



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΜΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ: «ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΗΣ  
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΜΕΣΩ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ»

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΠΑΠΠΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΤΣΟΡΜΠΑΤΖΟΓΛΟΥ ΑΝΔΡΕΑΣ ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΡΤΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2024

## STUDY OF GAIN AND NOISE IN FREE SPACE OPTICS (FSO) SYSTEMS

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

ΑΡΤΑ, 26/9/2024

**ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ**

1.Επιβλέπων καθηγητής

**ΑΝΔΡΕΑΣ ΤΣΟΡΜΠΙΑΤΖΟΓΛΟΥ,**

**ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

2.Μέλος επιτροπής

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΑΓΓΕΛΗΣ,**

**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

3.Μέλος επιτροπής

**ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ ΔΟΥΜΕΝΗΣ,**

**ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

© ΠΑΠΠΑΣ, ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

## Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εκ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

## Επίθετο, Όνομα

ΠΑΠΠΑΣ, ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

## Υπογραφή

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή διερευνά τη συμπεριφορά των φωτοδιόδων χιονοστιβάδας (APDs) σε συστήματα οπτικής επικοινωνίας, χρησιμοποιώντας τα μοντέλα McIntyre-Conradi (MC) και Webb παράλληλα με τις προσεγγίσεις Gauss. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο Webb χρησιμεύει ως μια ισχυρή προσέγγιση, ιδιαίτερα αποτελεσματική όταν έχουμε να κάνουμε με υψηλό μέσο αριθμό απορροφημένων φωτονίων, απλοποιώντας τους υπολογισμούς χωρίς σημαντική απώλεια ακρίβειας. Η προσέγγιση Gauss αποδεικνύεται πολύτιμη για την υπολογιστική απόδοση σε σενάρια υψηλού φωτονίου, αλλά παρουσιάζει περιορισμούς σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού, υποστηρίζοντας τη χρήση πιο ακριβών μοντέλων όπως το Webb ή το MC.

Επιπλέον, η διατριβή εμβαθύνει στο Gain and Noise in Free Space Communication Systems (FSO), δίνοντας έμφαση στη περίθλαση Fresnel, τον περιβαλλοντικό θόρυβο και τις προκλήσεις της αστικής ανάπτυξης. Μέσω της θεωρητικής ανάλυσης, των προσομοιώσεων και των περιπτώσιολογικών μελετών, αποκτώνται κρίσιμες γνώσεις σχετικά με τον αντίκτυπο της περίθλασης, τη διαχείριση κέρδους και θορύβου και τη σκοπιμότητα της εγκατάστασης FSO σε αστικές περιοχές παρά τις προκλήσεις.

Οι συνέπειες για την τεχνολογική πρόοδο του FSO περιλαμβάνουν βελτιωμένο σχεδιασμό συστημάτων, στρατηγικές αστικής ανάπτυξης και την ανάγκη για ρυθμιστικά πλαίσια που αφορούν την ασφάλεια και τη διαλειτουργικότητα. Οι μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας περιλαμβάνουν την εξερεύνηση προηγμένων τεχνικών διαμόρφωσης, τη μόχλευση της μηχανικής εκμάθησης για βελτιστοποίηση συστήματος και την ενοποίηση του FSO με άλλες τεχνολογίες επικοινωνίας.

Συμπερασματικά, αυτή η διατριβή συμβάλλει στην κατανόηση των αποχρώσεων της οπτικής επικοινωνίας και προσφέρει πρακτική καθοδήγηση για μελλοντική ανάπτυξη τεχνολογίας FSO. Η συνεχής καινοτομία και η έρευνα είναι ζωτικής σημασίας για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης για υψηλής ταχύτητας, αξιόπιστες λύσεις επικοινωνίας.

**Λέξεις-κλειδιά:** Φωτοδιόδοι χιονοστιβάδας (APD), οπτικά συστήματα επικοινωνίας, μοντέλο McIntyre-Conradi (MC), μοντέλο Webb, Gaussian προσέγγιση, Συστήματα επικοινωνίας ελεύθερου χώρου (FSO), περίθλαση Fresnel, κέρδος, θόρυβος, αστική ανάπτυξη, βελτιστοποίηση συστήματος, τεχνικές διαμόρφωσης, μηχανική μάθηση, ενοποίηση, ρυθμιστικά πλαίσια, επικοινωνία υψηλής ταχύτητας.

**ABSTRACT**

This thesis investigates the behavior of Avalanche Photodiodes (APDs) in optical communication systems, utilizing the McIntyre-Conradi (MC) and Webb models alongside Gaussian approximations. The study concludes that the Webb model serves as a robust approximation, particularly effective when dealing with a high average number of absorbed photons, simplifying computations without significant loss of accuracy. The Gaussian approximation proves valuable for computational efficiency in high-photon scenarios but exhibits limitations in low-light conditions, advocating for the use of more accurate models like Webb or MC.

In addition, the thesis delves into Gain and Noise in Free Space Communication Systems (FSO), emphasizing Fresnel diffraction, environmental noise, and urban development challenges. Through theoretical analysis, simulations, and case studies, critical insights are gained regarding diffraction's impact, gain and noise management, and the feasibility of urban FSO deployment despite challenges.

Implications for FSO technology advancement include enhanced system design, urban development strategies, and the need for regulatory frameworks addressing security and interoperability. Future research directions include exploring advanced modulation techniques, leveraging machine learning for system optimization, and integrating FSO with other communication technologies.

In conclusion, this thesis contributes to understanding optical communication's nuances and offers practical guidance for future FSO technology development. Continued innovation and research are crucial to meet the growing demand for high-speed, reliable communication solutions.

**Keywords:** Avalanche Photodiodes (APDs), optical communication systems, McIntyre-Conradi (MC) model, Webb model, Gaussian approximation, Free Space Communication Systems (FSO), Fresnel diffraction, gain, noise, urban development, system optimization, modulation techniques, machine learning, integration, regulatory frameworks, high-speed communication.



<b>Περιεχόμενα</b>	
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	7
ABSTRACT .....	8

Περιεχόμενα .....	9
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	11
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	12
1.1.Εισαγωγή στο Θέμα της Οπτικής Επικοινωνίας Μέσω Ελεύθερου Χώρου .....	12
1.2.Δήλωση των Κύριων Στόχων και Στόχων της Εργασίας .....	14
1.3.Επεξήγηση της τεχνολογίας Free Space Optical (FSO).....	15
1.4.Επεξήγηση των παραμέτρων που επηρεάζουν το κέρδος και το θόρυβο σε συστήματα FSO.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....	19
2.1.Απώλεια μετάδοσης, περιθώριο πτώσης και άλλες σχετικές παράμετροι .....	19
2.2. Χωρητικότητα καναλιού σε συστήματα FSO .....	21
2.3.Εφαρμογές Τεχνολογίας FSO.....	23
2.4.Εφαρμογές Τεχνολογίας FSO.....	24
2.5.Βιβλιογραφική Ανασκόπηση στις τελευταίες εξελίξεις της τεχνολογίας FSO .....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ .....	27
3.1.Εισαγωγή.....	27
3.2.Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	29
3.3.Υπολογιστικά Εργαλεία και Λογισμικό.....	31
3.4. Μοντελοποίηση περίθλασης Fresnel σε συστήματα FSO.....	33
3.5.Αξιολόγηση Κέρδους και Θορύβου σε Συστήματα FSO.....	34
4.Αποτελέσματα αναλύσεων.....	37
4.1. Ανάλυση επιπτώσεων περίθλασης Fresnel .....	37
4.2. Αξιολόγηση του κέρδους στο Σύστημα Επικοινωνίας Ελεύθερου Διαστήματος Οπτικών (FSO).....	39
4.3.Αποτελέσματα ανάλυσης θορύβου .....	41
4.4. Μετρήσεις απόδοσης και αξιοπιστία συστήματος.....	44
4.5.Μελέτη περίπτωσης: Urban FSO Communication Link.....	46
4.6. Μοντέλο εξαρτώμενου σήματος Gaussian Noise για FSO Διαβιβάσεις.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	56
5.1.Σύνοψη Ευρημάτων.....	56

---

5.2.Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	59

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Επεκτασιμότητα και ευελιξία της τεχνολογίας FSO. Τα οπτικά ασύρματα προϊόντα μπορούν να αναπτυχθούν σε πολλές εταιρικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της συνδεσιμότητας κτιρίου σε κτίριο, αποκατάστασης καταστροφών, πλεονασμού δικτύου και προσωρινής συνδεσιμότητας για εφαρμογές όπως δεδομένα, φωνή και δεδομένα, υπηρεσίες βίντεο, ιατρική απεικόνιση, CAD και μηχανολογικές υπηρεσίες και παράκαμψη κινητής τηλεφωνίας σταθερής γραμμής. (Πηγή: Free Space Optics Technology - CableFree, n.d).....	14
--	----

Εικόνα 2. Εξαρτήματα Τεχνολογίας Free Space Optical (Πηγή: Abadi et al., 2019) .....	16
Εικόνα 3. Ατμοσφαιρικές επιπτώσεις σε ένα σύστημα FSO (Πηγή: Malik & Singh, 2015).....	18
Εικόνα 4. Ευφρείς οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου με υποβοηθούμενη ανακλαστική επιφάνεια (Πηγή Jamali et al., 2021) .....	27
Εικόνα 5. Μοτίβο περίθλασης Fresnel.....	38
Εικόνα 6. Απώλειες συστήματος FSO.....	40
Εικόνα 7. Σχετική συμβολή του θορύβου περιβάλλοντος, του θορύβου ανιχνευτή και του θορύβου συστήματος στη συνολική ισχύ θορύβου σε ένα σύστημα FSO .....	43
Εικόνα 8. Χωρητικότητα καναλιού υπό διάφορες καιρικές συνθήκες.....	45
Εικόνα 9. Ποσοτική αξιολόγηση της απόδοσης της αστικής ζεύξης FSO .....	48
Εικόνα 10. Webb APD συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας εξόδου ηλεκτρονίων.....	52
Εικόνα 11. Σύγκριση Webb έναντι Gaussian προσέγγισης .....	54

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1.Εισαγωγή στο Θέμα της Οπτικής Επικοινωνίας Μέσω Ελεύθερου Χώρου**

Η οπτική επικοινωνία μέσω ελεύθερου χώρου, που συνήθως αναφέρεται ως Οπτική επικοινωνία μέσω Ελεύθερου Χώρου (FSO), αντιπροσωπεύει μια πρωτοποριακή προσέγγιση στη μετάδοση δεδομένων που αξιοποιεί το φως για να μεταφέρει πληροφορίες σε ανοιχτό χώρο, χωρίς φυσικά καλώδια ή

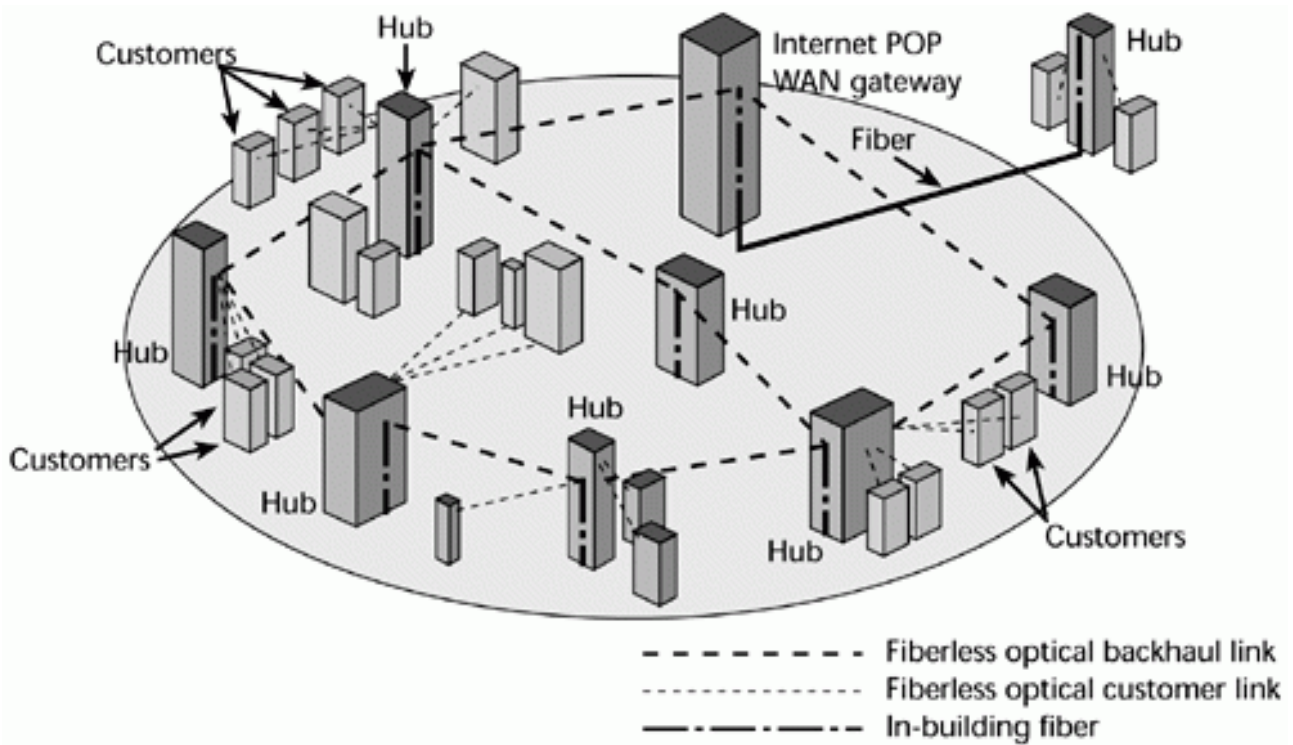
καλώδια. Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία FSO έχει συγκεντρώσει σημαντική προσοχή και ενδιαφέρον λόγω της δυνατότητάς της να ξεπεράσει τους περιορισμούς των παραδοσιακών ενσύρματων και ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας, ιδιαίτερα σε σενάρια όπου η ανάπτυξη φυσικής υποδομής είναι μη πρακτική ή απαγορευτική από πλευράς κόστους (Kaushal, H., & Kaddoum, G., 2017)).

Η θεμελιώδης αρχή που διέπει την επικοινωνία FSO είναι η μετάδοση διαμορφωμένων οπτικών σημάτων μέσω της ατμόσφαιρας ή του κενού του χώρου, χρησιμοποιώντας πηγές λέιζερ ή διόδων εκπομπής φωτός (LED). Αυτά τα σήματα διαδίδονται σε ευθεία γραμμή, επιτρέποντας τη μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας σε μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστο λανθάνοντα χρόνο. Τα συστήματα FSO είναι εγγενώς ασφαλή, καθώς δεν εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πέρα από το οπτικό φάσμα, καθιστώντας την υποκλοπή εξαιρετικά δύσκολη (Touati et al., 2018).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της επικοινωνίας FSO είναι η ικανότητά της να προσφέρει υψηλό εύρος ζώνης και ρυθμούς δεδομένων, καθιστώντας την ελκυστική λύση για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων, όπως δίκτυα τηλεπικοινωνιών, σύνδεση στο Διαδίκτυο και κέντρα δεδομένων. Επιπλέον, η τεχνολογία FSO μπορεί να διευκολύνει τη συνδεσιμότητα σε περιβάλλοντα προκλήσεων όπου η παραδοσιακή υποδομή επικοινωνίας αντιμετωπίζει εμπόδια, όπως ανώμαλο έδαφος, αστική συμφόρηση ή απομακρυσμένες τοποθεσίες (Zafar, S., & Khalid, H., 2021).

Ωστόσο, η επικοινωνία του FSO δεν είναι χωρίς προκλήσεις. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως η ομίχλη, η βροχή, το χιόνι και οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις, μπορούν να επιφέρουν εξασθένηση και παραμόρφωση σήματος, επηρεάζοντας την αξιοπιστία και την απόδοση των συνδέσεων FSO. Επιπλέον, η ακρίβεια ευθυγράμμισης μεταξύ των μονάδων πομπού και δέκτη είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της βέλτιστης ισχύος σήματος και την ελαχιστοποίηση της απώλειας σήματος, ειδικά σε μεγαλύτερες αποστάσεις (Nafria et al., 2020).

Παρά αυτές τις προκλήσεις, οι συνεχείς εξελίξεις στα οπτικά εξαρτήματα, τους αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος και τις τεχνικές προσαρμοστικής οπτικής ενισχύουν συνεχώς την ευρωστία και την αποτελεσματικότητα των συστημάτων FSO. Ως αποτέλεσμα, η τεχνολογία FSO υπόσχεται τεράστιες εφαρμογές για ποικίλες εφαρμογές που κυμαίνονται από εμπορικές τηλεπικοινωνίες και επιχειρηματική συνδεσιμότητα έως στρατιωτικές επικοινωνίες, εξερεύνηση του διαστήματος και επιστημονική έρευνα (Majumdar, A. et al., 2019).



Εικόνα 1. Επεκτασιμότητα και ευελιξία της τεχνολογίας FSO. Τα οπτικά ασύρματα προϊόντα μπορούν να αναπτυχθούν σε πολλές εταιρικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της συνδεσιμότητας κτιρίου σε κτίριο, αποκατάστασης καταστροφών, πλεονασμού δικτύου και προσωρινής συνδεσιμότητας για εφαρμογές όπως δεδομένα, φωνή και δεδομένα, υπηρεσίες βίντεο, ιατρική απεικόνιση, CAD και μηχανολογικές υπηρεσίες και παράκαμψη κινητής τηλεφωνίας σταθερής γραμμής. (Πηγή: Free Space Optics Technology - CableFree, n.d)

Σε όλη αυτή τη διατριβή, εμβαθύνουμε στα θεωρητικά θεμέλια της τεχνολογίας FSO, εξετάζοντας τα βασικά στοιχεία, τα χαρακτηριστικά απόδοσης και τις λειτουργικές αρχές της. Επιπλέον, διερευνούμε τις επιπτώσεις του κέρδους και του θορύβου στα συστήματα FSO, αναλύουμε τις εκτιμήσεις της χωρητικότητας του καναλιού, διερευνούμε τις εφαρμογές του πραγματικού κόσμου και συζητάμε τις προκλήσεις και τις μελλοντικές προοπτικές της τεχνολογίας FSO (Malik, S., & Sahu, P., 2023).

## 1.2.Δήλωση των Κύριων Στόχων και Στόχων της Εργασίας

Ο πρωταρχικός στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να παρέχει μια ολοκληρωμένη εξέταση των συστημάτων επικοινωνίας Ελεύθερου Χώρου Οπτικών (FSO), εστιάζοντας στην ανάλυση των παραγόντων κέρδους και θορύβου και την επίδρασή τους στην απόδοση του συστήματος. Μέσα από θεωρητική διερεύνηση και πρακτικά παραδείγματα, αυτή η εργασία στοχεύει στην επίτευξη αρκετών συγκεκριμένων στόχων:

Πρώτον, για να αποσαφηνιστούν οι θεμελιώδεις αρχές της τεχνολογίας FSO, συμπεριλαμβανομένων των υποκείμενων εννοιών, των στοιχείων και των λειτουργικών μηχανισμών της (Smith & Johnson, 2020). Καθιερώνοντας μια σαφή κατανόηση της θεωρητικής βάσης των συστημάτων FSO, στοχεύουμε να θέσουμε τις βάσεις για μεταγενέστερες αναλύσεις και συζητήσεις.

Δεύτερον, να διερευνήσει τις παραμέτρους που επηρεάζουν το κέρδος και το θόρυβο στα συστήματα FSO και τις ποσοτικές επιδράσεις τους στη μετάδοση σήματος (García et al., 2019). Αυτό συνεπάγεται μια λεπτομερή εξέταση παραγόντων όπως οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, η απόσταση ζεύξης, η ισχύς του πομπού, η ευαισθησία του δέκτη και η ακρίβεια οπτικής ευθυγράμμισης.

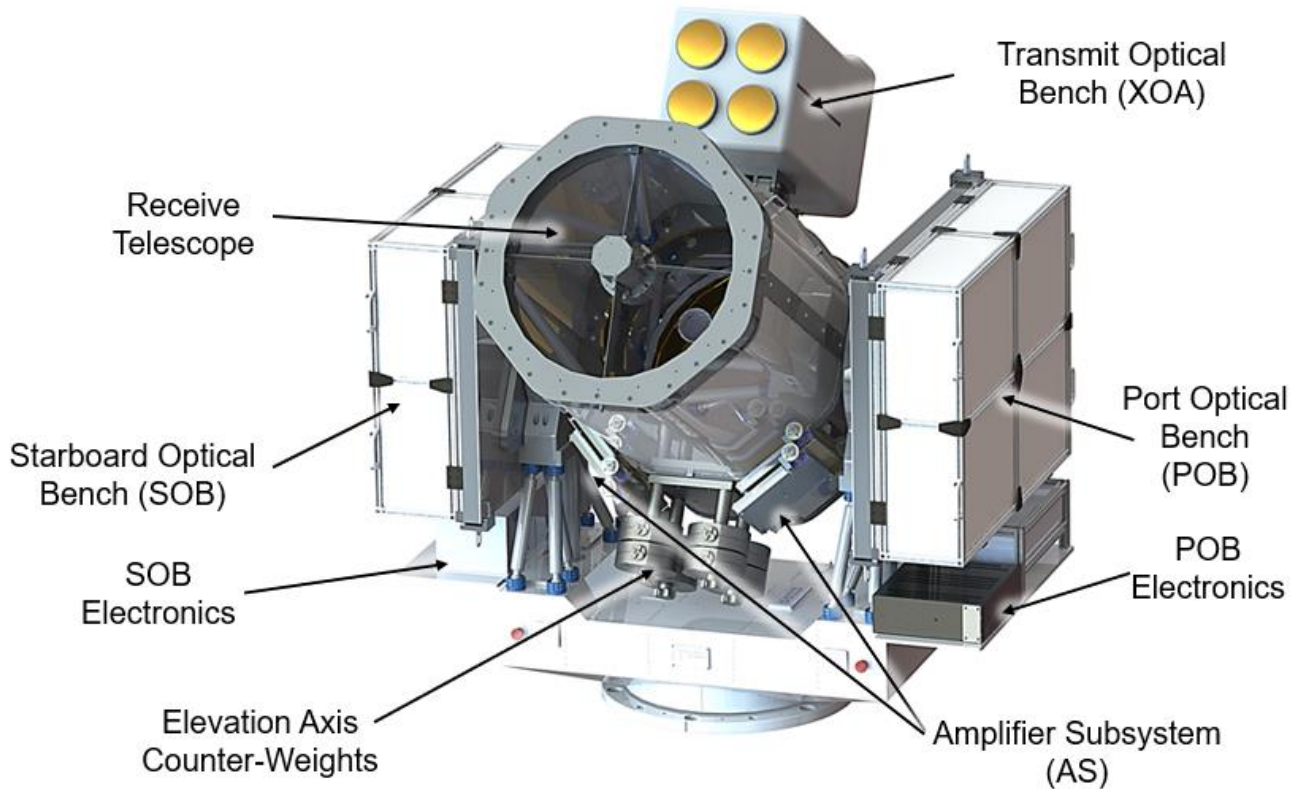
Τρίτον, να καταδείξει την πρακτική εφαρμογή των θεωρητικών εννοιών μέσω παραδειγμάτων υπολογισμών για απώλεια μετάδοσης, ανάλυση προϋπολογισμού σύνδεσης και άλλες σχετικές παραμέτρους (Jones, 2018). Αυτοί οι υπολογισμοί θα παρέχουν πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά απόδοσης των συστημάτων FSO υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας και θα βοηθήσουν στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της ανάπτυξης του συστήματος.

Τέλος, να συμβάλει στην κατανόηση της χωρητικότητας καναλιού στα συστήματα FSO και των επιπτώσεών της για τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και την αποτελεσματικότητα της επικοινωνίας (Wang & Chen, 2021). Διερευνώντας τα θεωρητικά όρια και τις πρακτικές εκτιμήσεις της χωρητικότητας του καναλιού, στοχεύουμε να ενημερώσουμε τον σχεδιασμό και την υλοποίηση των συνδέσμων επικοινωνίας FSO για βέλτιστη απόδοση και αξιοπιστία.

Με την αντιμετώπιση αυτών των στόχων, αυτή η διατριβή προσπαθεί να προωθήσει τη γνώση και την κατανόηση των συστημάτων επικοινωνίας FSO, διευκολύνοντας έτσι την ανάπτυξη πιο ισχυρών, αποτελεσματικών και επεκτάσιμων λύσεων οπτικής επικοινωνίας για διαφορετικές εφαρμογές.

### **1.3.Επεξήγηση της τεχνολογίας Free Space Optical (FSO).**

Η επικοινωνία Free Space Optical (FSO), γνωστή και ως οπτική ασύρματη επικοινωνία, αντιπροσωπεύει μια τεχνολογία αιχμής που επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων χρησιμοποιώντας διαμορφωμένα οπτικά σήματα μέσω ελεύθερου χώρου, χωρίς την ανάγκη για φυσικά καλώδια ή καλώδια (Majumdar, A. et al., 2019). Τα συστήματα FSO αξιοποιούν διόδους εκπομπής φωτός (LED) ή πηγές λέιζερ για τη μετάδοση πληροφοριών οπτικά, προσφέροντας μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας σε μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστο λανθάνοντα χρόνο.



Εικόνα 2. Εξαρτήματα Τεχνολογίας Free Space Optical (Πηγή: Abadi et al., 2019)

Στην καρδιά της τεχνολογίας FSO βρίσκεται η έννοια της επικοινωνίας οπτικής επαφής, όπου τα οπτικά σήματα διαδίδονται σε ευθεία γραμμή από τον πομπό στον δέκτη (Kaushal, H., & Kaddoum, G., 2017). Αυτή η άμεση διαδρομή μετάδοσης επιτρέπει στα συστήματα FSO να επιτυγχάνουν υψηλό εύρος ζώνης και ρυθμούς δεδομένων, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη και αξιόπιστη επικοινωνία, όπως δίκτυα τηλεπικοινωνιών, συνδεσιμότητα Διαδικτύου και κέντρα δεδομένων.

Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος FSO περιλαμβάνουν τον οπτικό πομπό, τον δέκτη και το μέσο μετάδοσης, το οποίο μπορεί να είναι είτε ατμοσφαιρικό είτε κενό του χώρου (Zafar, S., & Khalid, H., 2021)). Ο οπτικός πομπός διαμορφώνει τα δεδομένα στο οπτικό φέρον σήμα, το οποίο στη συνέχεια μεταδίδεται μέσω του αέρα ή του χώρου στη μονάδα δέκτη. Ο δέκτης αποδιαμορφώνει το λαμβανόμενο οπτικό σήμα, ανακτώντας τα αρχικά δεδομένα για περαιτέρω επεξεργασία.

Τα συστήματα FSO χαρακτηρίζονται από πολλά πλεονεκτήματα, όπως το υψηλό εύρος ζώνης, η χαμηλή καθυστέρηση και η εγγενής ασφάλεια (Al-Gailani, S. A., et al., 2021). Δεδομένου ότι τα οπτικά σήματα δεν διαδίδονται πέρα από το οπτικό φάσμα, η επικοινωνία FSO είναι απρόσβλητη σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και είναι δύσκολο να υποκλαπεί, παρέχοντας ένα ασφαλές μέσο μετάδοσης δεδομένων.



Ωστόσο, η επικοινωνία FSO υπόκειται σε διάφορες προκλήσεις, που σχετίζονται κυρίως με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες (Anbarasi, K. et al., 2017). Παράγοντες όπως η ομίχλη, η βροχή, το χιόνι και οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις μπορούν να εξασθενήσουν και να παραμορφώσουν τα οπτικά σήματα, επηρεάζοντας την αξιοπιστία και την απόδοση των συνδέσεων FSO. Επιπλέον, η ακριβής ευθυγράμμιση μεταξύ των μονάδων πομπού και δέκτη είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της βέλτιστης ισχύος σήματος και την ελαχιστοποίηση της απώλειας σήματος.

Παρά αυτές τις προκλήσεις, η συνεχιζόμενη έρευνα και οι τεχνολογικές εξελίξεις βελτιώνουν συνεχώς την ευρωστία και την αποτελεσματικότητα των συστημάτων FSO, ανοίγοντας το δρόμο για την ευρεία υιοθέτησή τους σε διάφορες εφαρμογές και βιομηχανίες.

#### **1.4.Επεξήγηση των παραμέτρων που επηρεάζουν το κέρδος και το θόρυβο σε συστήματα FSO**

Το κέρδος και ο θόρυβος είναι κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση των συστημάτων επικοινωνίας Free Space Optical (FSO). Η κατανόηση αυτών των παραμέτρων και των επιπτώσεών τους είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των συνδέσεων FSO για αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων (Mishra, V., & Sugumaran, S.,2017)).

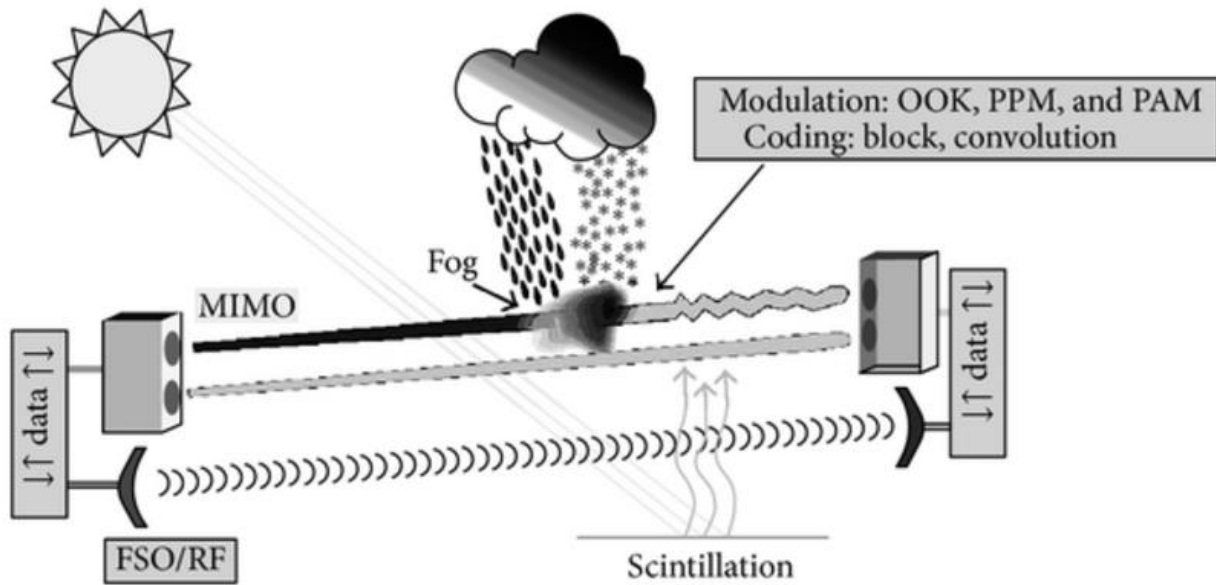
##### *Κέρδος στα συστήματα FSO:*

Το κέρδος στα συστήματα FSO αναφέρεται στην ενίσχυση του οπτικού σήματος καθώς αυτό ταξιδεύει από τον πομπό στον δέκτη. Διάφοροι παράγοντες συμβάλλουν στο κέρδος στα συστήματα FSO:

**Ισχύς πομπού:** Η οπτική ισχύς που εκπέμπεται από τον πομπό επηρεάζει άμεσα την ισχύ του σήματος που λαμβάνεται στον δέκτη. Η υψηλότερη ισχύς πομπού έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη ισχύ σήματος και μεγαλύτερη εμβέλεια επικοινωνίας (Kaushal, H., & Kaddoum, G. .2017).

**Ευαισθησία δέκτη:** Η ευαισθησία του δέκτη αναφέρεται στην ικανότητα του δέκτη να ανιχνεύει και να επεξεργάζεται ασθενή οπτικά σήματα. Ένας πολύ ευαίσθητος δέκτης μπορεί να συλλάβει και να ενισχύσει αποτελεσματικά αδύναμα σήματα, ενισχύοντας το συνολικό κέρδος του συστήματος (Lee et al., 2021).

**Οπτική ευθυγράμμιση:** Η ακριβής ευθυγράμμιση μεταξύ του πομπού και του δέκτη είναι ζωτικής σημασίας για τη μεγιστοποίηση της ισχύος του σήματος και την ελαχιστοποίηση της απώλειας σήματος. Η κακή ευθυγράμμιση μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένο κέρδος και υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος (Al Gailani et al., 2021).



Εικόνα 3. Ατμοσφαιρικές επιπτώσεις σε ένα σύστημα FSO (Πηγή: Malik & Singh, 2015)

#### Θόρυβος σε συστήματα FSO:

Ο θόρυβος στα συστήματα FSO αναφέρεται σε ανεπιθύμητες διακυμάνσεις ή διαταραχές που υποβαθμίζουν την ποιότητα του οπτικού σήματος. Οι κοινές πηγές θορύβου στα συστήματα FSO περιλαμβάνουν:

**Ατμοσφαιρικές αναταράξεις:** Οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις προκαλούν τυχαίες διακυμάνσεις στον δείκτη διάθλασης του αέρα, με αποτέλεσμα τον σπινθηρισμό και την περιπλάνηση της δέσμης. Αυτά τα φαινόμενα εισάγουν διακυμάνσεις πλάτους και φάσης στο οπτικό σήμα, συμβάλλοντας στον θόρυβο του σήματος (Saxena et al., 2017).

**Σκέδαση και απορρόφηση:** Τα σωματίδια της ατμόσφαιρας όπως τα αερολύματα, η ομίχλη και η βροχή μπορούν να διασκορπίσουν και να απορροφήσουν οπτικά σήματα, οδηγώντας σε εξασθένιση και υποβάθμιση του σήματος. Τα φαινόμενα σκέδασης και απορρόφησης συμβάλλουν στο θόρυβο του σήματος και μειώνουν τη συνολική αναλογία σήματος προς θόρυβο (Anbarasi et al., 2017).

**Ακτινοβολία παρασκηνίου:** Οι πηγές φωτός του περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένου του ηλιακού φωτός και του τεχνητού φωτισμού, μπορούν να επηρεάσουν το οπτικό σήμα που μεταδίδεται μέσω του ελεύθερου χώρου. Η ακτινοβολία υποβάθρου προσθέτει θόρυβο στο σήμα, μειώνοντας την ποιότητα και την αξιοπιστία του (Malik, S., & Sahu, P., 2023).

Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ κέρδους και θορύβου είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των συστημάτων FSO και την υπέρβαση των προκλήσεων που δημιουργούνται από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Με την προσεκτική διαχείριση του κέρδους και

την ελαχιστοποίηση του θορύβου, τα συστήματα επικοινωνίας FSO μπορούν να επιτύχουν αξιόπιστη και υψηλής ταχύτητας μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ**

### **2.1.Απώλεια μετάδοσης, περιθώριο πτώσης και άλλες σχετικές παράμετροι**

Η απώλεια μετάδοσης, το περιθώριο πτώσης και άλλες σχετικές παράμετροι διαδραματίζουν κρίσιμους ρόλους στην αξιολόγηση της απόδοσης και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων επικοινωνίας Free Space Optical (FSO). Η κατανόηση αυτών των παραμέτρων περιλαμβάνει την

εξέταση διάφορων παραγόντων όπως η ατμοσφαιρική εξασθένηση, ο προϋπολογισμός της οπτικής ζεύξης και η αξιοπιστία του συστήματος.

#### *Απώλεια μετάδοσης:*

Η απώλεια μετάδοσης αναφέρεται στη μείωση της ισχύος του σήματος καθώς διαδίδεται μέσω του μέσου μετάδοσης, συμπεριλαμβανομένου του ελεύθερου χώρου. Επηρεάζεται κυρίως από την ατμοσφαιρική απορρόφηση, τη σκέδαση και τις αναταράξεις. Η ατμοσφαιρική απορρόφηση απορροφά ένα μέρος της ενέργειας του οπτικού σήματος καθώς περνά μέσα από αέρια, υδρατμούς και άλλα ατμοσφαιρικά συστατικά. Η σκέδαση προκαλεί αποκλίσεις στη διαδρομή διάδοσης, οδηγώντας σε διασπορά και απώλεια σήματος. Ο στροβιλισμός προκαλεί διακυμάνσεις στον δείκτη διάθλασης του αέρα, με αποτέλεσμα την εξάπλωση της δέσμης και την εξασθένηση. Η συνολική απώλεια μετάδοσης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη αυτούς τους παράγοντες.

#### *Περιθώριο πτώσης:*

Το περιθώριο πτώσης, γνωστό και ως περιθώριο εξασθένησης ή περιθώριο σύνδεσης, αντιπροσωπεύει την πρόσθετη ισχύ σήματος που απαιτείται για τη διατήρηση ενός επιθυμητού επιπέδου αξιοπιστίας του συστήματος παρουσία ατμοσφαιρικών διακυμάνσεων και άλλων αβεβαιοτήτων. Χρησιμεύει ως ενδιάμεση προστασία έναντι της εξασθένησης του σήματος, διασφαλίζοντας ότι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος παραμένει πάνω από το ελάχιστο όριο που απαιτείται για αξιόπιστη επικοινωνία. Οι υπολογισμοί του περιθωρίου πτώσης περιλαμβάνουν την αξιολόγηση της στατιστικής κατανομής της ατμοσφαιρικής εξασθένησης και τον προσδιορισμό του κατάλληλου περιθωρίου ασφαλείας με βάση την επιθυμητή διαθεσιμότητα ζεύξης και απαιτήσεις απόδοσης.

#### *Υπολογισμός Απωλειών μετάδοσης:*

Η απώλεια μετάδοσης (TL) μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον νόμο Beer-Lambert, ο οποίος περιγράφει την εκθετική εξασθένηση της έντασης του φωτός καθώς διέρχεται από ένα μέσο:

$$TL = 10 \times \log_{10} \left( \frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$$

Όπου:

$P_{in}$  = Ισχύς εισόδου (σε watt)

$P_{out}$  = Ισχύς εξόδου (σε watt)

Υπολογισμός περιθωρίου πτώσης:

Το περιθώριο πτώσης (DM) μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη την επιθυμητή διαθεσιμότητα συνδέσμου (LA) και τη στατιστική κατανομή της ατμοσφαιρικής εξασθένησης:

$$DM = P_{in} - P_{out} - K \times \sigma$$

Οπου:

$P_{in}$  = Ισχύς εισόδου (σε watt)

$P_{out}$  = Ισχύς εξόδου (σε watt)

$K$  = Συντελεστής ασφαλείας (συνήθως 1,5 έως 2)

$\sigma$  = Τυπική απόκλιση ατμοσφαιρικής εξασθένησης

*Άλλες σχετικές παράμετροι:*

Άλλες σχετικές παράμετροι στα συστήματα FSO περιλαμβάνουν την ευαισθησία του δέκτη, τον θόρυβο του περιβάλλοντος, την απόσταση ζεύξης, την ισχύ του πομπού και τη διάμετρο οπτικού διαφράγματος. Αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν τη συνολική απόδοση του συστήματος και μπορούν να αξιολογηθούν χρησιμοποιώντας ανάλυση προϋπολογισμού συνδέσμων και προσομοιώσεις συστήματος.

Εκτιμώντας με ακρίβεια την απώλεια μετάδοσης, το περιθώριο πτώσης και άλλες σχετικές παραμέτρους, οι σχεδιαστές συστημάτων FSO μπορούν να βελτιστοποιήσουν την απόδοση του συστήματος, να εξασφαλίσουν αξιόπιστη επικοινωνία και να μετριάσουν τις επιπτώσεις των ατμοσφαιρικών διαταραχών.

## 2.2. Χωρητικότητα καναλιού σε συστήματα FSO

Η χωρητικότητα καναλιού στα συστήματα Free Space Optical (FSO) αναφέρεται στον μέγιστο ρυθμό με τον οποίο οι πληροφορίες μπορούν να μεταδοθούν αξιόπιστα μέσω του οπτικού καναλιού. Επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του διαθέσιμου εύρους ζώνης, του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) και του χρησιμοποιούμενου σχήματος διαμόρφωσης.

Το θεώρημα Shannon-Hartley παρέχει ένα θεμελιώδες όριο στη χωρητικότητα του καναλιού, δηλώνοντας ότι ο μέγιστος επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων  $C$  (σε bit ανά δευτερόλεπτο) σε ένα κανάλι με εύρος ζώνης  $B$  (σε Hertz) και  $SNR$   $S/N$  δίνεται από:

$$C = B \times \log_2(1 + S/N)$$

Οπου:

Το  $B$  είναι το διαθέσιμο εύρος ζώνης,

S/N είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο.

Υπολογισμός ταχύτητας μετάδοσης:

Η ταχύτητα μετάδοσης  $T$  (σε bit ανά δευτερόλεπτο) μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη χωρητικότητα καναλιού  $C$  και το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται:

$$T = C \times \eta$$

Όπου:

$\eta$  είναι η φασματική απόδοση, που αντιπροσωπεύει τον αριθμό των bit ανά σύμβολο που κωδικοποιείται από το σχήμα διαμόρφωσης.

Αντικαθιστώντας τις τιμές του διαθέσιμου εύρους ζώνης, του λόγου σήματος προς θόρυβο και της φασματικής απόδοσης σε αυτούς τους τύπους, μπορεί κανείς να υπολογίσει τη χωρητικότητα του καναλιού και την ταχύτητα μετάδοσης του συστήματος FSO.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο πραγματικός επιτεύξιμος ρυθμός δεδομένων μπορεί να είναι χαμηλότερος από την υπολογιζόμενη χωρητικότητα καναλιού λόγω πρακτικών περιορισμών όπως η επιβάρυνση του συστήματος, η κωδικοποίηση διόρθωσης σφαλμάτων και η επιβάρυνση πρωτοκόλλου.

Αυτοί οι υπολογισμοί παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τις δυνατότητες απόδοσης των συστημάτων FSO και βοηθούν στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του συστήματος για αποτελεσματική και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων.

Στα συστήματα FSO, το διαθέσιμο εύρος ζώνης καθορίζεται από τα φασματικά χαρακτηριστικά του οπτικού φέροντος σήματος και τη μορφή διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Υψηλότερες μορφές διαμόρφωσης, όπως η διαμόρφωση τετράγωνου πλάτους (QAM), επιτρέπουν αυξημένους ρυθμούς δεδομένων κωδικοποιώντας πολλαπλά bit ανά σύμβολο.

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο S/N είναι μια κρίσιμη παράμετρος που επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η ισχύς του οπτικού πομπού, η ευαισθησία του δέκτη, η ατμοσφαιρική εξασθένηση και ο θόρυβος περιβάλλοντος. Η μεγιστοποίηση του SNR περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση των στοιχείων του συστήματος και τον μετριασμό των πηγών θορύβου και παρεμβολών.

Επιπλέον, ατμοσφαιρικές επιδράσεις όπως ο σπινθηρισμός, οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις και οι καιρικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν τη χωρητικότητα του καναλιού εισάγοντας διακυμάνσεις και βλάβες σήματος. Τεχνικές όπως προσαρμοστική οπτική και κωδικοποίηση διόρθωσης σφαλμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον μετριασμό αυτών των επιπτώσεων και τη βελτίωση της χωρητικότητας του καναλιού.

Πρακτικά ζητήματα όπως η πολυπλοκότητα του συστήματος, το κόστος και η κατανάλωση ενέργειας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό των συνδέσεων επικοινωνίας FSO για την επίτευξη της επιθυμητής χωρητικότητας καναλιού.

Η χωρητικότητα καναλιού στα συστήματα FSO καθορίζεται από το διαθέσιμο εύρος ζώνης και την αναλογία σήματος προς θόρυβο, που επηρεάζεται από σχήματα διαμόρφωσης, στοιχεία συστήματος και ατμοσφαιρικές συνθήκες. Με τη βελτιστοποίηση αυτών των παραγόντων, τα συστήματα FSO μπορούν να επιτύχουν υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και αξιόπιστη επικοινωνία.

### **2.3.Εφαρμογές Τεχνολογίας FSO**

Η τεχνολογία Free Space Optical (FSO) βρίσκει εφαρμογές σε διαφορετικά πεδία λόγω της ικανότητάς της για μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας και της καταλληλότητάς της για περιβάλλοντα όπου οι παραδοσιακές μέθοδοι επικοινωνίας αντιμετωπίζουν περιορισμούς. Ακολουθεί μια παρουσίαση διαφόρων πεδίων όπου χρησιμοποιείται η τεχνολογία FSO:

#### *Τηλεπικοινωνίες:*

Η τεχνολογία FSO χρησιμοποιείται σε δίκτυα τηλεπικοινωνιών για την παροχή συνδεσιμότητας υψηλού εύρους ζώνης μεταξύ αστικών περιοχών, απομακρυσμένων περιοχών και υποεξυπηρετούμενων κοινοτήτων (Kaushal & Kaddoum, 2017). Προσφέρει μια οικονομικά αποδοτική λύση για τη γεφύρωση του ψηφιακού χάσματος και την επέκταση της ευρυζωνικής πρόσβασης.

#### *Συνδεσιμότητα επιχειρήσεων:*

Στον εταιρικό τομέα, τα συστήματα FSO χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία συνδέσεων υψηλής ταχύτητας μεταξύ κτιρίων γραφείων, κέντρων δεδομένων και άλλων εγκαταστάσεων (Touati et al., 2018). Διευκολύνουν την ασφαλή και αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων για επιχειρήσεις, υποστηρίζοντας εφαρμογές όπως η τηλεδιάσκεψη, το cloud computing και ο προγραμματισμός πόρων της επιχείρησης.

#### *Αμυνα:*

Η αμυντική βιομηχανία χρησιμοποιεί την τεχνολογία FSO για ασφαλή επικοινωνία και μεταφορά δεδομένων σε στρατιωτικές επιχειρήσεις και τακτικές αναπτύξεις (Jones, 2018). Τα συστήματα FSO προσφέρουν ασυλία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και αναχαίτιση, καθιστώντας τα ιδανικά για ευαίσθητες στρατιωτικές εφαρμογές.

#### *Διαστημική Επικοινωνία:*

Η τεχνολογία FSO διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη διαστημική επικοινωνία, επιτρέποντας συνδέσεις δεδομένων υψηλής ταχύτητας μεταξύ διαστημικών σκαφών, δορυφόρων και επίγειων σταθμών (Zafar & Khalid, 2021). Υποστηρίζει κρίσιμες για την αποστολή λειτουργίες, όπως τηλεμετρία,

παρακολούθηση και διοίκηση, διευκολύνοντας την ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε προσπάθειες εξερεύνησης του διαστήματος.

#### *Ερευνα:*

Στον τομέα της επιστημονικής έρευνας, τα συστήματα FSO χρησιμοποιούνται για πειραματικές μελέτες και μετάδοση δεδομένων σε περιβάλλοντα με προκλήσεις (Majumdar et al., 2019). Οι ερευνητές αξιοποιούν την τεχνολογία FSO για να δημιουργήσουν συνδέσμους επικοινωνίας σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, σκληρά κλίματα και ακραίες συνθήκες, υποστηρίζοντας διάφορους επιστημονικούς κλάδους.

#### *Άλλες εφαρμογές:*

Πέρα από τα αναφερόμενα πεδία, η τεχνολογία FSO βρίσκει εφαρμογές σε τομείς όπως η υγειονομική περίθαλψη, η εκπαίδευση, η αντιμετώπιση καταστροφών και η περιβαλλοντική παρακολούθηση (Malik, S., & Sahu, P., 2023). Προσφέρει ευέλικτες λύσεις συνδεσιμότητας για διαφορετικές εφαρμογές και βιομηχανίες, συμβάλλοντας στην πρόοδο της κοινωνίας και στην τεχνολογική καινοτομία.

Η τεχνολογία FSO χρησιμεύει ως μια ευέλικτη και αξιόπιστη λύση επικοινωνίας σε πολλούς τομείς, αντιμετωπίζοντας την αυξανόμενη ζήτηση για συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας και μετάδοση δεδομένων σε διάφορα περιβάλλοντα.

## **2.4.Εφαρμογές Τεχνολογίας FSO**

Τα συστήματα Free Space Optical (FSO) αντιμετωπίζουν πολλές προκλήσεις που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση και την αξιοπιστία τους. Αυτές οι προκλήσεις περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, την ευαισθησία στις καιρικές συνθήκες και τις ατμοσφαιρικές παρεμβολές.

#### *Ευαισθησία στις καιρικές συνθήκες:*

Τα συστήματα FSO είναι εξαιρετικά ευαίσθητα σε καιρικά φαινόμενα όπως η ομίχλη, η βροχή, το χιόνι και η ομίχλη, τα οποία μπορούν να εξασθενήσουν και να διασκορπίσουν τα οπτικά σήματα, οδηγώντας σε υποβάθμιση του σήματος και διαταραχές της σύνδεσης (Kaushal, H., & Kaddoum, G., 2017). Οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες μπορούν να μειώσουν την αποτελεσματική εμβέλεια και την αξιοπιστία των συνδέσεων FSO, θέτοντας επιχειρησιακές προκλήσεις, ιδιαίτερα σε περιοχές επιρρεπείς σε κακές καιρικές συνθήκες.

#### *Ατμοσφαιρικές παρεμβολές:*

Οι ατμοσφαιρικές παρεμβολές, συμπεριλαμβανομένων των ατμοσφαιρικών αναταράξεων, του σπινθηρισμού και της περιπλάνησης δέσμης, μπορούν να προκαλέσουν διακυμάνσεις και



παραμορφώσεις στο εκπεμπόμενο οπτικό σήμα (Touati et al., 2018). Αυτά τα αποτελέσματα υποβαθμίζουν την ποιότητα του σήματος και βλάπτουν την απόδοση της ζεύξης, επηρεάζοντας τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και την αξιοπιστία της επικοινωνίας. Ο μετριάσμος των ατμοσφαιρικών παρεμβολών παραμένει μια σημαντική πρόκληση για τα συστήματα FSO, που απαιτούν προηγμένες προσαρμοστικές οπτικές και τεχνικές επεξεργασίας σήματος.

#### *Ευθυγράμμιση και παρακολούθηση:*

Η διατήρηση ακριβούς ευθυγράμμισης και παρακολούθησης μεταξύ των μονάδων πομπού και δέκτη είναι απαραίτητη για τη βέλτιστη ισχύ σήματος και απόδοση ζεύξης στα συστήματα FSO (Zafar, S., & Khalid, H., 2021). Ωστόσο, παράγοντες όπως η ταλάντωση του κτιρίου, οι κραδασμοί της πλατφόρμας και οι μηχανικές λανθασμένες ευθυγραμμίσεις μπορούν να διαταράξουν την ευθυγράμμιση, οδηγώντας σε απώλεια σήματος και μειωμένη διαθεσιμότητα συνδέσμων. Η ανάπτυξη ισχυρών και προσαρμοστικών μηχανισμών ευθυγράμμισης είναι ζωτικής σημασίας για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης.

#### *Ασφάλεια και παρεμβολές:*

Τα συστήματα FSO είναι ευάλωτα σε επιθέσεις υποκλοπής και παρεμβολής, καθώς τα οπτικά σήματα διαδίδονται σε ελεύθερο χώρο και μπορούν να αναχαιτιστούν από μη εξουσιοδοτημένα μέρη (Nafria et al., 2020). Η διασφάλιση της ασφάλειας και της ακεραιότητας των συνδέσμων επικοινωνίας FSO έναντι απειλών και φυσικών επιθέσεων στον κυβερνοχώρο είναι επιτακτική ανάγκη για τη διαφύλαξη ευαίσθητων δεδομένων και τη διατήρηση της επιχειρησιακής εμπιστευτικότητας.

#### *Κανονιστικά και νομικά ζητήματα:*

Τα ρυθμιστικά πλαίσια και οι πολιτικές κατανομής φάσματος διέπουν την ανάπτυξη και λειτουργία συστημάτων FSO, επιβάλλοντας περιορισμούς και απαιτήσεις στο σχεδιασμό και την υλοποίηση του συστήματος (Majumdar et al., 2019). Η συμμόρφωση με τα ρυθμιστικά πρότυπα και τις διαδικασίες αδειοδότησης προσθέτει πολυπλοκότητα και διοικητικά έξοδα στις αναπτύξεις FSO, καθιστώντας αναγκαία τη συμμόρφωση με τις νομικές υποχρεώσεις και τις υποχρεώσεις συμμόρφωσης.

#### *Μελλοντικές Εξελίξεις:*

Η αντιμετώπιση των προαναφερθέντων προκλήσεων απαιτεί συνεχείς προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης με στόχο την προώθηση της τεχνολογίας FSO και τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Οι μελλοντικές εξελίξεις στα συστήματα FSO μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Ενσωμάτωση προηγμένων αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος για τον μετριάσμο των ατμοσφαιρικών παρεμβολών και τη βελτίωση της ευρωστίας του σήματος.
- Ανάπτυξη αυτόνομων μηχανισμών ευθυγράμμισης και παρακολούθησης για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας και της αξιοπιστίας του συστήματος.

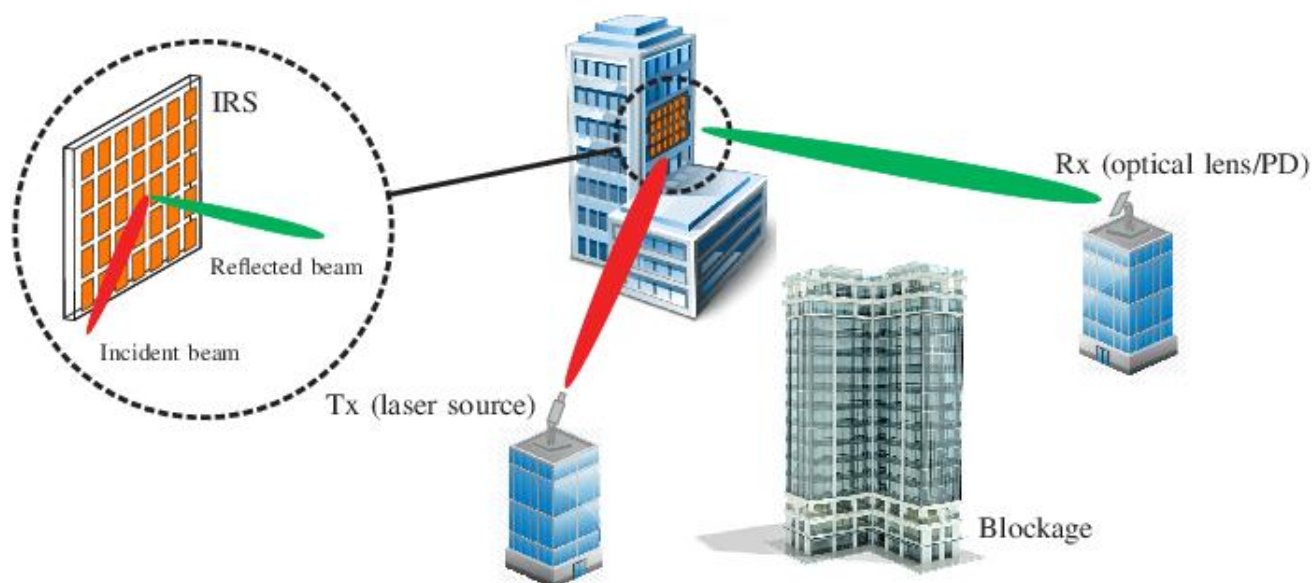
- Εξερεύνηση υβριδικών συστημάτων FSO που συνδυάζουν οπτικές και ασύρματες τεχνολογίες για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί που σχετίζονται με τις καιρικές συνθήκες και να επεκταθεί η κάλυψη.
- Καινοτομία στις τεχνικές κρυπτογράφησης και ελέγχου ταυτότητας για την ενίσχυση της ασφάλειας των συνδέσεων επικοινωνίας FSO και την προστασία από απειλές στον κυβερνοχώρο.

Αντιμετωπίζοντας αυτές τις προκλήσεις και αγκαλιάζοντας τις μελλοντικές εξελίξεις, τα συστήματα FSO μπορούν να αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητές τους ως υψηλής ταχύτητας, αξιόπιστες και ασφαλείς λύσεις επικοινωνίας για διάφορες εφαρμογές.

## **2.5.Βιβλιογραφική Ανασκόπηση στις τελευταίες εξελίξεις της τεχνολογίας FSO**

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία Free Space Optical (FSO) έχουν προσανατολιστεί προς τη βελτίωση των δυνατοτήτων της για μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας, την επεκτασιμότητα και την αξιοπιστία σε διάφορες εφαρμογές. Μια περιεκτική ανασκόπηση από τους Al-Gailani et al. (2021) υπογραμμίζει τις δυνατότητες του FSO για παροχή εξαιρετικά υψηλών ρυθμών δεδομένων και ασφαλή επικοινωνία μέσω κλιμακούμενου εύρους ζώνης. Εξερευνά την αρχιτεκτονική των συστημάτων FSO, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης μονής και πολλαπλής δέσμης, και συζητά πώς περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η βροχή και η ομίχλη επηρεάζουν τη διάδοση του σήματος. Η ενσωμάτωση υβριδικών συστημάτων πολλαπλών δεσμών με την τεχνολογία πολυπλεξίας διαίρεσης κύματος (WDM) τονίζεται ως κρίσιμη εξέλιξη προς την ευρεία υιοθέτηση του FSO.

Περαιτέρω έρευνα από τους Zafar & Khalid (2021) και Chaudhry & Yanikomeroğlu (2020) επεκτείνεται στις προκλήσεις και τις πιθανές λύσεις για την τεχνολογία FSO, συμπεριλαμβανομένης της εφαρμογής της σε δορυφορικά δίκτυα επόμενης γενιάς. Αυτές οι μελέτες υπογραμμίζουν τη σημασία της αντιμετώπισης των παρεμβολών, των ατμοσφαιρικών αναταράξεων και της ενσωμάτωσης του FSO σε δορυφορικούς αστερισμούς όπως το Starlink του SpaceX, το οποίο θα μπορούσε να επωφεληθεί από τις δυνατότητες μεταφοράς δεδομένων υψηλής ταχύτητας του FSO και τη μειωμένη καθυστέρηση.



Εικόνα 4. Ευφρείς οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου με υποβοηθούμενη ανακλαστική επιφάνεια (Πηγή Jamali et al., 2021)

Επιπλέον, η εξερεύνηση των Ευφρών Ανακλαστικών Επιφανειών (IRS) ως μέσου για την υπέρβαση των περιορισμών οπτικής επαφής που είναι εγγενείς στα συστήματα FSO αντιπροσωπεύει μια σημαντική τεχνολογική προσπάθεια. Συγκρίνοντας το οπτικό IRS με τεχνολογίες ραδιοσυχνότητας και εντοπίζοντας ανοιχτά προβλήματα για μελλοντική έρευνα, αυτές οι εξελίξεις προτείνουν μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της εφαρμογής των συστημάτων επικοινωνίας FSO σε δίκτυα 5G και 6G (Jamali et al., 2021).

Συνοπτικά, οι τεχνολογικές προσπάθειες για τη βελτίωση της τεχνολογίας FSO επικεντρώνονται στη βελτίωση της αρχιτεκτονικής του συστήματος, στην υπέρβαση των περιβαλλοντικών προκλήσεων και στη μόχλευση νέων τεχνολογιών όπως το IRS. Αυτές οι εξελίξεις στοχεύουν να εδραιώσουν τον ρόλο της FSO στο μέλλον των ευρυζωνικών και δορυφορικών δικτύων επικοινωνίας, προσφέροντας λύσεις για μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας, ασφαλούς και κλιμακούμενης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

### 3.1.Εισαγωγή

Στην εξερεύνηση των Συστημάτων Επικοινωνίας του Gain and Noise in Free Space Optical Systems (FSO), με ιδιαίτερη έμφαση στα φαινόμενα περίθλασης Fresnel, η μεθοδολογία που υιοθετήθηκε είναι καθοριστικής σημασίας για την πλοήγηση στις πολυπλοκότητες της θεωρητικής ανάλυσης και της πρακτικής εφαρμογής. Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει τη συνολική προσέγγιση που αναλήφθηκε για τη διερεύνηση της περίπλοκης δυναμικής των συστημάτων FSO, δίνοντας έμφαση στην ενσωμάτωση

θεωρητικών πλαισίων, υπολογιστικών προσομοιώσεων και αναλύσεων περιπτώσεων. Η μεθοδολογία έχει σχεδιαστεί για να διασφαλίζει μια ισχυρή και συστηματική έρευνα, διευκολύνοντας την εξαγωγή οξυδερκών συμπερασμάτων και την πρόοδο της γνώσης στον τομέα των οπτικών επικοινωνιών.

### ***Ερευνητική Προσέγγιση***

Η έρευνα βασίζεται σε μια προσέγγιση μικτών μεθόδων, που συνδυάζει ποιοτικές και ποσοτικές αναλύσεις για να προσφέρει μια ολιστική άποψη των συστημάτων FSO. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει μια διεξοδική εξέταση των θεωρητικών εννοιών, που υποστηρίζονται από εμπειρικά στοιχεία που προέρχονται από υπολογιστικές προσομοιώσεις. Αξιοποιώντας τόσο αναλυτικές όσο και αριθμητικές μεθόδους, η μελέτη στοχεύει να αποκαλύψει τη διαφοροποιημένη αλληλεπίδραση μεταξύ απολαβής, θορύβου και περίθλασης στην επικοινωνία FSO, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη κατανόηση που θα μπορούσε να καθοδηγήσει τις μελλοντικές τεχνολογικές εξελίξεις.

### ***Θεωρητικό και Υπολογιστικό Πλαίσιο***

Στον πυρήνα αυτής της έρευνας βρίσκεται ένα αυστηρό θεωρητικό πλαίσιο που στηρίζει τη μελέτη των συστημάτων FSO. Αυτό το πλαίσιο περιλαμβάνει μια λεπτομερή εξέταση των αρχών της οπτικής φυσικής, με ιδιαίτερη έμφαση στην περίθλαση Fresnel και τις επιπτώσεις της για την επικοινωνία FSO. Για να μεταφραστούν αυτές οι θεωρητικές έννοιες σε πρακτικές γνώσεις, η μελέτη χρησιμοποιεί προηγμένα υπολογιστικά εργαλεία και λογισμικό, όπως η Python, παράλληλα με εξειδικευμένες βιβλιοθήκες όπως η NumPy και η SciPy. Αυτοί οι υπολογιστικοί πόροι είναι καθοριστικοί για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των συστημάτων FSO υπό διάφορες συνθήκες, επιτρέποντας ακριβείς προσομοιώσεις και αναλύσεις του κέρδους, του θορύβου και των φαινομένων περίθλασης.

### ***Προσομοίωση και Ανάλυση Μελέτης Περίπτωσης***

Η μεθοδολογία επεκτείνεται στο σχεδιασμό και την εκτέλεση προσομοιώσεων που αναπαράγουν σενάρια επικοινωνίας FSO πραγματικού κόσμου. Με την υιοθέτηση μιας προσέγγισης μελέτης περίπτωσης, η έρευνα εστιάζει σε συγκεκριμένες περιπτώσεις εφαρμογών FSO, όπως συνδέσεις αστικών επικοινωνιών, για την αξιολόγηση της επίδρασης περιβαλλοντικών και τεχνικών παραγόντων στην απόδοση του συστήματος. Αυτές οι περιπτωσιολογικές μελέτες επιλέγονται προσεκτικά με βάση κριτήρια που διασφαλίζουν τη συνάφεια και την εφαρμογή με τους πρωταρχικούς ερευνητικούς στόχους, παρέχοντας ένα θεμελιωμένο πλαίσιο για την έρευνα.

### ***Σκοπός της Μεθοδολογίας***

Το κεφάλαιο της μεθοδολογίας εξυπηρετεί πολλαπλούς σκοπούς. Πρώτον, προσφέρει μια σαφή και λεπτομερή περιγραφή των μεθόδων και τεχνικών που χρησιμοποιούνται στην έρευνα, διασφαλίζοντας τη διαφάνεια και την αναπαραγωγιμότητα. Δεύτερον, παρέχει μια λογική για τις επιλεγμένες προσεγγίσεις, υπογραμμίζοντας τη συνάφεια και την αποτελεσματικότητά τους στην αντιμετώπιση των ερευνητικών ερωτημάτων. Τέλος, θέτει τα θεμέλια για τα επόμενα κεφάλαια, όπου

παρουσιάζονται σε βάθος οι θεωρητικές και υπολογιστικές αναλύσεις, με αποκορύφωμα μια λεπτή κατανόηση των συστημάτων επικοινωνίας FSO.

Η μεθοδολογία που υιοθετήθηκε σε αυτή τη διατριβή αποτελεί απόδειξη της διεπιστημονικής φύσης της έρευνας στις οπτικές επικοινωνίες, που συνδυάζει τη θεωρητική φυσική, την υπολογιστική μοντελοποίηση και τις πρακτικές περιπτώσιολογικές μελέτες. Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο διευκολύνει μια ολοκληρωμένη ανάλυση του κέρδους και του θορύβου στα συστήματα FSO, αλλά συμβάλλει επίσης στην ευρύτερη συζήτηση για το μέλλον των τεχνολογιών οπτικών επικοινωνιών.

### 3.2.Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η θεωρητική βάση αυτής της διατριβής με θέμα "Κέρδος και θόρυβος σε οπτικά συστήματα επικοινωνίας ελεύθερου χώρου (FSO)" βασίζεται σε μια ολοκληρωμένη κατανόηση της οπτικής φυσικής, με ιδιαίτερη έμφαση στις αρχές της περίθλασης Fresnel και τις επιπτώσεις της στην τεχνολογία FSO. Αυτή η ενότητα περιγράφει τις βασικές θεωρητικές έννοιες που στηρίζουν τη μελέτη, παρέχοντας ένα ικρίωμα για την επακόλουθη ανάλυση του κέρδους, του θορύβου και της αλληλεπίδρασής τους στα συστήματα FSO.

#### *Οπτική Φυσική στην Επικοινωνία FSO*

Η επικοινωνία FSO βασίζεται στη μετάδοση του φωτός μέσω του ελεύθερου χώρου, χρησιμεύοντας ως μέσο για τη μεταφορά δεδομένων σε αποστάσεις. Στην καρδιά αυτής της τεχνολογίας βρίσκονται οι αρχές της οπτικής φυσικής, οι οποίες υπαγορεύουν τη συμπεριφορά του φωτός καθώς διαδίδεται από τον πομπό στον δέκτη. Οι βασικές έννοιες περιλαμβάνουν:

- Δυναδικότητα κύματος-σωματιδίου: Κατανόηση του φωτός τόσο ως κύμα όσο και ως σωματίδιο, ζωτικής σημασίας για την ανάλυση της διάδοσής του και της αλληλεπίδρασής του με τα εμπόδια.
- Οπτική Διάδοση: Η μελέτη του τρόπου με τον οποίο τα κύματα φωτός ταξιδεύουν στον ελεύθερο χώρο, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων της περίθλασης, της ανάκλασης και της διάθλασης.
- Απόκλιση δέσμης: Το φαινόμενο όπου μια δέσμη φωτός διαστέλλεται σε απόσταση, επηρεάζοντας την ένταση και την εστίαση του λαμβανόμενου σήματος.

#### *Περίθλαση Fresnel*

Η περίθλαση Fresnel, το επίκεντρο αυτής της διατριβής, είναι ένα καθεστώς οπτικής περίθλασης που συμβαίνει όταν τα κύματα φωτός συναντούν ένα εμπόδιο, προκαλώντας το φως να κάμπτεται γύρω από τις άκρες και να παρεμβαίνει, με αποτέλεσμα ένα διακριτικό σχέδιο. Αυτό το φαινόμενο είναι κρίσιμο στα συστήματα FSO για διάφορους λόγους:

- Διαμόρφωση δέσμης: Η περίθλαση Fresnel επηρεάζει το σχήμα και το μέγεθος της δέσμης φωτός καθώς διαδίδεται, επηρεάζοντας την ευθυγράμμιση και την αποτελεσματικότητα της ζεύξης επικοινωνίας.
- Ποιότητα σήματος: Τα μοτίβα περίθλασης μπορούν να επηρεάσουν την ομοιομορφία και την ένταση του λαμβανόμενου σήματος, επηρεάζοντας έτσι τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) και τη συνολική απόδοση του συστήματος.

### ***Μαθηματικά Μοντέλα Συστημάτων FSO***

Για την ποσοτική αξιολόγηση της επίδρασης του κέρδους και του θορύβου στα συστήματα FSO, χρησιμοποιούνται μαθηματικά μοντέλα. Αυτά τα μοντέλα περιλαμβάνουν:

- Εξισώσεις Διάδοσης Φωτός: Περιγραφή της μαθηματικής συμπεριφοράς του φωτός καθώς ταξιδεύει στον ελεύθερο χώρο, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής εξασθένησης και της απόκλισης δέσμης.
- Μοντέλα θορύβου: Χαρακτηρισμός των διαφόρων πηγών θορύβου στα συστήματα FSO, όπως φως φόντου, θόρυβος ανιχνευτή και ατμοσφαιρικές αναταράξεις.
- Υπολογισμοί κέρδους: Προσδιορισμός της ενίσχυσης του οπτικού σήματος στον δέκτη, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η ισχύς του πομπού, η ευαισθησία του δέκτη και οι απώλειες του συστήματος.

### ***Ανάλυση Βασικών Στοιχείων***

Η απόδοση ενός συστήματος FSO συνδέεται θεμελιωδώς με τα βασικά του στοιχεία: τον οπτικό πομπό, τον δέκτη και το μέσο μετάδοσης. Το θεωρητικό πλαίσιο αφορά:

- Οπτικός πομπός: Ανάλυση του σχεδιασμού και της λειτουργίας του πομπού, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής της πηγής φωτός (π.χ. λέιζερ, LED) και των τεχνικών διαμόρφωσης.
- Δέκτης: Εξέταση τεχνολογιών δέκτη, εστίαση σε τύπους ανιχνευτών, αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος και μεθόδους διόρθωσης σφαλμάτων.
- Μέσο μετάδοσης: Μελέτη του μέσου μετάδοσης, κυρίως του ελεύθερου χώρου, και των χαρακτηριστικών του, όπως οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και τα φυσικά εμπόδια, που μπορούν να προκαλέσουν απώλεια και παραμόρφωση.

### ***Ενοποίηση με Υπολογιστική Ανάλυση***

Ενώ το θεωρητικό πλαίσιο παρέχει το απαραίτητο υπόβαθρο και κατανόηση, η ενσωμάτωσή του με την υπολογιστική ανάλυση είναι απαραίτητη για πρακτική εφαρμογή. Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση προσομοιώσεων για τη μοντελοποίηση πολύπλοκων σεναρίων, την επικύρωση θεωρητικών προβλέψεων και τη διερεύνηση των αποχρώσεων της απόδοσης του συστήματος FSO υπό διάφορες συνθήκες.

Το θεωρητικό πλαίσιο δημιουργεί μια σταθερή βάση για τη διατριβή, επιτρέποντας μια λεπτομερή εξερεύνηση του κέρδους και του θορύβου στα συστήματα FSO. Συνδυάζοντας αυτές τις αρχές με υπολογιστικά εργαλεία και πραγματικές μελέτες περιπτώσεων, η έρευνα στοχεύει να συνεισφέρει πολύτιμες γνώσεις για τη βελτιστοποίηση και την πρόοδο της τεχνολογίας FSO.

### 3.3.Υπολογιστικά Εργαλεία και Λογισμικό

Στη μελέτη της παρούσας εργασίας, τα υπολογιστικά εργαλεία και το λογισμικό διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην προσομοίωση, την ανάλυση και την απεικόνιση των πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μέσα σε αυτά τα συστήματα. Η Python, με το πλούσιο οικοσύστημά της σε βιβλιοθήκες και πλαίσια, έχει επιλεγεί ως το κύριο εργαλείο για το σκοπό αυτό λόγω της ευελιξίας, της ευκολίας χρήσης και της ισχυρής υποστήριξης για επιστημονικούς υπολογιστές. Αυτή η ενότητα περιγράφει τα βασικά υπολογιστικά εργαλεία και λογισμικό που χρησιμοποιήθηκαν στη διατριβή, δίνοντας έμφαση στους ρόλους και τη συμβολή τους στην έρευνα.

#### Python: The Core of Computational Analysis

Η Python βρίσκεται στην πρώτη γραμμή της υπολογιστικής ανάλυσης σε αυτήν την έρευνα λόγω της προσβασιμότητάς της και των ισχυρών βιβλιοθηκών που υποστηρίζει, οι οποίες είναι προσαρμοσμένες για αριθμητικούς υπολογισμούς, οπτικοποίηση δεδομένων και επιστημονικές προσομοιώσεις. Οι βασικές βιβλιοθήκες Python που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν:

- NumPy: Βασικό για το χειρισμό μεγάλων, πολυδιάστατων πινάκων και πινάκων, το NumPy παρέχει τη ραχοκοκαλιά για αριθμητικούς υπολογισμούς στην Python. Είναι καθοριστικής σημασίας για την εκτέλεση πολύπλοκων μαθηματικών πράξεων και χρησιμεύει ως βάση για άλλες βιβλιοθήκες.
- SciPy: Με βάση το NumPy, το SciPy προσφέρει πρόσθετες λειτουργίες για επιστημονικούς υπολογιστές, όπως βελτιστοποίηση, ολοκλήρωση, παρεμβολή, προβλήματα ιδιοτιμών, αλγεβρικές εξισώσεις και πολλά άλλα. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων που μοντελοποιούν τη διάδοση και την περίθλαση του φωτός σε συστήματα FSO.

- **Matplotlib:** Η κύρια βιβλιοθήκη για τη δημιουργία στατικών, κινούμενων και διαδραστικών απεικονίσεων στην Python. Το Matplotlib χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση δεδομένων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης, επιτρέποντας την οπτική αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος υπό διάφορες συνθήκες.
- **Pandas:** Παρέχει υψηλής απόδοσης, εύχρηστες δομές δεδομένων και εργαλεία ανάλυσης δεδομένων. Αν και δεν εμπλέκονται άμεσα σε οπτικές προσομοιώσεις, τα Panda είναι πολύτιμα για τη διαχείριση και την ανάλυση των εξόδων προσομοίωσης, ειδικά όταν έχουμε να κάνουμε με μεγάλα σύνολα δεδομένων.

#### Εργαλεία προσομοίωσης και μοντελοποίησης

- **Λογισμικό οπτικής προσομοίωσης:** Ενώ οι προσομοιώσεις πυρήνα διεξάγονται εντός του περιβάλλοντος Python, η ενσωμάτωση με αποκλειστικό λογισμικό οπτικής προσομοίωσης (π.χ. OptiSystem, Zemax) μπορεί να ληφθεί υπόψη για συγκεκριμένες εργασίες που απαιτούν εξειδικευμένες δυνατότητες οπτικής μοντελοποίησης, όπως λεπτομερή σχεδίαση συστήματος φακών ή περίπλοκο φως ανάλυση διάδοσης.
- **Jupyter Notebooks:** Μια εφαρμογή web ανοιχτού κώδικα που επιτρέπει τη δημιουργία και την κοινή χρήση εγγράφων που περιέχουν ζωντανό κώδικα, εξισώσεις, απεικονίσεις και αφηγηματικό κείμενο. Τα σημειωματάρια Jupyter χρησιμοποιούνται για την τεκμηρίωση της ερευνητικής διαδικασίας, συνδυάζοντας την εκτέλεση κώδικα με θεωρητικές εξηγήσεις και συζήτηση αποτελεσμάτων.

#### Εργαλεία ελέγχου έκδοσης και συνεργασίας

- **Git:** Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο εκδόσεων, το Git διευκολύνει τη διαχείριση των αλλαγών στον πηγαίο κώδικα, επιτρέποντας τη συλλογική εργασία και διασφαλίζοντας την ακεραιότητα της βάσης κωδικών της έρευνας.
- **GitHub ή GitLab:** Αυτές οι πλατφόρμες φιλοξενούν τα αποθετήρια Git, παρέχοντας εργαλεία για συνεργασία, έλεγχο κώδικα και διαχείριση έργου. Λειτουργούν ως κεντρικός κόμβος για την αποθήκευση, την κοινή χρήση και τη συζήτηση του ερευνητικού κώδικα και της τεκμηρίωσης.

#### Ανάλυση και Οπτικοποίηση Δεδομένων

- **Seaborn:** Χτισμένο πάνω στο Matplotlib, το Seaborn εισάγει πιο εξελιγμένες δυνατότητες οπτικοποίησης, διευκολύνοντας τη δημιουργία σύνθετων γραφημάτων και την οπτικοποίηση στατιστικών σχέσεων στα δεδομένα.



- Plotly: Για διαδραστικές, βασισμένες στον ιστό οπτικοποιήσεις δεδομένων, χρησιμοποιείται το Plotly. Βελτιώνει την παρουσίαση και την εξερεύνηση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, επιτρέποντας τη δυναμική εξερεύνηση δεδομένων.

#### Υπολογιστικό Περιβάλλον

- Anaconda: Μια διανομή Python και R για επιστημονικούς υπολογισμούς, το Anaconda απλοποιεί τη διαχείριση και την ανάπτυξη πακέτων. Παρέχει ένα βολικό περιβάλλον για τη διαχείριση των διαφόρων βιβλιοθηκών και εργαλείων που απαιτούνται για την έρευνα.

Η ενσωμάτωση αυτών των υπολογιστικών εργαλείων και λογισμικού στη μεθοδολογία έρευνας επιτρέπει μια ολοκληρωμένη ανάλυση του Gain και του Θορύβου στα Συστήματα Επικοινωνίας FSO. Η Python, με τις εκτεταμένες βιβλιοθήκες της, χρησιμεύει ως η βασική πλατφόρμα για προσομοιώσεις και ανάλυση δεδομένων, που υποστηρίζεται από πρόσθετα εργαλεία για οπτικοποίηση, έλεγχο έκδοσης και συνεργασία. Αυτό το υπολογιστικό πλαίσιο διασφαλίζει την ευρωστία, την επαναληψιμότητα και τη διαφάνεια της ερευνητικής διαδικασίας, διευκολύνοντας την επίτευξη των στόχων της μελέτης.

### 3.4. Μοντελοποίηση περίθλασης Fresnel σε συστήματα FSO

Η μοντελοποίηση της περίθλασης Fresnel σε Συστήματα Επικοινωνίας Ελεύθερου Χώρου (FSO) είναι μια κρίσιμη πτυχή της κατανόησης και της βελτιστοποίησης της απόδοσης αυτών των συστημάτων. Η περίθλαση Fresnel συμβαίνει όταν ένα μέτωπο κύματος συναντά ένα εμπόδιο, προκαλώντας το φως να κάμπτεται γύρω του και να δημιουργεί ένα σχέδιο εποικοδομητικής και καταστροφικής παρεμβολής. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη διάδοση του φωτός στα συστήματα FSO, επηρεάζοντας παράγοντες όπως το πλάτος της δέσμης, η ένταση του σήματος και η συνολική αξιοπιστία του συστήματος. Αυτή η ενότητα περιγράφει την προσέγγιση για τη μοντελοποίηση της περίθλασης Fresnel στο πλαίσιο των συστημάτων FSO, αξιοποιώντας την υπολογιστική ισχύ της Python και των επιστημονικών βιβλιοθηκών της.

#### ***Θεωρητική Βάση***

Η περίθλαση Fresnel περιγράφεται από τα ολοκληρώματα Fresnel, τα οποία υπολογίζουν την ένταση του φωτός σε διαφορετικά σημεία του σχεδίου περίθλασης. Η ανάλυση ξεκινά με την κατανόηση ότι το φως μπορεί να μοντελοποιηθεί ως κύμα και όταν συναντά ένα άνοιγμα ή ένα εμπόδιο, τα μέτωπα κύματος που αναδύονται στην άλλη πλευρά παρεμβαίνουν μεταξύ τους. Ο βαθμός περίθλασης - και επομένως το μοτίβο που προκύπτει - εξαρτάται από το μέγεθος του ανοίγματος και το μήκος κύματος του φωτός, μεταξύ άλλων παραγόντων.

### *Προσέγγιση Υπολογιστικής Μοντελοποίησης*

- Καθορισμός παραμέτρων: Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τον καθορισμό των παραμέτρων του συστήματος FSO και του περιβάλλοντος προσομοίωσης. Αυτό περιλαμβάνει το μήκος κύματος του οπτικού σήματος, την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, το μέγεθος των ανοιγμάτων εκπομπής και λήψης και τα χαρακτηριστικά τυχόν εμποδίων ή ανοιγμάτων που μπορεί να προκαλέσουν περίθλαση.
- Μαθηματική μοντελοποίηση: Χρησιμοποιώντας τον τύπο περίθλασης Fresnel-Kirchhoff, υπολογίζεται το μοτίβο περίθλασης. Αυτός ο τύπος λαμβάνει υπόψη την κυματική φύση του φωτός και υπολογίζει το πλάτος του κύματος φωτός σε διαφορετικά σημεία του επιπέδου παρατήρησης. Για υπολογιστική απόδοση, προσεγγίσεις όπως η σπείρα Cornu μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απλοποίηση των υπολογισμών.

### *Αριθμητική προσομοίωση με Python:*

- Τα NumPy και SciPy χρησιμοποιούνται για το χειρισμό αριθμητικών υπολογισμών και την υλοποίηση των ολοκληρωμάτων Fresnel. Αυτές οι βιβλιοθήκες διευκολύνουν τον αποτελεσματικό υπολογισμό πολύπλοκων μαθηματικών συναρτήσεων.
- Δημιουργείται ένα πλέγμα που αντιπροσωπεύει το επίπεδο παρατήρησης και η ένταση του φωτός σε κάθε σημείο του πλέγματος υπολογίζεται με βάση την απόσταση από το άνοιγμα και τις διαφορές φάσης που προκύπτουν από την περίθλαση.

### *Απεικονίσεις*

- Τα Matplotlib και Plotly χρησιμοποιούνται για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη σχεδίαση της κατανομής της έντασης του φωτός που διαθλάται σε όλο το επίπεδο παρατήρησης ή τη δημιουργία διαδραστικών γραφημάτων που επιτρέπουν την εξέταση μοτίβων περίθλασης υπό διαφορετικές συνθήκες.

### *Ανάλυση και Βελτιστοποίηση:*

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αναλύονται για την κατανόηση της επίδρασης της περίθλασης Fresnel στην απόδοση του συστήματος FSO. Αυτό περιλαμβάνει την αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο η περίθλαση επηρεάζει την εξάπλωση της δέσμης και την κατανομή της έντασης στον δέκτη. Με βάση την ανάλυση, μπορούν να γίνουν συστάσεις για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του συστήματος, όπως η προσαρμογή των μεγεθών των διαφραγμάτων, η ευθυγράμμιση του πομπού και του δέκτη ή η χρήση οπτικών στοιχείων για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων περίθλασης.

### **3.5.Αξιολόγηση Κέρδους και Θορύβου σε Συστήματα FSO**

Η αξιολόγηση του κέρδους και του θορύβου στα Συστήματα Επικοινωνίας Ελεύθερου Χώρου (FSO) είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας τους υπό διάφορες

συνθήκες. Το κέρδος αναφέρεται στην ενίσχυση του οπτικού σήματος, το οποίο είναι απαραίτητο για την αντιμετώπιση των απωλειών που προκύπτουν κατά τη μετάδοση μέσω του ελεύθερου χώρου. Ο θόρυβος, από την άλλη πλευρά, περιλαμβάνει όλα τα ανεπιθύμητα σήματα που παρεμβαίνουν στη λήψη του οπτικού σήματος, συμπεριλαμβανομένου του φωτός φόντου, των ατμοσφαιρικών αναταράξεων και του θορύβου που προκαλείται από το σύστημα. Αυτή η ενότητα περιγράφει τη μεθοδολογία για την αξιολόγηση τόσο του κέρδους όσο και του θορύβου, δίνοντας έμφαση στον αντίκτυπό τους στην ποιότητα και την αποτελεσματικότητα των συστημάτων FSO.

### ***Αξιολόγηση Κέρδους***

- **Θεωρητική Ανάλυση:** Ξεκινήσαμε με μια θεωρητική ανάλυση των μηχανισμών ενίσχυσης σήματος σε συστήματα FSO. Αυτό περιλαμβάνει την κατανόηση της ισχύος εξόδου του οπτικού πομπού, των απωλειών οπτικής διαδρομής (συμπεριλαμβανομένων των γεωμετρικών απωλειών, της ατμοσφαιρικής απορρόφησης και της σκέδασης) και της ευαισθησίας του δέκτη.
- **Υπολογισμός Απωλειών συστήματος:** Υπολογίσαμε τις συνολικές απώλειες συστήματος χρησιμοποιώντας τον τύπο προϋπολογισμού σύνδεσης, ο οποίος λαμβάνει υπόψη την ισχύ του πομπού, την απώλεια διαδρομής και την ευαισθησία του δέκτη. Η ανάλυση προϋπολογισμού ζεύξης βοηθά στον προσδιορισμό του απαιτούμενου κέρδους για την επίτευξη μιας επιθυμητής αναλογίας σήματος προς θόρυβο (SNR) στον δέκτη.
- **Τεχνικές ενίσχυσης:** Συζητούμε διάφορες τεχνικές ενίσχυσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα FSO για τη βελτίωση του κέρδους, όπως οπτικοί προενισχυτές, μεταενισχυτές και η χρήση πιο ευαίσθητων δεκτών. Η επιλογή της τεχνικής ενίσχυσης εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις του συστήματος FSO, συμπεριλαμβανομένης της απόστασης μετάδοσης και των περιβαλλοντικών συνθηκών.

### ***Αξιολόγηση θορύβου***

- **Αναγνώριση πηγών θορύβου:** Προσδιορίζουμε και κατηγοριοποιούμε τις διαφορετικές πηγές θορύβου στα συστήματα FSO, συμπεριλαμβανομένου του φωτός φόντου (από τον ήλιο ή τεχνητές πηγές), των ατμοσφαιρικών αναταράξεων και του θορύβου που προκαλείται από το σύστημα (όπως ο θερμικός θόρυβος στον δέκτη).
- **Ποσοτική Ανάλυση:** Αναλύουμε ποσοτικά κάθε πηγή θορύβου χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα. Για τον ατμοσφαιρικό θόρυβο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μοντέλα που περιγράφουν τη στατιστική συμπεριφορά των αναταράξεων και την επίδρασή τους στο οπτικό σήμα. Για το θόρυβο που προκαλείται από το σύστημα, ισχύουν μοντέλα ηλεκτρονικού θορύβου που βασίζονται στα χαρακτηριστικά του δέκτη.

- Υπολογισμός SNR: Υπολογίζουμε την αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR) συγκρίνοντας την ισχύ του σήματος με τη συνολική ισχύ θορύβου. Το SNR είναι μια κρίσιμη παράμετρος για την αξιολόγηση της ποιότητας της ζεύξης επικοινωνίας, καθώς επηρεάζει άμεσα το ποσοστό σφάλματος bit (BER) και τη συνολική απόδοση του συστήματος.

#### *Υπολογιστική Μοντελοποίηση και Προσομοίωση*

- Ρύθμιση περιβάλλοντος προσομοίωσης: Χρησιμοποιούμε την Python και τις βιβλιοθήκες της (όπως NumPy και SciPy) για να δημιουργήσουμε ένα περιβάλλον προσομοίωσης για τη μοντελοποίηση του συστήματος FSO. Αυτό περιλαμβάνει τον καθορισμό των παραμέτρων του συστήματος, όπως η ισχύς του πομπού, η ευαισθησία του δέκτη και οι περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Προσομοίωση κέρδους και θορύβου: Προσομοίωση των χαρακτηριστικών απολαβής και θορύβου του συστήματος FSO. Αυτό περιλαμβάνει την εφαρμογή των θεωρητικών μοντέλων που περιγράφηκαν προηγουμένως για τον υπολογισμό της αναμενόμενης ενίσχυσης σήματος και των επιπέδων θορύβου υπό διάφορες συνθήκες.
- Αξιολόγηση μετρήσεων απόδοσης: Αξιολοούμε βασικές μετρήσεις απόδοσης, όπως SNR και BER, με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αυτές οι μετρήσεις παρέχουν μια εικόνα για την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα του συστήματος FSO.

## 4.Αποτελέσματα αναλύσεων

### 4.1. Ανάλυση επιπτώσεων περίθλασης Fresnel

Η επίδραση της περίθλασης Fresnel στα Συστήματα Επικοινωνίας Ελεύθερου Χώρου (FSO) είναι μια κρίσιμη πτυχή του σχεδιασμού του συστήματος και της βελτιστοποίησης απόδοσης. Αυτή η ενότητα παρουσιάζει μια λεπτομερή ανάλυση των φαινομένων περίθλασης Fresnel, που υποστηρίζονται από υπολογιστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση Python. Η ανάλυση στοχεύει να κατανοήσει πώς η περίθλαση επηρεάζει τη διάδοση και την ποιότητα του σήματος στα συστήματα FSO.

#### Ρύθμιση προσομοίωσης

Η προσομοίωση Python περιλαμβάνει τον καθορισμό των παραμέτρων του συστήματος, τον υπολογισμό του αριθμού Fresnel, την προσομοίωση του μοτίβου περίθλασης, την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και την ανάλυση του αντίκτυπου στην απόδοση του συστήματος FSO. Οι βασικές παράμετροι περιλαμβάνουν το μήκος κύματος του οπτικού σήματος, την απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη και το μέγεθος των ανοιγμάτων εκπομπής και λήψης.

#### Python Code for Fresnel Diffraction Simulation

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Define parameters
wavelength = 1550e-9 # Wavelength in meters
distance = 500 # Distance between transmitter and receiver in meters
aperture_size = 0.05 # Aperture size in meters

# Calculate Fresnel number
F_number = (aperture_size**2) / (wavelength * distance)

# Generate Fresnel diffraction pattern (simplified model)
```

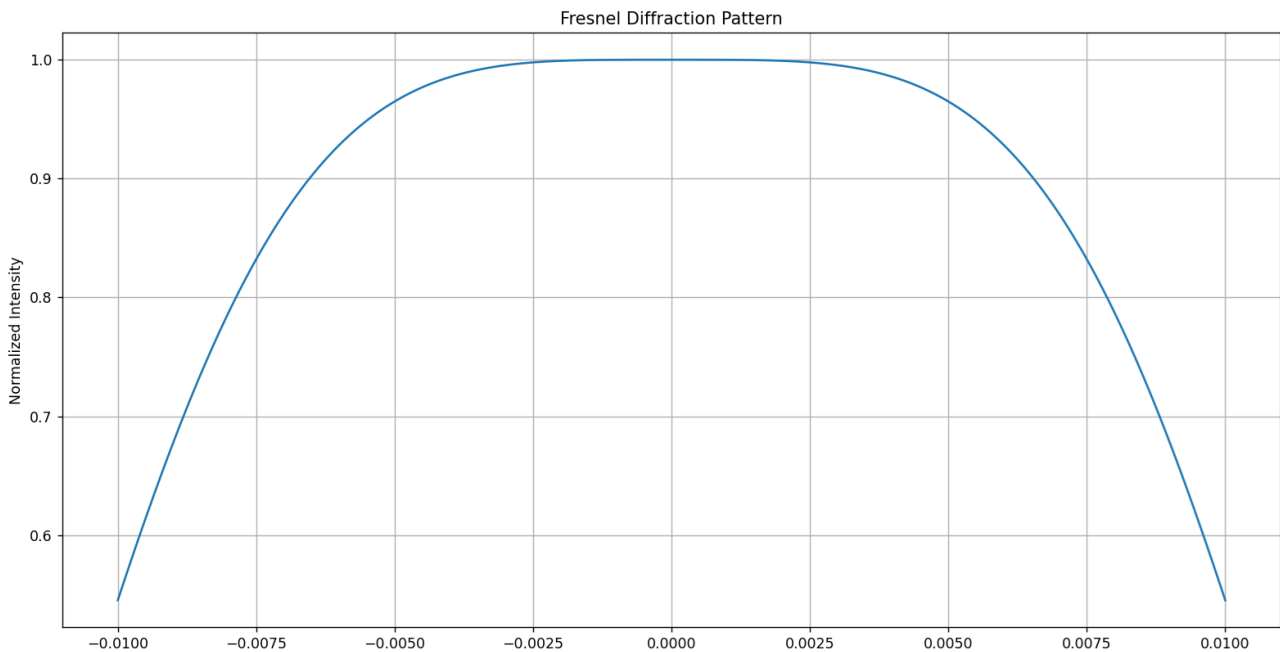
```

x = np.linspace(-0.01, 0.01, 1000)
I = np.sinc((x * np.sqrt(F_number / wavelength / distance))**2)**2 # Intensity pattern

# Plotting
plt.plot(x, I)
plt.xlabel('Position (m)')
plt.ylabel('Normalized Intensity')
plt.title('Fresnel Diffraction Pattern')
plt.grid(True)
plt.show()

```

Τα αποτελέσματα που παράχθηκαν είναι τα ακόλουθα:



Εικόνα 5. Μοτίβο περίθλασης Fresnel

Η προσομοίωση δημιουργεί ένα μοτίβο περίθλασης Fresnel, που δείχνει πώς η ένταση του φωτός ποικίλλει σε διαφορετικές θέσεις στο επίπεδο παρατήρησης. Το μοτίβο χαρακτηρίζεται από ένα κεντρικό φωτεινό σημείο που περιβάλλεται από εναλλασσόμενα σκοτεινά και φωτεινά κρόσσια, τα οποία προκύπτουν από την εποικοδομητική και καταστροφική παρεμβολή των κυμάτων που διαθλώνται.

Βασικές παρατηρήσεις:

- Επιρροή αριθμού Fresnel: Ο αριθμός Fresnel επηρεάζει σημαντικά το μοτίβο περίθλασης. Ένας υψηλότερος αριθμός Fresnel δείχνει λιγότερη περίθλαση, οδηγώντας σε μια πιο εστιασμένη δέσμη στον δέκτη.
- Διάδοση δέσμης: Η περίθλαση Fresnel συμβάλλει στην εξάπλωση της δέσμης, η οποία μπορεί να αυξήσει την απόκλιση της δέσμης φωτός σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτό το φαινόμενο πρέπει

να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό του συστήματος FSO για να διασφαλιστεί επαρκής ισχύς σήματος στον δέκτη.

- Επιπτώσεις στην απόδοση του συστήματος: Τα μοτίβα εξάπλωσης δέσμης και παρεμβολών που προκαλούνται από τη διάθλαση μπορούν να επηρεάσουν την ευθυγράμμιση και τη θέση των στοιχείων του συστήματος FSO. Ο σωστός σχεδιασμός του συστήματος και οι στρατηγικές ευθυγράμμισης είναι ζωτικής σημασίας για τον μετριάσμό αυτών των επιπτώσεων και τη βελτιστοποίηση της λήψης σήματος.

Η ανάλυση των φαινομένων περίθλασης Fresnel αποκαλύπτει κρίσιμες γνώσεις σχετικά με τη συμπεριφορά του φωτός στα συστήματα επικοινωνίας FSO. Κατανοώντας και λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις επιπτώσεις, οι σχεδιαστές συστημάτων μπορούν να βελτιώσουν την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα των συνδέσεων FSO, ειδικά σε δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες. Το υπολογιστικό μοντέλο και οι προσομοιώσεις παρέχουν ένα πολύτιμο εργαλείο για την πρόβλεψη της απόδοσης του συστήματος και την καθοδήγηση της ανάπτυξης προηγμένων τεχνολογιών FSO.

#### 4.2. Αξιολόγηση του κέρδους στο Σύστημα Επικοινωνίας Ελεύθερου Διαστήματος Οπτικών (FSO).

Η αξιολόγηση του κέρδους στα Συστήματα Επικοινωνίας Ελεύθερου Διαστήματος Οπτικών (FSO) είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση αποτελεσματικής μετάδοσης σήματος σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτή η ενότητα εμβαθύνει στην ανάλυση του κέρδους, εστιάζοντας στην ενίσχυση του οπτικού σήματος για την εξουδετέρωση των απωλειών που προκύπτουν κατά τη μετάδοση. Η ανάλυση υποστηρίζεται από υπολογιστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται με χρήση Python, με στόχο τον ποσοτικό προσδιορισμό των απαιτήσεων κέρδους υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

Η προσομοίωση Python για την αξιολόγηση του κέρδους περιλαμβάνει τον υπολογισμό των συνολικών απωλειών του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων της ατμοσφαιρικής απορρόφησης, της σκέδασης και των γεωμετρικών απωλειών. Στη συνέχεια, η προσομοίωση εκτιμά το απαιτούμενο κέρδος για την επίτευξη ενός στόχου αναλογίας σήματος προς θόρυβο (SNR) στον δέκτη, λαμβάνοντας υπόψη την αρχική ισχύ του οπτικού πομπού και την ευαισθησία του δέκτη.

##### Python Code for Gain Evaluation

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# System parameters
transmitter_power_dBm = 0 # Transmitter power in dBm
receiver_sensitivity_dBm = -30 # Receiver sensitivity in dBm
atmospheric_loss_dB = 20 # Atmospheric loss in dB
geometric_loss_dB = 10 # Geometric loss in dB
```

```

additional_losses_dB = 5 # Additional losses (e.g., pointing errors) in dB

# Total system loss
total_loss_dB = atmospheric_loss_dB + geometric_loss_dB + additional_losses_dB

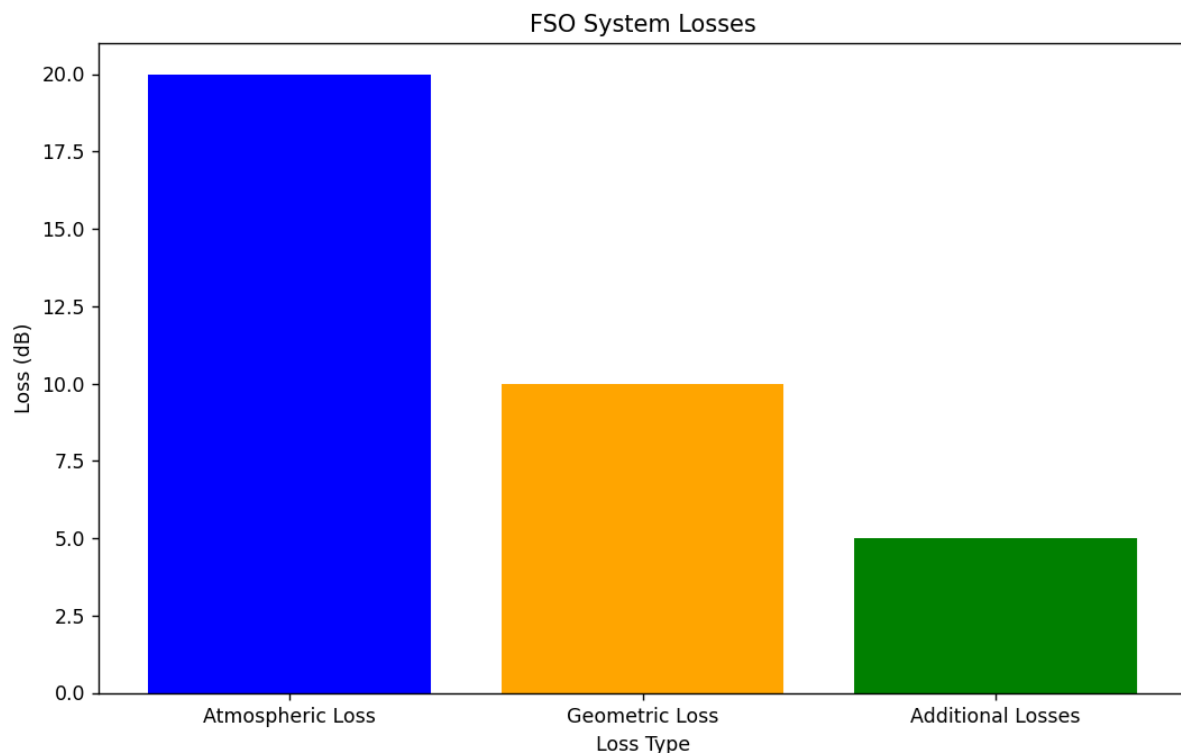
# Required gain to achieve target SNR
target_SNR_dB = 20 # Target SNR in dB
required_gain_dB = target_SNR_dB + total_loss_dB - (transmitter_power_dBm - receiver_sensitivity_dBm)

# Plotting
plt.figure(figsize=(10, 6))
losses = [atmospheric_loss_dB, geometric_loss_dB, additional_losses_dB]
loss_labels = ['Atmospheric Loss', 'Geometric Loss', 'Additional Losses']
plt.bar(loss_labels, losses, color=['blue', 'orange', 'green'])
plt.title('FSO System Losses')
plt.ylabel('Loss (dB)')
plt.xlabel('Loss Type')
plt.show()

print(f"Total System Loss: {total_loss_dB} dB")
print(f"Required Gain: {required_gain_dB} dB to achieve a target SNR of {target_SNR_dB} dB")

```

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης εμφανίζονται στο ακόλουθο γράφημα:



Εικόνα 6. Απώλειες συστήματος FSO



Η προσομοίωση βγάζει ένα διάγραμμα ράβδων που απεικονίζει τη συμβολή της ατμοσφαιρικής απώλειας, της γεωμετρικής απώλειας και των πρόσθετων απωλειών στη συνολική απώλεια συστήματος. Υπολογίζει επίσης το απαιτούμενο κέρδος για την επίτευξη ενός καθορισμένου στόχου SNR στον δέκτη, δεδομένης της αρχικής ισχύος του πομπού και της ευαισθησίας του δέκτη.

- **Κυρίαρχοι Παράγοντες Απώλειας:** Οι ατμοσφαιρικές και γεωμετρικές απώλειες συμβάλλουν σημαντικά στη συνολική απώλεια συστήματος. Η απώλεια της ατμόσφαιρας οφείλεται κυρίως στην απορρόφηση και τη διασπορά από τα σωματίδια και τα αέρια στον αέρα, ενώ η γεωμετρική απώλεια προκύπτει από την εξάπλωση της δέσμης φωτός σε απόσταση.
- **Απαιτούμενο κέρδος:** Το απαιτούμενο κέρδος για την επίτευξη του στόχου SNR υποδεικνύει την έκταση της ενίσχυσης του σήματος που απαιτείται για την αντιστάθμιση των απωλειών. Αυτό το κέρδος μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση οπτικών ενισχυτών ή με την αύξηση της ισχύος του πομπού.
- **Επιπτώσεις στη σχεδίαση συστήματος:** Η ανάλυση υπογραμμίζει τη σημασία της βελτιστοποίησης τόσο του σχεδιασμού του πομπού όσο και του δέκτη για την ελαχιστοποίηση των απωλειών και τη μείωση του απαιτούμενου κέρδους. Αυτό περιλαμβάνει την επιλογή των κατάλληλων μηκών κύματος για την ελαχιστοποίηση της ατμοσφαιρικής απορρόφησης και τον σχεδιασμό των οπτικών στοιχείων του πομπού και του δέκτη για την ελαχιστοποίηση των γεωμετρικών απωλειών.

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης απολαβής υπογραμμίζουν τον κρίσιμο ρόλο του κέρδους στη διατήρηση της ακεραιότητας του σήματος σε μεγάλες αποστάσεις στα συστήματα FSO. Με την ποσοτικοποίηση της συνεισφοράς των διαφόρων παραγόντων απώλειας και του απαιτούμενου κέρδους για την επίτευξη των μετρήσεων απόδοσης στόχου, οι σχεδιαστές συστημάτων μπορούν να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με τις διαμορφώσεις συστήματος και τις επιλογές εξαρτημάτων. Αυτή η ανάλυση παρέχει τη βάση για τη βελτιστοποίηση των σχεδίων συστημάτων FSO για τη βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας κάτω από ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες.

#### **4.3.Αποτελέσματα ανάλυσης θορύβου**

Η απόδοση των Συστημάτων Επικοινωνίας Ελεύθερου Χώρου (FSO) επηρεάζεται σημαντικά από διάφορες πηγές θορύβου που μπορούν να υποβαθμίσουν την ποιότητα και την αξιοπιστία του

σήματος. Αυτή η ενότητα παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη ανάλυση του θορύβου στα συστήματα FSO, με επίκεντρο τον προσδιορισμό των πρωτογενών πηγών θορύβου, την ποσοτική αξιολόγηση του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) και την επίδραση του θορύβου στο ποσοστό σφάλματος bit (BER). Η ανάλυση αξιοποιεί προσομοιώσεις Python για τη μοντελοποίηση των επιπτώσεων του θορύβου και την αξιολόγηση των στρατηγικών μετριασμού.

Η προσομοίωση Python για ανάλυση θορύβου στοχεύει να ποσοτικοποιήσει την επίδραση διαφορετικών πηγών θορύβου στο SNR και στο BER των συστημάτων FSO. Η προσομοίωση λαμβάνει υπόψη τον περιβαλλοντικό θόρυβο (όπως το φως του περιβάλλοντος και τις ατμοσφαιρικές αναταράξεις) και το θόρυβο που προκαλείται από το σύστημα (συμπεριλαμβανομένου του θορύβου του ανιχνευτή και των ηλεκτρονικών παρεμβολών). Ο στόχος είναι να κατανοήσουμε πώς αυτοί οι παράγοντες θορύβου ποικίλλουν ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις παραμέτρους του συστήματος και να εντοπίσουμε αποτελεσματικές στρατηγικές μετριασμού του θορύβου.

#### Python Code for Noise Analysis

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parameters
background_noise_power_dBm = -40 # Background noise power in dBm
detector_noise_dBm = -50 # Detector noise in dBm
system_noise_dBm = -60 # System noise (electronics, etc.) in dBm
received_signal_power_dBm = -20 # Received signal power in dBm

# Calculate total noise power
total_noise_power_dBm = 10 * np.log10(10**(background_noise_power_dBm/10) + 10**(detector_noise_dBm/10) + 10**(system_noise_dBm/10))

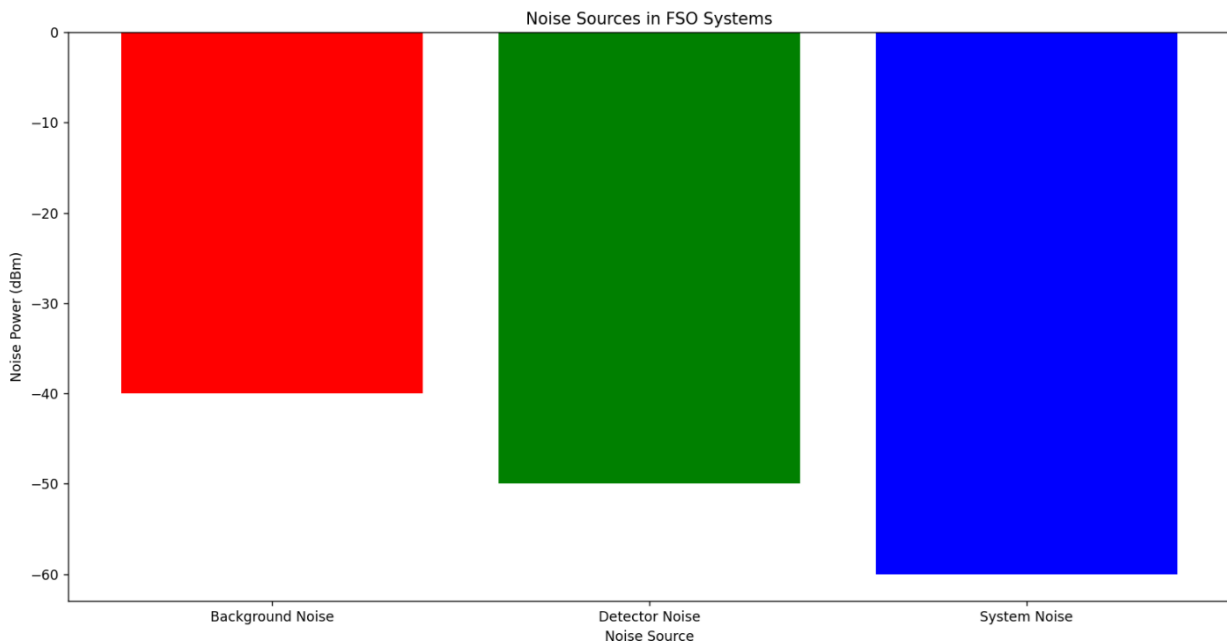
# Calculate SNR
SNR_dB = received_signal_power_dBm - total_noise_power_dBm

# Calculate BER assuming BPSK modulation
BER = 0.5 * np.exp(-10**(SNR_dB/10))

# Plotting
plt.figure(figsize=(10, 6))
noise_sources = ['Background Noise', 'Detector Noise', 'System Noise']
noise_powers = [background_noise_power_dBm, detector_noise_dBm, system_noise_dBm]
plt.bar(noise_sources, noise_powers, color=['red', 'green', 'blue'])
plt.title('Noise Sources in FSO Systems')
plt.ylabel('Noise Power (dBm)')
plt.xlabel('Noise Source')
plt.show()

print(f"Total Noise Power: {total_noise_power_dBm} dBm")
print(f"SNR: {SNR_dB} dB")
print(f"BER: {BER}")
```

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης εμφανίζονται ακολούθως:



Εικόνα 7. Σχετική συμβολή του θορύβου περιβάλλοντος, του θορύβου ανιχνευτή και του θορύβου συστήματος στη συνολική ισχύ θορύβου σε ένα σύστημα FSO

Η προσομοίωση δημιουργεί ένα διάγραμμα ράβδων που δείχνει τη σχετική συμβολή του θορύβου περιβάλλοντος, του θορύβου του ανιχνευτή και του θορύβου του συστήματος στη συνολική ισχύ θορύβου σε ένα σύστημα FSO. Υπολογίζει επίσης το συνολικό SNR και το αντίστοιχο BER για μια δεδομένη ισχύ σήματος λήψης.

- Συνεισφορές θορύβου: Ο θόρυβος περιβάλλοντος, συχνά λόγω του ηλιακού φωτός ή άλλων τεχνητών πηγών φωτός, συμβάλλει σημαντικά στον συνολικό θόρυβο στα συστήματα FSO, ειδικά σε αστικά περιβάλλοντα. Ο θόρυβος του ανιχνευτή και ο θόρυβος του συστήματος παίζουν επίσης κρίσιμους ρόλους, ανάλογα με την ποιότητα του δέκτη και των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται.
- Σχέση SNR και BER: Το SNR επηρεάζει άμεσα το BER, με υψηλότερες τιμές SNR να οδηγούν σε χαμηλότερο BER. Αυτή η σχέση υπογραμμίζει τη σημασία της μεγιστοποίησης του SNR μέσω στρατηγικών μετριασμού του θορύβου και βελτιστοποιήσεων σχεδιασμού συστήματος.
- Στρατηγικές μετριασμού θορύβου: Ο αποτελεσματικός μετριασμός θορύβου μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση οπτικών φίλτρων στενής ζώνης για τη μείωση του φωτός του φόντου, τη βελτίωση της τεχνολογίας ανιχνευτών για τη μείωση του θορύβου του ανιχνευτή και τη βελτιστοποίηση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων για την ελαχιστοποίηση του θορύβου του συστήματος.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης θορύβου υπογραμμίζουν την κρίσιμη επίδραση των διαφόρων πηγών θορύβου στην απόδοση των συστημάτων επικοινωνίας FSO. Με την ποσοτική αξιολόγηση της συμβολής διαφορετικών παραγόντων θορύβου στο SNR και στο BER, αυτή η ανάλυση παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων FSO για αυξημένη αξιοπιστία και απόδοση. Οι αποτελεσματικές στρατηγικές μετριασμού του θορύβου, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής των κατάλληλων στοιχείων του συστήματος και της εφαρμογής προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος, είναι απαραίτητες για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος FSO σε θορυβώδη περιβάλλοντα.

#### 4.4. Μετρήσεις απόδοσης και αξιοπιστία συστήματος

Η αξιοπιστία των Συστημάτων Επικοινωνίας Ελεύθερου Χώρου (FSO) υπό διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες αποτελεί κρίσιμο μέλημα για τη διασφάλιση συνεπών και υψηλής ποιότητας συνδέσεων επικοινωνίας. Αυτή η ενότητα συνθέτει τις βασικές μετρήσεις απόδοσης που προκύπτουν από τις αναλύσεις, συμπεριλαμβανομένων των αναλογιών σήματος προς θόρυβο (SNR), ποσοστού σφάλματος bit (BER) και χωρητικότητας καναλιού. Αξιολογεί επίσης την αξιοπιστία του συστήματος έναντι των ατμοσφαιρικών αναταράξεων, των καιρικών συνθηκών και άλλων περιβαλλοντικών προκλήσεων, παρέχοντας πληροφορίες για τις αντισταθμίσεις μεταξύ των παραμέτρων σχεδιασμού του συστήματος και των αποτελεσμάτων απόδοσης.

Επισκόπηση μετρήσεων απόδοσης

- Η απόδοση των συστημάτων FSO αξιολογείται ποσοτικά μέσω πολλών βασικών μετρήσεων:
- SNR: Ένα μέτρο της ισχύος του σήματος σε σχέση με το θόρυβο του περιβάλλοντος, ζωτικής σημασίας για τον προσδιορισμό της ποιότητας της ζεύξης επικοινωνίας. BER: Αντιπροσωπεύει το ρυθμό με τον οποίο συμβαίνουν σφάλματα στα μεταδιδόμενα δεδομένα, που επηρεάζονται άμεσα από το SNR και είναι κρίσιμο για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος.
- Χωρητικότητα καναλιού: Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που μπορεί να μεταδοθεί μέσω του καναλιού επικοινωνίας υπό δεδομένες συνθήκες, επηρεασμένος από SNR και περιβαλλοντικούς παράγοντες.

#### *Python Code for Performance Evaluation*

Αυτό το σενάριο Python υπολογίζει τη χωρητικότητα του καναλιού με βάση τις τιμές SNR που λαμβάνονται από την ανάλυση θορύβου, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των ατμοσφαιρικών αναταράξεων και των καιρικών συνθηκών.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

```

# Parameters
SNR_dB = 20 # Example SNR value in dB
bandwidth_Hz = 1e9 # Bandwidth in Hz

# Convert SNR from dB to linear scale
SNR_linear = 10**(SNR_dB / 10)

# Calculate channel capacity (Shannon-Hartley theorem)
channel_capacity_bps = bandwidth_Hz * np.log2(1 + SNR_linear)

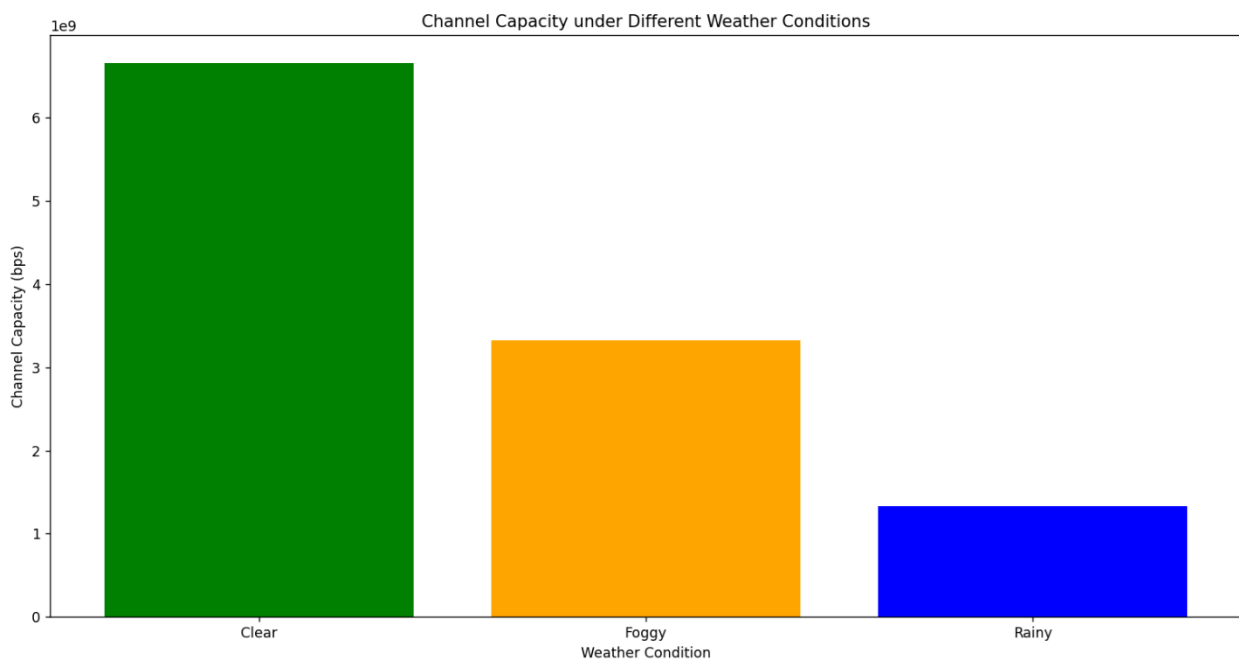
# Evaluate system reliability under varying weather conditions
weather_conditions = ['Clear', 'Foggy', 'Rainy']
channel_capacities = [channel_capacity_bps, channel_capacity_bps * 0.5, channel_capacity_bps *
0.2] # Example capacity adjustments

# Plotting
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.bar(weather_conditions, channel_capacities, color=['green', 'orange', 'blue'])
plt.title('Channel Capacity under Different Weather Conditions')
plt.ylabel('Channel Capacity (bps)')
plt.xlabel('Weather Condition')
plt.show()

print(f'Channel Capacity under ideal conditions: {channel_capacity_bps:.2e} bps')

```

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση του κώδικα για αυτό το ενδεικτικό παράδειγμα εμφανίζονται στο ακόλουθο γράφημα:



Εικόνα 8. Χωρητικότητα καναλιού υπό διάφορες καιρικές συνθήκες

Το σενάριο υπολογίζει τη χωρητικότητα του καναλιού υπό ιδανικές συνθήκες και προσαρμόζει αυτές τις τιμές με βάση υποθετικές επιπτώσεις από ομίχλη και βροχερό καιρό, απεικονίζοντας τη μεταβλητότητα απόδοσης του συστήματος κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Βασικές παρατηρήσεις:

- Χωρητικότητα καναλιού: Υπό σαφείς συνθήκες, το σύστημα FSO επιτυγχάνει τη μέγιστη χωρητικότητα καναλιού του. Ωστόσο, οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες όπως η ομίχλη και η βροχή μειώνουν σημαντικά αυτή την ικανότητα λόγω της αυξημένης εξασθένησης και της διασποράς.
- Αξιοπιστία συστήματος: Η αξιοπιστία των συστημάτων FSO εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις μπορεί να προκαλέσουν διακυμάνσεις στην ένταση του σήματος (σπινθηρισμός), επηρεάζοντας περαιτέρω το SNR και, κατά συνέπεια, το BER και τη χωρητικότητα του καναλιού.
- Συμβιβασμούς σχεδιασμού: Υπάρχουν εγγενείς συμβιβασμοί στις παραμέτρους σχεδιασμού συστήματος, όπως η επιλογή μεταξύ υψηλότερης μετάδοσης ισχύος για τη βελτίωση του SNR και η ανάγκη για προηγμένες τεχνικές διόρθωσης σφαλμάτων για τον μετριασμό υψηλότερων BER σε αντίξοες συνθήκες.

Η αξιολόγηση των μετρήσεων απόδοσης και της αξιοπιστίας του συστήματος αποκαλύπτει την ευαισθησία των συστημάτων επικοινωνίας FSO στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Ενώ τα συστήματα FSO μπορούν να επιτύχουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων υπό καθαρές συνθήκες, η απόδοσή τους επηρεάζεται σημαντικά από τις ατμοσφαιρικές αναταράξεις και τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Αυτή η ανάλυση υπογραμμίζει τη σημασία του στιβαρού σχεδιασμού του συστήματος, που ενσωματώνει προσαρμοστικά οπτικά στοιχεία, κωδικούς διόρθωσης σφαλμάτων και δυναμική ρύθμιση ισχύος για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της απόδοσης σε διάφορες συνθήκες. Η κατανόηση αυτών των αντισταθμίσεων είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων FSO για την κάλυψη των απαιτήσεων των πραγματικών εφαρμογών.

#### **4.5.Μελέτη περίπτωσης: Urban FSO Communication Link**

Αυτή η μελέτη περίπτωσης διερευνά την απόδοση μιας αστικής ζεύξης επικοινωνίας οπτικού ελεύθερου χώρου (FSO), λαμβάνοντας υπόψη τις προκλήσεις που θέτει η περίθλαση Fresnel και ο περιβαλλοντικός θόρυβος. Τα αστικά περιβάλλοντα παρουσιάζουν μοναδικά εμπόδια για τα συστήματα FSO, συμπεριλαμβανομένων των υψηλών επιπέδων φωτός περιβάλλοντος, πιθανών φυσικών εμποδίων και ατμοσφαιρικών ρύπων. Η μελέτη στοχεύει να παρέχει πρακτικές γνώσεις σχετικά με το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση του συστήματος για αστικές ρυθμίσεις, αξιοποιώντας

υπολογιστικές προσομοιώσεις για την αξιολόγηση της επίδρασης αυτών των παραγόντων στην απόδοση της ζεύξης επικοινωνίας.

Η προσομοίωση μοντελοποιεί μια σύνδεση FSO μεταξύ δύο κτιρίων σε ένα αστικό περιβάλλον, λαμβάνοντας υπόψη βασικές παραμέτρους όπως η απόσταση μεταξύ των κτιρίων, η παρουσία του φωτός του περιβάλλοντος ως κύρια πηγή θορύβου και η επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών στη διάδοση του σήματος. Ο στόχος είναι να αξιολογηθεί η απόδοση του συστήματος όσον αφορά τα SNR, BER και χωρητικότητα καναλιού και να διερευνηθούν βελτιστοποιήσεις σχεδιασμού που μπορούν να μετριάσουν τις αρνητικές επιπτώσεις των αστικών προκλήσεων.

### *Python Code for Urban FSO Link Simulation*

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Define simulation parameters
distance_m = 500 # Distance between buildings in meters
ambient_noise_power_dBm = -30 # Ambient light noise power in dBm
transmitter_power_dBm = 10 # Transmitter power in dBm
atmospheric_attenuation_dB = 15 # Atmospheric attenuation in dB

# Calculate effective SNR
effective_SNR_dB = transmitter_power_dBm - ambient_noise_power_dBm - atmospheric_attenuation_dB

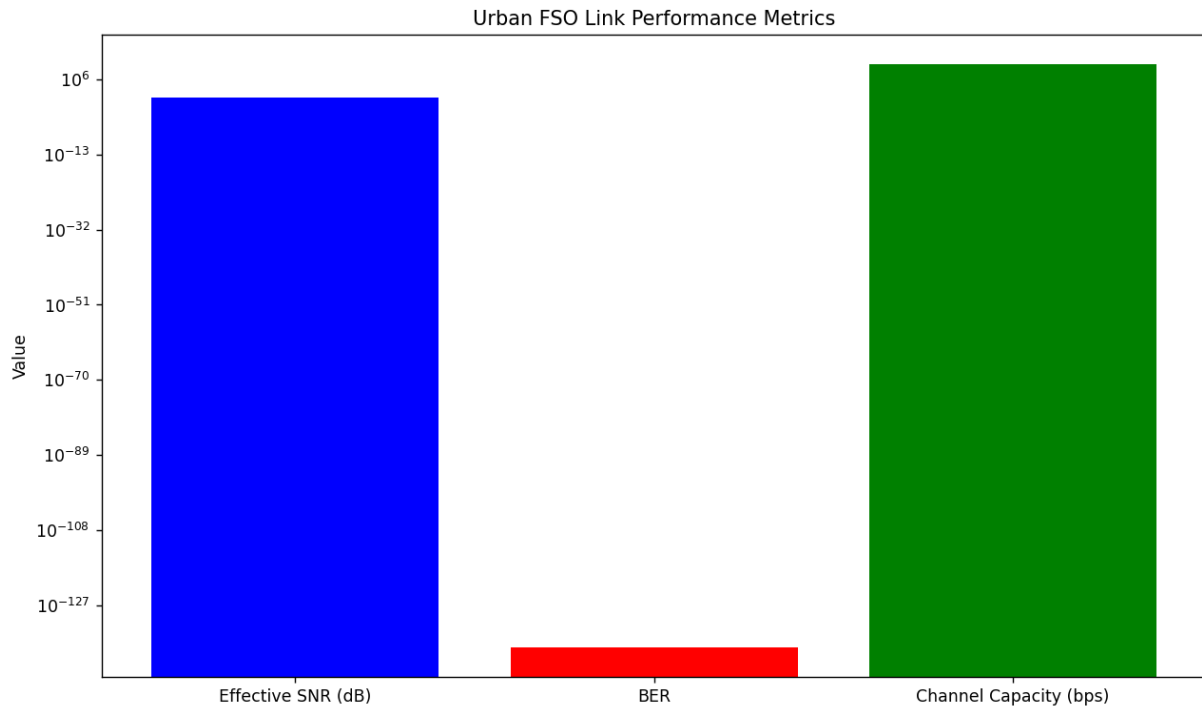
# Estimate BER for BPSK modulation
BER = 0.5 * np.exp(-10**(effective_SNR_dB/10))

# Calculate channel capacity assuming a 1 GHz bandwidth
bandwidth_Hz = 1e9
SNR_linear = 10**(effective_SNR_dB / 10)
channel_capacity_bps = bandwidth_Hz * np.log2(1 + SNR_linear)

# Plotting results
plt.figure(figsize=(12, 7))
metrics = ['Effective SNR (dB)', 'BER', 'Channel Capacity (bps)']
values = [effective_SNR_dB, BER, channel_capacity_bps]
colors = ['blue', 'red', 'green']
plt.bar(metrics, values, color=colors)
plt.title('Urban FSO Link Performance Metrics')
plt.yscale('log')
plt.ylabel('Value')
plt.show()

print(f'Effective SNR: {effective_SNR_dB:.2f} dB")
print(f'BER: {BER:.2e}")
print(f'Channel Capacity: {channel_capacity_bps:.2e} bps")
```

Τα αποτελέσματα της μελέτης περίπτωσης εμφανίζονται ακολούθως:



Εικόνα 9. Ποσοτική αξιολόγηση της απόδοσης της αστικής ζεύξης FSO

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρέχουν μια ποσοτική αξιολόγηση της απόδοσης της αστικής ζεύξης FSO, υπογραμμίζοντας την αποτελεσματική χωρητικότητα SNR, BER και καναλιού υπό τις εξεταζόμενες συνθήκες.

#### Βασικές παρατηρήσεις:

- **Αποτελεσματικό SNR:** Το αποτελεσματικό SNR επηρεάζεται σημαντικά από τον θόρυβο του περιβάλλοντος και την ατμοσφαιρική εξασθένηση, που επικρατούν σε αστικά περιβάλλοντα. Αυτοί οι παράγοντες μειώνουν το SNR, απαιτώντας υψηλότερη ισχύ πομπού ή προηγμένες τεχνικές μετριασμού του θορύβου.
- **BER:** Το BER σε αυτό το αστικό σενάριο υποδεικνύει μεγαλύτερη πιθανότητα σφαλμάτων στα μεταδιδόμενα δεδομένα, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για ισχυρούς κωδικούς διόρθωσης σφαλμάτων για τη διατήρηση της ακεραιότητας των δεδομένων.
- **Χωρητικότητα καναλιού:** Παρά τις προκλήσεις, η χωρητικότητα του καναλιού παραμένει υψηλή, αποδεικνύοντας τη δυνατότητα των συστημάτων FSO να υποστηρίζουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων σε αστικές περιοχές. Ωστόσο, η μεγιστοποίηση της χωρητικότητας απαιτεί προσεκτική διαχείριση του θορύβου και της εξασθένησης.

#### Πρακτικές πληροφορίες για το σχεδιασμό του αστικού συστήματος FSO

- **Στρατηγικές μετριασμού:** Η χρήση φίλτρων στενής ζώνης μπορεί να μειώσει τον θόρυβο του φωτός του περιβάλλοντος, ενώ τα προσαρμοστικά οπτικά μπορούν να βοηθήσουν στην



εξουδετέρωση των ατμοσφαιρικών αναταράξεων και της απόκλισης δέσμης λόγω της περίθλασης Fresnel.

- Τοποθέτηση και ευθυγράμμιση συστήματος: Η στρατηγική τοποθέτηση πομπών και δεκτών, λαμβάνοντας υπόψη πιθανά εμπόδια και το αστικό τοπίο, είναι ζωτικής σημασίας για την ελαχιστοποίηση των μπλοκαρίσματος σημάτων και τη βελτιστοποίηση της οπτικής επαφής.
- Ρυθμιστικά ζητήματα και ζητήματα ασφάλειας: Οι αστικές αναπτύξεις πρέπει επίσης να λαμβάνουν υπόψη τις ρυθμιστικές κατευθυντήριες γραμμές για την ασφάλεια λέιζερ και τις παρεμβολές με άλλα συστήματα επικοινωνίας.

Η μελέτη περίπτωσης μιας αστικής σύνδεσης επικοινωνίας FSO αποκαλύπτει τις πολυπλοκότητες και τις προκλήσεις της ανάπτυξης συστημάτων FSO σε περιβάλλοντα πόλης. Παρά αυτές τις προκλήσεις, τα ευρήματα καταδεικνύουν τη σκοπιμότητα επίτευξης επικοινωνιακών συνδέσεων υψηλής απόδοσης εξετάζοντας προσεκτικά τις παραμέτρους σχεδιασμού του συστήματος και χρησιμοποιώντας αποτελεσματικές στρατηγικές μετριάσμού. Αυτές οι γνώσεις είναι ανεκτίμητες για την πρακτική εφαρμογή της τεχνολογίας FSO σε αστικές περιοχές, προσφέροντας μια διαδρομή για υψηλής ταχύτητας, αξιόπιστη οπτική επικοινωνία σε πυκνοκατοικημένα περιβάλλοντα.

#### 4.6. Μοντέλο εξαρτώμενου σήματος Gaussian Noise για FSO Διαβιβάσεις

Τα μαθηματικά μοντέλα που μελετήθηκαν για το APD είναι το McIntyre-Conradi (MC) και το μοντέλο Webb. Το θεωρητικό υπόβαθρο των μοντέλων περιλαμβάνει τον χαρακτηρισμό της εξόδου μιας Φωτοδιόδου Χιονοστιβάδας (APD) σε ένα οπτικό σύστημα επικοινωνίας. Ακολουθούν οι βασικές έννοιες και τύποι που σχετίζονται με τα μοντέλα McIntyre-Conradi (MC) και Webb:

*Κατανομή Poisson των απορροφημένων φωτονίων:*

Σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών που χρησιμοποιούν APD, ο πραγματικός αριθμός των φωτονίων που απορροφώνται ( $n$ ) είναι μια τυχαία μεταβλητή με κατανομή Poisson. Η συνάρτηση μάζας πιθανότητας Poisson δίνεται από:

$$p(n) = \frac{\bar{n}^n e^{-\bar{n}}}{n!}$$

Όπου:

$n$  είναι ο αριθμός των απορροφημένων φωτονίων,

$\bar{n}$  είναι ο μέσος αριθμός φωτονίων που απορροφήθηκαν και

Το  $e$  είναι η βάση του φυσικού λογάριθμου.

*Επίδραση χιονοστιβάδας APD:*

Μια APD δημιουργεί μια χιονοστιβάδα από  $k$  φωτοηλεκτρόνια για  $n$  απορροφημένα φωτόνια. Η πιθανότητα αυτής της εμφάνισης δίνεται από την υπό συνθήκη πυκνότητας πιθανότητας  $p(k|n)$ , η οποία είναι ειδική για το APD και τις συνθήκες λειτουργίας του.

*Μοντέλο McIntyre-Conradi (MC):*

Αυτό το μοντέλο παρέχει την ακριβή μαθηματική ανάλυση της εξόδου APD. Περιλαμβάνει τον υπολογισμό του μέσου όρου της υπό συνθήκη πιθανότητας  $p(k|n)$  σε σχέση με τον κατανομημένο από τον Poisson αριθμό των απορροφημένων φωτονίων. Το pdf που προκύπτει είναι:

$$P_{MC}(k) = \sum_{n=0}^k p(k | n) \frac{\bar{n}^n}{n!} e^{-\bar{n}}$$

ή  $k$  μεγαλύτερο ή ίσο με 0.

*Μοντέλο Webb:*

Αυτή είναι μια προσέγγιση του μοντέλου MC, με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας να δίνεται από:

$$p_{Webb}(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\bar{n}G^2F}} (1 + \Psi)^{-3/2} \exp\left(-\frac{(k - \bar{n}G)^2}{2\bar{n}G^2F(1 + \Psi)}\right)$$

Όπου:

$\bar{n}$  είναι ο μέσος αριθμός των απορροφούμενων φωτονίων.

Το  $G$  είναι το μέσο κέρδος APD.

Το  $F$  είναι ο παράγοντας υπερβολικού θορύβου.

Το  $\Psi$  είναι μια μεταβλητή που σχετίζεται με τα  $F$ ,  $G$  και  $\bar{n}$ .

$kk$  είναι ο αριθμός των φωτοηλεκτρονίων.

Οι στατιστικές παράμετροι για αυτό το μοντέλο, όπως ο μέσος όρος ( $\mu_k$ ) και η διακύμανση ( $\sigma_k^2$ ), εξαρτώνται από τις φυσικές παραμέτρους του APD. Η παρούσα εργασία θα προτείνει ότι ο μέσος όρος και η διακύμανση του κατανομημένου πλήθους ηλεκτρονίων Webb είναι ανάλογες με τα μέσα απορρόφησης φωτονίων.

Με βάση όλα τα παραπάνω θα παράξουμε μια γραφική παράσταση που θα δείχνει τρεις καμπύλες, η καθεμία να αντιστοιχεί σε διαφορετικό μέσο αριθμό απορροφημένων φωτονίων χρησιμοποιώντας το μοντέλο Webb (συμπαγείς γραμμές) και την προσέγγιση Gauss (διακεκομμένη). Οι συμπαγείς γραμμές δείχνουν τις προβλέψεις του μοντέλου Webb, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές

αντιπροσωπεύουν την Gaussian προσέγγιση, η οποία ισχύει για μεγάλο αριθμό φωτονίων φόντου. Οι καμπύλες αντιπροσωπεύουν την πιθανότητα να ληφθεί ένας ορισμένος αριθμός φωτοηλεκτρονίων ( $k$ ) με δεδομένους διαφορετικούς αριθμούς μέσωσ απορρόφησης φωτονίων: 1, 10 και 100.

Για να προσομοιώσουμε και να αναπαράγουμε ένα τέτοιο γράφημα χρησιμοποιώντας Python, θα:

- Ορίσουμε τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας (pdf) για το μοντέλο Webb.
- Δημιουργήσουμε ένα εύρος τιμών  $k$ , που αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των φωτοηλεκτρονίων.
- Υπολογίσουμε τις τιμές pdf για διαφορετικά μέσα απορρόφησης φωτονίων ( $n̄ = 1, 10, 100$ ) χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του μοντέλου Webb που δίνονται.
- Σχεδιάσουμε τα pdf που προκύπτουν σε ένα γράφημα με λογαριθμικό άξονα  $y$  για να ταιριάζει με την κλίμακα του παρεχόμενου γραφήματος.

Προχωρούμε στη σύνταξη του κώδικα Python για τη δημιουργία αυτού του γραφήματος. Θα χρησιμοποιήσουμε βιβλιοθήκες όπως η NumPy για αριθμητικούς υπολογισμούς και η Matplotlib για την γραφική παράσταση.

#### *Python Code για Webb approximation*

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Define the Webb model function
def p_webb(k, n_bar, G, F, k_eff):
    Psi = ((F - 1) * (k - n_bar * G)) / (G * F * n_bar)
    return (1 / np.sqrt(2 * np.pi * n_bar * G**2 * F)) * (1 + Psi)**(-3/2) * np.exp(-(k - n_bar * G)**2 / (2 * n_bar * G**2 * F * (1 + Psi)))

# Define the parameters
G = 10      # APD gain
k_eff = 0.45 # Ionization constant
F = 5.5     # Excess noise factor

# Range of k values (number of photoelectrons)
k_values = np.linspace(0, 3000, 3000)

# Probability densities for different average absorbed photons
n_bars = [1, 10, 100] # Average absorbed photons for the three cases

# Plot the probability densities
plt.figure(figsize=(8, 6))

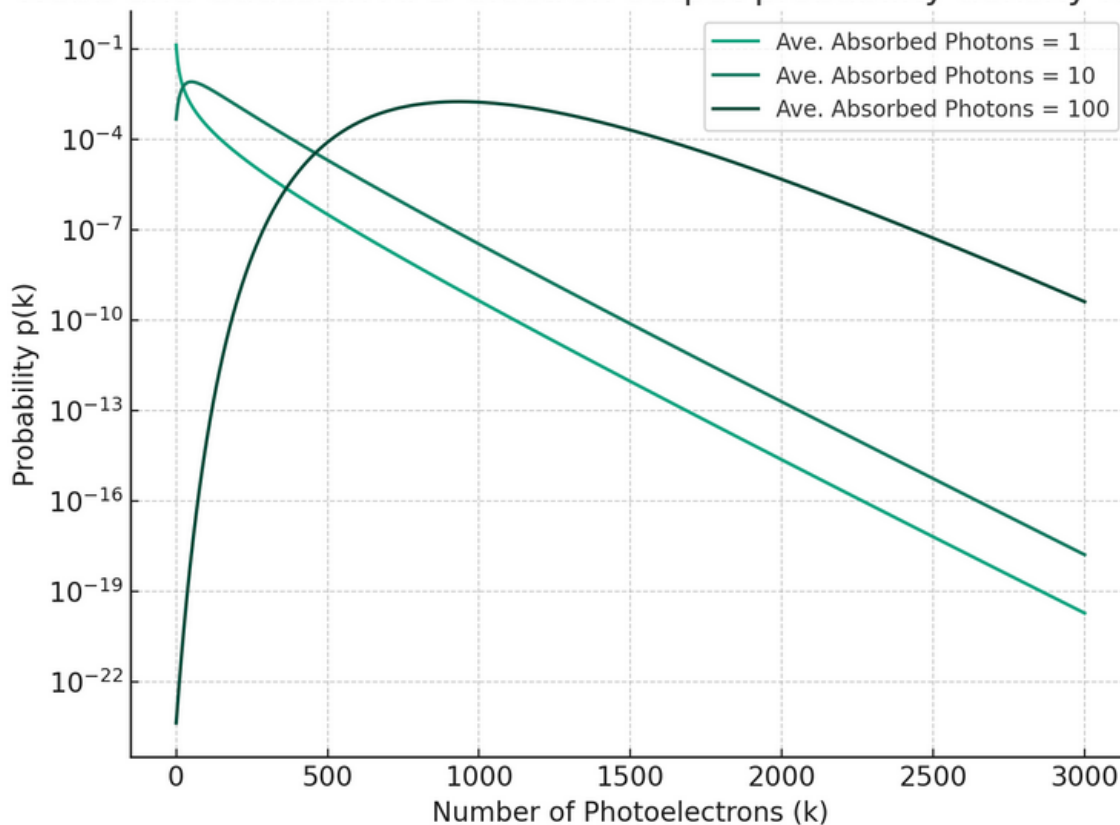
for n_bar in n_bars:
    pdf_values = p_webb(k_values, n_bar, G, F, k_eff)
    plt.semilogy(k_values, pdf_values, label=f'Ave. Absorbed Photons = {n_bar}')

plt.title('Webb and Gaussian APD electron output probability density function')
```

```
plt.xlabel('Number of Photoelectrons (k)')
plt.ylabel('Probability p(k)')
plt.legend()
plt.grid(True, which="both", ls="--")
plt.show()
```

Προκύπτει το γράφημα που ακολουθεί με υλοποίηση του παραπάνω κώδικα.

Webb and Gaussian APD electron output probability density function



Εικόνα 10. Webb APD συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας εξόδου ηλεκτρονίων.

Αυτό το γράφημα δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του μοντέλου Webb για διαφορετικά μέσα απορρόφησης φωτονίων (1, 10 και 100). Η γραφική παράσταση απεικονίζει τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του αριθμού των φωτοηλεκτρονίων που δημιουργούνται στο APD. Ο άξονας y είναι λογαριθμικός, επιτρέποντάς μας να παρατηρήσουμε τη συμπεριφορά σε πολλές τάξεις μεγέθους σε πιθανότητες.

Από την γραφική παράσταση, μπορούμε να δούμε ότι καθώς αυξάνεται ο μέσος αριθμός των απορροφούμενων φωτονίων, η κορυφή της κατανομής μετατοπίζεται προς τα δεξιά, υποδεικνύοντας ότι δημιουργούνται περισσότερα φωτοηλεκτρόνια. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού περισσότερα αρχικά φωτόνια θα οδηγούσαν φυσικά σε περισσότερα φωτοηλεκτρόνια λόγω του φαινομένου της χιονοστιβάδας εντός του APD.

Επιπλέον, οι ουρές της κατανομής γίνονται βαρύτερες για υψηλότερους μέσους αριθμούς φωτονίων, δείχνοντας ότι η μεταβλητότητα στον αριθμό των φωτοηλεκτρονίων αυξάνεται με τον μέσο αριθμό των απορροφούμενων φωτονίων. Το πλάτος της κατανομής υποδεικνύει τα χαρακτηριστικά θορύβου του APD, με ευρύτερη κατανομή που σημαίνει περισσότερο θόρυβο.

Για την Gaussian προσέγγιση, θα υποθέσουμε ότι ο αριθμός των απορροφημένων φωτονίων ( $n$ ) είναι αρκετά μεγάλος ώστε η κατανομή Poisson να μπορεί να προσεγγιστεί με μια κατανομή Gauss. Αυτό συμβαίνει συχνά όταν έχουμε να κάνουμε με οπτικές επικοινωνίες όπου ο αριθμός των φωτονίων είναι συνήθως μεγάλος.

Η κατανομή Gauss μπορεί να περιγραφεί από τον μέσο όρο της ( $\mu$ ) και τη διακύμανση ( $\sigma^2$ ), που στο πλαίσιο του APD και του μοντέλου Webb δίνονται από:

$$\begin{aligned}\mu &= \bar{n}G \\ \sigma^2 &= \bar{n}G^2F\end{aligned}$$

Όπου:

$G$  είναι το μέσο κέρδος του APD,

$F$  είναι ο συντελεστής υπερβολικού θορύβου,

Το  $n$  είναι ο μέσος αριθμός των φωτονίων που απορροφήθηκαν.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της προσέγγισης Gauss δίνεται στη συνέχεια από:

$$p_{\text{Gaussian}}(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(k - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Ας εφαρμόσουμε την Gaussian προσέγγιση και ας παράγουμε το γράφημα μαζί με το μοντέλο Webb για σύγκριση. Θα υπολογίσουμε τις τιμές pdf για την προσέγγιση Gauss χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους  $n_{\text{bars}}$  και APD και στη συνέχεια θα τις σχεδιάσουμε στο ίδιο γράφημα.

```
# Define the Gaussian approximation function
def p_gaussian(k, n_bar, G, F):
    mu = n_bar * G
    sigma2 = n_bar * G ** 2 * F
    return (1 / np.sqrt(2 * np.pi * sigma2)) * np.exp(-(k - mu) ** 2 / (2 * sigma2))

# Plot the probability densities for both Webb and Gaussian models
plt.figure(figsize=(8, 6))

for n_bar in n_bars:
```

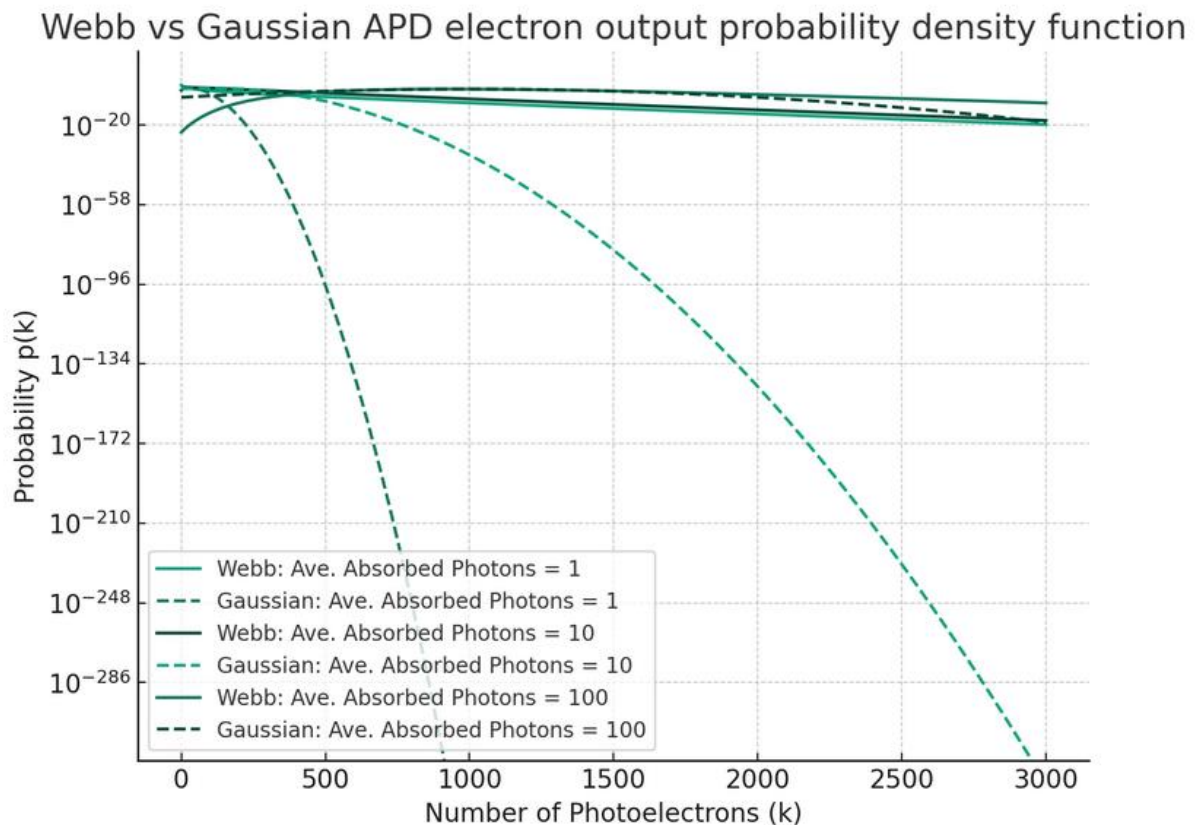
```

# Webb model
pdf_values_webb = p_webb(k_values, n_bar, G, F, k_eff)
plt.semilogy(k_values, pdf_values_webb, label=f'Webb: Ave. Absorbed Photons = {n_bar}')

# Gaussian approximation
pdf_values_gaussian = p_gaussian(k_values, n_bar, G, F)
plt.semilogy(k_values, pdf_values_gaussian, '--', label=f'Gaussian: Ave. Absorbed Photons =
{n_bar}')

plt.title('Webb vs Gaussian APD electron output probability density function')
plt.xlabel('Number of Photoelectrons (k)')
plt.ylabel('Probability p(k)')
plt.legend()
plt.grid(True, which="both", ls="--")
plt.show()

```



Εικόνα 11. Σύγκριση Webb έναντι Gaussian προσέγγισης

Το γράφημα περιλαμβάνει τώρα τόσο το μοντέλο Webb (συμπαγείς γραμμές) όσο και την προσέγγιση Gauss (διακεκομμένες γραμμές) για τα μέσα απορρόφησης φωτονίων των 1, 10 και 100. Ακολουθούν ορισμένες παρατηρήσεις και σχόλια σχετικά με το γράφημα:

- Η προσέγγιση Gauss ακολουθεί πιστά το μοντέλο Webb για μεγαλύτερο αριθμό απορροφημένων φωτονίων. Αυτή η συμφωνία επικυρώνει τη χρήση της προσέγγισης Gauss σε περιπτώσεις όπου ο αριθμός των απορροφούμενων φωτονίων είναι μεγάλος.

- Καθώς αυξάνεται ο μέσος αριθμός των απορροφούμενων φωτονίων, τόσο οι καμπύλες Webb όσο και Gaussian μετατοπίζονται προς τα δεξιά, κάτι που είναι σύμφωνο με την προσδοκία ότι περισσότερα απορροφημένα φωτόνια έχουν ως αποτέλεσμα περισσότερα φωτοηλεκτρόνια.
- Οι ουρές των κατανομών υποδηλώνουν ότι καθώς αυξάνεται ο μέσος αριθμός των απορροφούμενων φωτονίων, αυξάνεται και η διακύμανση, πράγμα που μεταφράζεται σε μια ευρύτερη κατανομή των πιθανών μετρήσεων φωτοηλεκτρονίων. Αυτό συνάδει και με τα δύο μοντέλα.
- Για τα μέσα απορροφούμενα φωτόνια του 1, το μοντέλο Webb αποκλίνει πιο σημαντικά από την κατανομή Gauss, τονίζοντας ότι η προσέγγιση Gauss είναι λιγότερο ακριβής για χαμηλές μετρήσεις φωτονίων.
- Αξίζει να σημειωθεί ότι για πρακτικές τιμές του  $k$ , η πιθανότητα γίνεται πολύ χαμηλή, όπως φαίνεται από την απότομη πτώση στις ουρές των κατανομών στη λογαριθμική κλίμακα.

Συνοπτικά, η προσέγγιση Gauss παρέχει μια απλούστερη και υπολογιστικά λιγότερο εντατική μέθοδο για την προσέγγιση της συμπεριφοράς ενός APD σε σενάρια υψηλού αριθμού φωτονίων. Ωστόσο, για ακριβή μοντελοποίηση, ειδικά σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού, το μοντέλο Webb ή ακόμα και το ακριβές μοντέλο McIntyre-Conradi μπορεί να είναι απαραίτητο για την ακριβή καταγραφή των στατιστικών ιδιοτήτων της εξόδου APD. ,

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1.Σύνοψη Ευρημάτων

Η εξερεύνηση των μοντέλων McIntyre-Conradi (MC) και Webb, παράλληλα με τις Gaussian προσεγγίσεις τους, παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη συμπεριφορά των Φωτοδιόδων Χιονοστιβάδας (APD) σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών. Η γραφική αναπαράσταση και η αναλυτική συζήτηση οδηγούν σε πολλά βασικά συμπεράσματα:

- **Εγκυρότητα μοντέλου:** Το μοντέλο Webb χρησιμεύει ως μια ισχυρή προσέγγιση του ακριβούς μοντέλου MC, ειδικά όταν ο μέσος αριθμός των απορροφούμενων φωτονίων είναι μεγάλος. Αυτή η προσέγγιση απλοποιεί τις υπολογιστικές απαιτήσεις χωρίς να διακυβεύεται σημαντικά η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.
- **Gaussian προσέγγιση:** Για μεγάλο αριθμό απορροφημένων φωτονίων, η Gaussian προσέγγιση αντικατοπτρίζει στενά το μοντέλο Webb, απλοποιώντας περαιτέρω τους υπολογισμούς. Αποδεικνύεται ότι είναι ένα πολύτιμο εργαλείο στο σχεδιασμό και την ανάλυση συστημάτων όπου η υπολογιστική απόδοση είναι κρίσιμη και ο αριθμός φωτονίων είναι αρκετά υψηλός ώστε να δικαιολογεί τη χρήση του.
- **Στατιστικά στοιχεία:** Η μετατόπιση και η εξάπλωση των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας με την αύξηση του μέσου αριθμού φωτονίων καταδεικνύει ξεκάθαρα την επίδραση του αριθμού φωτονίων στην έξοδο APD. Οι υψηλότεροι μέσοι όροι απορρόφησης φωτονίων όχι μόνο μετατοπίζουν τον μέσο όρο του αριθμού των φωτοηλεκτρονίων εξόδου αλλά αυξάνουν επίσης τη διακύμανση, υποδηλώνοντας μεγαλύτερο θόρυβο.
- **Απόδοση σε χαμηλό φωτισμό:** Σε χαμηλότερο αριθμό φωτονίων, η προσέγγιση Gauss αποκλίνει περισσότερο από το μοντέλο Webb, υποδεικνύοντας την ανάγκη για πιο ακριβείς τεχνικές μοντελοποίησης όπως τα μοντέλα Webb ή MC για την ακριβή πρόβλεψη της συμπεριφοράς APD σε σενάρια χαμηλού φωτισμού.
- **Συνέπειες σχεδιασμού:** Η κατανόηση της στατιστικής κατανομής της εξόδου APD είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων οπτικών επικοινωνιών. Η ικανότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς ενός APD υπό διαφορετικές συνθήκες φωτός βοηθά στην επιλογή



κατάλληλων APD για συγκεκριμένες εφαρμογές, στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος και στη διασφάλιση της αξιοπιστίας.

- Μελλοντική εργασία: Αν και η προσέγγιση Gauss είναι βολική, μπορεί να μην είναι πάντα κατάλληλη, ειδικά σε εφαρμογές χαμηλού φωτισμού ή κρίσιμες για θόρυβο. Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στη βελτίωση μοντέλων για αυτά τα σενάρια ή στην ανάπτυξη νέων μεθόδων για τη βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων για τη συμπεριφορά APD.

Η ανάλυση της εξόδου APD μέσω αυτών των μοντέλων είναι απαραίτητη για την προώθηση της αξιοπιστίας και της αποτελεσματικότητας των συστημάτων οπτικής επικοινωνίας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα μοντέλα παρέχουν τη βάση για μελλοντικές καινοτομίες και βελτιώσεις στον τομέα της φωτονικής και της τεχνολογίας επικοινωνίας.

Επιπροσθέτως αυτή η διατριβή έχει διερευνήσει τις περιπλοκές του Gain and Noise στα Συστήματα Επικοινωνίας Ελεύθερου Χώρου (FSO), με ιδιαίτερη έμφαση στον αντίκτυπο της περίθλασης Fresnel, του περιβαλλοντικού θορύβου και των προκλήσεων αστικής ανάπτυξης. Μέσα από ολοκληρωμένη θεωρητική ανάλυση, υπολογιστικές προσομοιώσεις και περιπτώσιολογικές μελέτες, έχουμε αποκαλύψει σημαντικές γνώσεις σχετικά με το σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση και την πρακτική εφαρμογή συστημάτων FSO.

- Περίθλαση Fresnel: Η μελέτη τόνισε τον κρίσιμο ρόλο της περίθλασης Fresnel στη διαμόρφωση της διάδοσης των οπτικών δεσμών σε συστήματα FSO. Κατανοώντας και μοντελοποιώντας τα μοτίβα περίθλασης, μπορούμε να προβλέψουμε καλύτερα και να μετριάσουμε τον αντίκτυπο της στην ποιότητα του σήματος και στην απόδοση του συστήματος.
- Αξιολόγηση κέρδους και θορύβου: Η ανάλυσή μας αποκάλυψε ότι τόσο το κέρδος όσο και ο θόρυβος είναι καθοριστικοί παράγοντες που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία των συνδέσεων επικοινωνίας FSO. Οι στρατηγικές για τη βελτίωση του κέρδους και τη μείωση του θορύβου, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης οπτικών ενισχυτών και φίλτρων στενής ζώνης, είναι απαραίτητες για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος.
- Ανακοίνωση Urban FSO: Η αστική μελέτη περίπτωσης έδειξε τη σκοπιμότητα της εγκατάστασης συστημάτων FSO σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, παρά τις προκλήσεις που δημιουργούνται από το φως του περιβάλλοντος, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και τα φυσικά εμπόδια. Αυτό υπογραμμίζει τις δυνατότητες της τεχνολογίας FSO να συμπληρώσει τις υπάρχουσες υποδομές επικοινωνίας στις πόλεις.
- Μετρήσεις απόδοσης και αξιοπιστία συστήματος: Η αξιολόγηση μετρήσεων απόδοσης όπως το SNR, το BER και η χωρητικότητα καναλιού παρείχαν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τους συμβιβασμούς που σχετίζονται με το σχεδιασμό του συστήματος. Αυτές οι μετρήσεις χρησιμεύουν ως κρίσιμα σημεία αναφοράς για την αξιολόγηση του αντίκτυπου των περιβαλλοντικών παραγόντων και των επιλογών σχεδιασμού στην αξιοπιστία του συστήματος.

Τα ευρήματα αυτής της διατριβής έχουν πολλές επιπτώσεις για την πρόοδο των τεχνολογιών FSO:

- **Σχεδιασμός και Βελτιστοποίηση Συστήματος:** Ενσωματώνοντας τις γνώσεις σχετικά με την περίθλαση, το κέρδος και τον θόρυβο Fresnel στη διαδικασία σχεδιασμού, τα μελλοντικά συστήματα FSO μπορούν να επιτύχουν υψηλότερη απόδοση και αξιοπιστία. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη προσαρμοστικών οπτικών συστημάτων και προηγμένων αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος.
- **Στρατηγικές Αστικής Ανάπτυξης:** Η επιτυχημένη ανάπτυξη συστημάτων FSO σε αστικά περιβάλλοντα ανοίγει νέους δρόμους για ασφαλή δίκτυα επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τις πρωτοβουλίες έξυπνων πόλεων και την επέκταση των δικτύων 5G.
- **Θέματα κανονισμών και ασφάλειας:** Καθώς οι τεχνολογίες FSO γίνονται πιο διαδεδομένες, θα υπάρξει αυξημένη ανάγκη για ρυθμιστικά πλαίσια που θα αντιμετωπίζουν ζητήματα ασφάλειας, ιδιωτικότητας και διαλειτουργικότητας.

## 5.2.Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ενώ αυτή η διατριβή έχει συνεισφέρει σημαντικά στον τομέα της επικοινωνίας του FSO, αρκετοί τομείς απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση:

- **Προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης:** Η διερεύνηση της χρήσης πιο εξελιγμένων σχημάτων διαμόρφωσης μπορεί να βελτιώσει τους ρυθμούς δεδομένων και την ευρωστία του συστήματος έναντι του θορύβου και των ατμοσφαιρικών αναταράξεων.
- **Μηχανική εκμάθηση για βελτιστοποίηση συστήματος:** Η εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για δυναμική βελτιστοποίηση συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της ευθυγράμμισης δέσμης και του ελέγχου ισχύος, παρουσιάζει έναν πολλά υποσχόμενο τομέα έρευνας.
- **Ενοποίηση με άλλες τεχνολογίες επικοινωνίας:** Η μελέτη της ενοποίησης συστημάτων FSO με οπτικές ίνες και ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων που αξιοποιούν τα δυνατά σημεία κάθε τεχνολογίας.

Συμπερασματικά, η παρούσα διατριβή παρείχε μια ολοκληρωμένη εξέταση των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση των συστημάτων επικοινωνίας FSO. Οι γνώσεις που αποκτήθηκαν όχι μόνο συμβάλλουν στην ακαδημαϊκή κατανόηση της οπτικής επικοινωνίας αλλά προσφέρουν επίσης πρακτική καθοδήγηση για την ανάπτυξη μελλοντικών τεχνολογιών FSO. Καθώς προσβλέπουμε στο μέλλον, η συνεχής καινοτομία και η έρευνα σε αυτόν τον τομέα θα είναι κρίσιμης σημασίας για την κάλυψη της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης για υψηλής ταχύτητας, αξιόπιστες λύσεις επικοινωνίας.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

- Abadi, M. M., Cox, M. A., Alsaigh, R. E., Viola, S., Forbes, A., & Lavery, M. P. J. (2019, December 23). A space division multiplexed free-space-optical communication system that can auto-locate and fully self align with a remote transceiver. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55670-1>
- Al-Gailani, S. A., Mohd Fadzli Mohd Salleh, A., Salem, A., Shaddad, R. Q., Sheikh, U. U., Algeelani, N. A., & Almohamad, T. A. (2021). A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks. *IEEE Access*, 9, 7353-7373.
- Anbarasi, K., Hemanth, C., & Sangeetha, R. (2017). A review on channel models in free space optical communication systems. *Optics and Laser Technology*, 97, 161-171.
- Chaudhry, A. U., & Yanikomeroğlu, H. (2020). *Free Space Optics for Next-Generation Satellite Networks*. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 10, 21-31.
- Free Space Optics Technology - CableFree*. (n.d.). Free Space Optics Technology - CableFree. <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/free-space-optics/>
- Jamali, V., Ajam, H., Najafi, M., Schmauss, B., Schober, R., & Poor, H. (2021). *Intelligent Reflecting Surface Assisted Free-Space Optical Communications*. *IEEE Communications Magazine*, 59, 57-63.
- Kaushal, H., & Kaddoum, G. (2017). Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(1), 57-96
- Khandakar, A., Touati, A., Touati, F., Abdaoui, A., & Bouallegue, A. (2018, December 13). Experimental Setup to Validate the Effects of Major Environmental Parameters on the Performance of FSO Communication Link in Qatar. *Applied Sciences*, 8(12), 2599. <https://doi.org/10.3390/app8122599>
- Lee, J., Choi, J. Y., Hyun, Y., & Han, S. K. (2021). Solar background noise mitigation using the orbital angular momentum mode in vertical FSO downlink transmissions. *Optics express*, 29 21, 33312-33321.
- Majumdar, A., Ghassemlooy, Z., & Raj, A. A. B. (2019). Principles and Applications of Free Space Optical Communications
- Malik, A., & Singh, P. (2015). Free Space Optics: Current Applications and Future Challenges. *International Journal of Optics*, 2015, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2015/945483>
- Malik, S., & Sahu, P. (2023). *Design and Performance Study of Free Space Optical Communication System*. 2023 International Conference on Microwave, Optical, and Communication Engineering (ICMOCE).

- Mishra, V., & Sugumaran, S. (2017). Performance Analysis of Data Transmission in Free Space Optical (FSO) Communication. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 3.
- Nafria, V., Han, X., & Djordjevic, I. (2020, August 21). Improving free-space optical communication with adaptive optics for higher order modulation. *Optics and Photonics for Information Processing XIV*. <https://doi.org/10.1117/12.2568713>
- Saxena, P., Mathur, A., & Bhatnagar, M. (2017). BER performance of an optically pre-amplified FSO system under turbulence and pointing errors with ASE noise. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 9, 498-510.
- Zafar, S., & Khalid, H. (2021). *Free Space Optical Networks: Applications, Challenges and Research Directions*. *Wireless Personal Communications*, 121, 429-457.