  [3].

Πίνακας 3: Ακτινοβολία ουρανού σε συγκεκριμένες συχνότητες [3]

Συχνότητα (THz)	Μήκος κύματος (μm)	Κατάσταση ουρανού		
		Εντολή Ηλιοφάνεια	Κανονική Ηλιοφάνεια	Νεφελώδης
566.0	0.530	303.4	101.6	71.75
352.9	0.850	122.3	42.58	30.3
310.9	0.965	64.62	25.12	18.63
283.0	1.06	54.45	25.32	17.99
200.0	1.50	13.01	6.00	4.44

Φυσικά εκτός του θορύβου περιβάλλοντος οφειλόμενου στη σκέδαση Rayleigh υπάρχουν και άλλες πηγές θορύβου περιβάλλοντος όπως πλανήτες, άστρα και αντανakλάσεις από φυσικά ή τεχνητά αντικείμενα. Εφόσον τα συστήματα μεταξύ 20THz και 375 THz δεν θεωρούνται λειτουργικά σε περιόδους υψηλής βροχόπτωσης, η αστραπή δεν θεωρείται μια τέτοια πηγή θορύβου.

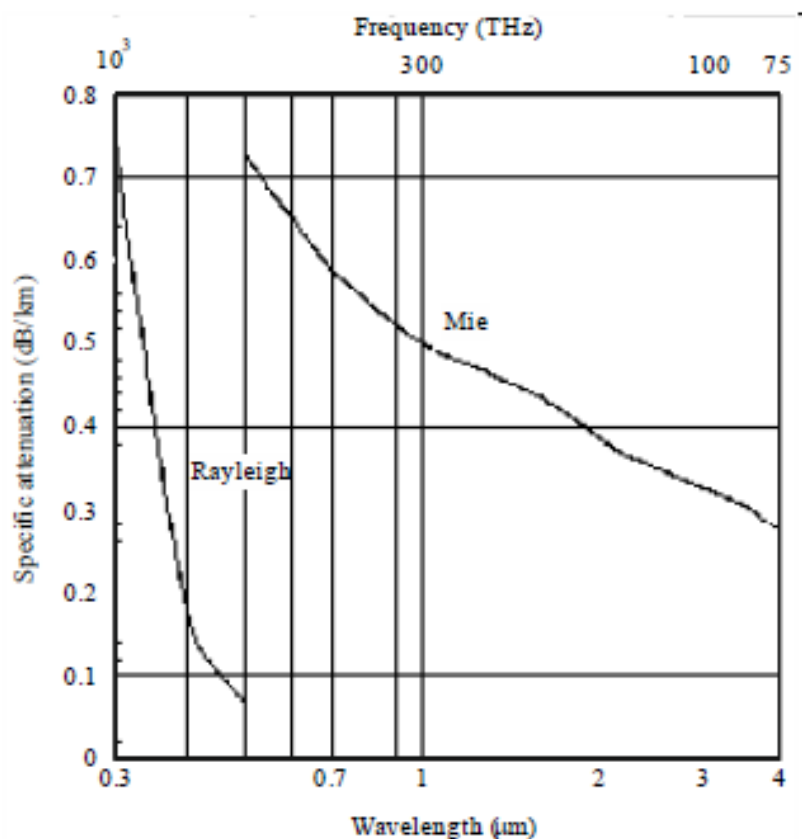
Τέλος αναλόγως της κατεύθυνσης και της κίνησης της διαδρομής διάδοσης ο θόρυβος περιβάλλοντος και η διάρκειά του μπορεί να διαφέρουν κατά πολλές τάξεις μεγέθους [3].

### 2.3.2 Σκέδαση Mie

Η ατμόσφαιρα εμφανίζει τα χαρακτηριστικά της σκέδασης Mie όταν τα σωματίδια κατά τη διαδρομή διάδοσης έχουν φυσική διάμετρο περίπου ίση με το μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Ο ακριβής υπολογισμός προϋποθέτει τη γνώση του αριθμού και του μεγέθους των σωματιδίων κατά μήκος μιας διαδρομής το οποίο είναι πρακτικά αδύνατο. Η σκέδαση Mie αποτελεί τον κύριο παράγοντα απωλειών για συχνότητες από 20THz έως 375 THz (15 $\mu$ m έως 0.8 $\mu$ m) και οι κύριες αιτίες που την προκαλούν είναι τα αερολύματα και τα μικροσκοπικά σωματίδια νερού κατά τη διαδρομή διάδοσης [3], [5].

Στην Εικόνα 5 γίνεται σύγκριση της απόσβεσης που προκαλεί η Rayleigh και η Mie σκέδαση για πρότυπη ατμόσφαιρα στο επίπεδο της θάλασσας.



Εικόνα 5: Σύγκριση απόσβεσης Rayleigh και Mie σκέδασης [3]

Σύμφωνα με τη σύσταση ITU-R P.1622 έχει προταθεί μια μέθοδος υπολογισμού για OGS σε υψόμετρα μεταξύ 0km και 5 km πάνω από το επίπεδο της θάλασσας καθώς και για συχνότητες μεταξύ 150 THz και 375 THz. Η μέθοδος έχει ακρίβεια 0.1 dB για γωνίες ανύψωσης άνω των 45°.

Αρχικά πρέπει να υπολογισθούν οι εξαρτώμενες από το μήκος κύματος εμπειρικές σταθερές όπως στις σχέσεις(2.7)-(2.10):

$$a = 0.000487\lambda^3 - 0.002237\lambda^2 + 0.003864\lambda - 0.004442 \quad (2.7)$$

$$b = -0.00573\lambda^3 + 0.02639\lambda^2 - 0.04552\lambda + 0.05164 \quad (2.8)$$

$$c = 0.02565\lambda^3 - 0.1191\lambda^2 + 0.20385\lambda - 0.216 \quad (2.9)$$

$$d = -0.0638\lambda^3 + 0.3034\lambda^2 - 0.5083\lambda + 0.425 \quad (2.10)$$

Όπου  $\lambda$ , μήκος κύματος (μm). Έπειτα πρέπει να υπολογιστεί ο λόγος εξάλειψης από το ύψος του σταθμού βάσης έως το άπειρο, σχέση (2.11):

$$\tau' = ah_E^3 + bh_E^2 + ch_E + d \quad (2.11)$$

Όπου  $h_E$  το ύψος του σταθμού βάσης πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (km). Τέλος υπολογίζεται η ατμοσφαιρική απόσβεση λόγω σκέδασης κατά τη διαδρομή διάδοσης από τη σχέση (2.12):

$$A_s = \frac{4.3429\tau'}{\sin(\theta)} \quad (dB) \quad (2.12)$$

Αυτή η μέθοδος υπολογισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς να είναι διαθέσιμες τοπικές μετρήσεις. Αν υπάρχουν μετρήσεις τότε στην ενότητα 2.3.3 παρατίθεται μια πιο αναλυτική έκφραση υπολογισμού.

Ειδική απόσβεση λόγω ομίχλης: Όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 2 η ομίχλη προκαλεί σκέδαση Mie ωστόσο σε αυτή την περίπτωση η αναλυτική προσέγγιση σύμφωνα με τη θεωρία Mie δεν είναι πρακτική. Αντιθέτως έχουν υιοθετηθεί πρακτικές υπολογισμού της απόσβεσης που εισάγει η ομίχλη αξιοποιώντας την ορατότητα. Μάλιστα σε περιπτώσεις έντονης παρουσίας ομίχλης όπου η ορατότητα είναι μικρότερη από 50m η εξασθένιση μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 350 dB/km [8]. Είναι εμφανές ότι σε τέτοιες περιπτώσεις η παρουσία έντονης ομίχλης μπορεί να προκαλέσει περιορισμό της διαθεσιμότητας.

Ως ορατότητα ή εύρος όρασης ορίζεται η απόσταση που το φως μειώνεται στο 2% της αρχικής του ενέργειας. Ο ποιοτικός ορισμός είναι ότι ορατότητα είναι η απόσταση στην οποία είναι δυνατό να διακριθεί ένα σκοτεινό αντικείμενο στον

ορίζοντα. Η παράμετρος της ορατότητας μπορεί εύκολα να αντληθεί για εκτίμηση της απόδοσης των συστημάτων τηλεπικοινωνίας από μετεωρολογικούς σταθμούς ή αεροπορικές βάσεις. Αυτά τα δεδομένα ωστόσο ενδέχεται να διαφέρουν σημαντικά για την περιοχή ενδιαφέροντος και εξαρτάται από τη θέση του μετεωρολογικού σταθμού ή αεροπορικής βάσης που λαμβάνει τις μετρήσεις [6]. Στη σχέση (2.13) δίνεται ένας εμπειρικός τρόπος υπολογισμού της ειδικής απόσβεσης που προκαλείται από την ομίχλη:

$$\gamma_{fog}(\lambda) = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda}{550nm} \right)^{-q} \quad \left( \frac{dB}{km} \right) \quad (2.13)$$

Όπου  $V$ , ορατότητα (km),  $\lambda$ , μήκος κύματος (nm),  $q$  εμπειρική σταθερά που εξαρτάται από την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων-σκεδαστών και η οποία λαμβάνει τις παρακάτω τιμές σύμφωνα με το μοντέλο του Kruse [9]:

$$\begin{cases} 1.6V & V > 50km \\ 1.3 & 6km < V < 50km \\ 0.585V^{1.3} & V < 6km \end{cases} \quad (2.14)$$

Για τον υπολογισμό της τιμής υπέρβασης της απόσβεσης για δεδομένη πιθανότητα (ποσοστό χρόνου) απαιτείται για τη σχέση (2.13) η τιμή της ορατότητας που δεν υπερβαίνει για την ίδια πιθανότητα (ποσοστό).

Η μέθοδος αυτή έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης όσον αφορά την απόσβεση που προκαλούν τα σύννεφα θεωρώντας ότι το σύννεφο και η ομίχλη μπορούν να ταυτιστούν σαν έννοιες με τη διαφορά ότι σχηματίζονται σε διαφορετικά υψόμετρα. Με αυτόν τον τρόπο θα ήταν δυνατός και ο υπολογισμός της απόσβεσης που προκαλούν τα σύννεφα αξιοποιώντας τον ορισμό της ορατότητας [9], [10]. Για την κάλυψη των νεφών ωστόσο θα γίνει εκτενής αναφορά στην ενότητα 2.5 του παρόντος.

### 2.3.3 Συγκεντρωτικά Rayleigh και Mie σκέδαση από αερολύματα

Αν υπάρχουν τοπικές μετρήσεις της ατμόσφαιρας τότε η μέθοδος που παρουσιάζεται στην ITU-R P.1622 [5] μπορεί να υπολογίζει την απόσβεση που προκαλείται τόσο από Rayleigh όσο και από Mie σκέδαση, οφειλόμενη σε αερολύματα για διαδρομές διάδοσης Γης-διαστήματος. Οι παράμετροι που απαιτούνται είναι το μήκος κύματος  $\lambda$  ( $\mu\text{m}$ ), το ύψους του σταθμού βάσης από την επιφάνεια της θάλασσας  $h_e$  (km) και η γωνία ανύψωσης  $\theta$ .

Αρχικά πρέπει να υπολογιστούν οι συντελεστές Rayleigh ( $\beta_R$ ) και Mie( $\beta_A$ ) σκέδασης από το υψόμετρο του σταθμού βάσης και αυξανόμενα με βήμα 1km



έως 30km από το επίπεδο της θάλασσας. Πάνω από 30km η σκέδαση Rayleigh είναι αμελητέα.

$$\beta_R(h) = \sigma_R n_R(h) \times 10^3 \quad (\text{km}^{-1}) \quad (2.15)$$

$$\beta_A(h) = \frac{\beta_A(0) n_A(h)}{n_A(0)} \quad (\text{km}^{-1}) \quad (2.16)$$

Όπου  $\sigma_R$ , η διατομή σκέδασης Rayleigh ( $\text{m}^2$ ),  $n_R(h)$ , πυκνότητα ατμοσφαιρικού αριθμού ( $\text{m}^{-3}$ ),  $\beta_A(0)$ , συντελεστής σκέδασης αερολυμάτων στο επίπεδο της θάλασσας ( $\text{km}^{-1}$ ) και  $n_A(h)$ , η πυκνότητα αριθμού αερολυμάτων σε  $h$  km πάνω από το επίπεδο της θάλασσας.

Υπολογίζεται ο συντελεστής εξάλειψης οφειλόμενος σε σκέδαση για κάθε υψόμετρο από το υψόμετρο του σταθμού βάσης έως 30km από το επίπεδο της θάλασσας με βήμα 1km.

$$\beta_T(h) = \beta_R(h) + \beta_A(h) \quad (\text{km}^{-1}) \quad (2.17)$$

Έπειτα υπολογίζεται ο λόγος εξάλειψης  $\tau'_T$ , από το ύψος του σταθμού βάσης έως 30km πάνω από το επίπεδο της θάλασσας

$$\tau'_T = \sum_{h=h_0}^{30} \bar{\beta}_T(h) \Delta h \quad (2.18)$$

Όπου  $\bar{\beta}_T(h)$ , μέση τιμή του  $\beta_T(h)$  και του  $\beta_T(h-1)$  ( $\text{km}^{-1}$ ) και  $\Delta h$  η απόσταση μεταξύ  $h$  και  $h-1$  (km). Τέλος η απόσβεση προκύπτει από τη σχέση (2.12). Αν κάποιο από τα δεδομένα δεν είναι διαθέσιμο τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα από τους Πίνακα 4 και Πίνακα 5.

Πίνακας 4: Συντελεστής διατομής σκέδασης Rayleigh,  $\sigma_R$  και συντελεστής Mie σκέδασης στο επίπεδο της θάλασσας  $\beta_A(0)$ [5]

Μήκος κύματος ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_R$ ( $\text{m}^2$ )	$\beta_A(0)$ ( $\text{km}^{-1}$ )	Μήκος κύματος ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_R$ ( $\text{m}^2$ )	$\beta_A(0)$ ( $\text{km}^{-1}$ )
0.50	$6.735 \times 10^{-31}$	0.167	1.06	$3.320 \times 10^{-32}$	0.113
0.55	$4.563 \times 10^{-31}$	0.158	1.26	$1.600 \times 10^{-32}$	0.108
0.60	$3.202 \times 10^{-31}$	0.150	1.67	$5.210 \times 10^{-33}$	0.098
0.65	$2.313 \times 10^{-31}$	0.142	2.17	$1.800 \times 10^{-33}$	0.085
0.70	$1.713 \times 10^{-31}$	0.135	3.50	$2.681 \times 10^{-34}$	0.070
0.80	$9.989 \times 10^{-32}$	0.127	4.00	$1.571 \times 10^{-34}$	0.063
0.90	$6.212 \times 10^{-32}$				

Ενδιάμεσες τιμές για το συντελεστή διατομής σκέδασης Rayleigh,  $\sigma_R$ , υπολογίζονται με παρεμβολή υποθέτοντας λογαριθμική-γραμμική σχέση ενώ για το συντελεστή Mie σκέδασης στο επίπεδο της θάλασσας  $\beta_A(0)$  υποθέτοντας σχέση νόμου δύναμης.

Πίνακας 5: Πυκνότητα αριθμού αερολυμάτων  $n_A$  και πυκνότητα ατμοσφαιρικού αριθμού  $n_R$  [5]

Υψόμετρο (km)	$n_A$ ( $m^{-3}$ )	$n_R$ ( $m^{-3}$ )	Υψόμετρο (km)	$n_A$ ( $m^{-3}$ )	$n_R$ ( $m^{-3}$ )
0	$2.0 \times 10^8$	$2.548 \times 10^{25}$	16	$6.7 \times 10^4$	$3.462 \times 10^{24}$
1	$8.7 \times 10^7$	$2.312 \times 10^{25}$	17	$7.3 \times 10^4$	$2.959 \times 10^{24}$
2	$3.8 \times 10^7$	$2.093 \times 10^{25}$	18	$8.0 \times 10^4$	$2.530 \times 10^{24}$
3	$1.6 \times 10^7$	$1.891 \times 10^{25}$	19	$9.0 \times 10^4$	$2.163 \times 10^{24}$
4	$7.2 \times 10^6$	$1.704 \times 10^{25}$	20	$8.6 \times 10^4$	$1.849 \times 10^{24}$
5	$3.1 \times 10^6$	$1.532 \times 10^{25}$	21	$8.2 \times 10^4$	$1.574 \times 10^{24}$
6	$1.3 \times 10^6$	$1.373 \times 10^{25}$	22	$8.0 \times 10^4$	$1.341 \times 10^{24}$
7	$4.0 \times 10^5$	$1.227 \times 10^{25}$	23	$7.6 \times 10^4$	$1.144 \times 10^{24}$
8	$1.4 \times 10^5$	$1.093 \times 10^{25}$	24	$5.2 \times 10^4$	$9.760 \times 10^{23}$
9	$5.0 \times 10^4$	$9.713 \times 10^{24}$	25	$3.6 \times 10^4$	$8.335 \times 10^{23}$
10	$2.6 \times 10^4$	$8.599 \times 10^{24}$	26	$2.5 \times 10^4$	$7.123 \times 10^{23}$
11	$2.3 \times 10^4$	$7.586 \times 10^{24}$	27	$2.4 \times 10^4$	$6.092 \times 10^{23}$
12	$2.1 \times 10^4$	$6.487 \times 10^{24}$	28	$2.2 \times 10^4$	$5.214 \times 10^{23}$
13	$2.3 \times 10^4$	$5.544 \times 10^{24}$	29	$2.0 \times 10^4$	$4.466 \times 10^{23}$
14	$2.5 \times 10^4$	$4.739 \times 10^{24}$	30	$1.9 \times 10^4$	$3.848 \times 10^{23}$
15	$4.1 \times 10^4$	$4.050 \times 10^{24}$			

Ενδιάμεσες τιμές και για την πυκνότητα του αριθμού αερολυμάτων,  $n_A$ , όσο και για την πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αριθμού,  $n_R$ , υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή.

### 2.3.4 Σκέδαση ανεξάρτητη του μήκους κύματος

Όταν η φυσική διάμετρος των σωματιδίων κατά μήκος μιας διαδρομής διάδοσης, είναι πολύ μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, τότε η ατμόσφαιρα παρουσιάζει χαρακτηριστικά σκέδασης ανεξάρτητης του μήκους κύματος. Τέτοιες περιπτώσεις αφορούν την παρουσία βροχής, χαλαζιού και χιονιού και ο υπολογισμός της απόσβεσης που εισάγουν αυτά τα φαινόμενα περιγράφεται καλύτερα είτε από γεωμετρικά οπτικά μοντέλα [11] είτε προσεγγιστικά από εμπειρικά μοντέλα.

Επιπλέον όπως αναλύεται στην ενότητα 2.5 η παρουσία νεφών κατά τη διαδρομή διάδοσης τις περισσότερες φορές καθιστά αδύνατη τη ζεύξη για FSO συστήματα. Ωστόσο παρακάτω δίνεται ο τρόπος υπολογισμού της απόσβεσης που εισάγουν τα φαινόμενα και έχει εφαρμογή κυρίως σε περίπτωση που λόγω της επιλεγμένης γωνίας ανύψωσης τα σύννεφα δεν παρεμβάλλονται στην LOS.

#### Ειδική απόσβεση λόγω βροχής:

Στην περίπτωση της βροχής η απόσβεση που προκαλείται είναι σχετικά μικρότερη από αυτή που προκαλεί η ομίχλη. Συγκεκριμένα η εξασθένιση για FSO συστήματα με μήκη κύματος 850nm έως 1500nm κυμαίνεται για ασθενή

βροχόπτωση (2.5 mm/hr) έως ισχυρή βροχόπτωση (25 mm/hr) από 1dB/km έως 10dB/km [12].

Η ειδική απόσβεση λόγω βροχής δίνεται σύμφωνα με τη σύσταση ITU-R P.1814 [6] από την σχέση (2.19):

$$\gamma_{rain} = k \cdot R^a \quad \left( \frac{dB}{km} \right) \quad (2.19)$$

Όπου R(p) (mm/h) είναι ο ρυθμός βροχόπτωσης που υπερβαίνεται για οποιοδήποτε ποσοστό ενός μέσου έτους, p, και για οποιαδήποτε τοποθεσία. Πρόβλεψη για το ρυθμό βροχόπτωσης που υπερβαίνεται, R, μπορεί να γίνει αξιοποιώντας τη σύσταση ITU-R P.837 [13].

Οι παράμετροι k, a, εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της βροχής, όπως είναι το μέγεθος της σταγόνας και η θερμοκρασία της βροχής, και ο υπολογισμός του μπορεί να γίνει αξιοποιώντας το μοντέλο που προτείνεται στη σύσταση ITU-R P.838 [14].

Ο συνδυασμός βροχόπτωσης με κάλυψη από νέφη είναι αρκετά συχνός. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται πηγές υψηλής ισχύος καθώς και προσαρμοστικές τεχνικές κωδικοποίησης και διαμόρφωσης που θα επιτρέψουν στη ζεύξη την αύξηση της διαθεσιμότητας. Επιπλέον οι διασυνδεδεμένοι οπτικοί σύνδεσμοι HAP (High Altitude Platform) εξυπηρετούν στην εξάλειψη του προβλήματος μπλοκαρίσματος για διάφορες γεωγραφικές τοποθεσίες [15].

Ειδική απόσβεση λόγω χιονιού:

Τα σωματίδια του χιονιού έχουν μέγεθος που βρίσκεται ανάμεσα σε αυτά της ομίχλης και της βροχής. Συνεπώς η εξασθένηση που λόγω του χιονιού είναι μεγαλύτερη από αυτή λόγω της βροχής αλλά μικρότερη από αυτή λόγω της ομίχλης.

Σε περίπτωση πυκνής χιονόπτωσης, η πυκνότητα των σωματιδίων χιονιού που παρεμβάλλονται στη διαδρομή διάδοσης είναι τέτοια ώστε η εξασθένηση να είναι παρόμοια με αυτή της ομίχλης, 30-50 dB/km. Τότε η παρουσία αυτού του φαινομένου καθιστά δυσχερή τη διάδοση και μπορεί να μειώσει σημαντικά τη διαθεσιμότητα της ζεύξης.

Σύμφωνα με την σύσταση ITU-R P.1814 η ειδική απόσβεση εξαιτίας του χιονιού δίνεται από τη σχέση (2.20):

$$\gamma_{snow} = a \cdot S^b \quad \left( \frac{dB}{km} \right) \quad (2.20)$$

Όπου  $S$ , ο ρυθμός χιονόπτωσης (mm/hr) και  $a, b$  παράμετροι συναρτήσεως του μήκους κύματος όπως δίνεται στον Πίνακα 6 για περιπτώσεις υγρού και ξηρού χιονιού.

Πίνακας 6: Παράμετροι  $a, b$  για υγρό και ξηρό χιόνι [6]

Είδος Χιονιού	$a$	$b$
Υγρό χιόνι	$0.000102\lambda + 3.79$	0.72
Ξηρό Χιόνι	$0.0000542\lambda + 5.50$	1.38

## 2.4 Ατμοσφαιρικές Αναταράξεις

Οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις είναι φαινόμενο τυχαίο που προκαλείται λόγω περιοχών αέρα με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης κατά τη διαδρομή διάδοσης. Όπως αναλύθηκε και στην ενότητα 2.2 ο δείκτης διάθλασης επηρεάζεται άμεσα από τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Κατ' επέκταση λοιπόν οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις οφείλονται σε περιοχές αέρα με διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης.

Οι περιοχές αυτές ή αλλιώς τα κελιά αναταράξεων διαφέρουν σε μέγεθος, από μερικά χιλιοστά έως μερικές δεκάδες μέτρα, καθώς και σε σχήμα και βρίσκονται ταυτόχρονα στη διαδρομή μετάδοσης. Τέτοιου είδους διαταραχές στο μέτωπο του κύματος που εισάγει η ατμόσφαιρα μπορούν να περιγραφούν φυσικά από το μοντέλο του Kolmogorov [16].

Σε συχνότητες από 20 THz έως 375 THz ο δείκτης διάθλασης καθορίζεται από τη θερμοκρασία και όχι από την υγρασία όπως συμβαίνει στις ραδιοσυχνότητες. Επίσης τα αποτελέσματα των αναταράξεων είναι διαφορετικά για τις ανερχόμενη (Γη-διάστημα) και κατερχόμενη (διάστημα-Γη) ζεύξη [3].

Η περιγραφή των χαρακτηριστικών διάδοσης κατά μήκος μιας λοξής διαδρομής μπορεί να γίνει συλλογικά με τέσσερις παραμέτρους-μέτρα όπως αναλύονται στην ITU-R P.1621 και οι οποίοι είναι οι εξής:

1.  $C_n^2 (m^{2/3})$ : Μέτρο της έντασης των ατμοσφαιρικών αναταράξεων, εξαρτώμενο από το ύψος.
2.  $r_0 (m)$ : Μήκος συνοχής της ατμόσφαιρας, περιγράφει την ενεργή διάμετρο ενός δέκτη που λαμβάνει ενέργεια που έχει διαδοθεί διαμέσου αναταράξεων.
3.  $\theta_0 (rad)$ : Ισοπλανητική γωνία της ατμόσφαιρας, είναι εκείνη η γωνιακή διαφορά κατά την οποία η διακύμανση του μετώπου κύματος στις δύο κατευθύνσεις είναι  $1 rad^2$ .
4.  $\tau_0 (s)$ : Κρίσιμη χρονική σταθερά της ατμόσφαιρας, περιγράφει τον χρονικό ρυθμό των διακυμάνσεων των αναταράξεων κατά μήκος μιας διαδρομής διάδοσης.

Για την περιγραφή των χαρακτηριστικών διάδοσης απαιτείται η γνώση και των τεσσάρων παραμέτρων. Για λόγους πληρότητας θα αναλυθούν στη συνέχεια οι

παράμετροι καθώς και οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού τους. Οι αριθμητικές σχέσεις που προκύπτουν σύμφωνα με τη σύσταση ITU-R P.1621 δίνουν μια ικανοποιητική προσέγγιση. Όσον αφορά την μελέτη των ατμοσφαιρικών αναταράξεων διάφορα εμπειρικά μοντέλα έχουν προταθεί ανά καιρούς και το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο θα αναλυθεί στη συνέχεια. Η μελέτη των αναταράξεων σε αυτό το μοντέλο βασίζεται αποκλειστικά στην παράμετρο  $C_n^2$  και περιγράφεται στη σύσταση ITU-R P.1622.

### Υπολογισμός παραμέτρου έντασης αναταράξεων $C_n^2$

Για τον υπολογισμό της παραμέτρου κατά μήκος μιας λοξής διαδρομής προτείνεται από τη σύσταση ITU-R P.1621 μια μέθοδος που βασίζεται στο μοντέλο Hufnagel-Valley 5/7. Σύμφωνα με τη μέθοδο αρχικά υπολογίζεται η rms ταχύτητα του ανέμου,  $v_{rms}$ , κατά μήκος κατακόρυφης διαδρομής χρησιμοποιώντας μια μορφή του Buffon μοντέλου ανέμου όπως στη σχέση (2.21):

$$v_{rms} = \sqrt{v_g^2 + 33.11v_g + 360.31} \quad (m/s) \quad (2.21)$$

Όπου  $v_g$ , η ταχύτητα του ανέμου στο επίπεδο του εδάφους (m/s). Όταν η ταχύτητα του ανέμου στο έδαφος είναι άγνωστη μπορεί να χρησιμοποιηθεί προσεγγιστικά η τιμή  $v_g = 2.3\text{m/s}$  που δίνει  $v_{rms} = 21\text{m/s}$ .

Κατόπιν μπορεί να υπολογιστεί η παράμετρος έντασης αναταράξεων  $C_n^2(h)$  σε ύψος  $h$  από τη σχέση (2.22):

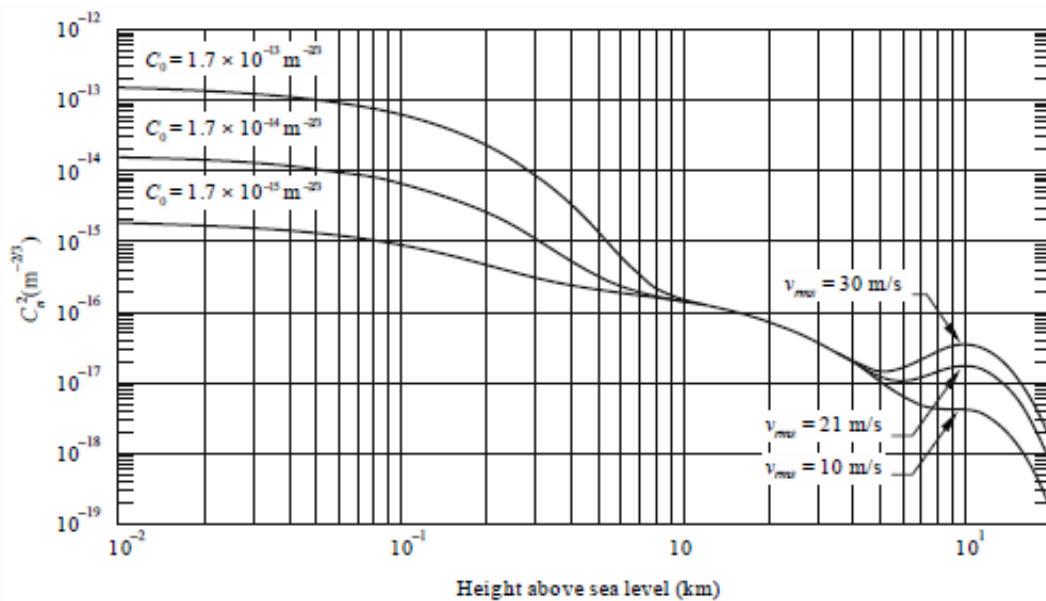
$$C_n^2(h) = 8.148 \times 10^{-56} v_{rms}^2 h^{10} \exp^{-h/1000} + 2.7 \times 10^{-16} \exp^{-h/1500} + C_0 \exp^{-h/100} \quad (2.22)$$

$$(m^{-2/3})$$

Όπου  $h$ , το ύψος πάνω από το επίπεδο του εδάφους (m) και  $C_0$ , η ονομαστική τιμή του  $C_n^2$  στο επίπεδο του εδάφους (τυπικά  $\sim 1.7 \times 10^{-14} m^{-2/3}$ ). Το ζευγάρι τιμών  $C_0 = 1.7 \times 10^{-14} m^{-2/3}$  και  $v_{rms} = 21 m/s$  είναι οι τυπικές συνθήκες αστρονομικών παρατηρήσεων κατά τη νύχτα. Το μοντέλο ωστόσο μπορεί, και ωφελεί να χρησιμοποιηθεί και κατά την ημέρα όσο και κατά τη νύχτα.

Αυτό το μοντέλο για το  $C_n^2$  μπορεί να εφαρμοστεί για οποιοδήποτε σημείο της Γης και διαφέρει σημαντικά από σημείο σε σημείο. Συνεπώς η γνώση των τοπικών χαρακτηριστικών είναι απαραίτητη πριν την εγκατάσταση ενός συστήματος.

Επίσης η παράμετρος αυτή μεταβάλλεται εντονότερα συναρτήσει του ύψους σε χαμηλά ύψη από την επιφάνεια του εδάφους. Στην Εικόνα 6 δίνεται η παράμετρος  $C_n^2$  για διαφορετικές συνθήκες για επιφάνεια εδάφους την επιφάνεια της θάλασσας.



Εικόνα 6: Παράμετρος  $C_n^2$  συναρτήσει του ύψους για 3 διαφορετικές τιμές ταχύτητας ανέμου και αναταράξεων στην επιφάνεια του εδάφους [3].

Γίνεται αντιληπτό ότι η παράμετρος είναι μεγαλύτερη στην επιφάνεια του εδάφους και μειώνεται απότομα με την αύξηση του ύψους. Σε ύψος περίπου 10 km αυξάνεται ελαφρώς και εν συνεχεία πέφτει απότομα. Επίσης η παράμετρος εξαρτάται πιο ισχυρά από το  $C_0$  για χαμηλά ύψη ενώ από την ταχύτητα του ανέμου για ύψη άνω του 1km. Τέλος για ύψη άνω των 20km η παράμετρος γίνεται αμελητέα.

Για τον ακριβέστερο προσδιορισμό του προφίλ ατμοσφαιρικών αναταράξεων θα πρέπει το πάχος κάθε στρώματος ή αλλιώς το μέγεθος του βήματος ενσωμάτωσης σε ύψος να αυξάνεται εκθετικά από 0.001 km στην επιφάνεια του εδάφους (χαμηλότερο στρώμα) σε 1 km σε ύψος 20 km από την επιφάνεια του εδάφους (υψηλότερο στρώμα) σύμφωνα με τη σχέση (2.23)

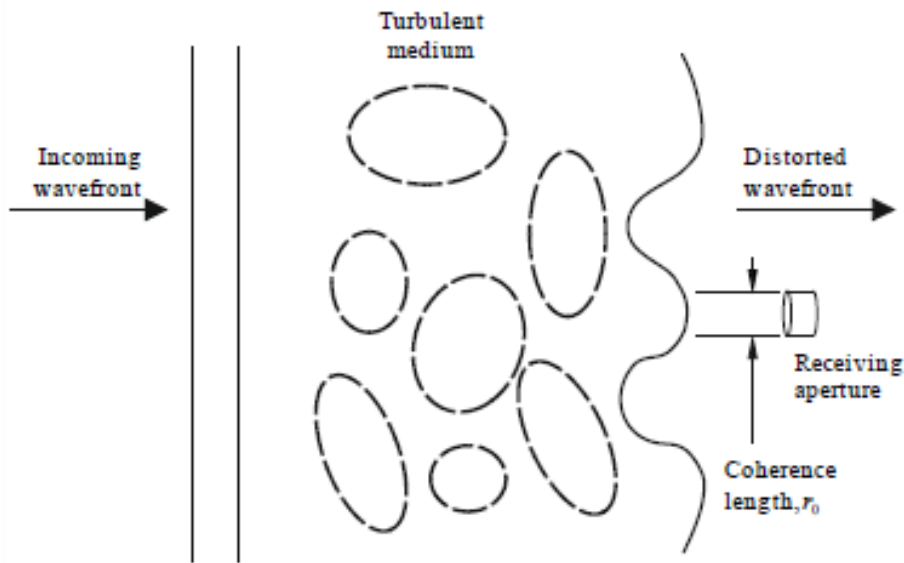
$$h_i = \exp\left\{\frac{i-1}{20}\right\} \quad (m) \quad (2.23)$$

από  $i=1$  έως  $i=139$ . Για  $i=139$   $h_{139} \cong 1000m$  και  $\sum_{i=1}^{i=139} h_i = 20 \text{ km}$

#### Υπολογισμός μήκους συνοχής ατμόσφαιρας $r_0$

Το μήκος συνοχής της ατμόσφαιρας περιγράφει την ενεργή διάμετρο που απαιτείται, εξαιτίας των ατμοσφαιρικών αναταράξεων, για ένα δέκτη. Ένας δέκτης με διάμετρο μικρότερη ή ίση του  $r_0$  θα συλλέξει ενέργεια από ένα συνεκτικό τμήμα του μετώπου κύματος. Ένας δέκτης με διάμετρο μεγαλύτερη

του  $r_0$  θα συλλέξει υποβαθμισμένο μέτωπο κύματος σε όλη του την επιφάνεια. Στην Εικόνα 7 φαίνεται η σημασία του μήκους συνοχής.



Εικόνα 7: Μήκος συνοχής σε ατμοσφαιρικές αναταράξεις [3]

Ο υπολογισμός του μήκους συνοχής γίνεται από τις σχέσεις (2.24):

$$r_0 = \left( 0.423k^2 \sec \zeta \int_{h_0}^Z C_n^2(h) dh \right)^{-3/5} \quad (m) \quad (2.24\alpha)$$

Εφόσον η γωνία ζενίθ είναι συμπληρωματική της γωνίας ανύψωσης ως προς το οριζόντιο και κάθετο επίπεδο η εξίσωση (2.24α) ισοδυναμεί με την εξίσωση (2.24β):

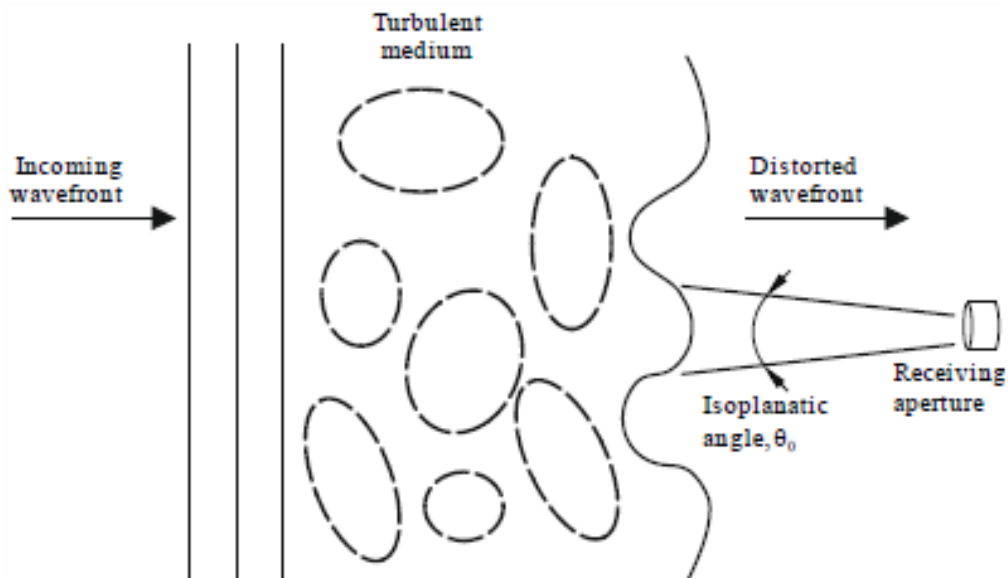
$$r_0 = \frac{1.1654 \times 10^{-8} \lambda^{1.2} \sin^{0.6} \theta}{\left( \int_{h_0}^Z C_n^2(h) dh \right)^{0.6}} \quad (m) \quad (2.24\beta)$$

Όπου  $k(=2\pi/\lambda)$ , ο κυματαριθμός,  $\zeta$ , η γωνία ζενίθ,  $\lambda$ , το μήκος κύματος (m),  $h_0$ , το ύψος του επίγειου σταθμού πάνω από το επίπεδο του εδάφους(m),  $h$ , το ύψος πάνω από το επίπεδο του εδάφους και  $Z$ , το ενεργό ύψος αναταράξεων (τυπικά 20km).

Για συχνότητες κάτω των 30THz (μήκη κύματος μεγαλύτερα από 10 μm) είναι πιθανή περιορισμένη απόδοση για συστήματα ενός δέκτη με διάμετρο μικρότερη από 1m. Το μήκος συνοχής μειώνεται με την αύξηση της ατμόσφαιρας. Στις περισσότερες περιοχές της Γης και σε συχνότητες άνω των 300 THz (μήκη κύματος μικρότερα από 1μm) το μήκος συνοχής είναι της τάξης των 5cm, ωστόσο υπό εξαιρετικές συνθήκες μπορεί να φθάσει και τα 30cm [3].

#### Υπολογισμός ισοπλανητικής γωνίας $\theta_0$

Η ισοπλανητική γωνία  $\theta_0$ , είναι το γωνιακό εύρος πάνω από το οποίο ένα τμήμα του μετώπου κύματος αφού έχει περάσει από τις ατμοσφαιρικές αναταράξεις συσχετίζεται σε ένα συγκεκριμένο βαθμό (τυπικά 1 rad). Η ισοπλανητική γωνία τείνει να λαμβάνει τιμές της τάξης  $10^{-6}$  έως  $10^{-4}$  rad και οι μεγαλύτερες τιμές που λαμβάνει σχετίζονται με υψηλές γωνίες ανύψωσης, χαμηλές συχνότητες και χαμηλές τιμές της παραμέτρου  $C_n^2$ . Η ισοπλανητική γωνία μετά από τις ατμοσφαιρικές αναταράξεις φαίνεται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8: Ισοπλανητική γωνία [3]

Ο υπολογισμός της ισοπλανητικής γωνίας γίνεται από τις σχέσεις (2.25)

$$\theta_0 = \left( 2.914k^2 \sec^{8/3} \zeta \int_{h_0}^Z C_n^2(h)(h-h_0)^{5/3} dh \right)^{-3/5} \quad (rad) \quad (2.25\alpha)$$

Η σχέση (2.25α) είναι ισοδύναμη με τη σχέση (2.25β):



$$\theta_0 = \frac{3.663 \times 10^{-9} \lambda^{1.2} \sin^{1.6} \theta}{\left( \int_{h_0}^Z C_n^2(h) (h-h_0)^{5/3} dh \right)^{0.6}} \quad (rad) \quad (2.25\beta)$$

Οι παράμετροι των σχέσεων (2.25) είναι ίδιες με αυτές των σχέσεων (2.24).

#### Υπολογισμός κρίσιμης χρονικής σταθεράς $\tau_0$

Η κρίσιμη χρονική σταθερά  $\tau_0$ , είναι ο χρόνος αντίδρασης που απαιτείται για τον μετρίασμό των επιπτώσεων των ατμοσφαιρικών αναταράξεων. Η μέθοδος που ακολουθεί μπορεί να υπολογίζει την παράμετρο  $\tau_0$ , για λοξές διαδρομές διάδοσης και γωνίες ανύψωσης υψηλότερες των 45°. Για τον υπολογισμό της παραμέτρου  $\tau_0$  με τη σχέση (2.28) απαιτείται πρώτα αν δεν είναι γνωστά να υπολογιστούν το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου από τη σχέση (2.26) καθώς και οι αναταράξεις που σταθμίζονται από τον άνεμο από τη σχέση (2.27) όπως παρακάτω:

$$v(h) = v_g + 30 \exp^{-\left(\frac{h-12448}{4800}\right)^2} \quad (m/s) \quad (2.26)$$

Όπου  $v_g$ , η ταχύτητα του ανέμου στο σταθμό βάσης (m/s) και  $h$ , το ύψος από το επίπεδο του εδάφους (m). Αν το  $v_g$  δεν είναι γνωστό μπορεί να υποτεθεί η τυπική τιμή 2.3 m/s.

$$v_{5/3} = \int_{h_0}^Z C_n^2(h) (v(h))^{5/3} dh \quad (m^2 / s^{5/3}) \quad (2.27)$$

Όπου  $C_n^2(h)$ , το προφίλ αναταράξεων ( $m^{-2/3}$ ),  $h_0$ , το ύψος του σταθμού βάσης πάνω από το επίπεδο του εδάφους (m) και  $Z$  το ενεργό ύψος αναταράξεων (τυπικά 20km). Τέλος η παράμετρος  $\tau_0$ , δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tau_0 = \frac{2.729 \times 10^{-8} \lambda^{1.2} \sin^{0.6} \theta}{v_{5/3}^{0.6}} \quad (s) \quad (2.28)$$

Όπου  $\lambda$ , το μήκος κύματος ( $\mu m$ ) και  $\theta$ , η γωνία ανύψωσης.

Οι παράμετροι που προαναφέρθηκαν περιγράφουν τα χαρακτηριστικά διάδοσης ωστόσο αξίζει να αναλυθούν και οι επιπτώσεις που προκαλεί στο σήμα η παρουσία ατμοσφαιρικών αναταράξεων καθώς και η ένταση αυτών. Οι

επιπτώσεις που προκαλούνται στο σήμα διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Σπινθηρισμός πλάτους (Amplitude scintillation)
- Αλλαγή γωνίας άφιξης
- Περιπλάνηση δέσμης (Beam wander)
- Εξάπλωση δέσμης (Beam spreading)

Τα φαινόμενα αυτά δεν επιδρούν το ίδιο για τις κατευθύνσεις Γης- διαστήματος και διαστήματος-Γης. Παρακάτω θα αναλυθεί ξεχωριστά κάθε μια από τις προαναφερθείσες κατηγορίες.

#### 2.4.1 Σπινθηρισμός πλάτους (Amplitude scintillation)

Οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις σε συχνότητες μεταξύ 150 THz και 375 THz προκαλούν διακυμάνσεις κατανομής Gauss στην λογαριθμική ακτινοβολία N, ενός εισερχόμενου κύματος με χωρική ανακατανομή της ισχύος σε όλη την επιφάνεια του μετώπου του κύματος τυχαία στο χρόνο [5]. Το φαινόμενο αυτό καλείται σπινθηρισμός πλάτους.

Σύμφωνα με την σύσταση ITU-R P.1622 η ένταση του σπινθηρισμού μπορεί να μετρηθεί σε όρους διακύμανσης του πλάτους της δέσμης. Για τον υπολογισμό μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις (2.29):

$$\sigma_{\ln N}^2 = 2.253k^{7/6} \sec^{11/6} \varphi \int_{h_0}^Z C_n^2(h) h^{5/6} dh \quad (Np^2) \quad (2.29\alpha)$$

Όπου  $h_0$ , το ύψος του σταθμού βάσης από την επιφάνεια του εδάφους(m), Z, το ενεργό ύψος αναταράξεων (τυπικά 20.000 m),  $h$ , το ύψος πάνω από την επιφάνεια του εδάφους (m),  $k$ , ο κυματαριθμός ( $=2\pi/\lambda$ ),  $\lambda$ , το μήκος κύματος (m),  $\varphi$ , η γωνία ζενίθ. Η σχέση (2.29α) είναι ισοδύναμη με τη σχέση (2.29β):

$$\sigma_{\ln N}^2 = \frac{1.924 \times 10^8 \int_{h_0}^Z C_n^2(h) (h - h_0)^{5/6} dh}{\lambda^{7/6} \sin^{11/6} \theta} \quad (Np^2) \quad (2.29\beta)$$

Όπου  $\lambda$ , το μήκος κύματος (μm),  $\theta$ , η γωνία ανύψωσης και ίδιες οι υπόλοιπες παράμετροι. Η σχέσεις (2.29α) και (2.29β) μπορούν να μετατραπούν σε dBN διακύμανσης από τη σχέση (2.29γ):

$$\sigma_{dB\mathcal{N}}^2 = \left( \frac{10}{\ln(10)} \right)^2 \sigma_{\ln\mathcal{N}}^2 \quad (dB^2) \quad (2.29\gamma)$$

### Σπινθηρισμός πλάτους σε διαδρομές στην κατεύθυνση Γη προς διάστημα

Ο σπινθηρισμός πλάτους έχει διαφορετική ένταση στην κατεύθυνση διάδοσης Γη προς διάστημα από ότι στην κατεύθυνση διάστημα προς Γη. Συγκεκριμένα σε διαδρομές προς την κατεύθυνση από Γη προς διάστημα η διακύμανση της λογαριθμικής ακτινοβολίας  $\sigma_{E-s}^2$  παραμένει μικρή. Τυπικά το  $\sigma_{\ln\mathcal{N}}^2$  μειώνεται κατά δύο τάξεις μεγέθους καθώς η συχνότητα αυξάνεται από 24 THz σε 750 THz (12.5μm σε 0.4 μm).

Τόσο κατά την κατεύθυνση Γη προς διάστημα όσο και κατά την κατεύθυνση διάστημα προς Γη σε ένα μέτωπο κύματος συμβαίνει η ίδια ανακατανομή ενέργειας σε όλη την επιφάνεια του. Ωστόσο η περίθλαση του μετώπου κύματος καθώς αυτό διαδίδεται στο διάστημα κατανέμει μεμονωμένες διαταραχές πλάτους και φάσης σε μεγάλες περιοχές. Έτσι η ακτίνα συνοχής της φάσης στην επιφάνεια του δέκτη ενός διαστημικού σκάφους είναι πολύ μεγαλύτερη από το μέγεθος της επιφάνειας του ίδιου του δέκτη (<1m). Συνεπώς δεν προκύπτει λόγος για χρήση παράγοντα εξισορρόπησης διαφράγματος (aperture averaging factor). Συνεπώς ο σπινθηρισμός που εμφανίζεται στο δέκτη δίνεται από τη σχέση (2.30):

$$\sigma_{E-s}^2 = \sigma_{\ln\mathcal{N}}^2 \quad (Np^2) \quad (2.30)$$

Σε συχνότητα 150 THz (2 μm) όταν το  $\sigma_{\ln\mathcal{N}}^2$  είναι περίπου 0.15 προκύπτει 4dB εξασθένιση για 1% του χρόνου με συχνότητα και διάρκεια 150 Hz και  $10^{-5}$  s.

### Σπινθηρισμός πλάτους σε διαδρομές στην κατεύθυνση διάστημα προς Γη

Σε διαδρομές διάδοσης με κατεύθυνση από το διάστημα προς τη Γη η επίδραση του σπινθηρισμού είναι αρκετά σημαντική και μπορεί να προκαλέσει σημαντική αρνητική επίπτωση στην επίδοση του δέκτη.

Όταν ένας δέκτης έχει πεπερασμένο άνοιγμα μεγαλύτερο από το ατμοσφαιρικό μήκος συνοχής  $r_0$ , το οποίο μπορεί να υπολογιστεί από τις σχέσεις (2.24), το φαινόμενο του σπινθηρισμού περιγράφεται από τη μέση λήψη σήματος σε όλη την επιφάνεια του δέκτη το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διακύμανσης  $\sigma_{\ln\mathcal{N}}^2$ .

Ενώ η εξισορρόπηση διαφράγματος (aperture averaging) μετριάζει το φαινόμενο του σπινθηρισμού πλάτους, η παραμόρφωση της φάσης υποβαθμίζει σημαντικά την απόδοση συστημάτων οπτικού δέκτη απλής χωρικής λειτουργίας όπως η σύμφωνη ανίχνευση (coherent detection) ή η προενισχυμένη άμεση ανίχνευση (preamplified direct detection).

Για τους παραπάνω λόγους σε περιπτώσεις διάδοσης με κατεύθυνση διάστημα προς Γη απαιτείται η εισαγωγή του παράγοντα εξισορρόπησης διαφράγματος (aperture averaging factor).

Ο παράγοντας αυτός ορίζεται ως ο λόγος της διακύμανσης της λογαριθμικής ακτινοβολίας που συλλέγεται από ένα δέκτη πεπερασμένου ανοίγματος προς την αντίστοιχη ποσότητα που συλλέγεται από ένα σημειακό δέκτη και δίνεται από τη σχέση (2.31):

$$A = \frac{1}{1 + 1.1 \times 10^7 \left( \frac{D^2 \sin \theta}{z_0 \lambda} \right)^{7/6}} \quad (2.31)$$

Όπου D, η διάμετρος του ανοίγματος του επίγειου δέκτη (m), θ, η γωνία ανύψωσης, λ, το μήκος κύματος (μm) και z<sub>0</sub>, το ύψος της κλίμακας αναταράξεων που υπολογίζεται από τη σχέση (2.32):

$$z_0 = \left[ \frac{\int_{h_0}^Z C_n^2(h) h^2 dh}{\int_{h_0}^Z C_n^2(h) h^{5/6} dh} \right]^{6/7} \quad (m) \quad (2.32)$$

Όπου h<sub>0</sub>, το ύψος του σταθμού βάσης από την επιφάνεια του εδάφους (m), h, το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους (m) και Z, το ενεργό ύψος αναταράξεων πάνω από το επίπεδο του εδάφους (τυπικά 20.000 m).

Τέλος η διακύμανση της λογαριθμικής ακτινοβολίας για διαδρομή με κατεύθυνση από το διάστημα προς τη Γη δίνεται από τη σχέση (2.33):

$$\sigma_{s-E}^2 = A \sigma_{\ln N}^2 \quad (Np^2) \quad (2.33)$$

Πέραν του παραπάνω μοντέλου που περιγράφεται στη σύσταση της ITU-R και άλλα μοντέλα έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την στατιστική περιγραφή του σπινθηρισμού [17], [18] με αξιόλογα αποτελέσματα η αναλυτική παρουσίαση των οποίων ωστόσο ξεφεύγει από το σκοπό του παρόντος.

#### 2.4.2 Αλλαγή γωνίας άφιξης

Η οφειλόμενη σε ατμοσφαιρικές αναταράξεις διακύμανση στην φαινόμενη γωνία άφιξης της λαμβανόμενης δέσμης σήματος οφείλονται στην μεταβολή

των δεικτών διάθλασης στα διάφορα στρώματα αέρα κατά τη διαδρομή διάδοσης.

Οι επιπτώσεις αυτών των διακυμάνσεων κατά την κατεύθυνση Γη προς διάστημα είναι μεν αμελητέες με μικρή rms διακύμανση της γωνίας άφιξης (της τάξεως του 1 μrad) οπότε έχουν μικρή επίπτωση ωστόσο κατά την κατεύθυνση διάστημα προς Γη η διακύμανση είναι της τάξης αρκετών μrad οπότε πρέπει να λαμβάνονται υπόψη [5]. Το φαινόμενο αυτό ωστόσο μπορεί να αντιμετωπιστεί με χρήση προσαρμοστικών οπτικών. Ο υπολογισμός της διακύμανσης της γωνίας άφιξης περιγράφεται στο [19], συστήνεται επίσης από τη σύσταση ITU-R P.1622, έχει εφαρμογή για γωνίες ανύψωσης μεγαλύτερες των 45° και προκύπτει από τη σχέση (2.34):

$$\sigma_{\beta}^2 = \frac{2.914\zeta D_R^{-1/3}}{\sin \theta} \quad (rad^2) \quad (2.34)$$

Όπου  $D_R$ , η διάμετρος του ανοίγματος του δέκτη (m),  $\theta$ , η γωνία ανύψωσης και  $\zeta$ , το ενσωματωμένο προφίλ αναταράξεων το οποίο προκύπτει από τη σχέση (2.35):

$$\zeta = \int_{h_0}^Z C_n^2(h) dh \quad (m^{1/3}) \quad (2.35)$$

Όπου  $h_0$ , το ύψος του σταθμού βάσης από την επιφάνεια του εδάφους (m),  $h$ , το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους (m) και  $Z$ , το ενεργό ύψος αναταράξεων πάνω από το επίπεδο του εδάφους (τυπικά 20.000 m).

Κατά μήκος διαδρομών με κατεύθυνση από το διάστημα προς τη Γη η απόκλιση της δέσμης και η μεγάλη απόσταση διάδοσης στον ελεύθερο χώρο έχει ως αποτέλεσμα το μέτωπο του κύματος να είναι πολύ μεγαλύτερο του μήκους συνοχής  $r_0$  της ατμόσφαιρας κατά τη στιγμή που θα φθάσει τις ατμοσφαιρικές αναταράξεις. Επομένως τα αποτελέσματα της ατμόσφαιρας υπολογίζονται κατά μέσο όρο σε όλο το πλάτος της δέσμης.

#### 2.4.3 Περιπλάνηση δέσμης (Beam wander)

Περιπλάνηση δέσμης είναι η μετατόπιση της δέσμης από την επιδιωκόμενη κατεύθυνση διάδοσης. Η περιπλάνηση δέσμης είναι σημαντική στην κατεύθυνση από Γη προς διάστημα και μπορεί να είναι της τάξεως του πλάτους της δέσμης. Η rms τιμή της μετατόπισης λόγω περιπλάνησης δέσμης περιγράφεται στο [20] καθώς και στη σύσταση ITU-R P.1622 [5] σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται από τις σχέσεις (2.36). Στη σχέση (2.36α) δίνεται η rms

μετατόπιση της δέσμης,  $r_c$ , ενώ με τη σχέση (2.36β) δίνεται η γωνιακή μετατόπιση,  $\omega_c$ , της δέσμης :

$$\sigma_{rc} = 2080 \cdot L \sqrt{\frac{\int_{h_0}^Z C_n^2(h) dh}{D_T^{1/3} \sin(\theta)}} \quad (m) \quad (2.36\alpha)$$

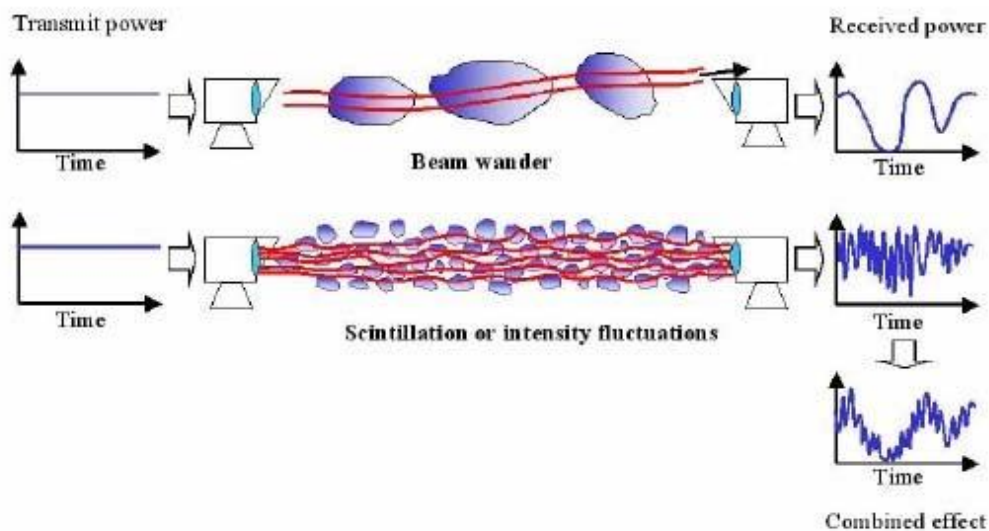
Όπου  $L$ , η απόσταση διάδοσης από τον επίγειο σταθμό έως το διαστημικό δέκτη (km),  $D_T$ , η διάμετρος του ανοίγματος του πομπού (m),  $h_0$ , το ύψος του σταθμού βάσης από την επιφάνεια του εδάφους (m),  $h$ , το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους (m) και  $Z$ , το ενεργό ύψος αναταράξεων πάνω από το επίπεδο του εδάφους (τυπικά 20.000 m).

Αντιστοίχως η rms γωνιακή μετατόπιση προκύπτει από την αφαίρεση του μήκους της διαδρομής διάδοσης από την εξίσωση:

$$\sigma_{\omega c} = \frac{\sigma_{rc}}{L \times 10^3} = 2.08 \sqrt{\frac{\int_{h_0}^Z C_n^2(h) dh}{D_T^{1/3} \sin(\theta)}} \quad (rad) \quad (2.36\beta)$$

Η περιπλάνηση δέσμης στην κατεύθυνση Γη προς διάστημα μπορεί να μετρηθεί με τεχνικές πολλαπλής δέσμης ή με πομπό ελεγχόμενο από συσκευή ανίχνευσης. Στην κατεύθυνση διάστημα προς Γη η ακτίνα διαδίδεται μέσω αναταράξεων μόνο για τα τελευταία 10 με 20 km της διαδρομής οπότε η περιπλάνηση δέσμης δεν είναι σημαντικό πρόβλημα σε αυτή την κατεύθυνση.

Μια συγκεντρωτική απεικόνιση του φαινομένου του σπινθηρισμού και της περιπλάνησης δέσμης δίνεται στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9: Περιπλάνηση δέσμης και σπινθηρισμός λόγω ατμοσφαιρικών αναταράξεων [21]

Γίνεται αντιληπτή η σημαντική επίδραση των δύο φαινομένων στην λαμβανόμενη ισχύ του σήματος και η αναγκαιότητα εφαρμογής τεχνικών μετριασμού αυτών όπως θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 3.

#### 2.4.4 Εξάπλωση δέσμης (Beam spreading)

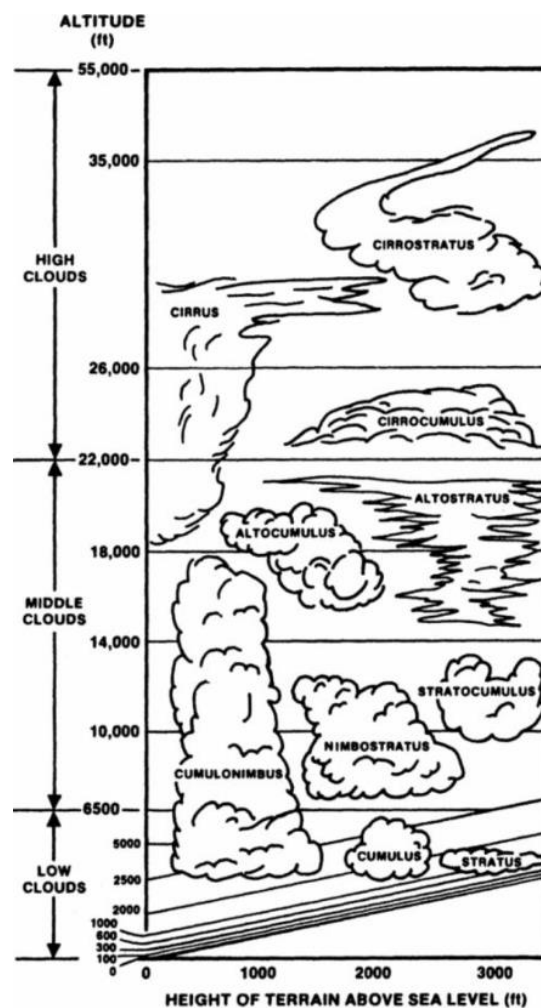
Η εξάπλωση της δέσμης είναι η αύξηση της διαμέτρου της δέσμης ακτινοβολίας πέραν από αυτή που ήδη έχει προκύψει λόγω απόκλισης της δέσμης ως αποτέλεσμα διάδοσης μέσα από ατμοσφαιρικές αναταράξεις. Το αποτέλεσμα της εξάπλωσης της δέσμης είναι μειωμένα επίπεδα ισχύος που φθάνουν στο δέκτη λόγω της εξάπλωσης της ενέργειας σε μεγαλύτερη περιοχή. Το μέγεθος της εξάπλωσης ωστόσο που εισάγεται από την ατμόσφαιρα είναι τυπικά πολύ μικρότερο σε σχέση με την απόκλιση της δέσμης ακτινοβολίας ή αλλιώς της γεωμετρικής απώλειας όπως αυτή περιγράφεται στην ενότητα (2.2) και δεν καθίσταται σημαντική απώλεια σε καμία εκ των δύο κατευθύνσεων (Γη-διάστημα και διάστημα-Γη) [1], [5].

### 2.5 Κάλυψη Νεφών

Αναμφισβήτητα τα νέφη έχουν πολύ σημαντικό ρόλο τόσο ως προς τη θερμική ισορροπία του πλανήτη όσο και ως προς την ομαλή λειτουργία του κύκλου του νερού. Η κάλυψη ωστόσο, από νέφη, της άμεσης οπτικής επαφής μεταξύ ενός πομπού και δέκτη στις τηλεπικοινωνίες προκαλεί απόσβεση στο σήμα που διαδίδεται με δυσμενή επίπτωση.

Τα νέφη αποτελούν τον σημαντικότερο παράγοντα απόσβεσης στις οπτικές επικοινωνίες και γι' αυτό στην ενότητα 2.5 θα γίνει παρουσίαση ενός πρόσφατου αναλυτικού μοντέλου το οποίο φαίνεται να έχει ουσιώδη ακρίβεια και να προσφέρει ουσιώδη αποτελέσματα καθώς και αναφορά στα ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα εκ των οποίων κάποια υιοθετούνται και από την ITU-R.

Τα νέφη διαφέρουν αναλόγως του ύψους σχηματισμού τους, της κάθετης έκτασής τους καθώς και της περιεκτικότητάς τους σε νερό με διαφορετική κάθε φορά επίδραση στην οπτική ζεύξη. Οι τυπικές μορφές των νεφών φαίνονται συγκεντρωτικά στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 10: Τα διάφορα είδη νεφών αναλόγως του ύψους σχηματισμού τους [10]

Συνεπώς αναλόγως του είδους του νέφους μπορεί να προσδιοριστεί και η περιεκτικότητά τους σε υγρό νερό, Integrated Liquid Water Content (ILWC). Ο παράγοντας αυτός αξιοποιείται από πολλά μοντέλα προκειμένου να υπολογιστεί η απόσβεση που εισάγεται.



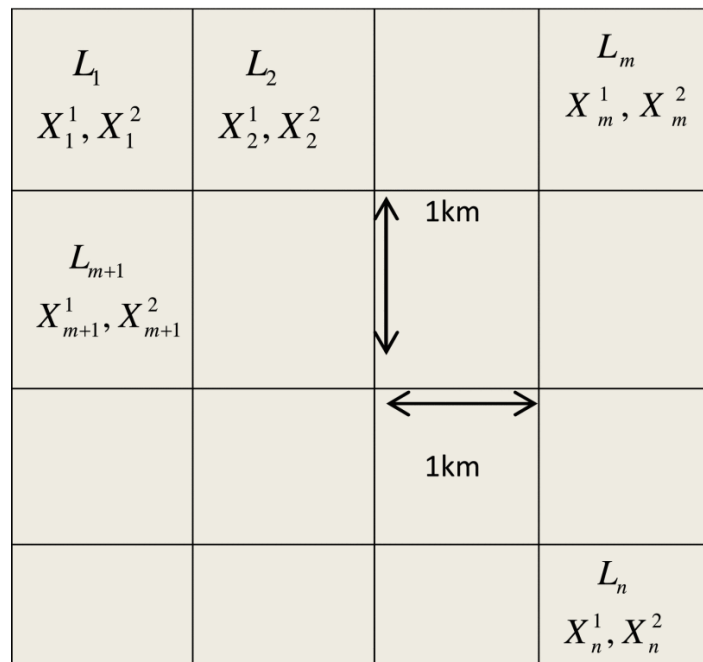
Διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί στη σχετική βιβλιογραφία για τον υπολογισμό της εξασθένισης που εισάγουν τα νέφη σε συχνότητες άνω των 10 GHz. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται είτε σε ημιεμπειρικές μεθόδους είτε σε μαθηματικά μοντέλα και στοχαστικά μοντέλα.

Από τα μοντέλα αυτά προσφάτως προτάθηκε ένα στοχαστικό δυναμικό μοντέλο δημιουργίας χρονοσειρών ILWC που συσχετίζονται τόσο χρονικά όσο και χωρικά με πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα [22], το οποίο θα παρουσιαστεί εν συνεχεία.

Το μοντέλο αξιοποιεί την προηγούμενη γνώση και προτείνει τη χρήση στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων (SDEs) για τη σύνθεση χωρικά συσχετισμένων χρονοσειρών ILWC. Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστούν όλα τα βήματα σύμφωνα με τα οποία το μοντέλο εκτιμά την παράμετρο ILWC με βάση πρότερη γνώση καθώς και την απόσβεση που εισάγεται.

### 2.5.1 Εκτίμηση της περιεκτικότητας των νεφών σε υγρό νερό

Σύμφωνα με το [22] για τη δημιουργία πεδίων ILWC θεωρείται ένας χωρικός χάρτης πλέγματος για κάθε σταθμό βάσης (OGS) διαστάσεων κελιού 1km x 1km σύμφωνα με το [23] όπως φαίνεται στην Εικόνα 11. Κάθε κελί συσχετίζεται με δυο στοχαστικές διαδικασίες Gauss ώστε να υπολογιστεί το ILWC.



Εικόνα 11: Χωρικός χάρτης των ILWC ενός OGS [24]

Ο χάρτης ILWC για κάθε σταθμό βάσης αναπαρίσταται ως  $L_{map,GS} = [L_1, L_2, \dots, L_n]$  όπου  $L_i$  είναι τα επιμέρους ILWC στοιχεία του χάρτη και n, ο απαιτούμενος

αριθμός στοιχείων ώστε όλη η κεκλιμένη διαδρομή διάδοσης να ληφθεί υπόψη τόσο ως προς την χωρική όσο και ως προς τη χρονική της μεταβλητότητα.

Οι υποκείμενες διαδικασίες Gauss  $X_i = [X_i^1, X_i^2]$ , με  $1 \leq i \leq n$  είναι οι  $n$  διαφορετικές στοχαστικές διαδικασίες υποθέτοντας  $n$ -D συνεχή διαδικασία Markov. Λόγω της χωρικής συσχέτισης των νεφών οι χρονοσειρές για κάθε  $X_i^k$  μπορούν να προκύψουν από την επίλυση των ακόλουθων  $n$ -D SDE [25]:

$$dX_i^k = B^k \cdot X_i^k dt + S^k \cdot dW_t \quad , (k=1,2) \quad (2.37)$$

Με ισχυρή λύση [26] τη σχέση (2.38):

$$X_{i,t}^k = e^{t \cdot B^k} \cdot X_0^k + e^{t \cdot B^k} \cdot \int_0^t e^{-s B^k} \cdot S^k \cdot dW_s \quad , (k=1,2) \quad (2.38)$$

Όπου  $B^k = [b_{ij}^k]$ ,  $1 \leq i, j \leq n$  διαγώνιος πίνακας με στοιχεία  $b_{ij}^k = -\beta^k \cdot \delta_{ij}$ ,  $\delta_{ij}$  η συνάρτηση δέλτα του Kronecker και  $\beta^k$  οι δυναμικές παράμετροι της διαδικασίας Gauss του ILWC. Ισχύει ότι  $e^{tB} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{n!} B^n$  και αφού ο πίνακας  $B$  είναι διαγώνιος προκύπτει ότι  $[e^{tB}]_{ij} = e^{-\beta^k t} \delta_{ij}$ . Επίσης  $W(t)$  είναι η  $n$ -D Wiener διαδικασία, με  $W(t) = [W_1(t), \dots, W_n(t)]^T$  και  $W_i(t)$ ,  $1 \leq i \leq n$  οι ανεξάρτητες Wiener διαδικασίες γνωστές και ως Brownian κινήσεις. Η διαδικασία Wiener εισάγεται και για τις δύο μεταβλητές  $X_{i,t}^1, X_{i,t}^2$ .

Ωστόσο για να υπολογιστεί το  $S^k$  που απαιτείται σύμφωνα με το [25] χρειάζεται πρώτα να εκτιμηθεί ο πίνακας συσχέτισης  $C$  ο οποίος περιέχει την πληροφορία σχετικά με τη χωρική συσχέτιση του ILWC. Η συσχέτιση  $\rho_{i,j}$  μεταξύ των  $X_i^k$  και  $X_j^k$  εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σημείων  $i, j$  του πλέγματος η οποία προκύπτει από τη σχέση που προτείνεται στη βάση δεδομένων MODIS [23] και δίνεται στη συνέχεια (προτείνεται για αποστάσεις  $d$ , μικρότερες των 250km):

$$\rho_{i,j} = 0.35e^{-\frac{d}{7.8}} + 0.65e^{-\frac{d}{225.3}} \quad (2.39)$$

Όπου  $d$ , η απόσταση μεταξύ των στοιχείων  $i, j$  (km)

Επομένως ο πίνακας συσχέτισης που θα προκύπτει είναι:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \rho_{1,n} \\ \cdot & 1 & & & \cdot \\ \cdot & & 1 & & \cdot \\ \cdot & & & 1 & \cdot \\ \rho_{n,1} & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Και αν δηλωθεί ότι  $\Lambda^k = 2 \cdot \beta^k \cdot C$  και  $\Lambda^k = S^k \cdot (S^k)^T$  τότε ο πίνακας  $S^k$  προκύπτει από τη αποσύνθεση κατά Cholesky του πίνακα  $\Lambda^k$ . Τελικά οι αρχικές τιμές της διαδικασίας Gauss δίνονται από την σχέση (2.41):

$$X_0^k = [x_{01}^k, x_{02}^k, \dots, x_{0n}^k] \quad (2.41)$$

Άρα για κάθε κελί του πλέγματος η υποκείμενη διαδικασία Gauss δίνεται από το άθροισμα των διαδικασιών Gauss  $X_i = [X_i^1, X_i^2]$  σύμφωνα με τη σχέση (2.42):

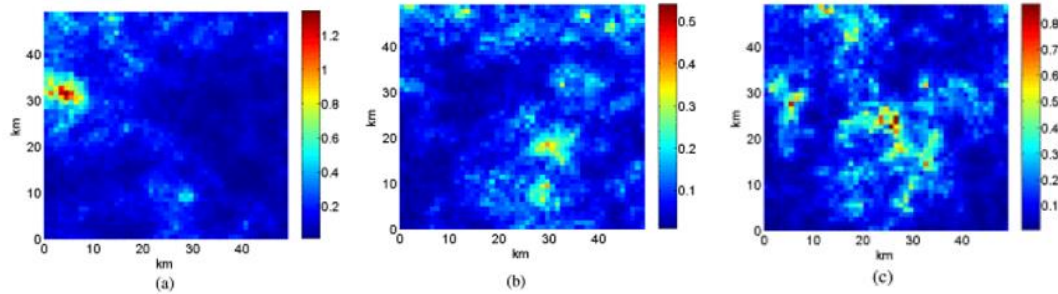
$$G_i(t) = \gamma_1 \cdot X_i^1(t) + \gamma_2 \cdot X_i^2(t) \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (2.42)$$

Οι τιμές των  $\gamma_1, \gamma_2, \beta^1, \beta^2$  μπορούν να ληφθούν από διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα του ILWC ή από μεθόδους που περιγράφονται στα [25], [27]. Τελικά το ILWC για κάθε σημείο δίνεται από τη σχέση (2.43):

$$L_i(t) = \begin{cases} \exp \left[ Q^{-1} \left( \frac{1}{P_{CLW}} Q(G_i(t)) \right) \cdot \sigma + m \right] & G_i(t) \geq a_{th} \\ 0 & G_i(t) \leq a_{th} \end{cases} \quad (2.43)$$

Όπου  $m$  και  $\sigma$ , είναι στατιστικές παράμετροι της ILWC κατανομής και προσδιορίζονται για δεδομένο γεωγραφικό μήκος και πλάτος από την σύσταση P.840 της ITUR [28].  $Q()$  είναι η Gauss Q-συνάρτηση της θεωρίας τηλεπικοινωνιών και  $a_{th}$ , είναι το κατώφλι του συσχετισμένου Gauss θορύβου το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση  $a_{th} = Q^{-1}(P_{CLW})$  και το οποίο λαμβάνεται επίσης από την σύσταση P.840 της ITU-R. Οι δυναμικές παράμετροι της υποκείμενης διαδικασίας Gauss μπορούν να ληφθούν από τη σύσταση P.1853 της ITU-R [29].

Η προσομοίωση της χωρικής και χρονικής συσχέτισης που αναλύθηκε πιο πάνω για μια περιοχή του Βελγίου διαστάσεων 50km x 50km που μελετήθηκε στο [22] δίνεται στην Εικόνα 12 για τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές και αποτυπώνει το ILWC με διακριτική δυνατότητα 1km x 1km.



Εικόνα 12: ILWC συσχετισμένο χωρικά και χρονικά για τις στιγμές α)  $t=t_0$ , β)  $t=t_0+30 \text{ min}$ , γ)  $t=t_0+60 \text{ min}$  [22]

### 2.5.2 Υπολογισμός απόσβεσης που εισάγουν τα νέφη

Στην ενότητα 2.5.1 αναλύθηκε μια μέθοδος υπολογισμού χρονοσειρών ILWC χωρικά και χρονικά συσχετισμένων η οποία δίνει την δυνατότητα ποιοτικής ανάλυσης (Εικόνα 12) του διαύλου για συχνότητες από την Ka ζώνη έως τις οπτικές συχνότητες. Για να είναι ωστόσο πιο ακριβής η ανάλυση απαιτείται η ποσοτική προσέγγιση σε όρους απόσβεσης.

Για το λόγο αυτό σύμφωνα με το [22] ο υπολογισμός της απόσβεσης που εισάγεται γίνεται μέσα από συγκεκριμένα βήματα τα οποία θα παρουσιαστούν στην παρούσα ενότητα. Για να γίνει αυτό θα πρέπει οι χρονοσειρές ILWC που υπολογίστηκαν στην ενότητα 2.5.1 να μετατραπούν σε LWC καθώς και να αξιοποιηθεί η θεωρία της σκέδασης Mie, οι μικροφυσικές ιδιότητες των νεφών, διαθέσιμα δεδομένα από συστάσεις της ITU-R καθώς και η κάθετη έκταση των νεφών.

Αρχικά για την μετατροπή των ILWC χρονοσειρών σε LWC χρονοσειρές οι οποίες λαμβάνουν υπόψη την κάθετη έκταση των νεφών για δεδομένη χρονική στιγμή σε δεδομένο σημείο του πλέγματος στον οριζόντιο άξονα μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο που προτείνεται στο [23]. Έτσι με δεδομένες τις ILWC χρονοσειρές παράγονται οι LWC χρονοσειρές για ύψος  $h$ , πάνω από το επίπεδο της θάλασσας σύμφωνα με τις σχέσεις (2.44), (2.45):

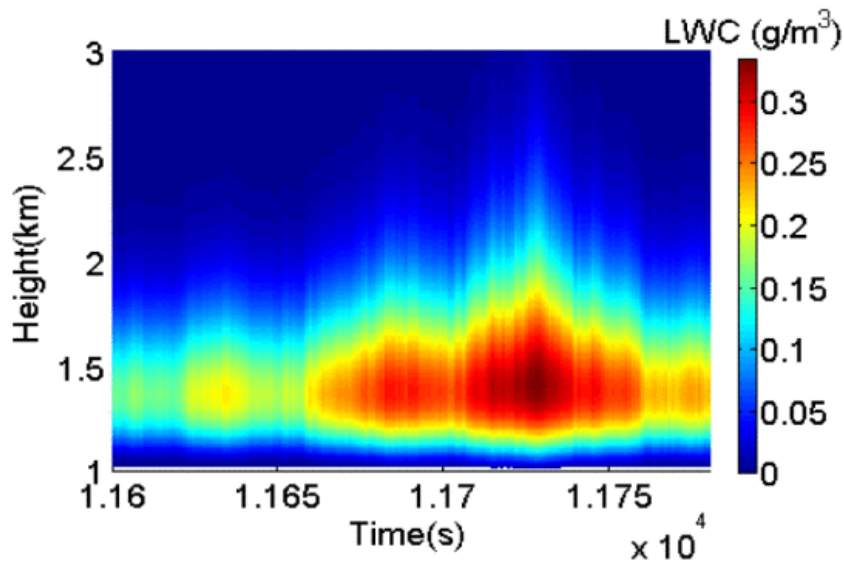
$$\tilde{w}_i(h,t) = \begin{cases} \frac{L_i(t)}{c_i^2(t)^{c_i^1(t)} \Gamma(c_i^1(t))} (h-h_0)^{c_i^1(t)-1} e^{-(h-h_0)/c_i^2(t)} & , h \geq h_0 \\ 0 & , h < h_0 \end{cases} \quad (2.44)$$

$$\begin{aligned}
c_i^1(t) &= 4.27e^{-4.93(L_i(t)+0.06)} + 54.12e^{-61.25(L_i(t)+0.06)} + 1.71 \\
c_i^2(t) &= 3.17c_i^1(t)^{-3.04} + 0.074
\end{aligned}
\tag{2.45}$$

Όπου  $\tilde{w}_i(h,t)$ , είναι η εξαρτώμενη από το κάθετο ύψος περιεκτικότητα σε υγρό νερό ( $\text{g/m}^3$ ),  $h$ , το κάθετο ύψος του νέφους (km),  $h_0$ , το ύψος βάσης του νέφους,  $L$ , το ILWC που υπολογίστηκε στην ενότητα 2.5.1 (mm),  $\Gamma(\cdot)$ , η συνάρτηση Γάμα και  $c_i^1(t)$ ,  $c_i^2(t)$  οι παράμετροι που καθορίζουν το σχήμα του  $\tilde{w}_i(h,t)$ . Με αυτό τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί το  $\tilde{w}_i(h,t)$  όχι μόνο για διαφορετικά κελιά αλλά και για διαφορετικά υψόμετρα και χρονικές στιγμές. Επιπλέον για να υπολογιστεί η κάθετη έκταση του νέφους απαιτείται το ύψος βάσης ( $h_0$ ) καθώς και το μέγιστο ύψος ( $h_{th}$ ). Το μέγιστο ύψος υπολογίζεται από τη σχέση (2.44) έχοντας ως δεδομένο [23] ότι  $\tilde{w}(h,t) \rightarrow 0$  για  $\tilde{w}_i(h,t) \leq 0.06 \cdot L_i(t)$  και το  $h_0$  λαμβάνεται από τη γενικευμένη ακραία τιμή PDF σύμφωνα με τη σχέση (2.46) η οποία προκύπτει από δεδομένα του CloudSat:

$$p(h_0) = \frac{1}{\sigma} t(h_0)^{\xi+1} e^{-t(h_0)t(x)} = \begin{cases} \left[ 1 + \left( \frac{x-\mu}{s} \right)^\xi \right]^{-\frac{1}{\xi}}, & , \xi \neq 0 \\ e^{-(x-\mu)/s}, & , \xi = 0 \end{cases}
\tag{2.46}$$

Όπου  $\xi=0.484$ ,  $s=0.582$  και  $\mu=0.987$ . Συνεπώς η κάθετη έκταση του νέφους  $dh = h_{th} - h_0$  μπορεί να υπολογιστεί. Η προσομοίωση για το LWC που προέκυψε από την παραπάνω μεθοδολογία και η οποία μελετήθηκε στο [22] αναπαρίσταται στην Εικόνα 13 για μια περιοχή του Μιλάνο της Ιταλίας:



Εικόνα 13: Χρονοσειρά LWC κάθετης έκτασης νεφών [22]

Η απόσβεση που προκαλείται από σωματίδια υγρού νερού των νεφών για συγκεκριμένο μήκος κύματος  $\lambda$ , δίνεται από τη σχέση (2.47):

$$A(\lambda) = \int_{l_0}^{l_{\max}} \beta_{ext}(\lambda) dl \quad (dB) \quad (2.47)$$

Όπου  $\beta_{ext}(\lambda)$ , ο συντελεστής απόσβεσης όγκου,  $A(\lambda)$ , είναι η απόσβεση που εισάγεται από το νέφος κατά την κεκλιμένη διαδρομή και  $l_0, l_{\max}$ , είναι τα άνω και κάτω όρια αντίστοιχα της κεκλιμένης διαδρομής που βρίσκεται εντός του νέφους. Ο συντελεστής απόσβεσης όγκου ή αλλιώς η ειδική απόσβεση δίνεται από τη σχέση (2.48):

$$\beta_{ext}(\lambda) = 4.343 \times 10^3 \int_0^{\infty} \sigma_{ext}(r, \lambda) n(r) dr \quad (dB / km) \quad (2.48)$$

Όπου  $\sigma_{ext}(r, \lambda)$ , ο συντελεστής διασταύρωσης απόσβεσης (extinction cross coefficient) ( $\mu m^2$ ) ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί είτε από τη θεωρία της σκέδασης Mie [30], [31] είτε από αντίστοιχα λογισμικά [32].

Η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων (PSD), εξαρτάται από το είδος των νεφών. Τα είδη αυτά που οπτικά φαίνονται στην Εικόνα 10 μπορούν να καταταχθούν σε τέσσερις κύριες κατηγορίες που φαίνονται στον Πίνακα 7 σύμφωνα με το [33]:

Πίνακας 7: Είδη νεφών καθώς και η κατακόρυφη έκτασή τους [22]

Είδος νέφους	Μέση κατακόρυφη έκταση (km)
Cumulonimbus	>2.5
Cumulus	2.5
Nimbostratus	1.4
Stratus	0.7

Για τον υπολογισμό της κάθετης έκτασης των νεφών αξιοποιείται η μέθοδος που αναλύθηκε στην παρούσα ενότητα όπου προκύπτουν οι χρονοσειρές LWC από τις αντίστοιχες ILWC.

Ως μοντέλο για την κατανομή του μεγέθους σωματιδίων χρησιμοποιείται η τροποποιημένη συνάρτηση Γάμα τεσσάρων παραμέτρων [33] η οποία χρησιμοποιείται ευρέως και δίνεται από τη σχέση (2.49):

$$n(r) = g \cdot r^{\alpha} \cdot \exp(-b \cdot r^{\gamma}) \quad (2.49)$$

Και αφού η κάθετη έκταση των νεφών έχει υπολογιστεί, το είδος του νέφους προκύπτει από τον Πίνακα 7. Έτσι γνωρίζοντας το είδος του νέφους οι παράμετροι  $\alpha, b, \gamma$ , προσδιορίζονται από τον Πίνακα 8:

Πίνακας 8: Οι παράμετροι της κατανομής μεγέθους σωματιδίων των σταγονιδίων των νεφών [22]

Είδος νέφους	$\alpha$	$b$	$\gamma$
Cumulonimbus	3	0.5	1
Cumulus	3	0.5	1
Nimbostratus	2	0.425	1
Stratus	2	0.6	1

Έπειτα η σχέση (2.50) συσχετίζει την παράμετρο  $w$  του LWC, με την κατανομή μεγέθους σωματιδίων  $n(r)$  σύμφωνα με το [33]:

$$w = \frac{4}{3} \pi \rho_w \int_{r_1}^{r_2} r^3 n(r) dr = \frac{4}{3} \pi \rho_w \frac{g}{\gamma} \frac{\Gamma((\alpha+4)/\gamma)}{b^{(\alpha+4)/\gamma}} \quad (2.50)$$

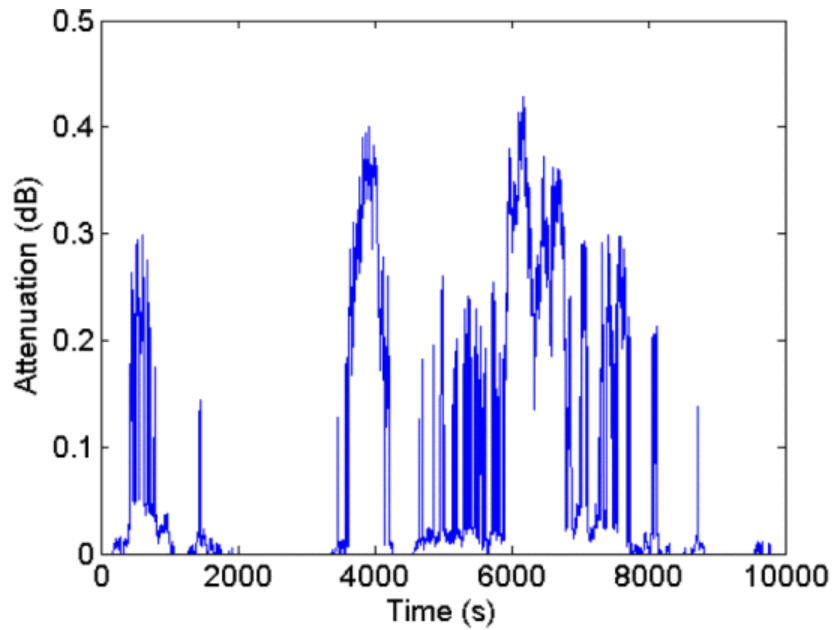
Όπου,  $\rho_w$ , η πυκνότητα νερού ( $g/cm^3$ ) και  $g, \alpha, b, \gamma$  είναι οι παράμετροι της PSD. Από τις σχέσεις (2.44) και (2.50) υπολογίζεται η παράμετρος  $g$  της PSD συναρτήσει του ύψους και του χρόνου για κάθε σημείο  $i$ , σύμφωνα με τη σχέση (2.51):

$$g_i(h, t) = \frac{3 \cdot \gamma \cdot b^{(\alpha+4)/\gamma} \cdot \tilde{w}_i(h, t)}{4 \cdot \pi \cdot \rho_w \cdot \Gamma((\alpha+4)/\gamma)} \quad (2.51)$$

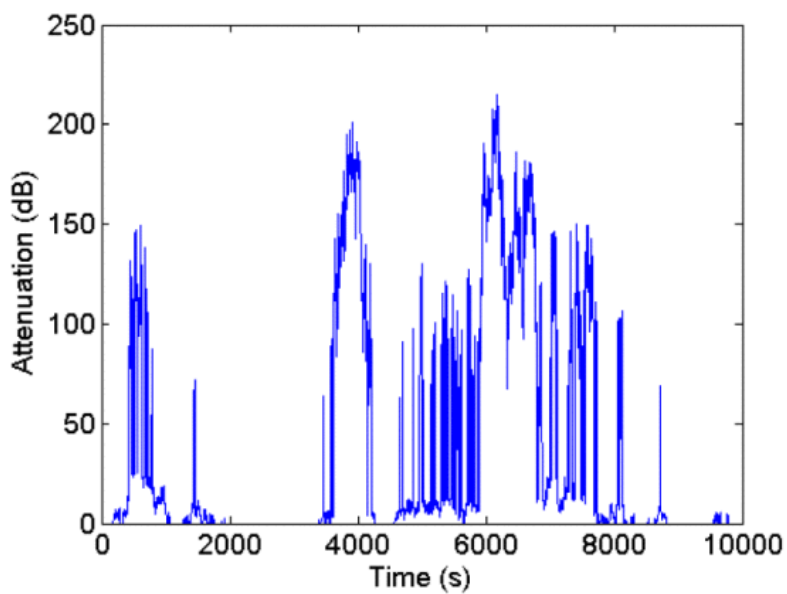
Πλέον η PSD υπολογίζεται συναρτήσει και του ύψους του νέφους δηλαδή είναι πλέον  $n(r, h)$  και συνεπώς το ίδιο συμβαίνει και για τον συντελεστή απόσβεσης όγκου. Τελικά από τις σχέσεις (2.47) και (2.48) προκύπτει εφόσον όλοι οι παράμετροι έχουν προσδιοριστεί ότι η χρονοσειρά της απόσβεσης λόγω νεφών για δεδομένη κεκλιμένη διαδρομή διάδοσης και δεδομένο ύψος νέφους δίνεται από τη σχέση (2.52):

$$A(t, \lambda) = \int_{l_0}^{l_{\max}} 4.343 \times 10^3 \int_0^{\infty} \sigma_{\text{ext}}(r, \lambda) n(r, h) dr dl \quad (\text{dB}) \quad (2.52)$$

Αξίζει να φανεί επίσης η διαφορά στη επίπτωση που έχουν τα νέφη στις RF συχνότητες σε σχέση με τις οπτικές συχνότητες βάση προσομοίωσης που έγινε στο [22] για την περιοχή του Μιλάνο της Ιταλίας με γωνία ανύψωσης  $40^\circ$  στην 1<sup>η</sup> περίπτωση για συχνότητα 40 GHz (Εικόνα 14) και στη δε δεύτερη για μήκος κύματος 1550 nm (Εικόνα 15).



Εικόνα 14: Χρονοσειρά Απόσβεσης λόγω νεφών για συχνότητα 40 GHz[22]



Εικόνα 15: Χρονοσειρά Απόσβεσης λόγω νεφών στα 1550 nm[22]



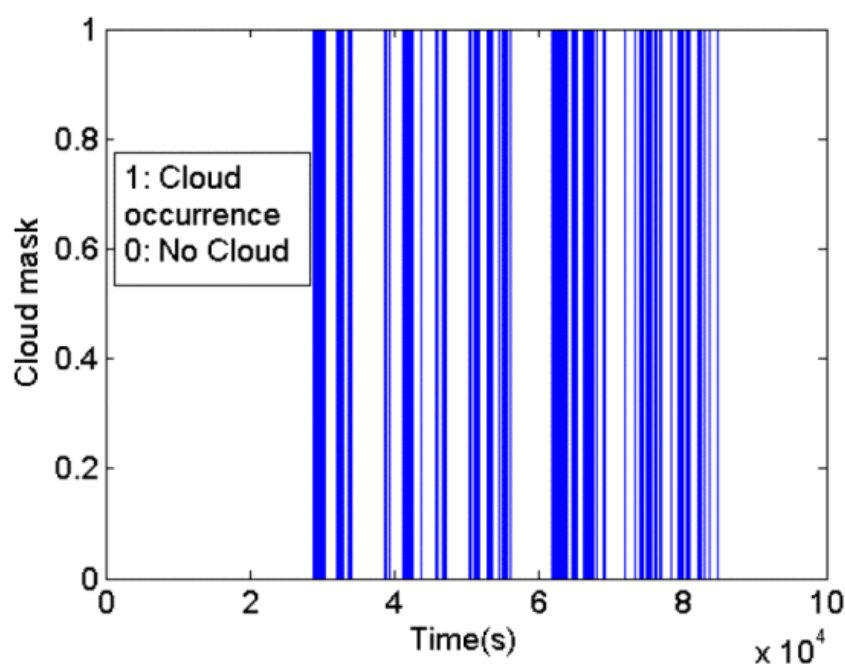
Γίνεται αντιληπτή ότι η διαφορά για την ίδια περιοχή είναι σημαντική και οφείλεται στην διαφορετική επίδραση των νεφών στην ζώνη των RF συχνοτήτων και των οπτικών συχνοτήτων.

### 2.5.3 Περαιτέρω μελέτη νεφών

Όπως έγινε αντιληπτό από την έως τώρα ανάλυση η κάλυψη, της απευθείας διαδρομής διάδοσης (LOS), από νέφη για συστήματα που λειτουργούν στις οπτικές συχνότητες έχει σημαντικό αντίκτυπο. Μελετήθηκε η απόσβεση που εισάγεται από τα νέφη και στην παρούσα ενότητα θα γίνει μια αναφορά στις περαιτέρω δυνατότητες που μπορούν να αξιοποιηθούν καθώς και άλλα πρόσφατα μοντέλα.

Η απόσβεση που εισάγεται είναι αρκετά μεγάλη στις οπτικές συχνότητες ώστε να μπορεί να θεωρηθεί η παρουσία νέφους στην LOS ως ένας διακόπτης On/Off, όπου όταν δεν υπάρχει νέφος (CFLOS-Cloud Free Line of Sight) το σύστημα λειτουργεί ενώ όταν υπάρχει νέφος το σύστημα δεν λειτουργεί.

Στα [22], [24] παρουσιάζεται η δυνατότητα υπολογισμού της πιθανότητας υπέρβασης με βάση την ανάλυση των ενοτήτων 2.5.1 και 2.5.2 και τα αποτελέσματα επαληθεύονται με βάση άλλα ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα. Επιπλέον δημιουργείται μια μάσκα ανοικτού/κλειστού διακόπτη για τον υπολογισμό της πιθανότητας CFLOS όπου και δημιουργούνται χρονοσειρές με παράθυρα εκπομπής και σιγής. Ενδεικτικά στην Εικόνα 16 φαίνεται η προσέγγιση αυτή για την περιοχή της Νεμέας και γωνία ανύψωσης  $46^\circ$ .



Εικόνα 16: Παράθυρα εκπομπής οπτικού σταθμού στη Νεμέα [22]

Για να είναι αποτελεσματικό φυσικά ένα σύστημα στις οπτικές συχνότητες απαιτούνται τεχνικές διαφορισμού οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3. Η ανάλυση για τον υπολογισμό της πιθανότητας ύπαρξης ή όχι νέφους στην LOS που γίνεται στο [22] και αφορά έναν μεμονωμένο σταθμό βάσης επεκτείνεται στο [24] για πολλαπλούς σταθμούς βάσης. Συνεπώς μπορεί αρχικά να υπολογιστεί η πιθανότητα CFLOS για κάθε μεμονωμένο σταθμό ή πιθανή θέση σταθμού για διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές και εν συνεχεία να υπολογιστεί ο απαιτούμενος αριθμός σταθμών ώστε να καλυφθεί το επιθυμητό ποσοστό διαθεσιμότητας. Ένα παράδειγμα του ανωτέρω φαίνεται στις Εικόνα 17 και Εικόνα 18 για περιοχές της Ελλάδας που μελετήθηκαν στο [24].

Area (lat. °N, long. °E)	Elev. Angle (deg)	Altitude (m)	$P_{CFLOS}$ (%)
Athens (37.98, 23.78)	43.19	300	69.2
Kea (37.613, 24.3198)	46.39	250	72.3
Taygetos (36.95, 22.35)	47.12	1700	71.38
Korinthos (37.94, 22.9)	46.15	350	68.2
City of Rhodes (36.4, 28.2)	47.47	200	82.0
Larissa (39.64, 22.42)	44.1	300	63.8
City of Limnos(39.92, 25.14)	43.78	320	67.4
Lefkada (38.66, 20.63)	45.1	330	67.5
Psiloritis Crete (35.23, 24.77)	49.0	1900	79.2
Skopelos (39.11, 23.71)	44.72	250	68.4

Εικόνα 17: Πιθανότητα μη ύπαρξης νεφών στην LOS για 10 σταθμούς στην Ελλάδα[24]

Area (lat. °N, long. °E)	Elev. Angle (deg)	Altitude (m)	$P_{CFLOS}^{joint}$ (%)
City of Rhodes (36.4, 28.2)	47.47	200	82.0
Psiloritis Crete (35.23, 24.77)	49	1900	95.12
Lefkada (38.66, 20.63)	45.1	330	98.21
City of Limnos(39.92, 25.14)	43.78	320	99.22
Taygetos (36.95, 22.35)	47.12	1700	99.61
Kea (37.613, 24.3198)	46.39	250	99.76
Larissa (39.64, 22.417)	44.1	300	99.87

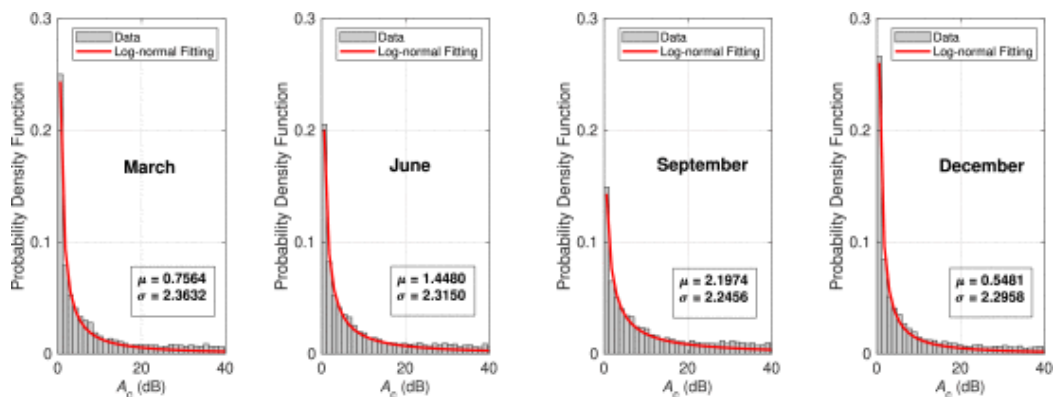
Εικόνα 18: Συλλογική Πιθανότητα μη ύπαρξης νεφών[24]

Στην Εικόνα 17 φαίνεται η πιθανότητα μη ύπαρξης νεφών για ένα μεμονωμένο οπτικό σταθμό βάσης (OGS) ενώ στην Εικόνα 18 φαίνεται η πιθανότητα μη ύπαρξης νεφών τουλάχιστον σε κάποιον από τους σταθμούς. Ειδικότερα

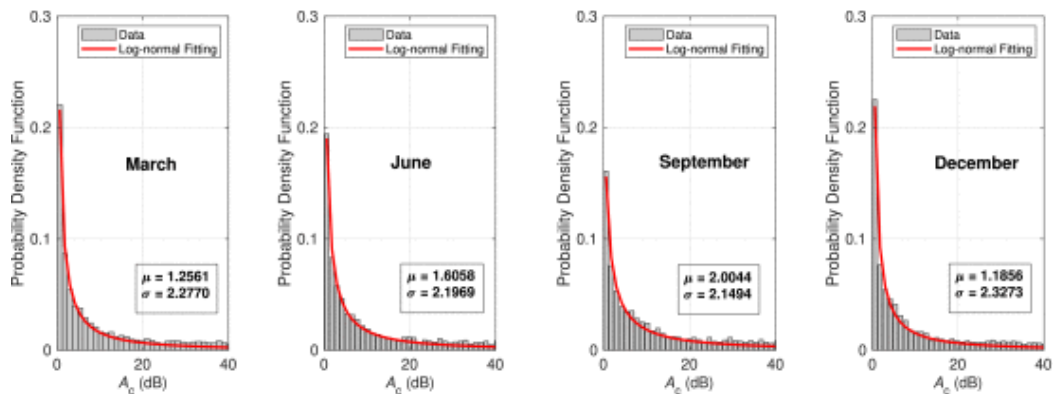
ξεκινώντας από την 1<sup>η</sup> γραμμή είναι η πιθανότητα CFLOS στην πόλη της Ρόδου, στην 2<sup>η</sup> γραμμή η πιθανότητα CFLOS τουλάχιστον σε μια εκ των πόλη της Ρόδου και του Ψηλορείτη στην Κρήτη κλπ.

Άμεσο όφελος χρήσης άνω του ενός σταθμού βάσης είναι η αύξηση της πιθανότητας CFLOS και συνεπώς και της πιθανότητας διαθεσιμότητας. Το αρνητικό είναι η αύξηση παράλληλα και του κόστους καθώς απαιτείται επιπλέον σταθμός βάσης. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης που παρέχεται ωστόσο από τις οπτικές συχνότητες είναι πολύ μεγαλύτερο από τις αντίστοιχες RF.

Τέλος παρόμοια με τον υπολογισμό της απόσβεσης που εισάγεται από την ομίχλη όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2.3.2 οι ερευνητές στο [34] παρουσίασαν ένα νέο μοντέλο μηνιαίων στατιστικών όπου εκτιμάται η ορατότητα και εν συνεχεία υπολογίζεται η συνολική εξασθένηση λόγω Mie σκέδασης του νέφους βάση της ορατότητας. Η λογαριθμική-κανονική κατανομή φαίνεται να περιγράφει καλύτερα την PDF της μηνιαία στατιστικής απόσβεσης. Στις Εικόνα 19, Εικόνα 20, Εικόνα 21 φαίνεται το ταίριασμα της κατανομής με ιστορικά δεδομένα 5 ετών για δύο διαφορετικές περιοχές της Ιαπωνίας, το Τόκυο και τη Σεντάι.



Εικόνα 19: Στατιστική κατανομή απόσβεσης νεφών ανά μήνα βάση στοιχείων 5 ετών στο Τόκυο [34]



Εικόνα 20: Στατιστική κατανομή απόσβεσης νεφών ανά μήνα βάση στοιχείων 5 ετών στη Σεντάι [34]

Month	Location	$\mu$	$\sigma$
January	Tokyo	0.1333	2.1557
	Sendai	0.9040	2.2915
February	Tokyo	0.3223	2.2815
	Sendai	1.1814	2.3402
March	Tokyo	0.7564	2.3632
	Sendai	1.2561	2.2770
April	Tokyo	0.8486	2.3815
	Sendai	0.4611	2.2815
May	Tokyo	0.8735	2.2925
	Sendai	0.5878	2.2805
June	Tokyo	1.4480	2.3150
	Sendai	1.6058	2.1969
July	Tokyo	1.8435	2.2659
	Sendai	2.0501	2.3458
August	Tokyo	1.7660	2.2143
	Sendai	1.6965	2.2472
September	Tokyo	2.1974	2.2456
	Sendai	2.0044	2.1494
October	Tokyo	1.6028	2.3144
	Sendai	1.6458	2.2490
November	Tokyo	1.2506	2.4034
	Sendai	1.7852	2.3474
December	Tokyo	0.5481	2.2958
	Sendai	1.1856	2.3273
Full Period	Tokyo	1.0454	2.3755
	Sendai	1.3153	2.3325

Εικόνα 21: Στατιστικά αποτελέσματα μοντέλου [34]

Βάση των παραμέτρων της λογαριθμικής-κανονικής κατανομής για αρκετά μεγάλο διάστημα ιστορικών δεδομένων προκύπτει η πρόβλεψη για μελλοντικές συνθήκες. Πλεονεκτήματα αυτού του μοντέλου είναι η απλότητα των σχέσεων και περιγραφή του διαύλου ανά μήνα.

Καθώς η εποχή σχετίζεται άμεσα με την πιθανότητα εμφάνιση νεφών οι μηνιαίες τιμές των παραμέτρων της λογαριθμικής-κανονικής κατανομής προσφέρει μια καλή εικόνα των αναμενόμενων επιπέδων απόσβεσης που εισάγονται στη ζεύξη καθώς και των αντίστοιχων πιθανοτήτων τους.

Τα μοντέλα που αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.5.3 δεν αναλύονται επιμέρους καθώς σκοπός είναι να παρουσιαστούν επιπρόσθετες δυνατότητες καθώς και εναλλακτικοί τρόποι στους οποίους οι ερευνητές κατέληξαν για τη μελέτη της παρουσίας νεφών. Εν γέννη τα πιο αναλυτικά μοντέλα φαίνεται να είναι πιο ακριβή αλλά και πιο πολύπλοκα. Αντιθέτως τα πιο απλά μοντέλα φαίνεται να είναι πιο εύχρηστα για μια προσέγγιση αλλά όχι τόσο ακριβή ως προς τους υπολογισμούς.

Συμπερασματικά τα διαθέσιμα μοντέλα που έχουν ήδη αναπτυχθεί είναι πολύ περισσότερα από αυτά που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 και κάθε ένα έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η παρουσίαση όλων των μοντέλων ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας και γι' αυτό επιλέχθηκαν να αναλυθούν μοντέλα είτε ευρέως χρησιμοποιούμενα είτε νέα μοντέλα που φαίνεται να προσφέρουν ενθαρρυντικά αποτελέσματα.



## Κεφάλαιο 3: Τεχνικές Άμβλυσης Διαλείψεων – Διαφορισμός Θέσης

Στο Κεφάλαιο 2 μελετήθηκαν οι παράγοντες εκείνοι που εισάγουν απόσβεση στις οπτικές επικοινωνίες λόγω της ύπαρξης της γήινης ατμόσφαιρας και έγινε προσπάθεια αναλυτικής προσέγγισης μέσα από μαθηματικούς τύπους ώστε να γίνει αντιληπτός και ο βαθμός κατά τον οποίο κάθε παράγοντας συνεισφέρει.

Στο Κεφάλαιο 3 σκοπός είναι η παρουσίαση όλων εκείνων των τεχνικών που μετριάζουν την απόσβεση και προσφέρουν ευρωστία στο σύστημα. Για ένα σύστημα τηλεπικοινωνιών σημαντική είναι η εξασφάλιση συγκεκριμένης ποιότητας υπηρεσιών (QoS - Quality of Service). Για τον σχεδιαστή ενός συστήματος επίσης σημαντικό είναι το κόστος το οποίο απαιτείται για την εφαρμογή της κάθε τεχνικής και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Το QoS στην επικοινωνία FSO βασίζεται στους παράγοντες: ρυθμός δεδομένων, καθυστέρηση, διακύμανση καθυστέρησης (jitter), την απώλεια δεδομένων, την κατανάλωση ενέργειας, την αξιοπιστία και την διαθεσιμότητα.

Η μεταφορά δεδομένων από έναν κόμβο σε έναν άλλο στα συστήματα επικοινωνίας FSO θα πρέπει να πληροί τις δεδομένες απαιτήσεις QoS, διαφορετικά οι προσφερόμενες υπηρεσίες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους τελικούς χρήστες με ικανοποιητικό τρόπο. Για αυτό, η κύρια πρόκληση στο δίκτυο FSO είναι η βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος επικοινωνίας.

Οι τεχνικές άμβλυσης των διαλείψεων αυξάνονται όσο προχωρά η τεχνολογία και διαρκώς προκύπτουν νέοι τρόποι. Στην ανάλυση που ακολουθεί καταγράφονται οι κυριότερες κατηγορίες τεχνικών άμβλυσης των διαλείψεων και αναφέρονται υπάρχουσες μελέτες με αξιόλογα αποτελέσματα.

### 3.1 Εξισορρόπηση Διαφράγματος (Aperture Averaging)

Η τεχνική αυτή σκοπό έχει το μετριασμό των ατμοσφαιρικών αναταράξεων που μελετήθηκαν στην ενότητα 2.4 αυξάνοντας το μέγεθος του διαφράγματος του δέκτη. Σκοπός είναι η εξισορρόπηση των σχετικά γρήγορων διακυμάνσεων που οφείλονται σε δίνες μικρού μεγέθους. Η παράμετρος που ποσοτικοποιεί τη μείωση της απόσβεσης καλείται παράγοντας εξισορρόπησης διαφράγματος,  $A$ . Ο παράγοντας  $A$ , ορίζεται ως ο λόγος της διακύμανσης της λογαριθμικής ακτινοβολίας που συλλέγεται από ένα δέκτη πεπερασμένου ανοίγματος προς την αντίστοιχη ποσότητα που συλλέγεται από ένα σημειακό δέκτη και δίνεται εν γένη από τη σχέση (3.1):

$$A = \frac{\sigma_I^2(D_R)}{\sigma_I^2(0)} \quad (3.1)$$

Συγκεκριμένα για οπτικές επικοινωνίες με κατεύθυνση διάστημα-Γη η σχέση (3.1) καταλήγει στη σχέση (2.31) που μελετήθηκε στην ενότητα 2.4.1.

Από τη σχέση (2.31) γίνεται αντιληπτό ότι η αύξηση της διαμέτρου του διαφράγματος μειώνει τον ατμοσφαιρικό σπινθηρισμό και συνεπώς βελτιώνει την απόδοση του συστήματος. Η τεχνική αυτή δεν είναι διαθέσιμη στην ανερχόμενη ζεύξη (Γη-διάστημα) καθώς η ακτίνα συνοχής είναι πολύ μεγαλύτερη του διαφράγματος του δέκτη στον δορυφόρο.

Η αύξηση του διαφράγματος προκαλεί αύξηση και του θορύβου περιβάλλοντος που συλλέγεται από τον δέκτη. Επομένως η βέλτιστη επιλογή διαμέτρου είναι αυτή που θα εξασφαλίσει και την βέλτιστη συλλογή ισχύος από τον δέκτη.

Πληθώρα μελετών έχουν πραγματοποιηθεί για τη χρήση της τεχνικής εξισορρόπησης διαφράγματος. Συγκεκριμένα, στο [35] μελετάται η χρησιμότητα του παράγοντα εξισορρόπησης διαφράγματος για επίγειες και δορυφορικές οπτικές ζεύξεις σε συνδυασμό με διάφορα σχήματα διαμόρφωσης. Η μελέτη βασίζεται στην αξιολόγηση του BER. Τα σχήματα που μελετήθηκαν είναι: διαμόρφωση θέσης παλμού (M-PPM), διαφορική PPM (M-DPPM), διαμόρφωση πλάτους και θέσης παλμού ( $L_A \times L_P$ -PAPM) και το διαφορικό πλάτος PPM ( $L_A \times L_P$ -DAPPM), όπου  $L_A \times L_P = M$  [1,2,18] καθώς και η διαμόρφωση ΟΟΚ.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν δείχνουν ότι η επίδραση της εξισορρόπησης διαφράγματος είναι διαφορετική για διάφορα σχήματα διαμόρφωσης και μάλιστα είναι πιο αποτελεσματική κατά τη σειρά στο: 8-PPM, 8-DPPM, 2 x 4-PAPM, ΟΟΚ, 2 x 4-DAPPM τόσο για επίπεδα όσο και σφαιρικά κύματα. Στο [35] παρέχονται επίσης αναλυτικές σχέσεις όπου ο υπολογισμός μπορεί εύκολα να γίνει για διαφορετικές, από τις ανωτέρω, τιμές M.

Τα ανωτέρω σχήματα διαμόρφωσης επιπλέον έχουν διαφορετική επίδραση ως προς το BER σε συνθήκες χαμηλού και υψηλού στροβιλισμού αλλά και διαφορετικό ωφέλιμο ρυθμό μετάδοσης. Η αύξηση της διαθεσιμότητας προκύπτει μέσω βέλτιστης επιλογής διαθεσιμότητας βάση των συνθηκών που επικρατούν στον δίαυλο.

### 3.2 Τεχνικές Διαφορισμού

Οι τεχνικές διαφορισμού που σκοπό έχουν τον μετριασμό των διαλείψεων που εισάγονται από την παρουσία της ατμόσφαιρας αφορά την εκπομπή ή λήψη του σήματος πληροφορίας μέσω διαφορετικών και ανεξάρτητων καναλιών. Διακρίνονται σε διαφορισμό:

- Χώρου
- Χρόνου
- Συχνότητας

Ως προς το Χωρικό Διαφορισμό απαιτούνται πολλές κεραιές απέχουσες αρκετά μεταξύ τους ώστε να ελαχιστοποιείται η επίδραση της συσχέτισης. Ο Χρονικός



Διαφορισμός αφορά την μετάδοση του ίδιου σήματος σε διαφορετικές χρονικές στιγμές με μεταξύ τους χρονική απόσταση μεγαλύτερη του χρόνου συνοχής του καναλιού. Ο Διαφορισμός Συχνότητας αφορά μετάδοση του ίδιου σήματος σε διαφορετικές συχνότητες με συχνοτική απόσταση μεταξύ των φερόντων τους μεγαλύτερη από το εύρος συνοχής του καναλιού.

Κοινό όλων είναι ότι τα αντίγραφα πρέπει να είναι αμοιβαία ασυσχέτιστα ώστε να βελτιωθεί η διαθεσιμότητα των ζεύξεων και η απόδοση του συστήματος. Το κέρδος διαφορισμού είναι μεγαλύτερο σε υψηλό επίπεδο ατμοσφαιρικών αναταράξεων παρά σε χαμηλό [36].

Σε περίπτωση διαφορισμού λήψης (SIMO) τα σήματα μπορούν να συνδυαστούν χρησιμοποιώντας συνδυασμό επιλογής (SC), συνδυασμό ίσου κέρδους (EGC) ή συνδυασμό μεγίστου λόγου (MRC). Το SC είναι πιο απλό αλλά προσφέρει και το χαμηλότερο κέρδος από τα άλλα δύο. Το MRC προσφέρει ελαφρώς υψηλότερο κέρδος από το EGC εις βάρος όμως πολυπλοκότητας και κόστους. Για το λόγο αυτό συνήθως το EGC προτιμάται έναντι του MRC [37]. Όσον αφορά την κατερχόμενη ζεύξη (κατεύθυνση διάστημα-Γη) η εκτόξευση και διατήρηση πολλών δορυφόρων στο διάστημα γίνεται πολύ πιο δαπανηρή σε σύγκριση με τους επίγειους σταθμούς.

Για τον διαφορισμό εκπομπής (MISO) αξιοποιούνται χωροχρονικοί κώδικες όπως ο οπτικός κώδικας Alamouti [38] ο οποίος έχει σχεδιαστεί για δύο κεραίες εκπομπής αλλά μπορεί να επεκταθεί και για περισσότερες [1].

Ο συνδυασμός διαφορισμού εκπομπής και λήψης (MIMO) λειτουργεί καλά στα FSO συστήματα μόνο για ανεξάρτητα και ασυσχέτιστα σήματα και μάλιστα η απόδοσή του είναι παρόμοια με αυτή των RF συστημάτων. Η χωρητικότητα του διαύλου αυξάνεται σχεδόν γραμμικά σε σχέση με τον αριθμό των κεραιών εκπομπής. Σε περίπτωση ασθενών αναταράξεων η πιθανότητα διακοπής για δίαυλο Gauss είναι ανάλογη του  $[\log(SNR)]^2$  ενώ για μεσαίου μεγέθους έως ισχυρές αναταράξεις είναι ανάλογη του  $[\log(SNR)]$ .

Η έννοια του εικονικού MIMO (V-MIMO) εφαρμόζεται στις πλατφόρμες υψηλού υψομέτρου (HAP) για την παροχή ευρυζωνικών συνδέσεων και εξασφάλιση υψηλής χωρητικότητας παρουσία νεφών και αναταράξεων.

Ο χρονικός Διαφορισμός έχει παρατηρηθεί ότι βελτιώνει την απόδοση του συστήματος σε χρονοεπιλεκτικούς διαύλους όπου γίνεται επιτρεπτή η μετάδοση επαναλαμβανόμενων συμβόλων σε διαφορετική χρονική περίοδο συνοχής. Εάν το μήκος του πλαισίου δεδομένων υπερβαίνει το χρόνο συνοχής του διαύλου τότε ο διαφορισμός επιτυγχάνεται μέσω κωδικοποίησης ή παρεμβολής. Παρατηρείται ότι ο χρονικός διαφορισμός συνδυάζεται καλύτερα με συνελκτικούς κώδικες για ασθενείς αναταράξεις και με Turbo κώδικες για ισχυρές αναταράξεις [39].

Στο [40] εφαρμόζεται η τεχνική διαφορισμού θέσης για διάφορες τοποθεσίες λαμβάνοντας υπόψη τα νέφη αλλά και τις ατμοσφαιρικές αναταράξεις και δίνονται απλές σχέσεις υπολογισμού. Σύμφωνα με αυτό η πιθανότητα μη

ύπαρξης νεφών στην LOS (CFLOS) εξαρτάται από τη γωνία ανύψωσης σύμφωνα με την σχέση (3.2):

$$CFLOS(\theta) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 - \frac{P_{CLW}(90^\circ)}{\left(2.7284 - 2.6P_{CLW}(90^\circ)^c \cos(\theta)\right)^b} & , \theta < 50^\circ \\ 1 - P_{CLW}(90^\circ) & 50^\circ < \theta < 90^\circ \end{array} \right\} \quad (3.2)$$

Όπου οι παράμετροι b,c προκύπτουν από τις σχέσεις (3.3):

$$b = -0.1863P_{CLW}(90^\circ) + 0.1847 \quad (3.3\alpha)$$

$$c = -0.0843P_{CLW}(90^\circ)^{1.1383} - 2.7469P_{CLW}(90^\circ)^{9.334} - 0.0104 \quad (3.3\beta)$$

Από 50° έως 90° το CFLOS θεωρείται σταθερό ενώ η παράμετρος  $P_{CLW}(90^\circ)$  μπορεί να εξαχθεί από τη σύσταση της ITU-R P.840. Η επίδραση στο CFLOS της γωνίας ανύψωσης σε συνδυασμό με το υψόμετρο δίνεται από τη σχέση (3.4):

$$CFLOS(\theta, h) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 - P_{CLW}(\theta) \cdot e^{a(h-1)^d} & , h > 1km \\ 1 - P_{CLW}(\theta) & , h \leq 1km \end{array} \right\} \quad (3.4)$$

Όπου  $\theta$ , η γωνία ανύψωσης(°), h, το υψόμετρο του σταθμού βάσης (km) και a,d δίνονται από τις σχέσεις (3.5):

$$a = k_1 \cdot P_{CLW}(\theta) + k_2 \quad (3.5\alpha)$$

$$d = k_3 \cdot P_{CLW}(\theta) + k_4 \quad (3.5\beta)$$

και

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = -0.0061 \cdot \theta + 0.5785 \\ k_2 = 0.0041 \cdot \theta + 0.4661 \\ k_3 = -0.0012 \cdot \theta + 1.008 \\ k_4 = 0.0261 \cdot \theta + 1.1505 \end{array} \right\} \quad (3.6)$$

Η διαθεσιμότητα για ένα OGSN, δηλαδή πολλαπλών σταθμών προκύπτει από την συγκεντρωτική πιθανότητα των σταθμών OGS που το αποτελούν σύμφωνα με την σχέση (3.7):

$$CFLOS^{OGSN} = 1 - P_{CLW}^1(\theta_1, h_1) \cdot P_{CLW}^2(\theta_2, h_2) \cdot \dots \cdot P_{CLW}^n(\theta_n, h_n) \quad (3.7)$$

Αν δεν μπορεί να θεωρηθούν οι επίγειοι σταθμοί ως χωρικά ασυσχέτιστοι τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος που παρουσιάζεται στο [24] και η οποία αναφέρθηκε στην ενότητα 2.5.3.

Ως προς τη μελέτη των συστημάτων που αφορά τις ατμοσφαιρικές αναταράξεις αξιοποιείται από το [40] η έννοια της ακτίνας συνοχής όπως περιεγράφηκε στην ενότητα 2.4 και ορίστηκε με τη σχέση (2.24) με δεδομένη επίσης τη σχέση (2.22) η οποία μπορεί να γραφεί επίσης και ως :

$$C_n^2(h) = 8.148 \times 10^{-56} v_{rms}^2 h^{10} \exp^{-h/1000} + 2.7 \times 10^{-16} \exp^{-h/1500} + A_0 \exp(-H_{GS} / 700) \exp(-(h - H_{GS}) / 100) \quad (3.8)$$

Όπου,  $A_0$ , η παράμετρος της δομής του δείκτη διάθλασης στην επιφάνεια του εδάφους,  $u$ , η rms ταχύτητα του ανέμου(m/s) και  $H_{GS}$ , το ύψος του σταθμού βάσης (m). Η ταχύτητα  $u$  μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (2.21) και το  $A_0$ , εξαρτάται από τις συνθήκες ημέρας και νύχτας.

Τελικά τα βήματα για την εφαρμογή της τεχνικής διαφορισμού θέσης καταλήγουν στα εξής:

- Υπολογισμός CFLOS για κάθε σταθμό.
- Υπολογισμός ακτίνας συνοχής για κάθε σταθμό.
- Οι σταθμοί με CFLOS μικρότερο του επιθυμητού κατωφλίου απορρίπτονται.
- Οι σταθμοί με ακτίνα συνοχής μικρότερη του επιθυμητού κατωφλίου επίσης απορρίπτονται.
- Ταξινόμηση σταθμών κατά φθίνουσα σειρά ως προς CFLOS.
- Αξιοποίηση όσων σταθμών απαιτούνται ξεκινώντας από αυτόν με το υψηλότερο ποσοστό CFLOS, υπολογίζοντας κάθε φορά την

συγκεντρωτική πιθανότητα που προσδίδεται στο σύστημα έως ότου ικανοποιηθεί η απαιτούμενη διαθεσιμότητα.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν εξάγονται με παρόμοιο τρόπο με αυτά που αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.5.3. Συγκεκριμένα από τις περιοχές που μελετήθηκαν στο [40] και φαίνονται στο χάρτη στην εικόνα:



Εικόνα 22: Εξεταζόμενες περιοχές OGS [40]

Πρόέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου τα παρακάτω δεδομένα:

Location	Lat. (deg)	Lon. (deg)	Alt. (m)	Elev. Ang (deg)	CFLOS Proposed (%)   CFLOS [2] (%)	$r_0$ (m)
Psiloritis Crete	35.23	24.78	1200	48.6	76.8   76.9	0.393
Ortobene Sardinia	40.32	9.40	800	42.3	71.3   72.4	0.284
Madrid	40.2	-3.70	800	37.7	68.6   69.0	0.268
Mallorca	39.64	3.00	1000	41.1	73.3   73.6	0.32
Berlin	52.52	13.40	200	29.7	41.4   41.0	0.154
Luxembourg	49.61	6.13	250	31.7	42.4   41.6	0.165
Stockholm	59.33	18.07	150	22.6	42.42   43.0	0.127
Paris	48.85	2.37	100	31.6	45.4   44.6	0.148
Mountain in Corfu	39.75	19.87	900	44	69.14   69.5	0.189
Constantinople	41.09	24.84	100	42	60.0   60.07	0.171

Εικόνα 23: CFLOS και Ακτίνα συνοχής για τους υπό μελέτη σταθμούς [40]

Αφού αφαιρέθηκαν οι σταθμοί με ποσοστό CFLOS μικρότερο του 60% και ακτίνα συνοχής μικρότερη του 0.18m κατόπιν ταξινομήθηκαν και υπολογίστηκε η συγκεντρωτική πιθανότητα όπως φαίνεται στην Εικόνα 24:

Location	$r_0$ (m)	Joint CFLOS Proposed (%)	Joint CFLOS [2] %
Psiloritis Crete	0.393	76.8	76.9
Mallorca	0.32	93.81	93.9
Ortobene	0.284	98.22	98.1
Madrid	0.268	99.44	99.37
Mountain in Corfu	0.189	99.83	99.8

Εικόνα 24: Συγκεντρωτική πιθανότητα OGSN [40]

Από την Εικόνα 24 γίνεται αντιληπτό ότι αν η απαιτούμενη διαθεσιμότητα ήταν π.χ. 99% για το οπτικό σύστημα τότε θα υπήρχε απαίτηση συνεργασίας των πρώτων 4 σταθμών που θα απάρτιζαν το OGSN σύστημα.

### 3.3 Χρήση Αναμεταδότη

Η μετάδοση με χρήση αναμεταδότη είναι μια αποτελεσματική τεχνική για την καταπολέμηση της επίδρασης των ατμοσφαιρικών αναταράξεων στις FSO επικοινωνίες [41]. Πρόκειται για μια μορφή κατανεμημένου χωρικού διαφορισμού που επιτρέπει σε πολλαπλά τερματικά να μοιράζονται τους πόρους τους μέσω μιας συνεργατικής επικοινωνίας, έτσι ώστε μια εικονική συστοιχία κεραιών να μπορεί να κατασκευαστεί με κατανεμημένο τρόπο. Εδώ λοιπόν αντί να χρησιμοποιούνται πολλαπλά διαφράγματα σε ένα πομπό ή δέκτη, μια κεραία επιτυγχάνει μεγάλο κέρδος διαφορισμού.

Η απόδοση αυτής της τεχνικής είναι υψηλή όταν το σύστημα λειτουργεί με υψηλό SNR ώστε η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος να είναι επαρκώς υψηλή σε σχέση με το θόρυβο βολής και την ατμοσφαιρική εξασθένιση. Σε περίπτωση όπου το SNR είναι χαμηλό, οι αναμεταδότες θα επανεκπέμπουν θορυβώδη αντίγραφα των σημάτων πληροφορίας που λαμβάνουν. Η πιθανότητα διακοπής και η εργοδικότητα βελτιώνονται σημαντικά για συστήματα με χρήση αναμεταδοτών από ότι σε συστήματα απευθείας μετάδοσης εν μέσω τυρβωδών διαδρομών. Η απόδοση της υβριδικής δορυφορικής-επίγειας ζεύξης FSO αναλύεται χρησιμοποιώντας ενίσχυση και αναμετάδοση προς τα εμπρός στο [42].

Η οπτική κατερχόμενη ζεύξη από δορυφορικό σταθμό LEO/GEO σε επίγειο σταθμό ολοκληρώνεται μέσω ζεύξης αναμεταδότη HAP. Το δίκτυο των διασυνδεδεμένων HAP παρέχει σχεδόν πλήρη διαθεσιμότητα σε όλες τις καιρικές συνθήκες. Περαιτέρω, προκειμένου να αξιοποιηθεί πλήρως το πλεονέκτημα της χωρητικότητας του οπτικού φορέα, όλα τα συστήματα FSO οπτικής αναμετάδοσης μελετώνται στο [43].

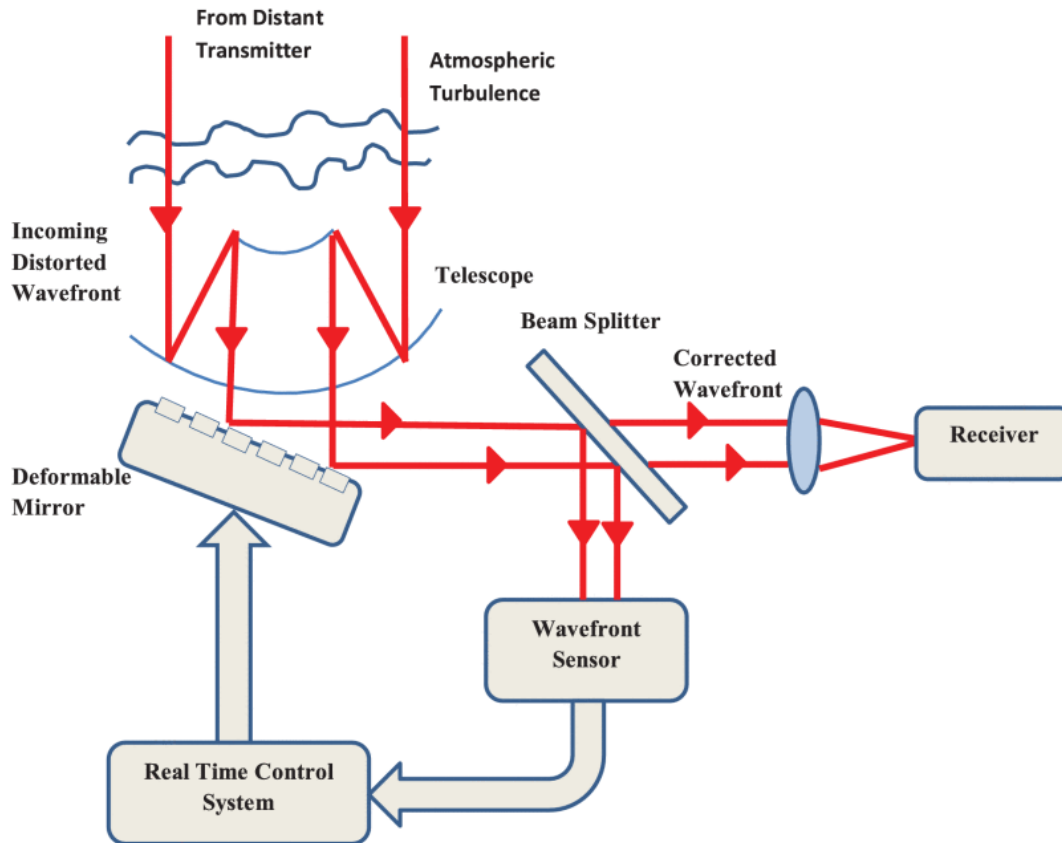
Τέλος η επίδραση του θορύβου που προκαλείται από το ακτινοβολία περιβάλλοντος και τον ενισχυτή σε πλήρως οπτικά συστήματα FSO μειώνεται με τη χρήση της τεχνικής αναμετάδοσης οπτικής αναγέννησης και προώθησης (ORF) [43] ή τεχνικής αναμετάδοσης οπτικής ενίσχυσης και προώθησης (OAF) [44].

### 3.4 Προσαρμοστικά Οπτικά

Η προσαρμοστική οπτική (AO) χρησιμοποιείται για τον μετριασμό της επίδρασης των ατμοσφαιρικών αναταράξεων και βοηθά στη μεταφορά μιας ακτίνας χωρίς παραμόρφωση μέσω της ατμόσφαιρας. Το σύστημα AO είναι βασικά ένας έλεγχος κλειστού βρόχου όπου η δέσμη διορθώνεται εκ των προτέρων υπολογίζοντας την κλίση των ατμοσφαιρικών αναταράξεων πριν τη μετάδοσή της στην ατμόσφαιρα [45].

Η αύξηση της ισχύος μετάδοσης ή η χρήση διαφορισμού μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος FSO. Αλλά για να έχουμε περαιτέρω βελτιώσεις στο SNR με μειωμένη απαίτηση ισχύος μετάδοσης, το AO έχει αποδειχθεί πολύ ωφέλιμο. Το σύστημα AO χρησιμοποιεί αισθητήρα μετώπου κύματος, διορθωτή

μετώπου κύματος και παραμορφώσιμα κάτοπτρα είτε στον πομπό είτε στα οπτικά στοιχεία του δέκτη για να αντισταθμίσει τις διακυμάνσεις φάσης του μετώπου. Ένα μέρος του λαμβανόμενου σήματος αποστέλλεται στον αισθητήρα μετώπου κύματος που παράγει ένα σήμα ελέγχου για τον διορθωτή μετώπου κύματος όπως φαίνεται στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25: Συμβατικό σύστημα προσαρμοστικού οπτικού [1]

Ωστόσο, ένας έλεγχος μετώπου κύματος σε πραγματικό χρόνο με χρήση συμβατικής προσέγγισης AO γίνεται αρκετά δύσκολος για πολύ ισχυρές τυρβώδεις συνθήκες. Σε τέτοιες περιπτώσεις, χρησιμοποιείται μια μη συμβατική προσέγγιση AO η οποία βασίζεται στη βελτιστοποίηση του λαμβανόμενου SNR ή οποιουδήποτε άλλου συστήματος μέτρησης απόδοσης [46], [47].

Με την ανάπτυξη ελεγκτών φάσης μετώπου κύματος υψηλού εύρους ζώνης, όπως παραμορφώσιμων κατόπτρων που βασίζονται σε μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS) και με την ανάπτυξη νέων αποδοτικών αλγορίθμων οι περιορισμοί που υπήρχαν νωρίτερα ως προς το εύρος ζώνης ελέγχου για μη συμβατικά συστήματα άρχισαν να αίρονται. Η χρήση προσαρμοστικών οπτικών για υψηλής χωρητικότητας ζεύξεις από δέκτη δορυφόρου LEO ή GEO στη Γη διερευνάται στο [48].

Η παρακολούθηση της αιχμής/κλίσης του εισερχόμενου μετώπου κύματος ισοδυναμεί με την παρακολούθηση του σημείου που εστιάζεται στον ανιχνευτή. Η αιχμή/κλίση του μετώπου κύματος που προκαλείται από αναταράξεις είναι ανεξάρτητη από το μήκος κύματος, αυξάνεται με τη γωνία ζενίθ και είναι ανάλογη του  $D_R^{-1/6}$  [49]. Η διόρθωση αιχμής/κλίσης επιτυγχάνεται με τη χρήση φυσικών ή τεχνητών αστεριών- οδηγών ή με τη χρήση δέσμης λέιζερ κοντά από ένα αναμεταδότη που βρίσκεται σε τροχιά που χρησιμοποιούνται ως αναφορά για τη μέτρηση και τη διόρθωση της παραμόρφωσης του μετώπου κύματος [50].

Ένα μοντέλο αναλογίας Strehl για διόρθωση αιχμής/κλίσης και προσαρμοστικής οπτικής διόρθωσης παρουσιάζεται στο [51]. Ο σχεδιασμός του συστήματος ΑΟ απαιτεί η συχνότητα κλειστού βρόχου του να είναι τουλάχιστον τέσσερις φορές η συχνότητα Greenwood [52] η οποία δίνεται από τη σχέση (3.9) (σε Hz):

$$f_G = \left[ 0.102k^2 \sec(\theta) \int_{h_0}^{h_0+L} C_n^2 \cdot v_T(h)^{5/3} dh \right]^{3/5} \quad (3.9)$$

Όπου  $v_T(h)$ , η συνιστώσα διέλευσης της ταχύτητας του ανέμου. Η συχνότητα αυτή δείχνει την ταχύτητα ενός ΑΟ συστήματος ώστε να ανταποκρίνεται στις διακυμάνσεις λόγω ατμοσφαιρικών αναταράξεων.

### 3.5 Μορφοποίηση

Στην επικοινωνία FSO, η επιλογή των σχημάτων διαμόρφωσης εξαρτάται από δύο βασικά κριτήρια: την απόδοση της οπτικής ισχύος και την απόδοση εύρους ζώνης. Η απόδοση οπτικής ισχύος μπορεί να μετρηθεί με υπολογισμό του κέρδους οπτικής ισχύος πάνω από το ΟΟΚ υπό την προϋπόθεση ότι και τα δύο σχήματα διαμόρφωσης έχουν την ίδια ευκλείδεια απόσταση,  $d_{\min}$ .

Τα συστήματα διαμόρφωσης αποδοτικής ισχύος είναι απλούστερα στην εφαρμογή και είναι αρκετά αποτελεσματικά στον μετριασμό της επίδρασης των αναταράξεων για χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, η αποδοτικότητα εύρους ζώνης καθορίζει τα μέγιστα δεδομένα για ένα δεδομένο μήκος ζεύξης με ένα συγκεκριμένο σχήμα διαμόρφωσης. Γενικά, η επικοινωνία FSO υποστηρίζει μια ποικιλία μορφών διαμόρφωσης δυαδικών και πολυεπίπεδων σχημάτων διαμόρφωσης. Από αυτές τις δύο μορφές, η μορφή δυαδικού επιπέδου χρησιμοποιείται πιο συχνά λόγω της απλότητας και της υψηλής απόδοσης ισχύος.

Τα πιο γνωστά σχήματα δυαδικής διαμόρφωσης είναι τα ΟΟΚ και PPM. Το σχήμα διαμόρφωσης ΟΟΚ απαιτεί προσαρμοστικό κατώφλι σε τυρβώδεις ατμοσφαιρικές συνθήκες για καλύτερα αποτελέσματα [53]. Λόγω της απλότητάς



του, το σχήμα διαμόρφωσης OOK είναι πολύ δημοφιλές στα συστήματα επικοινωνίας FSO και συνήθως αναπτύσσεται με μηχανισμό μετάδοσης και λήψης IM/DD (Intensity Modulation/Direct Detection). Η επιλογή του κύκλου λειτουργίας για σήματα διαμορφωμένης έντασης επηρεάζει τις παραμέτρους σχεδιασμού του συστήματος, όπως ο ρυθμός μετάδοσης bit και η απόσταση καναλιών.

Η ικανότητα διατήρησης αποδοτικής μετάδοσης σε ένα ευρύ φάσμα κύκλων λειτουργίας, απαιτεί αποτελεσματική διαμόρφωση παλμού στον πομπό. Έτσι βελτιώνεται η ευαισθησία του δέκτη και παρέχονται ευέλικτες δυνατότητες πολλαπλών ρυθμών με απλοποιημένες επιλογές σχεδίασης δέκτη [54]. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το λέιζερ μπορεί να απαιτεί κάποιο χρόνο αποκατάστασης μετά τη μετάδοση του παλμού και αυτό μπορεί να επιβάλλει μια ελάχιστη καθυστέρηση μεταξύ δύο παλμών.

Μια άλλη τεχνική ανίχνευσης που χρησιμοποιείται στο σχήμα διαμόρφωσης OOK είναι η ανίχνευση μέγιστης πιθανότητας (ML) με πληροφορίες κατάστασης τέλειου καναλιού (CSI) [55]. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας στην εφαρμογή της, αυτή η τεχνική ανίχνευσης δεν κέρδισε μεγάλη δημοτικότητα. Η ανίχνευση ακολουθίας μέγιστης πιθανότητας (MLSD) μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν ο δέκτης γνωρίζει μια κοινή χρονική κατανομή των διακυμάνσεων της έντασης. Άλλες τεχνικές ανίχνευσης [56], [57], [58] που χρησιμοποιούνται στον δέκτη είναι η ανίχνευση μέγιστης πιθανότητας σύμβολο προς σύμβολο, η τυφλή ανίχνευση, η V-BLAST και άλλες.

Στην περίπτωση του M-PPM, κάθε διάστημα συμβόλων χωρίζεται σε M χρονοθυρίδες και ένας μη μηδενικός οπτικός παλμός τοποθετείται σε αυτές τις χρονοθυρίδες ενώ οι άλλες θέσεις παραμένουν κενές. Για επικοινωνίες σε μεγάλες αποστάσεις ή στο βαθύ διάστημα, το σχήμα M-PPM χρησιμοποιείται ευρέως επειδή παρέχει υψηλό λόγο κορυφής προς μέση ισχύ (PAPR) που βελτιώνει τη μέση απόδοση ισχύος [59]. Επίσης, σε αντίθεση με το OOK, το M-PPM δεν απαιτεί προσαρμοστικό κατώφλι. Ωστόσο το σχήμα M-PPM έχει χαμηλή απόδοση εύρους ζώνης σε υψηλότερες τιμές του M και επομένως, για συστήματα περιορισμένου εύρους ζώνης, προτιμώνται τα σχήματα διαμόρφωσης πολλαπλών επιπέδων.

Στη διαμόρφωση πολλαπλών επιπέδων τα μεταδιδόμενα δεδομένα μπορούν να λάβουν πολλαπλά επίπεδα πλάτους και τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα σχήματα διαμόρφωσης έντασης πολλαπλών επιπέδων είναι η διαμόρφωση πλάτους παλμού (PAM) και η διαμόρφωση τετραγωνικού πλάτους (QAM). Ωστόσο, το τίμημα που καταβάλλεται για την απόδοση του εύρους ζώνης είναι η μείωση του επιπέδου ισχύος. Επομένως, αυτά τα σχήματα διαμόρφωσης δεν είναι μια καλή επιλογή για συνθήκες ισχυρών ατμοσφαιρικών αναταράξεων ή περιπτώσεις συστημάτων περιορισμένης ισχύος.

Με την αύξηση του M σε M-PPM, η στιβαρότητα έναντι της ακτινοβολίας του περιβάλλοντος αυξάνεται ακόμη περισσότερο λόγω του χαμηλού κύκλου λειτουργίας και του μικρότερου διαστήματος ολοκλήρωσης της φωτοδίοδου. Λόγω των διαφόρων πλεονεκτημάτων του PPM στην επικοινωνία FSO, έχουν

αναπτυχθεί διάφορες παραλλαγές του PPM με στόχο την ενίσχυση της φασματικής απόδοσης του συστήματος.

Μια φυσική επέκταση του μονοπαλμικού PPM είναι η χρήση δύο ή περισσότερων παλμών σε κάθε σύμβολο καναλιού για τη μεταφορά πληροφοριών και ονομάζεται PPM πολλαπλών παλμών [60]. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση πλήθους ( $K$ ) παλμών ανά διάστημα συμβόλου με όλους τους δυνατούς τρόπους σε  $M$  θυρίδες και ως εκ τούτου, παρέχει αστερισμό σημάτων του οποίου το μέγεθος ποικίλλει ως  $M^K$  παρά γραμμικά με  $M$ , όπως στην περίπτωση του συμβατικού PPM.

Άλλες παραλλαγές του PPM είναι το διαφορικό PPM (DPPM) [61], το διαφορικό πλάτος PPM (DAPPM) [62], η διαμόρφωση διαστήματος παλμών (PIM) [63], η διαμόρφωση διαστήματος παλμών διπλής κεφαλίδας (DHPIM) και το επικαλυπτόμενο PPM (OPPM) [64]. Όλα αυτά τα σχήματα διαμόρφωσης λαμβάνονται με απλή τροποποίηση στο PPM για την επίτευξη βελτιωμένης απόδοσης ισχύος και εύρους ζώνης.

Στο DPPM, οι κενές θυρίδες που ακολουθούν τον παλμό στο σύμβολο PPM αφαιρούνται, επομένως, μειώνεται το μέσο μήκος του συμβόλου και βελτιώνεται η απόδοση του εύρους ζώνης. Το DPPM εμφανίζει εγγενή συγχρονισμό συμβόλων καθώς κάθε σύμβολο τελειώνει με έναν παλμό. Ωστόσο, για μια μακρά ακολουθία μηδενικών θα μπορούσε να υπάρχει πρόβλημα συγχρονισμού της θυρίδας, το οποίο αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας τη ζώνη προστασίας αμέσως μετά την αφαίρεση του παλμού.

Από την άλλη πλευρά, το DAPPM είναι ένας συνδυασμός DPPM και PAM. Επομένως, πρόκειται για ένα σχήμα διαμόρφωσης πολλαπλών επιπέδων όπου το μήκος του συμβόλου ποικίλλει από  $1, 2, \dots, M$  και το πλάτος του παλμού επιλέγεται από  $1, 2, \dots, A$  όπου  $A$  και  $M$  είναι ακέραιοι.

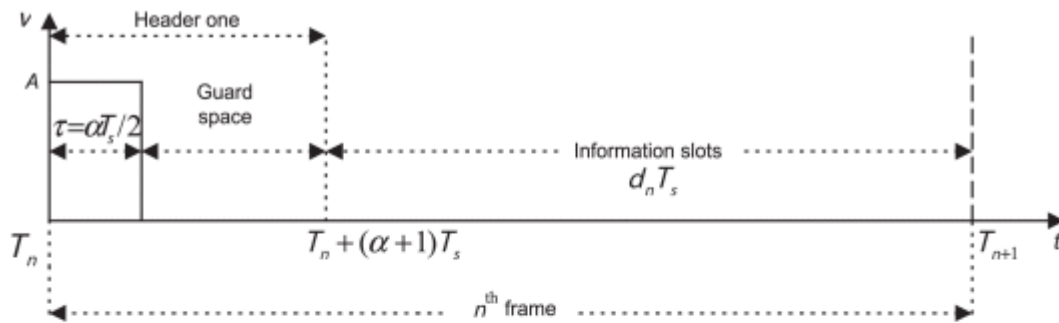
Το PIM είναι μια ανισόχρονη (χωρίς δομή σταθερού συμβόλου) τεχνική PPM στην οποία κάθε μπλοκ  $\log_2 M$  ψηφίων δεδομένων αντιστοιχίζονται σε ένα από τα  $M$  πιθανά σύμβολα. Το μήκος του συμβόλου είναι μεταβλητό και καθορίζεται από το περιεχόμενο πληροφοριών του συμβόλου. Κάθε σύμβολο ξεκινά με έναν παλμό, ακολουθούμενο από μια σειρά από κενές θυρίδες, ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από την δεκαδική τιμή του μπλοκ δεδομένων που κωδικοποιείται. Η αντιστοίχιση μεταξύ πηγής και μεταδιδόμενων bits των 4-PPM και 4-PIM φαίνεται στον Πίνακα 9.

Πίνακας 9: Αντιστοίχιση για 4-PPM και 4-PIM [1]

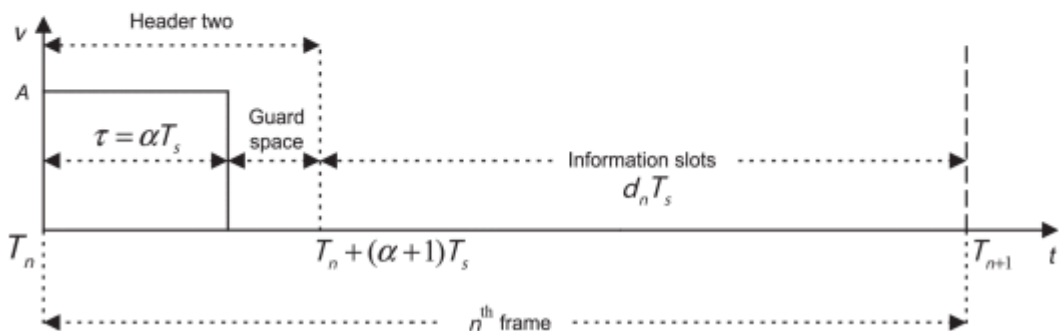
Bits Πηγής	4-PPM	4-PIM
00	1000	1(0)
01	0100	1(0)0
10	0010	1(0)00
11	0001	1(0)000

Απαιτεί μόνο συγχρονισμό τσιπ και δεν απαιτεί συγχρονισμό συμβόλων αφού κάθε σύμβολο ξεκινά με έναν παλμό. Έχει μεγαλύτερη ικανότητα μετάδοσης καθώς εξαλείφει τα αχρησιμοποίητα χρονικά τσιπ μέσα σε κάθε σύμβολο[1].

Στο DHPIM, ένα σύμβολο μπορεί να έχει μία από τις δύο προκαθορισμένες κεφαλίδες αναλόγως της πληροφορίας εισόδου όπως φαίνεται στην Εικόνα 26.



(a)



(b)

Εικόνα 26: Δομή συμβόλου στο DHPIM με (a)  $H_0$  και (b)  $H_1$  επικεφαλίδες[65]

Το  $n$  σύμβολο  $S_n (h_n, d_n)$  μιας ακολουθίας DHPIM αποτελείται από μια κεφαλίδα  $h_n$ , με την οποία ξεκινά και τις θυρίδες πληροφορίας  $d_n$ . Ανάλογα με το πιο σημαντικό bit (MSB) της κωδικής λέξης εισόδου, επιλέγονται δύο διαφορετικές κεφαλίδες  $H_0$  και  $H_1$ . Εάν το MSB της δυαδικής λέξης εισόδου είναι ίσο με 0, τότε χρησιμοποιείται η κεφαλίδα  $H_0$  και το  $d$  αντιπροσωπεύει τη δεκαδική τιμή της δυαδικής λέξης εισόδου. Ωστόσο, εάν το MSB είναι ίσο με 1 τότε χρησιμοποιείται η κεφαλίδα  $H_1$  και το  $d$  ισούται με τη δεκαδική τιμή του συμπληρώματος ως προς 1 της δυαδικής λέξης εισόδου. Για τις κεφαλίδες  $H_0$  και  $H_1$ , η διάρκεια του παλμού είναι  $aT_s/2$  και  $aT_s$  αντίστοιχα, όπου  $a > 0$  είναι ακέραιος και  $T_s$  είναι η διάρκεια της θυρίδας που αποτελείται από τις ζώνες παλμού και προστασίας.

Το μέσο μήκος συμβόλου μπορεί να μειωθεί με την κατάλληλη επιλογή του  $a$ . Επομένως, το DHPIM προσφέρει βελτιωμένο ρυθμό μετάδοσης και απαιτήσεις εύρους ζώνης. Μια σύγκριση της απαίτησης εύρους ζώνης, του λόγου κορυφής προς μέση ισχύ (PAPR) και της χωρητικότητας για παραλλαγές σχημάτων διαμόρφωσης PPM φαίνεται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10: Σύγκριση των διαφόρων παραλλαγών PPM ( $A$ , πλάτος παλμού,  $R_b$ , ρυθμός δεδομένων και  $a$ , ακέραιος) [1]

Σχήμα Διαμόρφωσης	M-PPM	DPPM	DAPPM	DPIM	DHPIM <sub>a</sub>
Εύρος Ζώνης (Hz)	$\frac{MR_b}{\log_2 M}$	$\frac{(M+1)R_b}{2\log_2 M}$	$\frac{(M+A)R_b}{2\log_2(MA)}$	$\frac{(M+3)R_b}{2\log_2 M}$	$\frac{(2^{\log_2 M-1} + 2a+1)R_b}{2\log_2 M}$
PAPR	$M$	$\frac{M+1}{2}$	$\frac{M+A}{A+1}$	$\frac{M+2}{2}$	$\frac{2(2^{\log_2 M-1} + 2a+1)}{3a}$
Χωρητικότητα	$\log_2 M$	$\frac{2M \log_2 M}{M+1}$	$\frac{2M \log_2(M \cdot A)}{M+1}$	$\frac{2M \log_2 M}{M+3}$	$\frac{2M \log_2 M}{2^{\log_2 M-1} + 2a+1}$

Η προσαρμοστική διαμόρφωση έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης και ευρωστίας του καναλιού σε οπτικές ζεύξεις Γης διαστήματος[66]. Η αποτελεσματικότητα της προσαρμοστικής διαμόρφωσης εξαρτάται από την ακρίβεια των εκτιμήσεων του καναλιού που προέρχονται από την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος μέσω μιας διαδρομής ανάδρασης χαμηλού ρυθμού. Χρησιμοποιεί μεγάλο χρόνο συνοχής καναλιού σε εύρος χιλιοστών του δευτερολέπτου (λόγω της αργής μεταβολής του καναλιού) για να εκτιμήσει την κατάσταση του καναλιού και να το στείλει πίσω στον πομπό για να διαφοροποιήσει ορισμένες από τις παραμέτρους μετάδοσης όπως ισχύς, ρυθμός κωδικοποίησης, επίπεδα διαμόρφωσης κ.λπ. ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού.

Για οπτικές ζεύξεις από και προς το διάστημα, εκτελείται προσαρμοστική κωδικοποίηση όπου ο κωδικοποιητής προσαρμόζει τον ρυθμό του κωδικού του για να ταιριάζει στις αργά μεταβαλλόμενες συνθήκες καναλιού με τη βοήθεια κωδικών Rateless [67]. Σχετικές μελέτες για διάφορες συνθήκες του διαύλου μελετώνται στα [68], [69] για ασθενείς και ισχυρές ατμοσφαιρικές αναταράξεις αντίστοιχα.

Εν γέννη, όταν οι συνθήκες FSO είναι ευνοϊκές, το μέγεθος του αστερισμού του σήματος αυξάνεται και όταν οι συνθήκες του καναλιού δεν είναι ευνοϊκές, το μέγεθος του αστερισμού του σήματος μειώνεται ή όταν οι συντελεστές έντασης του καναλιού είναι κάτω από δεδομένο κατώφλι, το σήμα δεν μεταδίδεται καθόλου.

Η διαμόρφωση έντασης οπτικού υποφορέα (SIM) είναι μια άλλη μορφή διαμόρφωσης όπου το βαθυπερατό σήμα διαμορφώνει τον ηλεκτρικό υποφορέα ραδιοσυχνοτήτων (μπορεί να είναι αναλογικός ή ψηφιακός) ο οποίος στη συνέχεια διαμορφώνεται από τον οπτικό φορέα. Αφού το σήμα υπο-φέροντος

είναι ημιτονοειδές σήμα, προστίθεται μια πόλωση DC για να παραλειφθεί το αρνητικό πλάτος του εκπεμπόμενου οπτικού σήματος.

Η διαμόρφωση SIM δεν απαιτεί προσαρμοστικό κατώφλι σε αντίθεση με το σχήμα OOK και είναι πιο αποδοτική ως προς το εύρος ζώνης από το σχήμα PPM. Η οπτική SIM κληρονομεί τα οφέλη από πιο ώριμα συστήματα ραδιοσυχνοτήτων, επομένως, κάνει τη διαδικασία υλοποίησης πιο απλή [70]. Η SIM σε συνδυασμό με τεχνικές διαφορισμού βελτιώνει την απόδοση BER του συστήματος FSO παρουσία ατμοσφαιρικών αναταράξεων [71]. Όταν αυτό το σχήμα διαμόρφωσης χρησιμοποιείται με διαφορετικούς υπο-φορείς ραδιοσυχνοτήτων που είναι πολυπλεγμένοι ως προς τη συχνότητα, τότε αυτό το σχήμα είναι γνωστό ως διαμόρφωση πολλαπλών υποφορέων έντασης (MSIM). Σε αυτή την περίπτωση, κάθε δευτερεύων φορέας είναι ένα σήμα στενής ζώνης και αντιμετωπίζει λιγότερη παραμόρφωση λόγω παρεμβολής μεταξύ συμβόλων σε υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα των SIM και MSIM είναι η μικρότερη απόδοση ισχύος από το OOK ή το PPM.

Διάφορα άλλα σχήματα διαμόρφωσης αποκτούν ενδιαφέρον με την άνοδο των οπτικών δορυφορικών επικοινωνιών. Το DPSK ως σχήμα διαμόρφωσης προσφέρει 3 dB βελτίωση ως προς την απόδοση ισχύος ως προς το OOK [72] εις βάρος ωστόσο της πολυπλοκότητας και του κόστους εφαρμογής. Για τα σχήματα διαμόρφωσης BPSK, DBPSK, QPSK, 8-QAM, 8-PSK, δυαδική και τετραγωνική OSSK (Optical Space Shift Keying) συγκρίνεται η απόδοσή τους ως προς το BER στο [73] για ασθενή, μέτρια και ισχυρά επίπεδα ατμοσφαιρικών αναταράξεων και μικρό μήκος ζεύξης (1km) καταλήγοντας στην υπεροχή του BPSK έναντι των υπολοίπων για όλες τις συνθήκες τυρβώδους κατάστασης.

### 3.6 Κωδικοποίηση

Ως κωδικοποίηση είναι γνωστή η διαδικασία με την οποία στο σήμα πληροφορίας προστίθενται επιπλέον ψηφία τα οποία προσφέρουν ανοσία στις συνθήκες εξασθένησης του διαύλου. Η κωδικοποίηση ελέγχου σφαλμάτων βελτιώνει την απόδοση της σύνδεσης FSO κάνοντας χρήση διαφορετικών σχημάτων FEC, συμπεριλαμβανομένων των κωδίκων Reed-Solomon (RS), των κωδίκων Turbo, των συνελικτικών κωδίκων, του συνδυασμού συνελικτικών κωδίκων με διαμόρφωση (TCM) και του LDPC [74], [75].

Οι κώδικες RS παρέχουν καλό κέρδος κωδικοποίησης όταν υλοποιούνται με PPM για επικοινωνία FSO μεγάλης απόστασης στο [76]. Σε περίπτωση ισχυρών ατμοσφαιρικών αναταράξεων, προτιμώνται οι κωδικοί Turbo, TCM ή LDPC. Οι κώδικες Turbo μπορούν να ταξινομηθούν σε οποιαδήποτε από τα τρία διαφορετικά είδη: παράλληλους συνεκτικούς συνελικτικούς κώδικες, σειριακούς συνεκτικούς συνελικτικούς κώδικες και συνδυασμό αυτών. Οι παράλληλοι συνεκτικοί συνελικτικοί κώδικες χρησιμοποιούνται περισσότερο στους οποίους δύο ή περισσότεροι συνελικτικοί κωδικοποιητές συνδέονται μέσω ενός παρεμβολέα [74].

Για πολύ υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, οι κωδικοί LDPC προτιμώνται έναντι των κωδικών Turbo λόγω της μειωμένης πολυπλοκότητας αποκωδικοποίησης και υπολογιστικού χρόνου. Στο [77] βρέθηκε ότι η LDPC κωδικοποίηση για σύστημα MIMO FSO χρησιμοποιώντας M-PPM παρέχει καλύτερη απόδοση σε σχέση με το μη κωδικοποιημένο σύστημα σε περίπτωση ισχυρών ατμοσφαιρικών αναταράξεων και μεγάλου θορύβου περιβάλλοντος που έχει οριστεί στα -170 dBJ. Προκύπτει κέρδος κωδικοποίησης 10-20 dB για BER της τάξης του  $10^{-12}$ . Επίσης, καλή απόδοση και ευκολία εφαρμογής παρατηρείται με το σχήμα κωδικοποιημένης διαμόρφωσης με παρεμβολή bit (BICM) που προτείνεται από τον Djordjevic, καθώς απαιτεί τη χρήση μόνο ενός κωδικοποιητή/αποκωδικοποιητή LDPC.

Η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) σε συνδυασμό με την κατάλληλη κωδικοποίηση ελέγχου σφαλμάτων θεωρείται επίσης μια πολύ καλή μορφή διαμόρφωσης για τη βελτίωση της απόδοσης BER των συστημάτων FSO IM/DD. Ο μετριασμός των σφαλμάτων σε FSO ζεύξη από δορυφόρο στο έδαφος μεταξύ διαφόρων κωδικών Rateless όπως οι: Luby Transform, Raptor και RaptorQ μελετήθηκε στο [67] όπου προέκυψε ότι ο RaptorQ είναι ο πιο αποδοτικός.

Για την αποκωδικοποίηση της πληροφορίας στον δέκτη, έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι. Αν και θεωρητικά, η αποκωδικοποίηση ML μπορεί να προσφέρει καλύτερη ανάκτηση δεδομένων, η χρήση της είναι περιορισμένη λόγω της πολυπλοκότητας στην υλοποίηση. Ο αλγόριθμος αποκωδικοποίησης MAP είναι υπολογιστικά πολύπλοκος και δεν είναι προτιμώμενη επιλογή για εφαρμογή σε ολοκληρωμένα κυκλώματα (VLSI). Πιο απλοί αλγόριθμοι όπως οι αλγόριθμοι log-MAP και SOVA είναι πρακτικά οι αλγόριθμοι αποκωδικοποίησης για υλοποίηση με χρήση κωδικών Turbo. Από αυτά τα δύο, ο αλγόριθμος log-MAP δίνει καλύτερη απόδοση αλλά είναι υπολογιστικά πολύ περίπλοκος. Ο αλγόριθμος Simplified-log-MAP λειτουργεί πολύ κοντά στο log-MAP και μειώνει ακόμη περισσότερο την πολυπλοκότητα [78].

### 3.7 Απόρριψη Θορύβου Περιβάλλοντος

Κύρια πηγή θορύβου περιβάλλοντος αποτελεί η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η ποσότητα του θορύβου περιβάλλοντος που οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος κύματος λειτουργίας. Όσο χαμηλότερο είναι το μήκος κύματος τόσο μεγαλύτερος είναι ο θόρυβος περιβάλλοντος. Το παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό μέσω της Εικόνας 4.

Ο θόρυβος περιβάλλοντος μπορεί να μετριαστεί χρησιμοποιώντας κατάλληλα φασματικά ή χωρικά φίλτρα καθώς και κατάλληλη τεχνική διαμόρφωσης. Τα φασματικά φίλτρα είναι φίλτρα στενής ζώνης και επιδιώκουν την αύξηση του SNR. Τα χωρικά φίλτρα χρησιμοποιούν τεχνικές προσαρμοστικών οπτικών ώστε προσαρμοστικές συστοιχίες ανιχνευτών να επιτυγχάνουν συγκεκριμένο βαθμό χωρικού φιλτραρίσματος (έως 5 dB για την δυσμενέστερη περίπτωση

θορύβου). Το καταλληλότερο σχήμα διαμόρφωσης για το βαθύ διάστημα είναι το M-PPM για την καταπολέμηση της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας θορύβου υποβάθρου (καθώς όσο πιο στενός είναι ο παλμός τόσο λιγότερος θα είναι και ο θόρυβος) [79]. Επιπλέον σημαντικό είναι σύμφωνα με την παραπάνω λογική το κατά το δυνατόν μικρότερο πεδίο ορατότητας του δέκτη (FOV-Field of View).

Στο [80] γίνεται ανάλυση για τη ζεύξη μεταξύ των πλανητών Γης και Ερμή όπου αξιοποιούνται προσαρμοστικά οπτικά πλήθος ενεργοποιητών καθώς και διαμόρφωση PPM και προκύπτει βελτίωση 8,5 dB για ακραίες συνθήκες θορύβου περιβάλλοντος και αναταράξεων, ενώ για μέτριες αντίστοιχες συνθήκες η βελτίωση είναι 5,6 dB.

### 3.8 Υβριδικά συστήματα RF/MMW/FSO

Η απόδοση της επικοινωνίας FSO επηρεάζεται σημαντικά από τις καιρικές συνθήκες και τις ατμοσφαιρικές αναταράξεις. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχίες σύνδεσης ή κακή απόδοση BER του συστήματος FSO μειώνοντας έτσι την ποιότητα υπηρεσιών. Προκειμένου να βελτιωθεί η αξιοπιστία και να βελτιωθεί η διαθεσιμότητα της σύνδεσης για όλες τις καιρικές συνθήκες απαιτείται η υποστήριξη της οπτικής ζεύξης από ένα σύστημα RF ή MMW (Millimeter Wave Communication) ή συνδυασμό και των δύο. Τέτοια συστήματα ονομάζονται υβριδικά και είναι ικανά να παρέχουν υψηλή διαθεσιμότητα ζεύξης ακόμη και σε αντίξοες καιρικές συνθήκες.

Η επίπτωση των ατμοσφαιρικών αναταράξεων είναι μεγαλύτερη στα συστήματα FSO μικρότερη στα συστήματα MMW και ακόμη μικρότερη στα συστήματα RF. Ο ρυθμός μετάδοσης που υποστηρίζουν οι ανωτέρω τεχνολογίες ακολουθεί την αντίστροφη πορεία. Έτσι, με τη χρήση υβριδικών συστημάτων παρότι οι δυσμενείς συνθήκες μειώνουν τον ωφέλιμο ρυθμό μετάδοσης της ζεύξης η συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί. Αυτό μπορεί να γίνει σταδιακά μέσω της αξιολόγησης των απαιτούμενων εφεδρικών τεχνολογιών (MMW ή RF) λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας σε συγκεκριμένη τοποθεσία.

Στο [81] αξιολογείται το τριπλό υβριδικό σύστημα FSO/MMW/RF εκτιμώντας την πιθανότητα αποκοπής ενός συστήματος που λειτουργεί σε τυρβώδες ατμοσφαιρικό κανάλι καθώς και εξασθένηση κατά Weibull και Rayleigh για τις ζεύξεις των MMW και RF αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αξιοποίηση τέτοιων υβριδικών συστημάτων, σε περίπτωση όπου η FSO σύνδεση παρέχει ανεπαρκή απόδοση, είναι κρίσιμη και εξασφαλίζει την απρόσκοπτη λειτουργία και τη βελτίωση της διαθεσιμότητας.

Η συμβατική προσέγγιση στα υβριδικά συστήματα προκαλεί αναποτελεσματική εκμετάλλευση των υβριδικών συστημάτων ενώ οι συχνές εναλλαγές μεταξύ των FSO/MMW/RF συστημάτων μπορεί να οδηγήσουν σε κατάρρευση ολόκληρου του συστήματος. Στο [82] ο ρυθμός συμβόλων προκύπτει από ένα κοινό

προσαρμοστικό σχήμα κωδικοποίησης με παράλληλη λειτουργία FSO και RF συστημάτων, το οποίο παρέχει εξοικονόμηση εύρους ζώνης.

Άλλη προσέγγιση είναι αυτή της Rateless κωδικοποίησης η οποία φαίνεται να παρέχει πλεονέκτημα απόδοσης έναντι των σχημάτων κωδικοποίησης σταθερού ή προσαρμοστικού ρυθμού. Οι Rateless κώδικες δεν απαιτούν γνώση του καναλιού και προσαρμόζουν, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, τον ρυθμό μεταξύ FSO και RF, με ανάδραση ενός ψηφίου ανά μήνυμα.

Σημαντικό πλεονέκτημα για την αξιοποίηση των υβριδικών συστημάτων είναι ότι τα RF συστήματα κυρίως, λόγω της ευρείας χρήσης τους μέχρι στιγμής, υπάρχουν ήδη εγκατεστημένα σε διάφορες περιοχές. Συνεπώς σημαντικό είναι να αξιοποιηθούν συνδυαστικά με τα FSO συστήματα κατά βέλτιστο τρόπο παρέχοντας τόσο ισχυρότερους ωφέλιμους ρυθμούς μετάδοσης αλλά και διαθεσιμότητα συστήματος επαρκή για την εξασφάλιση της απαιτούμενης ποιότητας υπηρεσιών.

### 3.9 Επανεκπομπή

Τα πρωτόκολλα επανεκπομπής είναι γνωστά στις Τηλεπικοινωνίες και χρησιμοποιούνται ευρέως για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων. Στο πρωτόκολλο αυτόματου αιτήματος επανάληψης (ARQ) η μετάδοση πραγματοποιείται με τη μορφή πακέτων ορισμένων μηκών πλαισίου. Εάν ο παραλήπτης δεν αναγνωρίσει το μεταδιδόμενο πακέτο εντός του αναμενόμενου χρονικού πλαισίου, τότε το πακέτο αναμεταδίδεται. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ληφθεί θετική επιβεβαίωση από τον πομπό από τον δέκτη ή να ξεπεραστεί η προκαθορισμένη τιμή του μετρητή [83].

Τα πρωτόκολλα ARQ ωστόσο έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλη καθυστέρηση, κατανάλωση ενέργειας και κυρώσεις εύρους ζώνης λόγω της διαδικασίας αναμετάδοσης. Διάφορες παραλλαγές του πρωτοκόλλου ARQ έχουν αναπτυχθεί. Μεταξύ αυτών είναι και το υβριδικό ARQ (HARQ) το οποίο συνδυάζει τεχνικές FEC κωδικοποίησης με το πρωτόκολλο ARQ [84].

Άλλη πρακτική επανεκπομπής αναλύεται στο [85] χρησιμοποιώντας πρωτόκολλο Rateless Round Robin για πολύ ισχυρή εξασθένιση του διαύλου όπου και φαίνεται να προσφέρει αποτελεσματικό σχεδιασμό ελέγχου σφαλμάτων για πρακτικές εφαρμογές FSO.

### 3.10 Αναδρομολόγηση

Σε περίπτωση που σε μια συγκεκριμένη FSO σύνδεση υπάρξει απώλεια δεδομένων είτε λόγω ατμοσφαιρικών συνθηκών είτε για άλλο λόγο, τα δεδομένα δρομολογούνται εκ νέου μέσω άλλης διαθέσιμης υπάρχουσας ζεύξης είτε αυτή είναι FSO είτε RF. Στόχος είναι η αύξηση της διαθεσιμότητας και της αξιοπιστίας του συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται στο μεν φυσικό επίπεδο μέσω τεχνικών ATP (Acquisition, Tracking and Pointing) στο δε λογικό επίπεδο με χρήση



αλγορίθμων δρομολόγησης. Η αναδιαμόρφωση δυναμικής διαδρομής αποδεικνύεται πειραματικά στο [86].

Η αναδρομολόγηση μπορεί να γίνει είτε με αλγόριθμους προληπτικής δρομολόγησης όπου η τοπολογία και όλες οι διαθέσιμες διαδρομές είναι γνωστές εκ των προτέρων είτε με αλγόριθμους αντιδραστικής δρομολόγησης όπου νέες διαδρομές δημιουργούνται κατόπιν ζήτησης. Η προληπτική δρομολόγηση επιβαρύνει τα δίκτυα μεγάλου μεγέθους. Η αντιδραστική δρομολόγηση από την άλλη πλευρά εισάγει καθυστέρηση λόγω του χρόνου επεξεργασίας κατά την αναζήτηση διαδρομής. Υβριδικά συστήματα αποτελεί ο συνδυασμός των ανωτέρω όπου το δίκτυο χωρίζεται σε τμήματα και εφαρμόζεται προληπτική δρομολόγηση για κάθε τμήμα αυτού και αντιδραστική δρομολόγηση μεταξύ των τμημάτων.

Στο [87] μελετάται η αναδιαμόρφωση τοπολογίας δικτύου για ασύρματα δίκτυα 5G+ που βασίζονται σε FSO. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προτείνεται ο GMB αλγόριθμος ο οποίος παρέχει τη βέλτιστη τοπολογία για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Σε περιπτώσεις αποτυχίας σύνδεσης ή υψηλής κίνησης η απόδοση του δικτύου βελτιώνεται με χρήση αντιδραστικών αλγορίθμων.



## Κεφάλαιο 4: Κβαντική Φωτονική

Οι οπτικές επικοινωνίες παρουσιάζουν όλο και περισσότερο ενδιαφέρον στους ερευνητές και όχι άδικα, καθώς παρέχουν εξαιρετικές δυνατότητες τόσο για την ταχεία όσο και για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων.

Μια ιδιαίτερη κατηγορία οπτικών επικοινωνιών αποτελεί και η κβαντική φωτονική. Ο όρος αναφέρεται σε φωτονικά συστήματα μοναδικών φωτονίων όπου αξιοποιούνται κβαντικές ιδιότητες μοναδικών κβαντικών αντικειμένων, τα οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι τα φωτόνια. Συνεπώς η οπτική δέσμη παράγεται από μονοφωτονιακές πηγές με ζητούμενο κάθε παλμός να περιέχει το πολύ ένα φωτόνιο. Αυτό κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό για την αξιοποίηση των κβαντικών ιδιοτήτων και την παροχή αξιοπιστίας.

Η διαρκής πρόοδος της τεχνολογίας και η ανάπτυξη κβαντικών υπολογιστών λόγω της υπολογιστικής δύναμης που παρέχουν, θέτει σε κίνδυνο την κλασική κρυπτογραφία αλλά και τις συμβατικές μεθόδους διανομής κλειδιών κρυπτογράφησης. Ως εκ τούτου οι σύγχρονες μορφές κρυπτογραφίας με τα πρωτόκολλα διανομής κβαντικών κλειδιών (QKD) παρέχουν υποσχόμενες λύσεις για την ασφαλή επικοινωνία μεταξύ δύο μερών που επικοινωνούν και στηρίζονται στις θεμελιώδεις αρχές τις κβαντικής φυσικής.

Διάφορα πρωτόκολλα μετάδοσης κβαντικού κλειδιού έχουν αναπτυχθεί ανά καιρούς, μεταξύ αυτών τα BB84, B92, Decoy state BB84, SARG04, πρωτόκολλα που βασίζονται σε εμπλεκόμενα ζεύγη φωτονίων όπως E91, BBM92 και άλλα [88]. Από όλα τα παραπάνω το BB84 είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο και θα περιγραφεί στη συνέχεια.

### 4.1 Το πρωτόκολλο BB84

Στην πιο απλή εκδοχή του πρωτοκόλλου BB84, που αναπτύχθηκε από τους Bennett και Brassard, δύο διαφορετικές βάσεις ( $\oplus, \otimes$ ) επιλέγονται τυχαία για τη μετάδοση σε μία από τις τέσσερις διαφορετικές πολωτικές καταστάσεις οι οποίες είναι οι  $\{|0^\circ\rangle, 90^\circ\rangle, -45^\circ\rangle, +45^\circ\rangle\}$ . Ένας χρήστης γνωστός ως Alice προσπαθεί να επικοινωνήσει με έναν άλλο χρήστη γνωστό ως Bob παρουσία ενός λαθρακουστή γνωστού ως Eve. Τα βήματα για την υλοποίηση του πρωτοκόλλου φαίνονται παρακάτω [88].

#### 4.1.1 Μετάδοση κβαντικών ψηφίων

Το πρώτο βήμα για τη δημιουργία του κβαντικού κλειδιού είναι η μετάδοση των κβαντικών ψηφίων η οποία πραγματοποιείται σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα.

1. Η Alice επιλέγει τυχαία μια τιμή bit (0, 1) και μια βάση ( $\oplus, \otimes$ ).

2. Εν συνεχεία η Alice εκτελεί διαμόρφωση πόλωσης και προετοιμάζει τα κβαντικά bit μοναδικού φωτονίου που βρίσκονται σε οποιαδήποτε από τις τέσσερις κβαντικές καταστάσεις τα οποία και στέλνει στον Bob μέσω του κβαντικού καναλιού.
3. Ο Bob επιλέγει τυχαία μία από τις δύο βάσεις ( $\oplus, \otimes$ ). Οι μετρήσεις του Bob καθώς και η βάση που επέλεξε καταγράφονται.

#### 4.1.2 Δημιουργία κβαντικού κλειδιού

Αφού έχει πραγματοποιηθεί η αρχική μετάδοση των κβαντικών bit ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα για τον έλεγχο της ασφάλειας του διαύλου και την δημιουργία του μυστικού κλειδιού ως εξής:

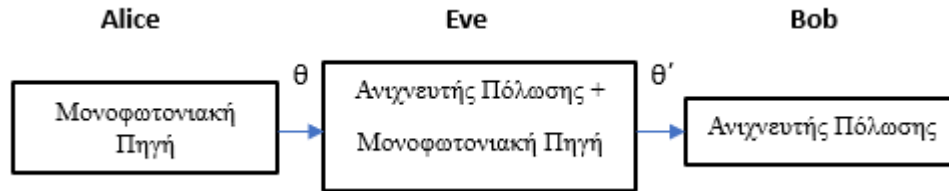
1. Για κάθε bit ο Bob αποκαλύπτει μέσω του δημόσιου καναλιού την τιμή της βάσης που χρησιμοποίησε.
2. Η Alice συγκρίνει τις επιλογές του Bob με τις δικές τις και εντοπίζει το υποσύνολο εκείνο στις οποίες έχουν επιλέξει την ίδια βάση.
3. Εν συνεχεία η Alice αναφέρει μέσω του δημόσιου διαύλου σε ποιες χρονικές στιγμές υπήρξε συμφωνία βάσεων. Τα υπόλοιπα bit απορρίπτονται.
4. Ο Bob διαμοιράζει ένα τυχαίο υποσύνολο των διυλισμένων ψηφίων στην Alice μέσω του δημόσιου διαύλου.
5. Η Alice συγκρίνει με τα δικά της και προχωρά σε ανάλυση σφαλμάτων

$$QBER = \frac{(Number\_of\_incorrect\_bits)}{(Total\_shared\_bits)} \quad (4.1)$$

6. Εάν η Eve επιχειρήσει να ακούσει στο κβαντικό κανάλι παρεμβάλλοντας στη ζεύξη, όπως φαίνεται στην αναπαράσταση θα επιλέξει μια τυχαία βάση μέτρησης και θα στείλει στον Bob ένα φωτόνιο με την ίδια κατάσταση πόλωσης που έλαβε. Θα υπάρξει εισαγωγή πρόσθετων σφαλμάτων και το QBER θα αυξηθεί.

Εάν η Eve, κατά τύχη επιλέξει την ίδια βάση με την Alice, ο Bob λαμβάνει την κατάσταση της Alice αμετάβλητη. Ωστόσο, εάν χρησιμοποιεί λανθασμένη βάση, η μέτρησή της θα κατέληγε να αλλάξει την κβαντική κατάσταση. Δεδομένου ότι ο Bob έχει ίσες πιθανότητες να μετρήσει οποιοδήποτε από τα αποτελέσματα, η παρουσία της Eve θα οδηγήσει

25% τουλάχιστον των bit κλειδιού να είναι λανθασμένα, αυξάνοντας έτσι το QBER κατά 25%. Συνεπώς εάν το ποσοστό σφαλμάτων είναι <25%, η Alice συμπεραίνει πως δεν έχει συμβεί υποκλοπή και πως το κβαντικό κανάλι είναι ασφαλές.



Εικόνα 27: Αναπαράσταση της Μετάδοσης

7. Τα εναπομείναντα ψηφία χρησιμοποιούνται ως κλειδί.

#### 4.1.3 Διόρθωση σφαλμάτων

Η διάδοση στο δίαυλο προκαλεί σφάλματα στο τελικό κλειδί είτε λόγω ατελειών των συστημάτων είτε λόγω ατμοσφαιρικών αναταράξεων και θορύβου περιβάλλοντος. Αυτά τα σφάλματα πρέπει να διορθωθούν προκειμένου το τελικό μυστικό κλειδί μεταξύ των δύο μερών να είναι ίδιο. Η διαδικασία θα πρέπει να μπορεί να γίνεται από την πλευρά του δέκτη δίχως ο πομπός να αποκαλύψει bit στο δημόσιο δίαυλο.

Διάφορα πρωτόκολλα διόρθωσης σφαλμάτων έχουν αναπτυχθεί για αυτό το σκοπό [89]. Μια άλλη διαδικασία γνωστή ως ενίσχυση απορρήτου [90] εφαρμόζεται κατόπιν της διόρθωσης σφαλμάτων ώστε να μειωθούν οι πληροφορίες που διέρρευαν στην Eve.

## 4.2 Μετάδοση κβαντικού κλειδιού σε FSO

Η διαρκής ανάπτυξη των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών ενθαρρύνει τον σχεδιασμό συστημάτων επικοινωνίας μετάδοσης κβαντικού κλειδιού ελευθέρου χώρου (FSQKD). Η επιτυχία του FSQKD μπορεί να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο για την ενεργοποίηση μετάδοσης δεδομένων υψηλής ταχύτητας αλλά και στη μείωση του κόστους και της πολυπλοκότητας των συστημάτων.

Το πρόβλημα για τη μετάδοση του κβαντικού κλειδιού από οπτικές ίνες υφίσταται στον περιορισμό των αποστάσεων που αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά καθώς και στις περιπτώσεις απομακρυσμένων περιοχών. Έτσι λοιπόν ενώ τα οφέλη στην ασφάλεια των πληροφοριών είναι τεράστια υφίστανται σημαντικοί περιορισμοί.

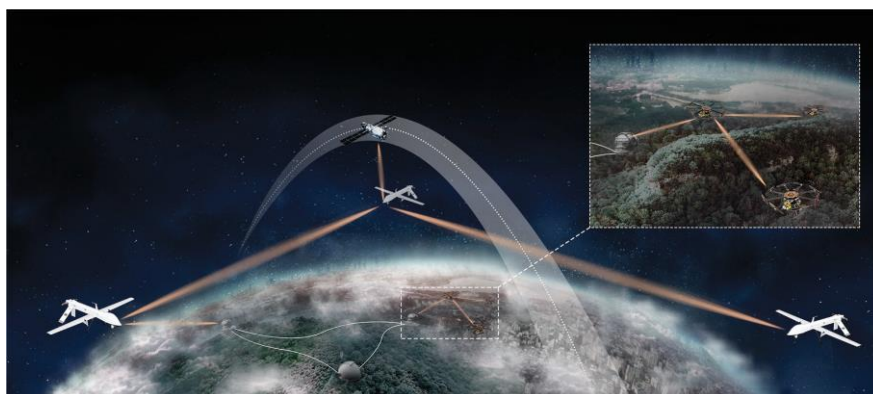
Από την άλλη πλευρά η μετάδοση στον ελεύθερο χώρο επιβαρύνεται από την παρουσία της ατμόσφαιρας και μάλιστα η επίδραση της ατμόσφαιρας είναι πολύ πιο κρίσιμη στο επίπεδο της δέσμης μοναδικών φωτονίων.

Για να είναι αποτελεσματική μια τέτοια ζεύξη θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη οι παράμετροι σχεδιασμού. Απαραίτητη δε προϋπόθεση για τη δημιουργία και διατήρηση της ζεύξης είναι η διατήρηση οπτικής επαφής πομπού και δέκτη καθ' όλη τη διάρκεια της μετάδοσης. Αρκετές μελέτες έχουν ήδη πραγματοποιηθεί για την υλοποίηση συστημάτων ελεύθερου χώρου [91], [92]. Επιθυμητό σε κάθε περίπτωση είναι να υλοποιηθεί ένα σύστημα το οποίο να είναι ικανό για QKD σε όλες τις περιπτώσεις που οι οπτικές ίνες καθιστούν το έργο αυτό δύσκολο.

Κινούμενοι προς αυτή την κατεύθυνση οι ερευνητές στο [93] σχεδίασαν ένα σύστημα FSQKD στο οποίο τα φωτόνια μεταδίδονται μεταξύ δύο διαφορετικών τηλεσκοπίων σε απόσταση 2 km. Για να το επιτύχουν αυτό ανέπτυξαν ένα μοντέλο PAT (Pointing, Acquisition, Tracking) το οποίο αντιμετωπίζει τόσο τα σφάλματα κατάδειξης όσο και τις ατμοσφαιρικές διαταραχές. Το μοντέλο αυτό αξιοποιεί προηγμένους αλγόριθμους παρακολούθησης, προσαρμοστικά οπτικά και ισχυρούς μηχανισμούς ελέγχου.

Η δυνατότητα τοποθέτησης του παραπάνω συστήματος σε επίγειους σταθμούς και σε UAV αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς τη βελτιστοποίηση των QKD συστημάτων. Μάλιστα η εισαγωγή παραμορφώσιμων κατόπτρων, σύμφωνα με τους ερευνητές, μπορεί να επεκτείνει την εμβέλεια ακόμη και στα 10 km.

Παρότι η μετάδοση κβαντικού κλειδιού ελεύθερου χώρου είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την παροχή ασφαλούς μετάδοσης δεδομένων, μένει να αποδειχθεί η χρησιμότητά της σε ευρεία κλίμακα καθόσον υπόκειται στις δυσμενείς συνθήκες της παρουσίας της ατμόσφαιρας και οι οποίες στα πλαίσια του μοναδικού φωτονίου έχουν πολύ μεγαλύτερη βαρύτητα. Μια λύση θα ήταν η ανάπτυξη ενός δικτύου με ενδιάμεσους κόμβους όπως φαίνεται στην Εικόνα 28. Όσο περισσότεροι οι κόμβοι τόσο πιο πυκνοί θα είναι και τόσο μικρότερες οι απαιτήσεις των συστημάτων σε εμβέλεια.



Εικόνα 28: Αναπαράσταση δικτύου επίγειων σταθμών, UAV και δορυφόρων [94]

## Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση Απόδοσης Διαύλου

Με την μέχρι τώρα ανάλυση έγινε αντιληπτή η σημασία που έχει η σωστή μελέτη της επίδρασης της ατμόσφαιρας προκειμένου σε ένα σύστημα FSO να μπορούν να εισαχθούν οι κατάλληλοι παράμετροι σχεδίασης.

Για την επιλογή του σημείου στο οποίο θα εγκατασταθεί ένας σταθμός πρέπει να λαμβάνονται υπόψη αρκετοί παράγοντες από τον σχεδιαστή τόσο από οικονομικής όσο και από τεχνικής απόψεως. Όσον αφορά το τεχνικό μέρος απαιτείται η προσέγγιση να είναι αφενός όσο το δυνατόν πιο απλή υπολογιστικά και αφετέρου όσο το δυνατόν πιο ακριβής. Ως εκ τούτου η εφαρμογή πολύπλοκων αναλυτικών σχέσεων για όλους τους παράγοντες που εισάγουν διαλείψεις και για όλες τις πιθανές τοποθεσίες εγκατάστασης επίγειου σταθμού καθίσταται αναποτελεσματική.

Στο παρόν Κεφάλαιο θα γίνει προσπάθεια μέσα από απλές σχέσεις και υπολογισμούς να αξιολογηθεί κατά πόσο μια θέση προσφέρεται για εγκατάσταση OGS αλλά και να προσδιοριστεί η βελτίωση που παρέχεται εφαρμόζοντας την τεχνική διαφορισμού χώρου.

### 5.1 Μοντέλο Προσομοίωσης και Στόχοι Προσομοίωσης

Από τους παράγοντες που μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο 2 την μεγαλύτερη επίπτωση βάση αρκετών ερευνών φαίνεται να έχει η παρουσία των νεφών στην LOS καθώς και οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις.

Επιπλέον όπως αναλύθηκε στην ενότητα 3.2 οι τεχνικές διαφορισμού χώρου, όπου διαφορετικοί σταθμοί λειτουργούν συνδυαστικά, αποδίδουν μεγαλύτερες πιθανότητες καθαρής από νέφη LOS (CFLOS). Η σύνδεση των διαφόρων σταθμών μεταξύ τους μπορεί να υλοποιηθεί με επίγειο δίκτυο κορμού οπτικών ινών, το οποίο μπορεί να διαχειριστεί αποτελεσματικά τον όγκο πληροφοριών που παρέχονται από τους οπτικούς δορυφορικούς σταθμούς.

Στην παρούσα προσομοίωση θα αξιοποιηθούν ως μοντέλο οι απλοποιημένες εκφράσεις που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3 και συγκεκριμένα στην ενότητα 3.2 και οι οποίες αναπτύχθηκαν στο [40] από τους Lygas et al. με κεντρικούς στόχους τους παρακάτω:

- Επιλογή Θέσης: Σε διάφορα σημεία στην Ευρώπη τίθεται υποθετικός επίγειος Σταθμός οπτικής συχνότητας. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχολιάζεται η καταλληλότητα της θέσης και εκρέουν συμπεράσματα για τον τρόπο που εξυπηρετεί καλύτερα την επιλογή μιας θέσης.
- Αξιοποίηση Τεχνικής Διαφορισμού Χώρου: Για την περιοχή των Βαλκανίων θεωρούνται υπάρχοντες OGS με μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη των 500 km. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης

εξάγονται συμπέρασμα για το κέρδος που παρέχεται από τη συνδυαστική δράση όλων των σταθμών, σε σχέση με την ανεξάρτητη δράση κάθε ενός από αυτούς.

### 5.1.1 Ανάλυση Μοντέλου και παραδοχές

Το μοντέλο βασίζεται στην αξιοποίηση της ακτίνας συνοχής,  $r_0$  (σχέση 2.24), για την αξιολόγηση του μεγέθους των ατμοσφαιρικών αναταράξεων και του CFLOS (σχέση 3.4), για την εκτίμηση παρουσίας υγρού στοιχείου στην LOS επίγειου σταθμού και δορυφόρου.

Για τον υπολογισμό της γωνίας ανύψωσης των επιμέρους επίγειων σταθμών θεωρείται γεωγραφικό μήκος του ίχνος GEO δορυφόρου 19.2° Ανατολικά. Οι σχέσεις (2.24α) και (3.4) που θα χρησιμοποιηθούν φαίνονται και παρακάτω:

$$r_0 = \left( 0.423k^2 \sec \zeta \int_{h_0}^Z C_n^2(h) dh \right)^{-3/5} \quad (m) \quad (2.24\alpha)$$

$$CFLOS(\theta, h) = \begin{cases} 1 - P_{CLW}(\theta) \cdot e^{\alpha(h-1)^d} & , h > 1km \\ 1 - P_{CLW}(\theta) & , h \leq 1km \end{cases} \quad (3.4)$$

Η γωνία ανύψωσης θα προκύψει από την θεωρία των δορυφορικών επικοινωνιών κατόπιν εφαρμογής των παρακάτω σχέσεων:

$$\varphi_\alpha = \arctan \left( \frac{\cos \varphi_\Gamma - \frac{R_\Gamma}{R_\Gamma + h}}{\sin \varphi_\Gamma} \right) \quad (5.1)$$

Όπου,

$$\varphi_\Gamma = \arccos \left[ \cos(\theta_e) \cos(\varphi_{es}) \right] \quad (5.2)$$

$$\varphi_{es} = |\varphi_e - \varphi_s| \quad (5.3)$$

και επιπλέον



$\theta_e$  = το γεωγραφικό πλάτος τους επίγειου σταθμού

$\varphi_e$  = το γεωγραφικό μήκος του επίγειου σταθμού

$\varphi_s$  = το γεωγραφικό μήκος του ίχνους του δορυφόρου

## 5.2 Υλοποίηση των σεναρίων

Για την υλοποίηση των σεναρίων αναπτύχθηκε κώδικας σε Python ο οποίος υπολογίζει το  $r_0$  και το CFLOS για τις πιθανές τοποθεσίες που μελετώνται κάθε φορά. Επιπρόσθετα για την εφαρμογή της τεχνικής διαφορισμού χώρου δύναται με τον κώδικα να υπολογιστεί η συγκεντρωτική CFLOS πιθανότητα για OGSN σύστημα.

Στην ενότητα 5.2.1 τα σημεία επιλέγονται τυχαία και σε όλη την έκταση του χάρτη. Αυτό γίνεται με σκοπό να ανευρεθούν τυχόν κανόνες επιλογής οι οποίοι θα προσφέρουν τη δυνατότητα να επιλεγούν στην ενότητα 5.2.2 τα πλέον κατάλληλα σημεία.

### 5.2.1 Μελέτη Διαφόρων σημείων στην Ευρώπη

Επιλέγονται τα σημεία που απεικονίζονται στο χάρτη και τα οποία επιλέχθηκαν τυχαία ώστε να καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης για να είναι δυνατή η παρατήρηση των παραγόντων εκείνων που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα μέσω της προσομοίωσης.

Δεδομένου ότι το υψόμετρο εν γένη επηρεάζει το  $r_0$  αναμένουμε σε χαμηλά υψόμετρα μειωμένο το δείκτη αυτό ενώ το αντίθετο αναμένουμε σε υψηλά υψόμετρα ιδίως άνω των 1000 m. Επιπλέον αναμένουμε χαμηλότερο CFLOS σε περιοχές όπου παρατηρούνται υψηλά ποσοστά βροχόπτωσης. Αυτό διαισθητικά γίνεται αντιληπτό καθώς όσο πλησιάζουμε στον ισημερινό τόσο πιο θερμό γίνεται το κλίμα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 11 κατά φθίνουσα σειρά ως προς το CFLOS.



Εικόνα 29: Διάφορα σημεία στην Ευρώπη που μελετήθηκαν μέσω της προσομοίωσης

Πίνακας 11: Αποτελέσματα προσομοίωσης για τα σημεία που φαίνονται στην Εικόνα 29

Χώρα	Γεωγρ. Πλάτος (°)	Γεωγρ. Μήκος (°)	Υψόμετρο (m)	Γωνία Ανύψωσης (°)	$r_0$ (m)	CFLOS (%)
Μάλτα	35.85	14.42	200	48.08	0.197	79.23
Ελλάδα	37.39	22.57	500	46.50	0.241	72.52
Γαλλία (Μονπελιέ)	43.65	2.89	1080	37.06	0.319	61.96
Κροατία (Μπράτς)	43.29	16.65	650	40.00	0.248	61.32

Χώρα	Γεωγρ. Πλάτος (°)	Γεωγρ. Μήκος (°)	Υψόμετρο (m)	Γωνία Ανύψωσης (°)	r <sub>0</sub> (m)	CFLOS (%)
Ισπανία	42.01	-8.00	875	34.18	0.267	61.20
Ιταλία (Βερόνα)	45.59	11.09	1080	36.9	0.318	60.22
Ιταλία (Τορίνο)	44.94	7.30	950	36.89	0.292	59.59
Γαλλία (Λυών)	46.66	4.60	270	34.46	0.176	48.81
Τσεχία	48.99	13.64	1030	33.74	0.227	47.21
Νορβηγία	59.96	10.83	350	21.61	0.135	46.03
Σουηδία	61.87	17.19	40	19.94	0.110	45.78
Ρουμανία	45.08	26.51	260	37.57	0.182	43.89
Φινλανδία	60.27	25.16	40	21.46	0.115	39.82
Πολωνία	51.89	20.39	155	30.63	0.152	35.71

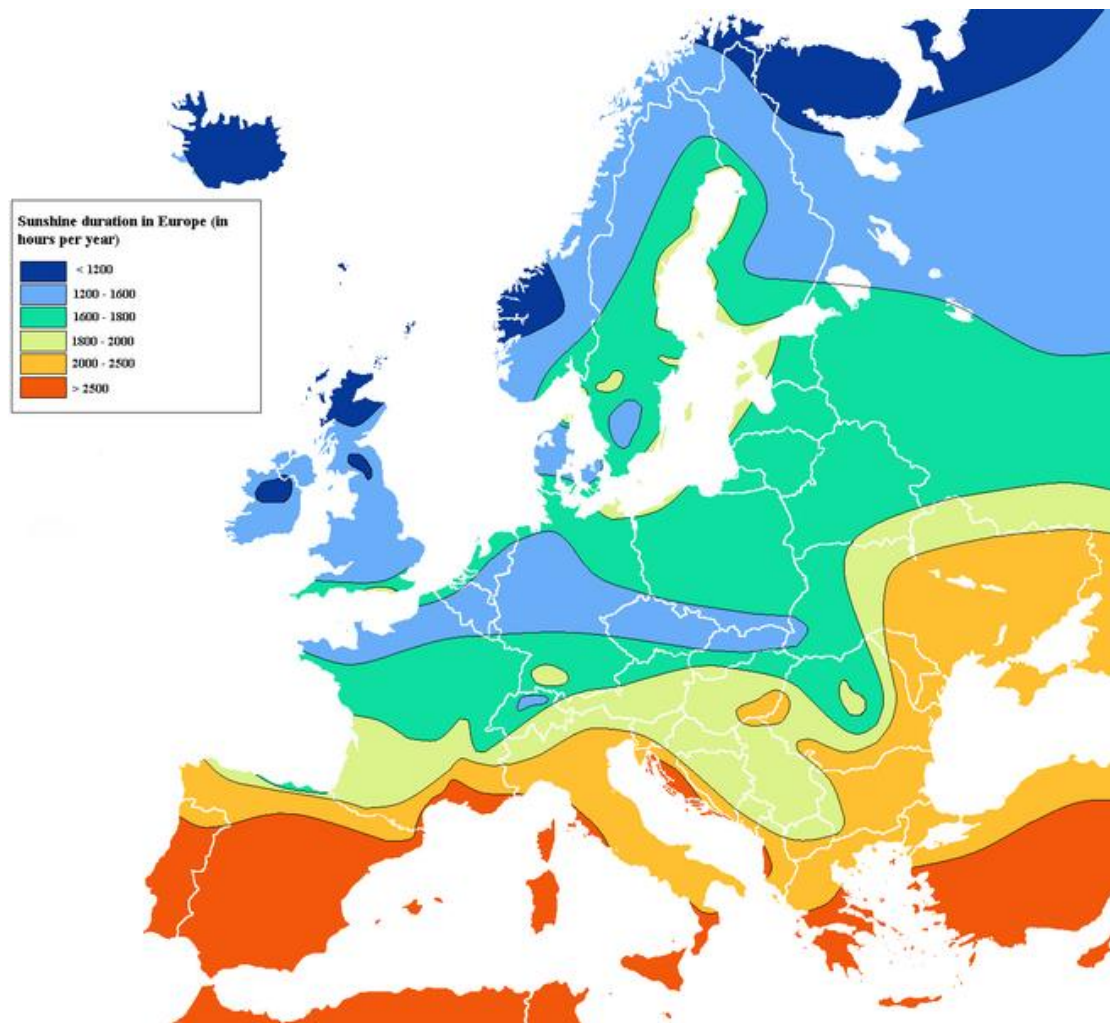
Ως προς το r<sub>0</sub>, παρατηρούμε την εξάρτηση από το υψόμετρο και τη γωνία ανύψωσης. Όσο μειώνεται η γωνία ανύψωσης αλλά και το υψόμετρο οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις αυξάνονται. Αυτό είναι λογικό καθώς η ακτίνα ταξιδεύει για μεγαλύτερο διάστημα σε χαμηλά υψόμετρα όπου οι αναταράξεις είναι πιο ισχυρές.

Στην Φινλανδία για παράδειγμα όπου το υψόμετρο είναι μόλις 40m και η γωνία ανύψωσης 21.46° ο δείκτης αναταράξεων φαίνεται να είναι υπερβολικά χαμηλός. Επίσης από την Γαλλία (Λυών) και τη Ρουμανία παρατηρούμε ότι ενώ η πρώτη βρίσκεται σε ελαφρώς υψηλότερο υψόμετρο, η δεύτερη υπερτερεί στο δείκτη αναταράξεων λόγω μεγαλύτερης γωνίας ανύψωσης. Από τις Γαλλία (Μονπελιέ) και Ιταλία (Βερόνα) παρατηρούμε ότι έχουν το ίδιο υψόμετρο και παρόμοια γωνία ανύψωσης οπότε έχουν και παραπλήσιο δείκτη αναταράξεων.

Ως προς την πιθανότητα CFLOS φαίνεται να εξαρτάται αρκετά από τις κλιματικές συνθήκες της ίδια της περιοχής που βρίσκεται ο σταθμός αλλά και των περιοχών που παρεμβάλλονται μεταξύ του επίγειου σταθμού και του δορυφόρου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση που ο δορυφόρος είναι GEO οπότε βρίσκεται πάνω από τον ισημερινό παρατηρούμε ότι οι πιο βόρειες χώρες της Ευρώπης μειονεκτούν σημαντικά έναντι των πιο Νότιων περιοχών.

Τα νέφη σχηματίζονται σε διάφορα υψόμετρα και η διέλευση της ακτίνας από περιοχές που ευνοούν λόγω ανάγλυφου το σχηματισμό νεφών έχει ως συνέπεια την μείωση της πιθανότητας η LOS να είναι καθαρή από νέφη. Επιπλέον παρατηρούμε ότι μεταξύ των Νότιων περιοχών της Ευρώπης οι περιοχές με την μεγαλύτερη ηλιοφάνεια υπερτερούν έναντι αυτών που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη συχνότητα βροχοπτώσεων. Φυσικά σημαντικό ρόλο έχει πάντα και η ευθεία απόσταση σταθμού – δορυφόρου.

Για την εύρεση των σημείων εγκατάστασης OGS είναι συνεπώς συνετή η μελέτη μετεωρολογικών δεδομένων ποσοστών ηλιοφάνειας ανά περιοχή. Μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να βασιστεί στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 30: Ώρες ηλιοφάνειας στην περιοχή της Ευρώπης [95]

Τα χαμηλά ποσοστά CFLOS ωστόσο μπορούν να αντιμετωπιστούν με τεχνικές διαφορισμού όπως είναι και η τεχνική διαφορισμού χώρου η οποία θα εφαρμοστεί στην επόμενη ενότητα για κάλυψη της περιοχής των Βαλκανίων.

### 5.2.2 Εφαρμογή Τεχνικών Διαφορισμού για κάλυψη των Βαλκανίων

Στην παρούσα ενότητα ελέγχονται οι δυνατότητες που προσφέρονται από την τεχνική διαφορισμού θέσης για την κάλυψη της περιοχής των Βαλκανίων.

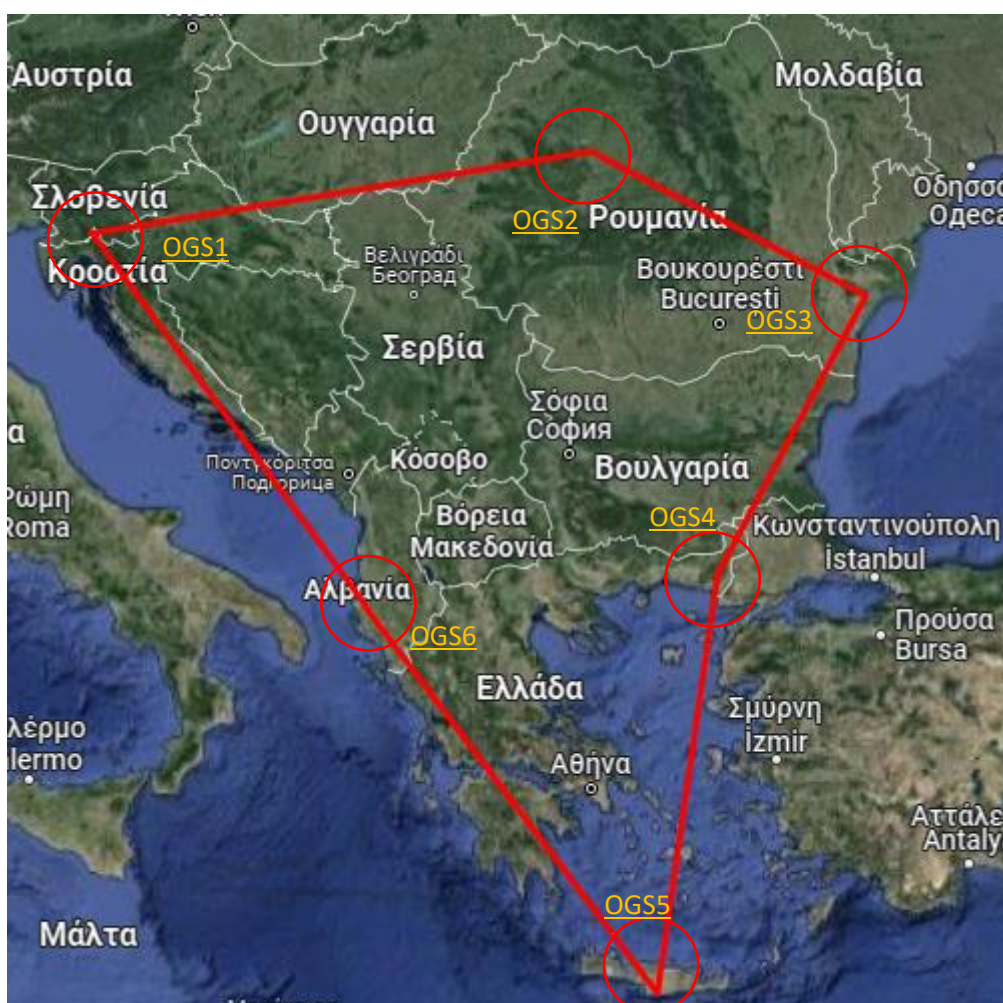
Οι γενικές παραδοχές και παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν αναλύονται στη συνέχεια για δεδομένο δορυφόρο GEO, το γεωγραφικό μήκος του ίχνους του οποίου είναι και πάλι 19,2° Ανατολικά. Το κατώφλι για το  $r_0$  τίθεται στα 0,17 m ενώ για το CFLOS το κατώφλι τίθεται στο 50%. Κάτω από αυτές τις τιμές οι σταθμοί δεν μπορούν να επιλεγούν.

Για την εύρεση των πιθανών τοποθεσιών επιλέχθηκαν επιφάνειες - ομάδες πιθανής εγκατάστασης και διάφορα σημεία εντός της ομάδας, τα οποία αφενός τηρούν την χιλιομετρική απόσταση των 500 km και αφετέρου βρίσκονται σε

περιοχές με τη δυνατόν μεγαλύτερη ωριαία ηλιοφάνεια ανά έτος. Από κάθε ομάδα εν τέλη χρησιμοποιείται το πολύ ένας επίγειος σταθμός. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το  $\tau_0$  εξαρτάται σημαντικά από το υψόμετρο επιλέγονται κατά προτεραιότητα σημεία με υψηλά υψόμετρα. Στην παρακάτω εικόνα αποτυπώνεται η ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος.

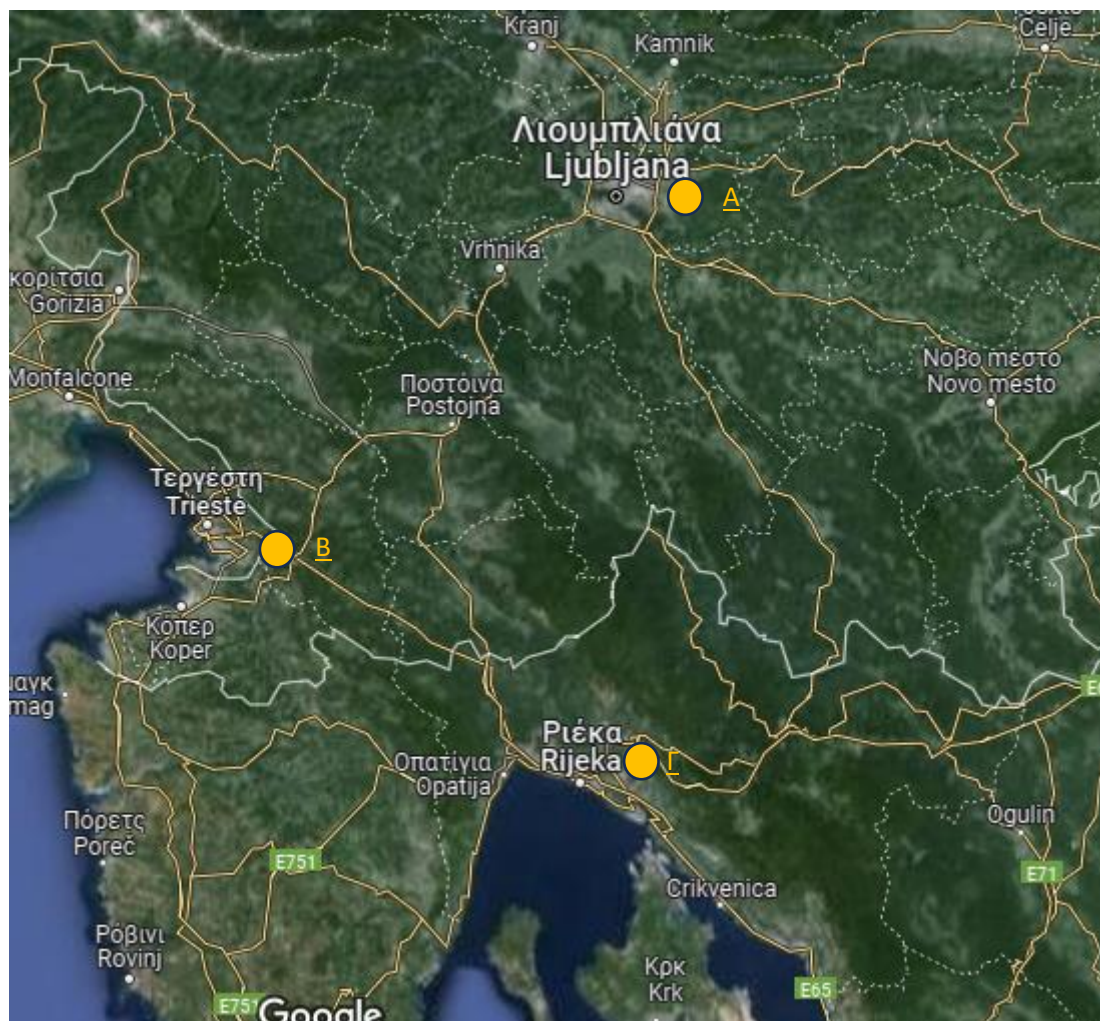
Για την εφαρμογή του μοντέλου αξιοποιούνται τα παρακάτω:

- Οι επίγειοι σταθμοί θεωρούνται μεταξύ τους ασυσχέτιστοι καθώς βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη των 500 km.
- Το μήκος κύματος είναι 1550 nm.
- Η rms ταχύτητα του ανέμου στο επίπεδο του εδάφους είναι 26.4 m/s
- Η παράμετρος της δομής του δείκτη διάθλασης στην επιφάνεια του εδάφους,  $A_0$  είναι  $1.7 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ .
- Το ύψος των σταθμών από το έδαφος είναι 50 m.
- Το ενεργό μήκος αναταράξεων είναι 10.000 m.



Εικόνα 31: Περιοχή Ενδιαφέροντος και ευρύτερες περιοχές των OSG

Παρακάτω παρατίθενται στο χάρτη οι πιθανές θέσεις για κάθε ένα από τα OGS της Εικόνας 31 καθώς και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε πίνακα. Κατόπιν σχολιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε επιμέρους περιοχή.

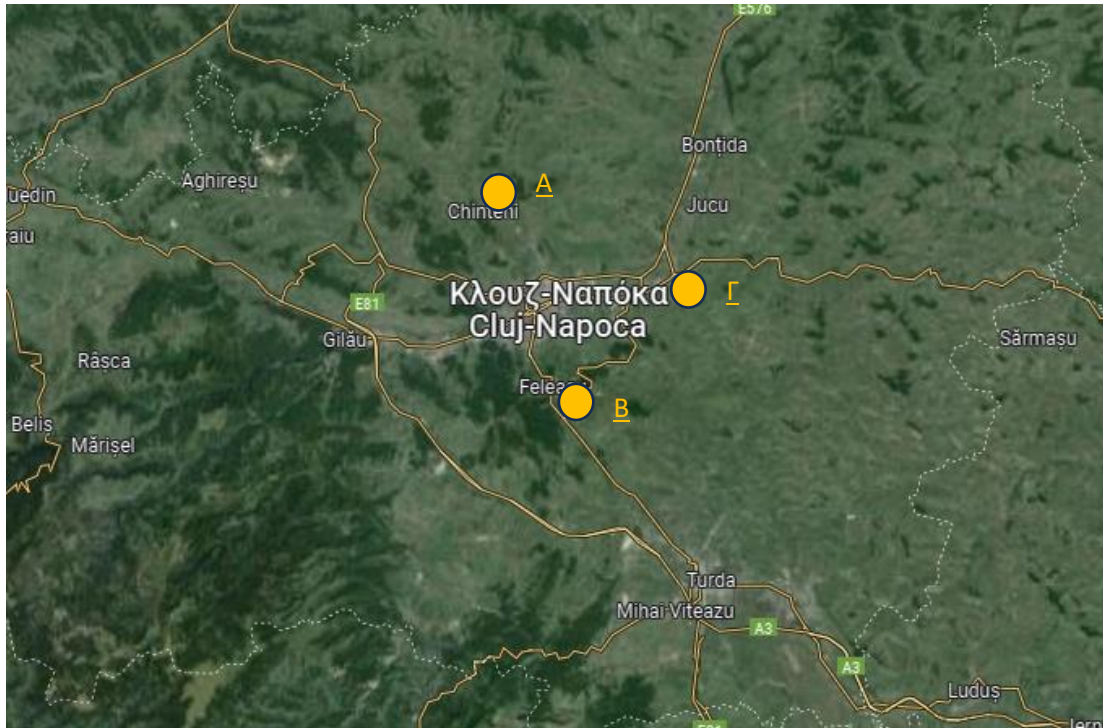


Εικόνα 32: Εναλλακτικές θέσεις για το OGS1

Πίνακας 12: Αποτελέσματα προσομοίωσης των εναλλακτικών θέσεων για το OGS1

Σημείο	Γεωγρ. Πλάτος (°)	Γεωγρ. Μήκος (°)	Υψόμετρο (m)	Γωνία Ανύψωσης (°)	$r_0$ (m)	CFLOS (%)
OGS1_A	46.05	14.64	500	36.82	0.214	52.26
OGS1_B	45.61	13.87	440	37.23	0.207	58.19
<b>OGS1_Γ</b>	<b>45.34</b>	<b>14.55</b>	<b>430</b>	<b>37.59</b>	<b>0.206</b>	<b>59.12</b>

Για το OGS1 το  $r_0$  είναι πολύ κοντά και για τις τρεις θέσεις επομένως επιλέγεται η καλύτερη θέση ως προς το CFLOS η οποία είναι η **OGS1\_Γ**.



Εικόνα 33: Εναλλακτικές θέσεις για το OGS2

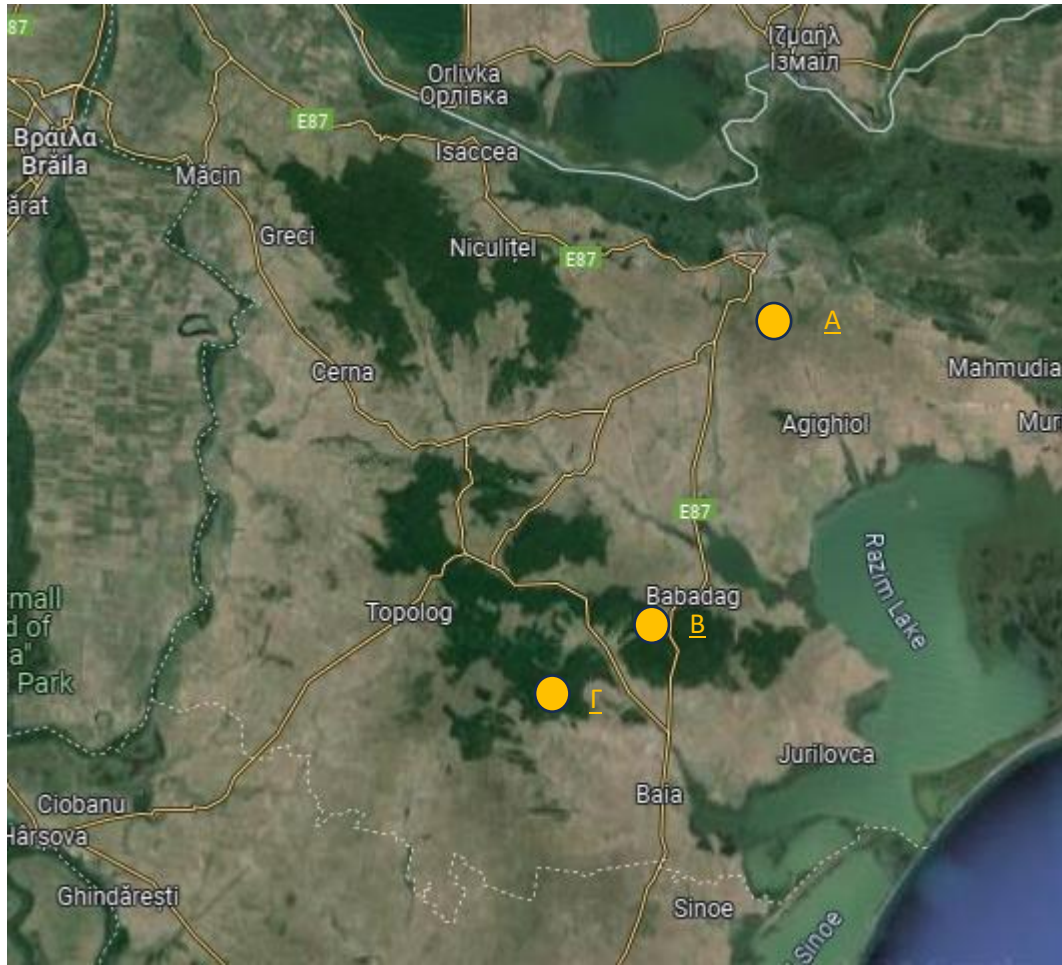
Πίνακας 13: Αποτελέσματα προσομοίωσης των εναλλακτικών θέσεων για το OGS2

Σημείο	Γεωγρ. Πλάτος (°)	Γεωγρ. Μήκος (°)	Υψόμετρο (m)	Γωνία Ανύψωσης (°)	$r_0$ (m)	CFLOS (%)
<b>OGS2 A</b>	<b>46.87</b>	<b>23.55</b>	<b>650</b>	<b>35.94</b>	<b>0.235</b>	<b>40.04</b>
OGS2 B	46.70	23.65	760	36.12	0.255	38.73
OGS2 Γ	46.79	23.78	440	36.02	0.203	38.69

Για το OGS2 το  $r_0$  είναι κοντά για τις θέσεις A,B ενώ μειώνεται περισσότερο στη θέση Γ. Επομένως από τις θέσεις A,B επιλέγεται τελικά η καλύτερη ως προς το CFLOS η οποία είναι η **OGS2 A**.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη ομάδα σύμφωνα με την Εικόνα 30 δεν είναι κατάλληλη λόγω χαμηλής ωριαίας ηλιοφάνειας ανά έτος ωστόσο επιλέγεται λόγω του περιορισμού της χιλιομετρικής απόστασης από σταθμό σε σταθμό ώστε οι πιθανότητες να είναι ασυσχέτιστες.

Το συμπέρασμα που προκύπτει επιβεβαιώνει την αρχική θεώρηση, καθώς παρότι ο δείκτης αναταράξεων είναι υψηλότερος του κατωφλίου, το CFLOS είναι αρκετά χαμηλό.



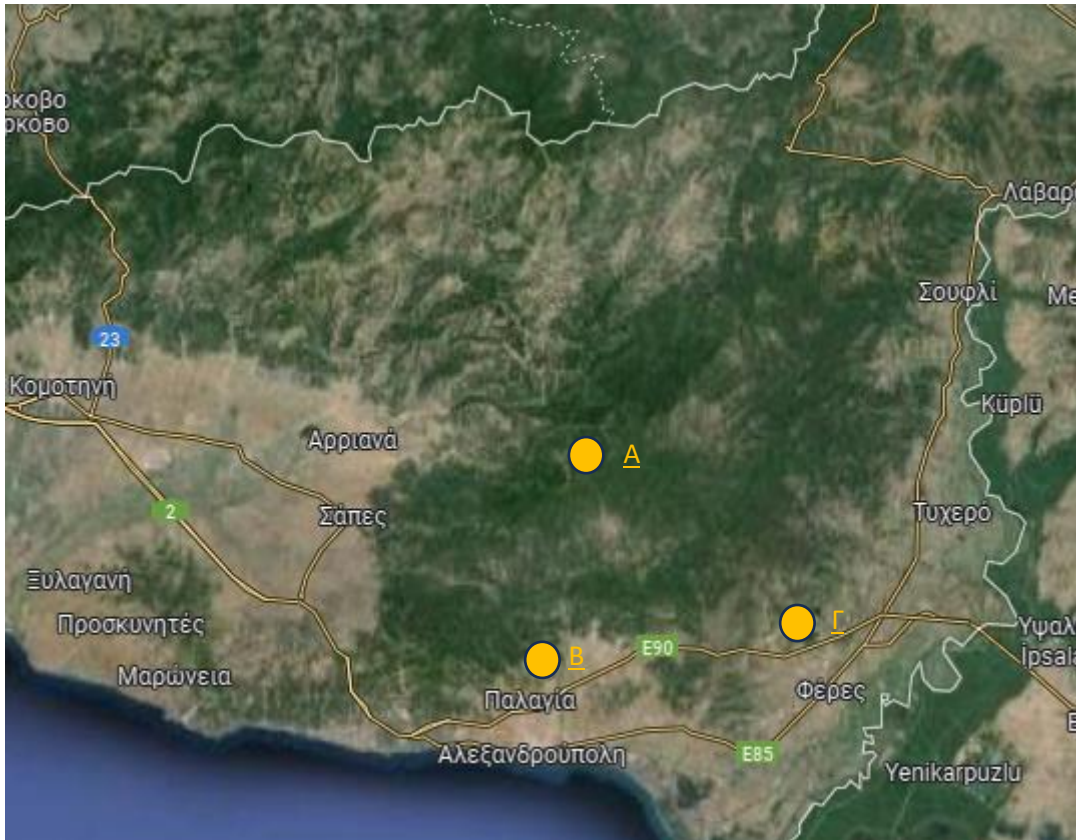
Εικόνα 34: Εναλλακτικές θέσεις για το OGS3

Πίνακας 14: Αποτελέσματα προσομοίωσης των εναλλακτικών θέσεων για το OGS3

Σημείο	Γεωγρ. Πλάτος (°)	Γεωγρ. Μήκος (°)	Υψόμετρο (m)	Γωνία Ανύψωσης (°)	$r_0$ (m)	CFLOS (%)
<b>OGS3 A</b>	<b>45.11</b>	<b>28.82</b>	<b>170</b>	<b>37.17</b>	<b>0.170</b>	<b>50.06</b>
OGS3 B	44.86	28.67	250	37.47	0.181	49.43
OGS3 Γ	44.81	28.56	230	37.54	0.178	48.90

Για το OGS3, οι θέσεις είναι αρκετά κοντά ως προς το  $r_0$ , οπότε η επιλογή γίνεται ως προς το CFLOS και τελικά επιλέγεται το **OGS3 A**.





Εικόνα 35: Εναλλακτικές θέσεις για το OGS4

Πίνακας 15: Αποτελέσματα προσομοίωσης των εναλλακτικών θέσεων για το OGS4

Σημείο	Γεωγρ. Πλάτος (°)	Γεωγρ. Μήκος (°)	Υψόμετρο (m)	Γωνία Ανύψωσης (°)	$r_0$ (m)	CFLOS (%)
<b>OGS4 A</b>	<b>41.06</b>	<b>25.90</b>	<b>710</b>	<b>42.04</b>	<b>0.265</b>	<b>62.53</b>
OGS4 B	40.91	25.89	140	42.21	0.177	64.37
OGS4 Γ	40.93	26.15	140	42.15	0.178	64.88

Για το OGS4, το  $r_0$ , είναι σημαντικά καλύτερο στην A θέση ενώ μειώνεται σημαντικά στις θέσεις B,Γ. Επομένως η θέση που επιλέγεται είναι η **OGS4 A**.

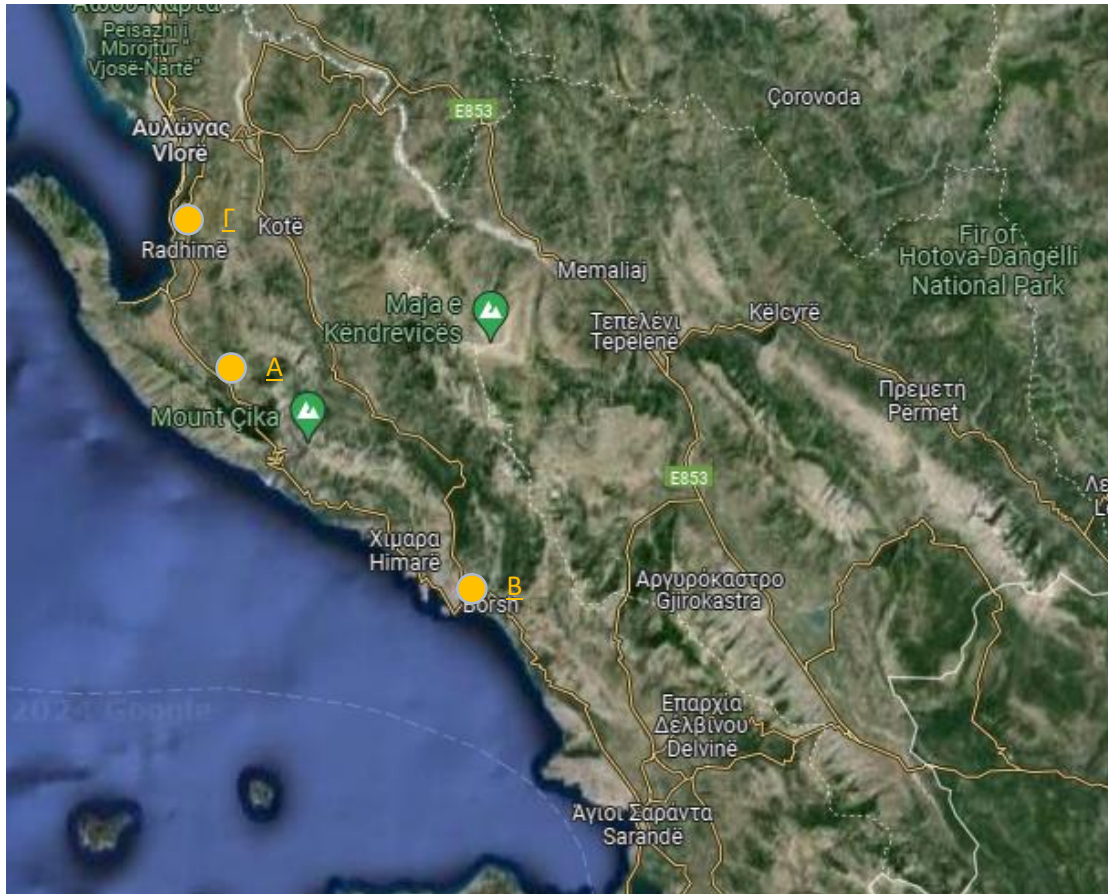


Εικόνα 36:Εναλλακτικές θέσεις για το OGS5

Πίνακας 16: Αποτελέσματα προσομοίωσης των εναλλακτικών θέσεων για το OGS5

Σημείο	Γεωγρ. Πλάτος (°)	Γεωγρ. Μήκος (°)	Υψόμετρο (m)	Γωνία Ανύψωσης (°)	$r_0$ (m)	CFLOS (%)
OGS5_A	35.30	24.50	800	48.62	0.302	76.23
<b>OGS5_B</b>	<b>35.06</b>	<b>25.83</b>	<b>750</b>	<b>48.66</b>	<b>0.292</b>	<b>78.74</b>
OGS5_Γ	35.47	24.06	230	48.49	0.202	75.41

Για το OGS5, το  $r_0$ , είναι εμφανώς καλύτερο στις θέσεις A,B επομένως επιλέγεται λόγω καλύτερου CFLOS η θέση **OGS5 B**.



Εικόνα 37: Εναλλακτικές θέσεις για το OGS6

Πίνακας 17: Αποτελέσματα προσομοίωσης των εναλλακτικών θέσεων για το OGS6

Σημείο	Γεωγρ. Πλάτος (°)	Γεωγρ. Μήκος (°)	Υψόμετρο (m)	Γωνία Ανύψωσης (°)	$r_0$ (m)	CFLOS (%)
<b>OGS6_A</b>	<b>40.26</b>	<b>19.55</b>	<b>820</b>	<b>43.43</b>	<b>0.291</b>	<b>68.94</b>
OGS6_B	40.06	19.83	0.56	43.66	0.237	68.55
OGS6_Γ	40.40	19.50	0.62	43.28	0.253	68.76

Για το OGS6 τόσο ως προς το  $r_0$ , όσο και ως προς το CFLOS η καλύτερη επιλογή είναι η θέση **OGS6\_A**.

Συγκεντρωτικά οι επιλεγμένες θέσεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα ταξινομημένες ως προς το  $r_0$ . Από τους παρακάτω σταθμούς το OGS2 έχει τιμές  $r_0$ , CFLOS χαμηλότερες των τιμών που τέθηκαν ως κατώφλι συνεπώς η τοποθέτηση σταθμού στην εν λόγω περιοχή δεν θα παρείχε σημαντικό πλεονέκτημα. Αν ωστόσο ο σταθμός ήταν διαθέσιμος θα μπορούσε να συμβάλει στην βελτίωση του συνδυαστικού CFLOS.

Πίνακας 18: Επιλεγμένοι σταθμοί για τις περιοχές των Βαλκανίων που μελετήθηκαν

Περιοχή	Σταθμός	$r_0$ (m)	CFLOS (%)
Ελλάδα (Νότια)	OGS5	0.292	78.74
Αλβανία	OGS6	0.291	68.94
Ελλάδα (Βόρεια)	OGS4	0.265	62.53
Ρουμανία (Κεντρικά)	OGS2	0.235	40.04
Κροατία	OGS1	0.206	59.12
Ρουμανία (Ανατολικά)	OGS3	0.170	50.06

Στον Πίνακα 19 φαίνεται τελικά η συνδυαστική πιθανότητα CFLOS των παραπάνω σταθμών. Αν και ο σταθμός OGS2 απορρίπτεται λόγω κατωφλίου παρουσιάζεται η βελτίωση που προσφέρει στην τελική συνδυαστική CFLOS.

Πίνακας 19: Συνδυαστική Πιθανότητα για τους επιλεγμένους σταθμούς (Joint CFOS)

Περιοχή	Σταθμός	$r_0$ (m)	CFLOS (%)	Joint CFLOS (%)
Ελλάδα (Νότια)	OGS5	0.292	78.74	<b>78.74</b>
Αλβανία	OGS6	0.291	68.94	<b>93.40</b>
Ελλάδα (Βόρεια)	OGS4	0.265	62.53	<b>97.53</b>
Κροατία	OGS1	0.206	59.12	<b>98.99</b>
Ρουμανία (Ανατολικά)	OGS3	0.170	50.06	<b>99.50</b>
<i>Ρουμανία (Κεντρικά)</i>	<i>OGS2</i>	<i>0.235</i>	<i>40.04</i>	<b>99.70</b>

Από τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτή η διαφορά που παρέχεται αξιοποιώντας την τεχνική διαφορισμού θέσης σε συστήματα FSO. Στο παράδειγμα των Βαλκανίων που μελετήθηκε ενώ κάθε σταθμός είχε CFLOS το πολύ 78.74 % η συνδυαστική δράση όλων αυτών οδηγεί το σύστημα σε πιθανότητα που αγγίζει το 99.5%.

Επιπλέον ακόμη και ο σταθμός στη Κεντρική Ρουμανία που δεν θα επιλεγόταν να εγκατασταθεί σε αυτή τη θέση, αν ήταν διαθέσιμος, θα παρείχε αύξηση του συνολικού ποσοστού του συστήματος στο 99.7%.

Το ποσοστό Joint CFLOS δείχνει την πιθανότητα τουλάχιστον ένας από τους σταθμούς να μην καλύπτεται από νέφη. Στην περίπτωση όμως που κάποιος ή ακόμη και όλοι πλην ενός οι σταθμοί καλύπτονται από νέφη το «βάρος» της παροχής δεδομένων θα πέφτει στους σταθμούς που απομένουν. Άρα είναι σημαντικό και η διασύνδεση μεταξύ των σταθμών να παρέχει επαρκή δυνατότητα των δεδομένων αυτών. Όπως ήδη αναφέρθηκε και προηγουμένως αυτό μπορεί να γίνει με την υποστήριξη του δικτύου κορμού από οπτικές ίνες.



## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Στην εργασία μελετήθηκαν οι οπτικές δορυφορικές επικοινωνίες καθώς προσφέρουν σημαντικά οφέλη τόσο ως προς το ρυθμό μετάδοσης όσο και ως προς την αξιοπιστία και την ασφάλεια.

Μελετήθηκαν αναλυτικά οι παράγοντες που επιβαρύνουν τη μετάδοση σε μια οπτική ζεύξη λόγω της παρουσίας της ατμόσφαιρας και οφείλονται στην ατμοσφαιρική απορρόφηση, στην γεωμετρική απώλεια, στη διάθλαση, στη σκέδαση, στις ατμοσφαιρικές αναταράξεις και στην κάλυψη των νεφών. Για κάθε μία από τις κατηγορίες δόθηκαν αναλυτικά μοντέλα υπολογισμού ώστε να είναι δυνατή η αποτύπωση του βαθμού στις οποίες κάθε παράγοντας συνεισφέρει. Εν συνεχεία έγινε καταγραφή των κυριότερων τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων και μια σύντομη περιγραφή τους καθώς και πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα που κάθε τεχνική παρέχει.

Για την ιδιαίτερη κατηγορία της κβαντικής φωτονικής έγινε ξεχωριστή αναφορά και επικέντρωση στη μετάδοση κβαντικού κλειδιού παρέχοντας ένα αρκετά διαδεδομένο πρωτόκολλο ως βάση για την κατανόηση της αρχής λειτουργίας. Έπειτα εξετάστηκε η δυνατότητα εφαρμογής των γνώσεων κβαντικής φωτονικής σε συστήματα ελεύθερου χώρου. Τέλος έγινε προσομοίωση της απόδοσης του διαύλου για δεδομένες θέσεις επίγειων σταθμών και εφαρμόστηκαν τεχνικές διαφορισμού.

Συμπερασματικά, η επίδραση της ατμόσφαιρας στις οπτικές δορυφορικές τεχνολογίες αποτελεί μείζονος σημασίας παράγοντα για τον σχεδιαστή του συστήματος ο οποίος θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις αποσβέσεις που εισάγονται στη ζεύξη τόσο προ της εγκατάστασης ενός σταθμού όσο και μετά.

Εξατομικευμένα για μια συγκεκριμένη τοπολογία διατίθενται αρκετές τεχνικές οι οποίες συνεισφέρουν αθροιστικά στη βελτίωση της διαθεσιμότητας της ζεύξης και στην παροχή πρόσθετης αξιοπιστίας. Σημαντικοί παράμετροι αποτελούν σε κάθε περίπτωση για το σχεδιαστή, το τελικό κόστος και η επιθυμητή παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσιών.

Από την πλευρά της ασφάλειας, η μετάδοση κβαντικού κλειδιού ελεύθερου χώρου φαίνεται μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για παροχή ασφαλών συνδέσεων σε μεγάλες αποστάσεις ή απομακρυσμένες περιοχές. Έως τώρα για την εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα απαιτείται πύκνωση των κόμβων με χρήση συνδυασμού επίγειων σταθμών, UAV και δορυφόρων.

Μέσω της προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε για την απόδοση του διαύλου αντλήθηκαν σημαντικά συμπεράσματα τόσο για την σωστή επιλογή των θέσεων όσο και για την χρησιμότητα των τεχνικών άμβλυνσης διαλείψεων. Συγκεκριμένα από τις θέσεις που μελετήθηκαν έγινε σαφές ότι οι κυριότεροι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι:

- Η σχετική θέση δορυφόρου – επίγειου σταθμού
- Οι παρεμβαλλόμενες περιοχές μεταξύ δορυφόρου και OGS

Η σχετική θέση δορυφόρου – επίγειου σταθμού σχετίζεται πρωταρχικά με την μεταξύ τους απόσταση σε ευθεία γραμμή. Έπειτα σχετίζεται με την γωνία ανύψωσης και η οποία αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τις ατμοσφαιρικές αναταράξεις και τα νέφη που η δέσμη της ακτίνας πρόκειται να συναντήσει κατά τη διέλευση της από την ατμόσφαιρα.

Οι παρεμβαλλόμενες περιοχές μεταξύ δορυφόρου και OGS συμβάλουν σημαντικά λόγω του ανάγλυφου της Γης. Όταν μεταξύ επίγειου σταθμού και δορυφόρου παρεμβάλλονται γεωγραφικές περιοχές με ανάγλυφα που ευνοούν τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, η δέσμη θα έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να συναντήσει κάποιο νέφος κατά τη διέλευσή της από την ατμόσφαιρα.

Τέλος η εφαρμογή μιας μόνο τεχνικής άμβλυσης διαλείψεων και συγκεκριμένα της τεχνικής διαφορισμού χώρου, παρατηρήθηκε να προσφέρει σημαντική βελτίωση στην πιθανότητα καθαρής από νέφη LOS την οποία από μόνος του ένας σταθμός δεν θα ήταν εύκολο να παρέχει. Η βελτίωση που παρατηρήθηκε στο συνδυαστικό σύστημα σε σχέση με τους αρχικούς ανεξάρτητους σταθμούς ήταν της τάξεως του 20% έως περίπου 50% για το δυσμενέστερο σταθμό βελτιώνοντας με αυτό τον τρόπο το συνολικό χρόνο λειτουργίας του συστήματος κατά πολύ.



## Αναφορές

- [1] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 19, no. 1. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 57–96, Jan. 01, 2017. doi: 10.1109/COMST.2016.2603518.
- [2] I. Radiocommunication Bureau, "RECOMMENDATION ITU-R P.676-13 - Attenuation by atmospheric gases and related effects," 2022. [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>
- [3] "Propagation data required for the design of Earth-space systems operating between 20 THz and 375 THz P Series Radiowave propagation." [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>
- [4] I. Radiocommunication Bureau, "RECOMMENDATION ITU-R P.835-6( - Reference standard atmospheres," 2017. [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>
- [5] I. Radiocommunication Bureau, "RECOMMENDATION ITU-R P.1622-1 - Prediction methods required for the design of Earth-space systems operating between 20 THz and 375 THz," 2022. [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>
- [6] "Prediction methods required for the design of terrestrial free-space optical links (Question ITU-R 228/3)," 2007.
- [7] A. Harris, Jr. , J. J. Sluss, H. H. Refai, and P. G. LoPresti, "Analysis of beam steering tolerances and divergence for various long range FSO communication," R. M. Rao, S. A. Dianat, M. D. Zoltowski, R. Singh, and S. P. Miller, Eds., Jun. 2005, pp. 455–462. doi: 10.1117/12.602503.
- [8] F. Nadeem, T. Javornik, E. Leitgeb, V. Kvicera, and G. Kandus, "Continental Fog Attenuation Empirical Relationship from Measured Visibility Data".
- [9] K. Rammprasad and S. Prince, "Analyzing the cloud attenuation on the performance of free space optical communication," *International Conference on Communication and Signal Processing, ICCSP 2013 - Proceedings*, pp. 791–794, 2013, doi: 10.1109/ICCSP.2013.6577165.
- [10] M. S. Awan, Marzuki, E. Leitgeb, B. Hillbrand, F. Nadeem, and M. S. Khan, "Cloud attenuations for free-space optical links," *IWSSC'09 - 2009 International Workshop on Satellite and Space Communications - Conference Proceedings*, pp. 274–278, 2009, doi: 10.1109/IWSSC.2009.5286364.
- [11] R. N. Mahalati and J. M. Kahn, "Effect of fog on free-space optical links employing imaging receivers," *Optics Express*, Vol. 20, Issue 2, pp. 1649-1661, vol. 20, no. 2, pp. 1649–1661, Jan. 2012, doi: 10.1364/OE.20.001649.
- [12] A. Jahid, M. H. Alsharif, and T. J. Hall, "A contemporary survey on free space optical communication: Potentials, technical challenges, recent advances and research direction," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 200, p. 103311, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.JNCA.2021.103311.

- [13] I. Radiocommunication Bureau, "RECOMMENDATION ITU-R P.837-7 - Characteristics of precipitation for propagation modelling," 2017. [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>
- [14] I. Radiocommunication Bureau, "RECOMMENDATION ITU-R P.838-3 - Specific attenuation model for rain for use in prediction methods," 1992.
- [15] M. Knapik *et al.*, "Optical high-capacity satellite downlinks via high-altitude platform relays," <https://doi.org/10.1117/12.734053>, vol. 6709, pp. 107–118, Sep. 2007, doi: 10.1117/12.734053.
- [16] L. C. Andrews and R. L. Phillips, "Laser Beam Propagation Through Random Media: Second Edition," *Laser Beam Propagation Through Random Media: Second Edition*, pp. 1–783, Sep. 2005, doi: 10.1117/3.626196.
- [17] J. Parikh and V. K. Jain, "Study on statistical models of atmospheric channel for FSO communication link," in *2011 Nirma University International Conference on Engineering*, IEEE, Dec. 2011, pp. 1–7. doi: 10.1109/NUiConE.2011.6153263.
- [18] N. D. Chatzidiamantis, H. G. Sandalidis, G. K. Karagiannidis, S. A. Kotsopoulos, and M. Matthaiou, "New results on turbulence modeling for free-space optical systems," in *2010 17th International Conference on Telecommunications*, IEEE, Apr. 2010, pp. 487–492. doi: 10.1109/ICTEL.2010.5478872.
- [19] H. Hemmati, "Deep space optical communications," p. 705, 2006. [Online]. Available: [https://books.google.com/books/about/Deep\\_Space\\_Optical\\_Communications.html?hl=el&id=Cj52X7jK5OgC](https://books.google.com/books/about/Deep_Space_Optical_Communications.html?hl=el&id=Cj52X7jK5OgC)
- [20] H. Kaushal *et al.*, "Experimental Study on Beam Wander Under Varying Atmospheric Turbulence Conditions," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 22, pp. 1691–1693, Nov. 2011, doi: 10.1109/LPT.2011.2166113.
- [21] K. Kazaura *et al.*, "Enhancing performance of next generation FSO communication systems using soft computing-based predictions," *Opt Express*, vol. 14, no. 12, p. 4958, 2006, doi: 10.1364/OE.14.004958.
- [22] N. K. Lyras, C. I. Kourogiorgas, and A. D. Panagopoulos, "Cloud Attenuation Statistics Prediction From Ka-Band to Optical Frequencies: Integrated Liquid Water Content Field Synthesizer," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 65, no. 1, pp. 319–328, Jan. 2017, doi: 10.1109/TAP.2016.2630602.
- [23] L. Luini and C. Capsoni, "Modeling High-Resolution 3-D Cloud Fields for Earth-Space Communication Systems," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 62, no. 10, pp. 5190–5199, Oct. 2014, doi: 10.1109/TAP.2014.2341297.
- [24] N. K. Lyras, C. I. Kourogiorgas, and A. D. Panagopoulos, "Cloud Free Line of Sight Prediction Modeling for Optical Satellite Communication Networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 7, pp. 1537–1540, Jul. 2017, doi: 10.1109/LCOMM.2017.2681073.
- [25] G. A. Karagiannis, A. D. Panagopoulos, and J. D. Kanellopoulos, "Multidimensional Rain Attenuation Stochastic Dynamic Modeling: Application to Earth–Space Diversity

- Systems,” *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 60, no. 11, pp. 5400–5411, Nov. 2012, doi: 10.1109/TAP.2012.2208610.
- [26] “Brownian Motion and Stochastic Calculus - Ioannis Karatzas, Steven Shreve - Βιβλία Google.” [Online]. Available: [https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=ATNy\\_Zg3PSsC&oi=fnd&pg=PR7&dq=Brownian+Motion+and+Stochastic+Calculus&ots=7XliUzXxVV&sig=H\\_y2xVxwx1jjKdWlaEP-vc0niks&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Brownian%20Motion%20and%20Stochastic%20Calculus&f=false](https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=ATNy_Zg3PSsC&oi=fnd&pg=PR7&dq=Brownian+Motion+and+Stochastic+Calculus&ots=7XliUzXxVV&sig=H_y2xVxwx1jjKdWlaEP-vc0niks&redir_esc=y#v=onepage&q=Brownian%20Motion%20and%20Stochastic%20Calculus&f=false)
- [27] S. A. Kanellopoulos, A. D. Panagopoulos, and J. D. Kanellopoulos, “Calculation of the Dynamic Input Parameter for a Stochastic Model Simulating Rain Attenuation: A Novel Mathematical Approach,” *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 55, no. 11, pp. 3257–3264, Nov. 2007, doi: 10.1109/TAP.2007.908817.
- [28] Itu-r, “Recommendation ITU-R P.840-7 Attenuation due to clouds and fog P Series Radiowave propagation”. [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>
- [29] “Tropospheric attenuation time series synthesis P Series Radiowave propagation,” 2012. [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>
- [30] “Light Scattering by Small Particles - Hendrik Christoffel Hulst, H. C. van de Hulst - Βιβλία Google.” [Online]. Available: [https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=PIHfPMVAFrC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Light+Scattering+by+Small+Particles&ots=Gh79RtqiNa&sig=R\\_R0pui2f1sRN7sNksRSdH2bqyk&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Light%20Scattering%20by%20Small%20Particles&f=false](https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=PIHfPMVAFrC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Light+Scattering+by+Small+Particles&ots=Gh79RtqiNa&sig=R_R0pui2f1sRN7sNksRSdH2bqyk&redir_esc=y#v=onepage&q=Light%20Scattering%20by%20Small%20Particles&f=false)
- [31] “Absorption and Scattering of Light by Small Particles - Craig F. Bohren, Donald R. Huffman - Βιβλία Google.” [Online]. Available: [https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=ib3EMXXIRXUC&oi=fnd&pg=PP2&dq=Absorption+and+scattering+by+a+sphere&ots=AAjz7fk1O&sig=GzCu20I2LIRkQmJYbQ3snFSjcN4&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Absorption%20and%20scattering%20by%20a%20sphere&f=false](https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=ib3EMXXIRXUC&oi=fnd&pg=PP2&dq=Absorption+and+scattering+by+a+sphere&ots=AAjz7fk1O&sig=GzCu20I2LIRkQmJYbQ3snFSjcN4&redir_esc=y#v=onepage&q=Absorption%20and%20scattering%20by%20a%20sphere&f=false)
- [32] “The Light Scattering Information Portal, Jul. 2014, [online] Available: <http://www.scattport.org/>”
- [33] L. Resteghini, C. Capsoni, L. Luini, and R. Nebuloni, “An attempt to classify the types of clouds by a dual frequency microwave radiometer,” in *2014 13th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad)*, IEEE, Mar. 2014, pp. 90–93. doi: 10.1109/MicroRad.2014.6878915.
- [34] H. D. Le, T. V. Nguyen, and A. T. Pham, “Cloud Attenuation Statistical Model for Satellite-Based FSO Communications,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 20, no. 5, pp. 643–647, May 2021, doi: 10.1109/LAWP.2021.3058641.
- [35] A. Viswanath, P. Gopal, V. K. Jain, and S. Kar, “Performance enhancement by aperture averaging in terrestrial and satellite free space optical links,” *IET Optoelectronics*, vol. 10, no. 3, pp. 111–117, Jun. 2016, doi: 10.1049/iet-opt.2015.0042.

- [36] Z. Chen, S. Yu, T. Wang, G. Wu, S. Wang, and W. Gu, "Channel correlation in aperture receiver diversity systems for free-space optical communication," *Journal of Optics*, vol. 14, no. 12, p. 125710, Dec. 2012, doi: 10.1088/2040-8978/14/12/125710.
- [37] K. Li, J. Ma, A. Belmonte, L. Tan, and S. Yu, "Performance analysis of satellite-to-ground downlink optical communications with spatial diversity over Gamma–Gamma atmospheric turbulence," *Optical Engineering*, vol. 54, no. 12, p. 126103, Dec. 2015, doi: 10.1117/1.OE.54.12.126103.
- [38] J. Park, E. Lee, and G. Yoon, "Average Bit-Error Rate of the Alamouti Scheme in Gamma-Gamma Fading Channels," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 4, pp. 269–271, Feb. 2011, doi: 10.1109/LPT.2010.2100815.
- [39] Fang Xu, M.-A. Khalighi, P. Causse, and S. Bourennane, "Performance of coded time-diversity free-space optical links," in *2008 24th Biennial Symposium on Communications*, IEEE, Jun. 2008, pp. 146–149. doi: 10.1109/BSC.2008.4563225.
- [40] N. K. Lyras, C. I. Kourogiorgas, T. Kapsis, and A. D. Panagopoulos, "'On Optical Satellite Communication Systems Design: CFLOS Calculation and OGS Selection,' 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 2019, pp. 1-5."
- [41] M. Safari and M. Uysal, "Relay-Assisted Free-Space Optical Communication," in *2007 Conference Record of the Forty-First Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, IEEE, Nov. 2007, pp. 1891–1895. doi: 10.1109/ACSSC.2007.4487565.
- [42] M. R. Bhatnagar and M. K. Arti, "Performance Analysis of Hybrid Satellite-Terrestrial FSO Cooperative System," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 25, no. 22, pp. 2197–2200, Nov. 2013, doi: 10.1109/LPT.2013.2282836.
- [43] E. Bayaki, D. S. Michalopoulos, and R. Schober, "EDFA-Based All-Optical Relaying in Free-Space Optical Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 60, no. 12, pp. 3797–3807, Dec. 2012, doi: 10.1109/TCOMM.2012.090512.110198.
- [44] M. A. Kashani, M. M. Rad, M. Safari, and M. Uysal, "All-Optical Amplify-and-Forward Relaying System for Atmospheric Channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 10, pp. 1684–1687, Oct. 2012, doi: 10.1109/LCOMM.2012.082012.121066.
- [45] F. E. Zocchi, "A simple analytical model of adaptive optics for direct detection free-space optical communication," *Opt Commun*, vol. 248, no. 4–6, pp. 359–374, Apr. 2005, doi: 10.1016/J.OPTCOM.2004.12.025.
- [46] D. L. Fried, "Branch point problem in adaptive optics," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 15, no. 10, p. 2759, Oct. 1998, doi: 10.1364/JOSAA.15.002759.
- [47] M. A. Vorontsov, G. W. Carhart, and J. C. Ricklin, "Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization," *Opt Lett*, vol. 22, no. 12, p. 907, Jun. 1997, doi: 10.1364/OL.22.000907.
- [48] N. Védrenne, J.-M. Conan, C. Petit, and V. Michau, "Adaptive optics for high data rate satellite to ground laser link," H. Hemmati and D. M. Boroson, Eds., Mar. 2016, p. 97390E. doi: 10.1117/12.2218213.

- [49] S. S. Olivier and D. T. Gavel, "Tip-tilt compensation for astronomical imaging," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 11, no. 1, p. 368, Jan. 1994, doi: 10.1364/JOSAA.11.000368.
- [50] J. W. Armstrong, C. Yeh, and K. E. Wilson, "Earth-to-deep-space optical communications system with adaptive tilt and scintillation correction by use of near-Earth relay mirrors," *Opt Lett*, vol. 23, no. 14, p. 1087, Jul. 1998, doi: 10.1364/OL.23.001087.
- [51] J. C. Juarez, D. M. Brown, and D. W. Young, "Antenna gain of actively compensated free-space optical communication systems under strong turbulence conditions," *Opt Express*, vol. 22, no. 10, p. 12551, May 2014, doi: 10.1364/OE.22.012551.
- [52] D. P. Greenwood, "Bandwidth specification for adaptive optics systems\*," *J Opt Soc Am*, vol. 67, no. 3, p. 390, Mar. 1977, doi: 10.1364/JOSA.67.000390.
- [53] A. Viswanath, H. Kaushal, V. K. Jain, and S. Kar, "Evaluation of performance of ground to satellite free space optical link under turbulence conditions for different intensity modulation schemes," H. Hemmati and D. M. Boroson, Eds., Mar. 2014, p. 897106. doi: 10.1117/12.2038212.
- [54] "Free-Space Laser Communications: Principles and Advances - Βιβλία Google." [Online]. Available: [https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=-wj39a3oTecC&oi=fnd&pg=PR3&dq=Free-Space+Laser+Communications:+Principles+and+Advances&ots=bVSqKAnW4b&sig=RQPt1iOw8sqzFsQFcntvA29YY58&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Free-Space%20Laser%20Communications%3A%20Principles%20and%20Advances&f=false](https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=-wj39a3oTecC&oi=fnd&pg=PR3&dq=Free-Space+Laser+Communications:+Principles+and+Advances&ots=bVSqKAnW4b&sig=RQPt1iOw8sqzFsQFcntvA29YY58&redir_esc=y#v=onepage&q=Free-Space%20Laser%20Communications%3A%20Principles%20and%20Advances&f=false)
- [55] X. Zhu and J. M. Kahn, "Pilot-symbol assisted modulation for correlated turbulent free-space optical" D. G. Voelz and J. C. Ricklin, Eds., Jan. 2002, pp. 138–145. doi: 10.1117/12.453222.
- [56] N. D. Chatzidiamantis, G. K. Karagiannidis, and M. Uysal, "Generalized Maximum-Likelihood Sequence Detection for Photon-Counting Free Space Optical Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 58, no. 12, pp. 3381–3385, Dec. 2010, doi: 10.1109/TCOMM.2010.093010.090116A.
- [57] M. L. B. Riediger, R. Schober, and L. Lampe, "Blind detection of on-off keying for free-space optical communications," in *2008 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, IEEE, May 2008, pp. 001361–001364. doi: 10.1109/CCECE.2008.4564763.
- [58] M. Uysal, T. A. Tsiftsis, N. D. Chatzidiamantis, and G. K. Karagiannidis, "Iterative Near Maximum-Likelihood Sequence Detection for MIMO Optical Wireless Systems," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 28, Issue 7, pp. 1064-1070, vol. 28, no. 7, pp. 1064–1070, Apr. 2010. [Online]. Available: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=jlt-28-7-1064>
- [59] "Deep Space Optical Communications - Βιβλία Google." [Online]. Available: [https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=Cj52X7jK5OgC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Deep+Space+Optical+Communication&ots=g0hKklMSOl&sig=Mlgkv2ysWs\\_WPCu18OB1i7J\\_T-](https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=Cj52X7jK5OgC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Deep+Space+Optical+Communication&ots=g0hKklMSOl&sig=Mlgkv2ysWs_WPCu18OB1i7J_T-)

- U&redir\_esc=y#v=onepage&q=Deep%20Space%20Optical%20Communication&f=false
- [60] M. K. Simon and V. A. Vilnrotter, "Multi-Pulse Pulse-Position-Modulation Signaling for Optical Communication with Direct Detection," 2003.
- [61] D. Zwillinger, "Differential PPM has a higher throughput than PPM for the band-limited and average-power-limited optical channel," *IEEE Trans Inf Theory*, vol. 34, no. 5, pp. 1269–1273, Sep. 1988, doi: 10.1109/18.21255.
- [62] P. Gopal, V. K. Jain, and S. Kar, "Performance Analysis of Ground to Satellite FSO System with DAPPM Scheme in Weak Atmospheric Turbulence," in *International Conference on Fibre Optics and Photonics*, Washington, D.C.: OSA, 2012, p. WPo.43. doi: 10.1364/PHOTONICS.2012.WPo.43.
- [63] C. L. Chao Liu, Y. Y. Yong Yao, J. T. Jiajun Tian, Y. Y. Yijun Yuan, Y. Z. Yufeng Zhao, and B. Y. and Benshuang Yu, "Packet error rate analysis of DPIM for free-space optical links with turbulence and pointing errors," *Chinese Optics Letters*, vol. 12, no. s1, pp. S10101-310105, 2014, doi: 10.3788/col201412.s10101.
- [64] R. Bose, V. Jain, M. Choudhary, and V. K. Jain, "Study of trellis coded overlapping ppm and overlapping multi-pulse ppm schemes for deep space optical communication systems," 2004. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/228995357>
- [65] N. M. Aldibbiat, Z. F. Ghassemlooy, and R. McLaughlin, "Performance of dual header-pulse interval modulation (DH-PIM) for optical wireless communication systems," E. J. Korevaar, Ed., Feb. 2001, pp. 144–152. doi: 10.1117/12.417505.
- [66] A. Khatoon, W. G. Cowley, and N. Letzepis, "Capacity of adaptive free-space optical channel using bi-directional links," A. M. J. van Eijk, C. C. Davis, S. M. Hammel, and A. K. Majumdar, Eds., Oct. 2012, p. 85170X. doi: 10.1117/12.929212.
- [67] A. Ando *et al.*, "Fading mitigation coding techniques for space to ground free space optical communications," in *2014 Euro Med Telco Conference (EMTC)*, IEEE, Nov. 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/EMTC.2014.6996643.
- [68] I. B. Djordjevic, "Adaptive Modulation and Coding for Free-Space Optical Channels," *Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 2, Issue 5, pp. 221-229, vol. 2, no. 5, pp. 221–229, May 2010, doi: 10.1364/JOCN.2.000221.
- [69] "Advanced Optical Wireless Communication Systems - Βιβλία Google [Online]. Available: [https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=2OqldFkZpOYC&oi=fnd&pg=PR10&dq=Advanced+Optical+Wireless+Communication+System&ots=Mupm99yx5K&sig=CHqLDrTE4nDTdVhkn-wg9dTRQJA&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Advanced%20Optical%20Wireless%20Communication%20System&f=false](https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=2OqldFkZpOYC&oi=fnd&pg=PR10&dq=Advanced+Optical+Wireless+Communication+System&ots=Mupm99yx5K&sig=CHqLDrTE4nDTdVhkn-wg9dTRQJA&redir_esc=y#v=onepage&q=Advanced%20Optical%20Wireless%20Communication%20System&f=false)
- [70] N. D. Chatzidiamantis, A. S. Lioumpas, G. K. Karagiannidis, and S. Arnon, "Adaptive Subcarrier PSK Intensity Modulation in Free Space Optical Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 5, pp. 1368–1377, May 2011, doi: 10.1109/TCOMM.2011.022811.100078.

- [71] H. Kaushal, V. K. Jain, and S. Kar, "Improvement of ground to satellite fso link performance using transmit diversity in weak atmospheric turbulence," in *2010 International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, IEEE, Jun. 2010, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICIAS.2010.5716119.
- [72] C. Wree *et al.*, "Ten Gb/s optically pre-amplified RZ-DPSK for FSO communications systems with very large link losses," A. K. Majumdar and C. C. Davis, Eds., Aug. 2008, p. 709103. doi: 10.1117/12.793784.
- [73] D. Rathi, A. Gajjar, and H. Joshi, "BER Performance Comparison of Gamma-Gamma FSO link for Different Modulations and Diversity Techniques," in *2022 IEEE 9th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, IEEE, Dec. 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/UPCON56432.2022.9986410.
- [74] B. Moision and J. Hamkins, "Coded Modulation for the Deep-Space Optical Channel: Serially Concatenated Pulse-Position Modulation," 2005.
- [75] I. B. Djordjevic, "Deep-space and near-Earth optical communications by coded orbital angular momentum (OAM) modulation," *Optics Express*, Vol. 19, Issue 15, pp. 14277–14289, vol. 19, no. 15, pp. 14277–14289, Jul. 2011, doi: 10.1364/OE.19.014277.
- [76] X. Sun *et al.*, "Simultaneous laser ranging and communication from an Earth-based satellite laser ranging station to the Lunar Reconnaissance Orbiter in lunar orbit," H. Hemmati and D. M. Boroson, Eds., Mar. 2013, p. 861003. doi: 10.1117/12.2006645.
- [77] B. Barua and D. Barua, "Analysis the performance of a LDPC coded FSO system with Q-ary pulse-position modulation," in *2011 3rd International Conference on Computer Research and Development*, IEEE, Mar. 2011, pp. 339–343. doi: 10.1109/ICCRD.2011.5764032.
- [78] H. R. Sadjadpour, "Maximum a posteriori decoding algorithms for turbo codes," <https://doi.org/10.1117/12.394081>, vol. 4045, pp. 73–83, Jul. 2000, doi: 10.1117/12.394081.
- [79] S. Lee, K. E. Wilson, and M. Troy, "Background Noise Mitigation in Deep-Space Optical Communications Using Adaptive Optics," 2005.
- [80] A. J. Hashmi, A. A. Eftekhar, A. Adibi, and F. Amoozegar, "Analysis of adaptive optics-based telescope arrays in a deep-space inter-planetary optical communications link between Earth and Mars," *Opt Commun*, vol. 333, pp. 120–128, Dec. 2014, doi: 10.1016/J.OPTCOM.2014.07.077.
- [81] G. D. Roumelas, H. E. Nistazakis, A. N. Stassinakis, G. S. Tombras, and Ch. K. Volos, "Triple Hybrid Terrestrial FSO/RF/MMW System with Receiver's Diversity," in *2019 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST)*, IEEE, May 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/MOCAST.2019.8741540.
- [82] Y. Tang, M. Brandt-Pearce, and S. G. Wilson, "Adaptive coding and modulation for hybrid FSO/RF systems," in *2009 Conference Record of the Forty-Third Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, IEEE, 2009, pp. 1644–1649. doi: 10.1109/ACSSC.2009.5469820.

- [83] S. Parthasarathy, D. Giggenbach, and A. Kirstädter, "Channel modelling for free-space optical inter-HAP links using adaptive ARQ transmission," E. M. Carapezza, P. G. Datskos, and C. Tsamis, Eds., Oct. 2014, p. 92480Q. doi: 10.1117/12.2067195.
- [84] E. Zedini, A. Chelli, and M.-S. Alouini, "On the Performance Analysis of Hybrid ARQ With Incremental Redundancy and With Code Combining Over Free-Space Optical Channels With Pointing Errors," *IEEE Photonics J*, vol. 6, no. 4, pp. 1–18, Aug. 2014, doi: 10.1109/JPHOT.2014.2339331.
- [85] A. R. Hammons and F. Davidson, "On the design of automatic repeat request protocols for turbulent free-space optical links," in *2010 - MILCOM 2010 MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE*, IEEE, Oct. 2010, pp. 808–813. doi: 10.1109/MILCOM.2010.5680280.
- [86] S. Gurumani, H. Moradi, H. H. Refai, P. G. LoPresti, and M. Atiquzzaman, "Dynamic Path Reconfiguration Among Hybrid FSO/RF Nodes," in *IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference*, IEEE, 2008, pp. 1–5. doi: 10.1109/GLOCOM.2008.ECP.537.
- [87] Z. Gu, J. Zhang, Y. Ji, L. Bai, and X. Sun, "Network Topology Reconfiguration for FSO-Based Fronthaul/Backhaul in 5G+ Wireless Networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 69426–69437, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2880880.
- [88] A. Jain, A. Khanna, J. Bhatt, P. V Sakhiya, and R. K. Bahl, "Experimental Demonstration of Free Space Quantum Key Distribution System based on the BB84 Protocol," in *2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, IEEE, Jul. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICCCNT49239.2020.9225317.
- [89] J. S. Johnson, M. R. Grimaila, J. W. Humphries, and G. B. Baumgartner, "An analysis of error reconciliation protocols used in Quantum Key Distribution systems," *The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 217–227, Jul. 2015, doi: 10.1177/1548512913503418.
- [90] M. Hayashi, "Exponential Decreasing Rate of Leaked Information in Universal Random Privacy Amplification," *IEEE Trans Inf Theory*, vol. 57, no. 6, pp. 3989–4001, Jun. 2011, doi: 10.1109/TIT.2011.2110950.
- [91] J. Handsteiner, D. Rauch, D. Bricher, T. Scheidl, and A. Zeilinger, "Quantum key distribution at space scale," in *2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, IEEE, Oct. 2015, pp. 1–3. doi: 10.1109/ICSOS.2015.7425062.
- [92] A. Jain, A. Khanna, J. Bhatt, P. V Sakhiya, and R. K. Bahl, "Experimental Demonstration of Free Space Quantum Key Distribution System based on the BB84 Protocol," in *2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, IEEE, Jul. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICCCNT49239.2020.9225317.
- [93] M. Korrapati *et al.*, "Design and Modeling of a PAT System for Freespace Optical Links in Quantum Key Distribution," in *2024 16th International Conference on*



*COMmunication Systems & NETworks (COMSNETS)*, IEEE, Jan. 2024, pp. 1070–1075.  
doi: 10.1109/COMSNETS59351.2024.10427419.

- [94] H.-Y. Liu *et al.*, “Drone-based entanglement distribution towards mobile quantum networks,” *Natl Sci Rev*, vol. 7, no. 5, pp. 921–928, May 2020, doi: 10.1093/nsr/nwz227.
- [95] “File:Europe sunshine hours map.png - Wikipedia.” [Online]. Available: [https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Europe\\_sunshine\\_hours\\_map.png](https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Europe_sunshine_hours_map.png)