



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

**«ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΡΑΔΙΟΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑ (Ρ/Η) ΚΑΙ
ΣΤΟΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟ (Η/Α)»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Μελέτη των οπτικών επικοινωνιών
ελευθέρου χώρου στο πλαίσιο ανάπτυξης και
βελτίωσης των επιδόσεων των σύγχρονων
κινητών δικτύων B5G και 6G»**

**Χρήστος Κ. Ντούφας
ΑΜ:2020106**

**Επιβλέπων: Έκτορας Εμμανουήλ Νισταζάκης,
Καθηγητής,
Τμήμα Φυσικής ΕΚΠΑ**

ΑΘΗΝΑ

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2024

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη των οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου στο πλαίσιο ανάπτυξης και βελτίωσης των επιδόσεων των σύγχρονων κινητών δικτύων B5G και 6G»

Χρήστος Κ. Ντούφας

AM:2020106

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Έκτορας Εμμανουήλ Νισταζάκης,
Καθηγητής

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: Έκτορας Εμμανουήλ Νισταζάκης, Καθηγητής
Άννα Τζανακάκη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
Μάρκος Αναστασόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Σεπτέμβριος 2024

Περίληψη

Με την παρούσα Διπλωματική εργασία θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε τα σύγχρονα ασύρματα κινητά δίκτυα B5G και 6G, εξετάζοντας λεπτομερώς τις δυνατότητες αξιοποίησης των οπτικών τεχνολογιών και ειδικότερα τα FSO συστήματα.

Αρχικά, γίνεται μια επισκόπηση της τεχνολογίας FSO αναλύοντας βασικές παραμέτρους επίδοσης (Link Budget, SNR κ.λπ.), τη μοντελοποίηση των απωλειών του καναλιού και τις προκλήσεις, που πρέπει να αντιμετωπιστούν για να καταστεί δυνατή η πλήρης αξιοποίησή της στα σύγχρονα δίκτυα. Στη συνέχεια παρατίθενται εν συντομία οι προδιαγραφές των δικτύων B5G και 6G και αναφέρουμε τις προκλήσεις, που δημιουργούνται από τις τεράστιες απαιτήσεις, όσον αφορά τον αριθμό διασυνδεδεμένων τελικών χρηστών, τον όγκο διακινούμενων δεδομένων, τους ρυθμούς μετάδοσης, την καθυστέρηση και την κατανάλωση ενέργειας.

Υπό αυτό το πρίσμα, εξετάζουμε την δυνατότητα ενσωμάτωσης των FSO συστημάτων στις υπάρχουσες επίγειες υποδομές των κυψελωτών δικτύων και στα εναέρια – διαστημικά δίκτυα, προκειμένου να καταστεί δυνατή η δημιουργία ενός πλέγματος επικοινωνιών, που θα προσφέρει μεγαλύτερη ευρωστία, εμβέλεια και εν γένει καλύτερη επίδοση στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, παρουσιάζοντας διάφορες αρχιτεκτονικές, που έχουν προταθεί σε αυτήν την κατεύθυνση, παραθέτοντας συγχρόνως αποτελέσματα με τις επιδόσεις, που επιτυγχάνονται. Επιπλέον, στο πλαίσιο αυτό γίνεται αναφορά σε μελλοντικές επεκτάσεις των FSO συστημάτων, προκειμένου να υπερκεραστούν οι προκλήσεις, που αφορούν την ενσωμάτωση και την αποδοτική λειτουργία αυτών στα B5G και 6G.

Λέξεις Κλειδιά

Δίκτυα B5G και 6G, Οπτικές τεχνολογίες, Κινητά δίκτυα επικοινωνιών, FSO συστήματα, Τηλεπικοινωνιακά συστήματα, Κυψελωτά Δίκτυα, Μη επανδρωμένα οχήματα, Δορυφόρος, Οπτικός πομπός, Φωτοανιχνευτής, Συχνότητες THz, Τυρβώδης ροή, Ρυθμός μετάδοσης, Πιθανότητα αποκοπής, Ποιότητα υπηρεσιών

Abstract

With the present Diploma thesis, we will attempt to analyze the modern wireless mobile networks B5G and 6G, examining in detail the possibilities of utilizing optical technologies, specifically FSO systems.

Initially, an overview of FSO technology is provided by analyzing key performance parameters (Link Budget, SNR, etc.), modeling of channel losses, and the challenges that must be addressed to enable its full utilization in modern networks. Next, a brief overview of the specifications of B5G and 6G networks is presented, and we discuss the challenges arising from the enormous demands regarding the number of connected end users, the volume of data being transmitted, transmission rates, latency, and energy consumption.

In this context, we examine the possibility of integrating FSO systems into existing terrestrial infrastructures of cellular networks and into aerial-space networks, in order to enable the creation of a communication grid that will provide greater reliability, coverage, and overall better performance in modern telecommunication systems, presenting various architectures that have been proposed in this direction, while simultaneously providing results with the performances achieved. Additionally, in that sense, there is a reference to future expansions of FSO systems, in order to overcome the challenges related to their integration and efficient operation in B5G and 6G.

Keywords

B5G and 6G networks, Optical technologies, Mobile communication networks, FSO systems, Telecommunication systems, Cellular networks, Unmanned vehicles, Satellite, Optical transmitter, Photodetector, THz Frequencies, Turbulence, Transmission rate, Outage probability, Quality of service.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Έκτορα Νισταζάκη, για την εμπιστοσύνη, την καθοδήγηση και γενικά την πολύτιμη βοήθειά του, με τις χρήσιμες συμβουλές του, τόσο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου όσο κατά τη φάση της εκπόνησης της παρούσας μελέτης - εργασίας. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για την αμέριστη υποστήριξή της, όλα αυτά τα χρόνια, στην πορεία προς την επίτευξη των στόχων μου.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1^ο	12
Οι ασύρματες οπτικές επικοινωνίες στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα ..	12
1.1 Εισαγωγή στις ασύρματες οπτικές επικοινωνίες (Optical Wireless Communication – OWC).....	12
1.2 Σύντομη περιγραφή των βασικών τεχνολογιών των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών.....	14
1.2.1 Οι τεχνολογίες των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών	14
1.2.2 Σύντομη ανάλυση των τεχνολογιών των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών.....	14
1.2.3 Κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών ανάλογα το φάσμα χρήσης.....	18
1.3 Ανάλυση βασικών παραμέτρων (link budget, SNR κ.λπ.) της τεχνολογίας FSO - Μοντελοποίηση των απωλειών του καναλιού.....	20
1.3.1 Εσωτερικές παράμετροι	20
1.3.2 Εξωτερικές παράμετροι.....	25
1.4 Προκλήσεις και κατευθύνσεις ανάπτυξης των οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου.....	34
1.4.1 Χρήση των FSO συστημάτων ως λύση στα δίκτυα B5G και 6G.....	34
1.4.2 THz και Κβαντικές επικοινωνίες	36
1.4.3 Εισαγωγή αναμεταδοτών στα FSO δίκτυα.....	36
1.4.4 Πολυπλεξία μήκους κύματος στις FSO ζεύξεις	37
1.4.5 Χαρακτηρισμός καναλιού	38
1.4.6 Στόχευση, Απόκτηση και Παρακολούθηση (Pointing, Acquisition, Tracking – PAT).....	38
1.4.7 Δικτύωση στα FSO συστήματα	39
1.4.8 Δικτύωση βασισμένη στο λογισμικό (Software Defined Networking – SDN)	40

Κεφάλαιο 2°	41
Χρήση των FSO επικοινωνιών	41
στα επίγεια (Terrestrial) B5G και 6G δίκτυα	41
2.1 Εισαγωγή στα δίκτυα B5G και 6G	41
2.2 Χρήσεις και εφαρμογές των δικτύων B5G και 6G	44
2.3 Περιγραφή των απαιτήσεων - δυνατοτήτων των σύγχρονων δικτύων B5G και 6G	46
2.3.1 Ρυθμός μετάδοσης	47
2.3.2 Φασματική απόδοση (Spectral Efficiency)	47
2.3.3 Καθυστέρηση (Latency)	47
2.3.4 Κινητικότητα.....	48
2.3.5 Πλήθος διασυνδεδεμένων συσκευών	48
2.3.6 Χωρητικότητα κίνησης περιοχής (Area traffic capacity).....	48
2.3.7 Ενεργειακή απόδοση.....	49
2.4 Αξιοποίηση - ενσωμάτωση των οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου στα δίκτυα B5G και 6G	50
2.4.1 Εφαρμογές χρήσης των οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου .	50
2.4.2 Ικανοποίηση των KPIs των δικτύων B5G και 6G με χρήστη της τεχνολογίας οπτικών επικοινωνιών	53
2.5 Ανάλυση της επίδοσης υβριδικού συστήματος FSO/RF με εφεδρική (backup) ζεύξη	57
2.5.1 Μοντελοποίηση της FSO ζεύξης	58
2.5.2 Μοντελοποίηση της εφεδρικής RF/FSO ζεύξης	59
2.5.3 Ανάλυση της πιθανότητας αποκοπής (Outage Probability) του συστήματος.....	61
2.5.4 Ανάλυση του μέσου ρυθμού εσφαλμένων ψηφίων (Bit Error Rate – BER) του συστήματος.....	63

2.5.5	Ανάλυση της μέσης χωρητικότητας του συστήματος.....	66
Κεφάλαιο 3^ο		69
Χρήση των FSO επικοινωνιών στα μη επίγεια (Non-Terrestrial - NTN) B5G και 6G δίκτυα		69
3.1	Εισαγωγή στα Non-Terrestrial δίκτυα	69
3.1.1	Τα NTN δίκτυα στο δίκτυο πρόσβασης.....	69
3.1.2	Τα NTN δίκτυα στο δίκτυο backhaul	69
3.1.3	Τα NTN δίκτυα στο δίκτυο κορμού	70
3.2	Η χρήση των UAV, Drones και δορυφόρων στα δίκτυα B5G και 6G ..	71
3.2.1	Διαστημικά Δίκτυα	71
3.2.2	Εναέρια Δίκτυα	73
3.2.3	Ενοποιημένα Διαστημικά – Εναέρια – Επίγεια Δίκτυα.....	75
3.2.4	Σενάρια εφαρμογών ενοποιημένου δικτύου.....	76
3.3	Τρόποι αξιοποίησης των οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου για βελτίωση της επίδοσης των Non-Terrestrial δικτύων	77
3.3.1	Υλοποίηση backhaul δικτύου με χρήση FSO συστημάτων	77
3.3.2	Υλοποίηση inter – satellite ζεύξεων με χρήση FSO συστημάτων ...	78
3.4	Ανάλυση της επίδοσης – χωρητικότητας των NTN δικτύων.....	81
3.4.1	Επίδοση υβριδικού συστήματος RF/FSO για επικοινωνίες εδάφους – αέρος – διαστήματος.....	81
3.4.1.1	Μοντελοποίηση του συστήματος.....	81
3.4.1.2	Μοντελοποίηση του καναλιού.....	84
3.4.1.3	Ανάλυση επίδοσης.....	87
3.4.1.4	Αποτελέσματα προσομοίωσης	90
3.4.2	Επίδοση backhaul δικτύου με χρήση FSO συστημάτων	96
3.5	Μελλοντικές επεκτάσεις – Προκλήσεις	100

3.5.1	Χρήση έξυπνων ανακλαστικών επιφανειών στα FSO – NTN δίκτυα 100	
3.5.2	Εκτέλεση Διαπομπής (Handover) στα FSO – NTN δίκτυα	102
3.5.3	Διαχείριση της ευελιξίας - επεκτασιμότητας	103
3.5.4	Ακριβής εντοπισμός και καθορισμός της θέσης.....	104
3.5.5	Αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) στα FSO – NTN δίκτυα 105	
Κεφάλαιο 4		108
Συμπεράσματα		108
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ		111

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Σύγκριση των βασικών παραμέτρων μεταξύ 5G και 6G [46]	46
Εικόνα 2.2: Παραδείγματα Backhaul ζεύξεων [58]	51
Εικόνα 2.3: Παραδείγματα FSO ζεύξεων μεταξύ κτιρίων [60]	52
Εικόνα 2.4: Παραδείγματα υβριδικής υλοποίησης δικτύου με	57
Εικόνα 2.5: Υλοποίηση δικτύωσης με FSO και υβριδική RF/ FSO ζεύξεις.....	58
Εικόνα 2.6: Η πιθανότητα αποκοπής της ζεύξης συναρτήσει του SNR [64] ..	62
Εικόνα 2.7: Το μέσο BER συναρτήσει του SNR [64]	66
Εικόνα 2.8: Η μέση χωρητικότητα συναρτήσει του SNR [64]	68
Εικόνα 3.1: Σύγκριση της ακτίνας κάλυψης ανάλογα με το ύψος λειτουργίας του δορυφόρου [70].....	72
Εικόνα 3.2: Απεικόνιση ενοποιημένου συστήματος επικοινωνιών [6]	75
Εικόνα 3.3: Αρχιτεκτονική backhaul δικτύου με χρήση FSO συστημάτων [75]	78
Εικόνα 3.4: Αρχιτεκτονική NTN συστήματος με οπτικές Αρχιτεκτονική NTN συστήματος με οπτικές inter – satellite ζεύξεις [78].....	80
Εικόνα 3.5: Απεικόνιση του μέσου SEP συναρτήσει του SNR κατωφλίου για διάφορες τιμές του μέσου SNR της RF ζεύξης [79].....	92
Εικόνα 3.6: Απεικόνιση του μέσου SEP συναρτήσει του SNR της FSO ζεύξης για διάφορα σχήματα ανοδικής ζεύξης [79]	93
Εικόνα 3.7: Απεικόνιση του μέσου SEP συναρτήσει του SNR της FSO ζεύξης για διάφορες ζενίθ γωνίες [79]	94
Εικόνα 3.8: Απεικόνιση της πιθανότητας χρησιμοποίησης της RF/FSO ζεύξης για διάφορες ζενίθ γωνίες [79]	95
Εικόνα 3.9: Απεικόνιση της πιθανότητας αποκοπής συναρτήσει του μέσου SNR της FSO ζεύξης [79].....	96

Εικόνα 3.10: Απεικόνιση ρυθμού μετάδοσης της backhaul FSO ζεύξης συναρτήσεως του ύψους της πλατφόρμας για διάφορες καιρικές συνθήκες [89]	98
Εικόνα 3.11: Απεικόνιση περιθωρίου ισχύος της backhaul FSO ζεύξης συναρτήσεως του ύψους της πλατφόρμας για διάφορες καιρικές συνθήκες [89]	99
Εικόνα 3.12: Απεικόνιση ρυθμού μετάδοσης και περιθωρίου ισχύος της backhaul FSO ζεύξης συναρτήσεως του ύψους της πλατφόρμας για διάφορες τιμές της απόκλισης της δέσμης [89]	99
Εικόνα 3.13: Απεικόνιση δικτύου με IRS σε εγκαταστάσεις και UAV [91].....	101

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Συγκριτικός πίνακας των ασύρματων οπτικών τεχνολογιών επικοινωνίας [1]	20
Πίνακας 2 Σύνοψη των KPIs του 6G [56]	50
Πίνακας 3 Συγκριτικός πίνακας με τους ρυθμούς μετάδοσης και τη καθυστέρηση διαφόρων Backhaul τεχνολογιών [59].....	51
Πίνακας 4 Συγκριτικός πίνακας για τις κατηγορίες των δορυφόρων [71,72] ..	73
Πίνακας 5 Τιμές παραμέτρων για την προσομοίωση του συστήματος [79] ...	91
Πίνακας 6 Τιμές παραμέτρων για την προσομοίωση του συστήματος [89] ...	97

Κεφάλαιο 1^ο

Οι ασύρματες οπτικές επικοινωνίες στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα

1.1 Εισαγωγή στις ασύρματες οπτικές επικοινωνίες (Optical Wireless Communication – OWC)

Η διαρκώς αυξανόμενη απαίτηση για υπηρεσίες και εφαρμογές, που απαιτούν υψηλές ταχύτητες μετάδοσης, στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα είναι μία εξαιρετικά σημαντική παράμετρος που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη σχεδίαση των ασύρματων επικοινωνιών της σύγχρονης εποχής. Συνδυάζοντας την παραπάνω διαπίστωση με τις προβλέψεις, που υπάρχουν σχετικά με τον όγκο των διακινούμενων δεδομένων και την μαζική συνδεσιμότητα (IoT, αισθητήρες, τελικοί χρήστες κ.λπ.), που θα κληθούν να υποστηρίξουν τα 5G και 6G δίκτυα, καθίσταται σαφές ότι μόνο η υπάρχουσα υποδομή και ειδικότερα το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency – RF) δεν θα είναι σε θέση να ανταπεξέλθει στις τεράστιες απαιτήσεις των τελικών χρηστών για αξιόπιστες και γρήγορες επικοινωνίες.

Οι ασύρματες οπτικές επικοινωνίες, εμφανίζονται ως μια ελκυστική λύση, που θα χρησιμοποιείται για να καλύψει τον κορεσμό που υφίσταται το φάσμα στην περιοχή RF. Επιπλέον, εκτιμάται οι θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στα σύγχρονα δίκτυα καθώς διαθέτουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, το οποίο αξίζει να σημειωθεί ότι δεν απαιτεί άδεια χρήσης, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στο σύστημα να καλύψει ασύρματες επικοινωνίες των οποίων οι αποστάσεις εκτείνονται από μερικά nm έως αρκετά km. Ορισμένα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά που πρόκειται να προσφέρει η χρήση του οπτικού φάσματος (Optical Spectrum) είναι τα ακόλουθα: ευρυζωνικότητα (Broadband connectivity), υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης (High data rates), μικρή καθυστέρηση (Low latency – delay), χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (Low energy consumption) και μικρό κόστος εξοπλισμού.

Σε αντίθεση με τα δίκτυα που χρησιμοποιούν τις RF επικοινωνίες, η ενσωμάτωση της τεχνολογίας των οπτικών επικοινωνιών μεταξύ άλλων αναμένεται να επιφέρει τα παρακάτω σημαντικά πλεονεκτήματα [1]:

α. Ασύρματες επικοινωνίες υψηλού ρυθμού μετάδοσης για αποστάσεις που εκτείνονται από μερικά m έως αρκετά km, καλύπτοντας έτσι τις ανάγκες για παροχή επικοινωνιακής κάλυψης τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους.

β. Αξιόπιστη μετάδοση χωρίς ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, καθώς οι οπτικές δέσμες που χρησιμοποιούνται είναι εξαιρετικά κατευθυντικές και εκπέμπονται με μικρή σχετικά ισχύ εκπομπής, όποτε παρέχεται και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του φάσματος σε κοντινές περιοχές.

γ. Υψηλό επίπεδο ασφάλειας, καθώς τα οπτικά σήματα δεν μπορούν να διαπεράσουν τα εμπόδια (τοίχο, κτίρια κ.λπ.) που συναντούν κατά τη διάδοσή τους, συνεπώς ένας κακόβουλος χρήστης δεν μπορεί να λάβει το σήμα.

δ. Ευκολία εγκατάστασης και απλότητα εξοπλισμού, μειώνοντας σημαντικά το κόστος εγκατάστασης και διατήρησης του δικτύου και επιπλέον συμμορφώνεται με την «πράσινη» ατζέντα (χαμηλές καταναλώσεις, μικρές εκπομπές κ.λπ.) που πρέπει να πληρούν τα σύγχρονα δίκτυα.

Ωστόσο, πέρα από τα παραπάνω πλεονεκτήματα υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες όπως για παράδειγμα η περιορισμένη γεωγραφική κάλυψη, η εξάρτηση από την ύπαρξη οπτικής επαφής (Line of Sight - LOS) μεταξύ πομπού – δέκτη, οι παρεμβολές που υφίστανται από τις εξωτερικές πηγές φωτός, οι απώλειες λόγω διάδοσης στην ατμόσφαιρα και η μικρή ισχύ εκπομπής, οι οποίοι δυσχεραίνουν τις οπτικές επικοινωνίες και οδηγούν στην υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος, κλπ. Ως εκ τούτου, η αντιμετώπιση των ανωτέρω περιορισμών αποτελεί μια τεράστια ερευνητική πρόκληση που αφορά στα ασύρματα οπτικά δίκτυα, προκειμένου να προσφέρουν αυτά που υπόσχονται.

Συναφώς, η συνεργασία των RF και οπτικών επικοινωνιών στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα είναι ζωτικής σημασίας για την εξασφάλιση αξιόπιστων επικοινωνιών, που θα πληρούν τις τεθείσες προδιαγραφές που αφορούν ορισμένες βασικές παραμέτρους όπως η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών (Quality of Service – QoS), ο ρυθμός εσφαλμένων ψηφίων (Bit Error Rate – BER) και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων. Επομένως, οι ασύρματες οπτικές επικοινωνίες δεν έρχονται για να αντικαταστήσουν αλλά να λειτουργήσουν συμπληρωματικά με τις RF επικοινωνίες, προσπαθώντας η κάθε τεχνολογία να καλύψει τις αδυναμίες της μέσω της άλλης [2 - 4]. Συνεπώς, τα σύγχρονα δίκτυα θα χαρακτηρίζονται από ετερογένεια όσον αφορά τις ασύρματες τεχνολογίες που θα χρησιμοποιούν, έχοντας ως γνώμονα την επίτευξη του απαιτούμενου QoS μέσω της καλύτερης αξιοποίησης των δικτύων επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα και την αποφόρτιση του δικτύου (Traffic Off-loading).

1.2 Σύντομη περιγραφή των βασικών τεχνολογιών των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών

1.2.1 Οι τεχνολογίες των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών

Τα πιο ευρέως διαδεδομένα συστήματα ασυρμάτων οπτικών επικοινωνιών, που έχουν αναπτυχθεί, είναι οι επικοινωνίες ορατού φωτός (Visible Light Communication – VLC), το Light Fidelity (LiFi), οι οπτικές επικοινωνίες με χρήση κάμερας (Optical Camera Communication – OCC) και οι οπτικές επικοινωνίες ελευθέρου χώρου (Free Space Optical – FSO) [5]. Η κοινή συνισταμένη των παραπάνω συστημάτων είναι ότι χρησιμοποιούν ως μέσο διάδοσης τις περιοχές συχνοτήτων που αφορούν το φάσμα του ορατού φωτός (Visible Light – VL), το υπέρυθρο (Infrared – IR) και το υπεριώδες (Ultraviolet – UV) φάσμα. Η κάθε μία από τις προαναφερθείσες περιοχές συχνοτήτων έχει μοναδικά χαρακτηριστικά – ιδιαιτερότητες και ανάλογα με το αποτέλεσμα που θέλει να πετύχει ο λειτουργός του δικτύου επιλέγει αυτή που ταιριάζει καλύτερα. Για παράδειγμα, το υπέρυθρο φάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές που δεν απαιτούν την ύπαρξη φωτισμού. Από την άλλη πλευρά, το υπεριώδες φάσμα συχνοτήτων επιλέγεται για την υποστήριξη ασύρματων επικοινωνιών μικρής εμβέλειας με υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, οι οποίες είναι ανεξάρτητες από την ύπαρξη οπτικής επαφής, δηλαδή υποστηρίζουν ζεύξεις LOS και NLOS.

Οι τεχνολογίες των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών υποστηρίζουν ζεύξεις, υψηλού ρυθμού μετάδοσης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μία ευρεία γκάμα εφαρμογών ανάλογα με τη εμβέλεια που απαιτείται να επιτυγχάνουν. Το βασικότερο ενδεχομένως χαρακτηριστικό αυτών των τεχνολογιών είναι ότι οι περιοχές συχνοτήτων που χρησιμοποιούν δεν είναι αδειοδοτούμενες και δεν υπόκεινται σε αυστηρούς κανονισμούς χρήσης, όπως συμβαίνει στις RF συχνότητες. Κάποια επιπλέον βασικά χαρακτηριστικά είναι ότι έχουν μικρή κατανάλωση ενέργειας, υψηλό επίπεδο στην ασφάλεια διακινούμενων δεδομένων, ατρωσία από παρεμβολές που δημιουργούν τα συστήματα RF, μικρό κόστος ανάπτυξης – εγκατάστασης και τέλος ευκολία ενσωμάτωσης στην υπάρχουσα τηλεπικοινωνιακή υποδομή.

1.2.2 Σύντομη ανάλυση των τεχνολογιών των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών

Κάθε μια από τις τεχνολογίες ασύρματων οπτικών επικοινωνιών (VLC, LiFi, OCC και FSO) έχει διαφορετικές απαιτήσεις όσον αφορά τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, την αρχιτεκτονική, τις βασικές αρχές λειτουργίας, τις τεχνικές διαμόρφωσης, το σύστημα εκπομπής – λήψης και ως εκ τούτου ανάλογα με το σενάριο χρήσης επιλέγεται αυτή που ταιριάζει καλύτερα. Στις επόμενες

υποπαραγράφους θα γίνει μία σύντομη περιγραφή των δυνατοτήτων της κάθε τεχνολογίας.

α. Light Fidelity (LiFi) [6, 7]

Η αρχή λειτουργίας του LiFi είναι σχεδόν ίδια με αυτή του Wireless Fidelity (WiFi) και μπορεί να χαρακτηριστεί ως επικοινωνία με μήκος κύματος της τάξης του nm (nm-wave). Η τεχνολογία LiFi παρέχει επικοινωνίες πολύ υψηλού ρυθμού μετάδοσης χρησιμοποιώντας τις λάμπες φωτισμού της εγκατάστασης. Τυπικές δίοδοι LED (Light Emitting Diodes – LEDs) ή δίοδοι laser (Laser Diodes – LDs) χρησιμοποιούνται ως πομποί, ενώ αντιθέτως από τη άλλη πλευρά χρησιμοποιούνται φωτοανιχνευτές (Photodetectors – PDs) ή κάμερες ως οπτικοί δέκτες. Το LiFi είναι ένα σύστημα που παρέχει αμφίδρομη επικοινωνία ενώ το VLC έχει τη δυνατότητα να παρέχει είτε μονόδρομη είτε αμφίδρομη επικοινωνία. Το LiFi υποστηρίζει επικοινωνίες σημείο προς σημείο (Point-to-Point – PtP), σημείο προς πολλαπλά σημεία (Point-to-Multipoint – PtMP), πολλαπλών σημείων προς πολλαπλά σημεία (Multipoint-to-Multipoint – MPtMP) και απρόσκοπτη κινητικότητα (mobility) των τελικών χρηστών όπως συμβαίνει στα RF συστήματα. Συνεπώς, το LiFi είναι ένα ώριμο ασύρματο σύστημα δικτύωσης που επιτρέπει τη χρήση πολλαπλών χρηστών, που μπορεί να ενσωματωθεί στα υπάρχοντα ετερογενή δίκτυα. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν δημοσιεύσεις, που περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα δοκιμών από δίκτυα LiFi και οι επιδόσεις που έχουν επιτευχθεί είναι εξαιρετικά ενθαρρυντικές καθώς είναι της τάξης των 3 Gbps (με πομπό LED) [8] και 56 Gbps (με πομπό Vertical Cavity Surface Emitting Laser - VCSEL) [9].

Με τη χρήση της ανωτέρω τεχνολογίας έχουμε την εμφάνιση του όρου attocell LiFi, που είναι μια κυψέλη που καλύπτει μια πολύ μικρή περιοχή συνήθως εσωτερικού χώρου και έχει σκοπό να οδηγήσει στην εμφάνιση πολλών μικρών τέτοιων κυψελών οι οποίες θα συμβάλουν στην αποφόρτιση του ήδη κορεσμένου RF δικτύου. Το θετικό αυτής της τεχνολογίας είναι ότι μέσω της υπάρχουσας υποδομής για τη λειτουργία του φωτισμού ταυτόχρονα ικανοποιείται και η υπηρεσία των επικοινωνιών. Για παράδειγμα, ο έλεγχος των φωτεινών σηματοδοτών κυκλοφορίας θεωρείται ότι καλύπτει μόνο το μέρος της επικοινωνίας, ενώ αντιθέτως ο έλεγχος του δημόσιου φωτισμού δύναται να καλύψει την ανάγκη του φωτισμού του οδικού δικτύου και τις απαιτούμενες επικοινωνίες.

Συνοψίζοντας, τα βασικά χαρακτηριστικά του LiFi μπορούμε να αναφέρουμε ότι μπορεί να υποστηρίξει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, να παρέχει υψηλό επίπεδο ασφάλειας, είναι οικονομικά αποδοτικό και έχει υψηλή διαθεσιμότητα σε φάσμα. Από την άλλη πλευρά, η απόδοση του LiFi επηρεάζεται και υποβαθμίζεται σημαντικά από τις εξωτερικές πηγές φωτισμού

είτε αυτές είναι φυσικές (ήλιος) είτε τεχνητές (φώτα). Επιπλέον, ένας ακόμη περιορισμός την εν λόγω τεχνολογίας είναι ύπαρξη «νεκρών» σημείων μεταξύ των φωτεινών πηγών, που επηρεάζει την κινητικότητα των τελικών χρηστών καθώς δεν μπορεί να τους προσφέρει απρόσκοπτη λειτουργία καθώς κινούνται. Συνεπώς, η χρήση του LiFi δεν ενδείκνυται για να υλοποιήσει ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων και δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε εξωτερικούς χώρους.

β. Επικοινωνίες ορατού φωτός (Visible Light Communication – VLC) [10, 11]

Το VLC χρησιμοποιεί διόδους LED και διόδους laser LDs ως πομπούς, φωτοανιχνευτές PDs ως οπτικούς δέκτες και ως μέσο επικοινωνίας το ορατό φως. Το VLC παρέχει επικοινωνίες σημείο προς σημείο (PtP), σημείο προς πολλαπλά σημεία (PtMP), οι οποίες μπορούν είναι είτε μονόδρομες είτε αμφίδρομες ανάλογα με το αν πρέπει να υποστηρίξουν κινητικότητα χρηστών ή όχι. Η τεχνολογία VLC δύναται να υποστηρίξει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 100 Gbps και να προσφέρει πολλές φορές μεγαλύτερο εύρος ζώνης και χωρητικότητα συγκριτικά με την RF τεχνολογία. Οι εφαρμογές χρήσης του VLC είναι παρόμοιες με αυτές του LiFi, δηλαδή επικοινωνιακή κάλυψη γραφείων, πεζοδρόμια δρόμων, αεροσκάφη και αυτοκίνητα. Επιπλέον, η τεχνολογία VLC έχει πληθώρα εφαρμογών για εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, όπου μεταξύ άλλων έχουμε επικοινωνία οχήματος με υποδομές (V2X), έξυπνο φωτισμό, ανάπτυξη τοπικών ασύρματων δικτύων και υλοποίηση συνδέσεων οπισθόζευξης (Backhaul Connectivity) με τον κορμό του δικτύου.

Η τεχνολογία VLC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει ταυτόχρονα υπηρεσίες φωτισμού, επικοινωνιακής κάλυψης και εντοπισμού θέσης, εκμεταλλευόμενη τη δυνατότητα γρήγορης εναλλαγής (fast switching), που υποστηρίζουν οι συσκευές LED. Η εν λόγω δυνατότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη VLC τεχνολογία, καθώς μέσω αυτής επιτυγχάνεται η ταχεία απόκριση και η γρήγορη εναλλαγή μεταξύ των υποστηριζόμενων τρόπων λειτουργίας. Από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε εσωτερικό χώρο με κανονικές συνθήκες φωτισμού, επιτεύχθηκαν ταχύτητες μετάδοσης της τάξης των 10 Gbps (με πομπό LED) και 100 Gbps (με πομπό LD) [12]. Ομοίως με τη τεχνολογία LiFi, οι VLC επικοινωνίες δεν είναι κατάλληλες για εφαρμογές σε εξωτερικούς χώρους, για ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων και σε εσωτερικούς χώρους έχουν το πρόβλημα με τα «νεκρά» σημεία που αναφέρθηκε παραπάνω.

γ. Οπτικές επικοινωνίες με χρήση κάμερας (Optical Camera Communication – OCC) [13, 14]

Η τεχνολογία OCC χρησιμοποιεί τις διόδους LED ως πομπούς, την κάμερα ως βαθμίδα λήψης στην πλευρά του δέκτη και το φάσμα VL και IR ως μέσο επικοινωνίας. Η τεχνολογία OCC μπορεί πολύ ευκολά να ενσωματωθεί και να λειτουργήσει με την υπάρχουσα υποδομή από πλευρά υλικού. Η αρχή λειτουργίας είναι ότι το σήμα που μεταδίδουν οι πομποί του συστήματος μπορούν με ευκολία να ληφθούν με χρήση ενός αισθητήρα καταγραφή εικόνας (κάμερα, φωτογραφική μηχανή κ.λπ.). Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να λειτουργήσει και να καλύψει τις επικοινωνίες σε εξωτερικούς χώρους διότι μπορεί να αφαιρέσει τις παρεμβολές από το φως του ήλιου και των τεχνητών πηγών μέσω επεξεργασίας της εικόνας σε επίπεδο pixel. Αναφορικά με τα προηγούμενα, η τεχνολογία VLC θα μπορούσε κάλλιστα να θεωρηθεί ως ένα σύστημα OCC, όταν χρησιμοποιεί τις διόδους LED ως πομπούς και κάμερα ως δέκτες αντί των φωτοανιχνευτών.

Ένα σύστημα OCC μπορεί να ξεπεράσει ορισμένους από τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω, όπως η μικρή εμβέλεια επικοινωνιών, οι παρεμβολές από εξωτερικές οπτικές πηγές και η γρήγορη εξασθένιση του εκπεμπόμενου σήματος. Η τεχνολογία OCC είναι προφανές ότι είναι η πλέον κατάλληλη επιλογή για εφαρμογές όπως ο εντοπισμός θέσης εντός εσωτερικού χώρου, οι επικοινωνίες οχήματος προς όχημα, οχήματος προς υποδομή, drone σε drone, ο εντοπισμός κίνησης μέσω της ανταλλαγής μηνυμάτων ελέγχου που προκαλούνται από την κίνηση μερών του σώματος και για υπηρεσίες που απαιτούν υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR). Τα οφέλη που προσφέρει η αποδοτική χρήση της OCC τεχνολογίας σε εξωτερικούς χώρους είναι πολύ σημαντικά, ωστόσο το trade off είναι ότι τα επιτυγχάνει με μικρούς σχετικά ρυθμούς μετάδοσης. Από δοκιμές που εκτελέστηκαν οι ρυθμοί μετάδοσης που επιτεύχθηκαν είναι της τάξης των 45 Mbps (με μηδενικό BER) και 54 Mbps (με BER 10^{-5}) [15].

δ. Οπτικές επικοινωνίες ελευθέρου χώρου (Free Space Optical – FSO) με οπτική επαφή [4, 18, 19]

Οι επικοινωνίες FSO είναι ένα υποσύνολο των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών, που συνήθως χρησιμοποιούν τη φασματική περιοχή κοντά στην υπέρυθη (NIR) ως κανάλι επικοινωνίας, καθώς το επίπεδο των αποσβέσεων είναι πολύ μικρότερο συγκριτικά με τις άλλες φασματικές περιοχές. Η τεχνολογία FSO μπορεί επίσης να λειτουργήσει χρησιμοποιώντας το φάσμα του ορατού φωτός (VL) και το υπεριώδες (UV) φάσμα και δεν απαιτεί την ύπαρξη φωτισμού. Οι επικοινωνίες FSO χρησιμοποιούν στενές δέσμες οπτικών πηγών (LDs) ως πομπούς και φωτοανιχνευτές (PDs) ως οπτικούς δέκτες, προκειμένου

να δημιουργήσουν ασύρματες ζεύξεις επικοινωνίας με υψηλή ταχύτητα μετάδοσης. Επιπλέον, αυτού του είδους οι ζεύξεις έχουν τη δυνατότητα να διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις, παρέχοντας επικοινωνία σημείου προς σημείο (PtP), με εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

Οπτικοί ενισχυτές ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν την ένταση του διαμορφωμένου σήματος που προκύπτει στην έξοδο του λέιζερ, ωστόσο αυτό θα πρέπει να πλαισιώνεται από κατάλληλες επιλογές στο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για να είναι αποδοτική η ενίσχυση σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Επιπρόσθετα, στην πλευρά του δέκτη θα πρέπει να υπάρχουν ηλεκτρονικά κυκλώματα που θα μετατρέπουν την έξοδο του φωτοανιχνευτή (PD) σε τάση, βαθυτερατό φίλτρο (Low Pass Filter – LPF) για να εξουδετερώνει το επίπεδο του θορύβου και τέλος ο αποδιαμορφωτής, θα πρέπει να υλοποιεί όλες τις απαραίτητες διεργασίες προκειμένου να εξάγει ένα όσο το δυνατό πιο πιστό αντίγραφο της πληροφορίας που εκπέμφθηκε από τον πομπό.

Οι πιο συνηθισμένες εφαρμογές για τα συστήματα FSO είναι η παροχή διασύνδεσης μεταξύ κτιρίων εντός του χώρου των πανεπιστημίων, ζεύξεις οπισθόζευξης στα κυβελωτά συστήματα, διαστημικές επικοινωνίες (space communications), σύνδεση σε επίπεδο chip (inter-chip connectivity) και ως εναλλακτική λύση για την οπτική ίνα. Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα που έχουν τα συστήματα FSO σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, η απόδοση, η αξιοπιστία και η διαθεσιμότητα τους είναι πολύ ευαίσθητη σε περιοριστικούς παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες (βροχή, ομίχλη, χιόνι σκόνη κ.λπ.), η ατμοσφαιρική τυρβώδης ροή και τα φυσικά εμπόδια, η εμφάνιση των οποίων δεν δύναται να ελεγχθεί.

1.2.3 Κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών ανάλογα το φάσμα χρήσης

Σύμφωνα με την κατανομή του φάσματος, οι οπτικές ασύρματες επικοινωνίες μπορούν να καταταχθούν σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με την φασματική περιοχή που χρησιμοποιούν, οι οποίες είναι το ορατού φωτός, υπέρυθρες και υπεριώδεις. Η φασματική περιοχή κοντά στην υπέρυθη (NIR) χρησιμοποιείται ευρέως από την τεχνολογία FSO για επικοινωνίες σημείου προς σημείο (PtP), συμπεριλαμβάνοντας τις περιοχές των υπερβολικά κοντινών (760 nm έως 1450 nm), κοντινών (1400 nm έως 3000 nm), μεσαίων (3000 nm έως 8000 nm), μεγάλων (8000 nm έως 15000 nm), και υπερβολικά μακρινών αποστάσεων (15000 nm έως 1 mm). Όμως, για την υλοποίηση ζεύξεων μεγάλων αποστάσεων με χρήση της τεχνολογίας FSO, χρησιμοποιείται το οπτικό φάσμα υπερβολικά και κοντινών αποστάσεων. Από την άλλη πλευρά, οι περιοχές μεσαίων και μεγάλων αποστάσεων μπορούν να

χρησιμοποιηθούν για στρατιωτικές εφαρμογές και σκοπούς θερμικής απεικόνισης αντίστοιχα. Η φασματική περιοχή κοντά στην υπέρυθρη (NIR) έχει μήκος κύματος λειτουργίας που κυμαίνεται από 760 nm έως 1 mm και είναι και είναι κατάλληλη για επικοινωνίες οπτικής επαφής (LOS) που δεν χρειάζονται φωτισμό. Ωστόσο, δεν είναι πάντα ασφαλές για τον άνθρωπο και έχει περιορισμένη εφαρμογή στις επικοινωνίες χωρίς οπτική επαφή (NLOS).

Δεύτερον, η φασματική περιοχή του ορατού φωτός είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη στις οπτικές τεχνολογίες VLC, LiFi και OCC για να καλύψουν κοντινές και μεσαίες αποστάσεις. Σε ορισμένες περιορισμένες περιπτώσεις, το φάσμα του ορατού φωτός, του οποίου το μήκος κύματος λειτουργίας εκτείνεται από 360 nm έως 750 nm, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από την τεχνολογία FSO. Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της φασματικής περιοχής είναι ότι είναι ασφαλής για τον άνθρωπο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα για φωτισμό και παροχή επικοινωνιακής κάλυψης. Σε αντιστοιχία με NIR το φάσμα ορατού φωτός είναι ιδανικό για επικοινωνίες LOS και δύναται να επιτύχει μικρούς σχετικά ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων για επικοινωνίες NLOS.

Τέλος, υπάρχει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον για την παροχή γρήγορων συνδέσεων LOS και NLOS με χρήση του υπεριώδους φάσματος. Το μήκος κύματος λειτουργίας σε αυτή τη φασματική περιοχή κυμαίνεται από 10 nm έως 400 nm και είναι κατάλληλο για παροχή κοντινών και μεσαίων αποστάσεων με χρήση της τεχνολογία LiFi, καθώς και για κοντινές, μεσαίες και μακρινές αποστάσεις με τη τεχνολογία FSO.

Παράγοντας	LiFi	VLC	OCC	FSO
Οπτική πηγή	LED/LD	LED/LD	LED	LD
Οπτικός δέκτης	PD	PD	Camera	PD
Διαμόρφωση	OOK, OFDM, CDMA	OOK, OFDM, CDMA	OOK, PAM, CDMA	OOK, OFDM, QAM, SIK
Εμβέλεια	10m	20m	200m	>1000km
Ρυθμός μετάδοσης	100 Gbps (LD)	100 Gbps (LD)	54 Mbps	40 Gbps
Φάσμα	IR/VL/UV	VL	VL	IR/VL/UV
Άδεια χρήσης φάσματος	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι
Απώλειες διάδοσης	Μέτριες (LOS)	Μέτριες (LOS)	Χαμηλές	Υψηλές
Επίπεδο παρεμβολών	Χαμηλό	Χαμηλό	Μηδενικό	Χαμηλό
Ασφάλεια	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
Περιορισμοί	Χαμηλές επιδόσεις για	Χαμηλές επιδόσεις για	Χαμηλό ρυθμός	Επίδοση που εξαρτάται και

	NLOS επικοινωνίες	NLOS επικοινωνίες	μετάδοσης και μικρή εμβέλεια	υποβαθμίζεται ανάλογα με συνθήκες του περιβάλλοντος
--	----------------------	----------------------	------------------------------------	--

Πίνακας 1 Συγκριτικός πίνακας των ασύρματων οπτικών τεχνολογιών επικοινωνίας [1]

1.3 Ανάλυση βασικών παραμέτρων (link budget, SNR κ.λπ.) της τεχνολογίας FSO - Μοντελοποίηση των απωλειών του καναλιού

Όταν αναφερόμαστε στα συστήματα FSO, στην πράξη εννοούμε την υλοποίηση οπτικών ζεύξεων σημείου προς σημείο, για τη μεταφορά δεδομένων με εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες μετάδοσης. Με άλλα λόγια, οι FSO επικοινωνίες είναι μια LOS τεχνολογία που χρησιμοποιεί πολύ στενές δέσμες λέιζερ, οι οποίες είναι ασφαλείς για τα μάτια και παρέχουν ασύρματη οπτική επικοινωνία χρησιμοποιώντας τον κενό χώρο ως μέσο διάδοσης. Οι FSO επικοινωνίες είναι μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική για τις RF επικοινωνίες, αν αναλογιστούμε ότι το φως διαδίδεται γρηγορότερα στον αέρα από στο γυαλί, συνεπώς είναι δυνατό να επιτευχθούν ρυθμοί μετάδοσης εφάμιλλοι με αυτούς που επιτυγχάνονται στις οπτικές ίνες.

Στα συστήματα FSO μπορούμε να διακρίνουμε δύο γενικές κατηγορίες παραμέτρων, οι οποίες είναι οι εσωτερικές και οι εξωτερικές. Στις εσωτερικές παραμέτρους συμπεριλαμβάνονται χαρακτηριστικά του συστήματος (ισχύς εκπομπής, bandwidth, μήκος κύματος κ.λπ.), τα οποία μπορούν να ελεγχθούν από τους λειτουργούς του δικτύου, ενώ από την άλλη πλευρά στις εξωτερικές παραμέτρους ενσωματώνονται αστάθμητοι παράγοντες (καιρικές συνθήκες, τυρβώδης ροή κ.λπ.), οι οποίοι δεν είναι ελεγχόμενοι και επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος.

1.3.1 Εσωτερικές παράμετροι

Οι εσωτερικές παράμετροι των συστημάτων FSO, έχουν ως ακολούθως [20]:

α. Περιθώριο ισχύος στη ζεύξη (Link Margin)

Ο σωστός προϋπολογισμός ζεύξης (Link budget), κατά τη φάση σχεδίασης του συστήματος, αποτελεί μία από τις σημαντικότερες διεργασίες, καθώς καθορίζει το πόσο καλά θα λειτουργεί η FSO σύνδεση για δεδομένες καιρικές συνθήκες. Συνεπώς με τον υπολογισμό του link budget γίνεται μια προσπάθεια να εκτιμηθεί το περιθώριο ή η παραπάνω ισχύς που πρόκειται να φτάσει στο δέκτη υπό συγκεκριμένη λειτουργική κατάσταση του συστήματος.

Εν συνέχεια, αυτή η επιπλέον διαθέσιμη ισχύς συνδυάζεται με μοντέλα απωλειών, ατμοσφαιρικών και λόγω διάδοσης στον ελεύθερο χώρο, προκειμένου να προκύψει η τελική διαθέσιμη ισχύς στο δέκτη. Η διαμόρφωση της εξίσωσης του link budget είναι ένα πολύ σημαντικό βήμα, που συμβάλει στη σωστή σχεδίαση του FSO συστήματος. Η σχέση που εκφράζει το περιθώριο ισχύος στη ζεύξη περιλαμβάνει συνήθως την εκπεμπόμενη ισχύ, την ευαισθησία του δέκτη και τις απώλειες (συστήματος, γεωμετρικές ευθυγράμμισης κ.λπ.), σύμφωνα με την ακόλουθη μαθηματική εξίσωση [21]:

$$LM = P_t - P_r - \alpha_{geo} - \alpha_{atmo} - \alpha_{sys} \quad (1.1)$$

όπου, P_t η εκπεμπόμενη ισχύς, P_r η ευαισθησία του δέκτη, α_{geo} γεωμετρικές απώλειες, α_{atmo} ατμοσφαιρικές απώλειες και α_{sys} απώλειες του συστήματος.

Οι εκφράσεις για τις παραπάνω απώλειες δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις [20]:

$$\alpha_{geo} = \frac{S_t}{S_c} \quad (1.2)$$

$$\alpha_{atmo} = \alpha_{rain} d \quad (1.3)$$

$$\alpha_{rain} = 1.076R^{0.67} \quad (1.4)$$

Όπου, $S_t = (\pi/4)(d \cdot \theta)^2$ είναι η περιοχή φωτισμού, θ η γωνία ανοίγματος της ζεύξης, d η απόσταση μεταξύ πομπού – δέκτη, S_c η περιοχή λήψης του δέκτη και R η ένταση βροχόπτωσης.

β. Εκπεμπόμενη ισχύς και ευαισθησία ανιχνευτή

Η εκπεμπόμενη ισχύς είναι ένα μέγεθος που μας δείχνει την ποσότητα οπτικής ενέργειας που εκπέμπεται από τον πομπό του FSO συστήματος. Ενώ, η ευαισθησία του ανιχνευτή είναι η ελάχιστη ποσότητα οπτικής ισχύος που πρέπει να φτάσει στην είσοδό του, προκειμένου να παραγάγει συγκεκριμένη έξοδο με δεδομένο BER και εν συνεχεία ο δέκτης να μπορέσει να εκτελέσει τις απαιτούμενες διεργασίες (αποδιαμόρφωση, αποκωδικοποίηση κ.λπ.) και να ανακτήσει την πληροφορία που εκπέμφθηκε από τον πομπό. Για τον υπολογισμό των δύο παραπάνω παραμέτρων τα πιο συνηθισμένα μεγέθη που καταμετρώνται είναι η μέση ή μέγιστη ισχύς, έχοντας ως σημείο μέτρησης την έξοδο της οπτικής πηγής ή του ανιχνευτή. Ωστόσο, κάθε φορά που πραγματοποιείται μια μέτρηση στην έξοδο του λέιζερ ή του ανιχνευτή δεν θα πρέπει να αμελείται η συμπερίληψη και των επιπλέον απωλειών που προκαλούνται λόγω της διάδοσης της οπτικής ισχύος εντός του συστήματος.

γ. Μήκος κύματος λειτουργίας

Στην παρούσα φάση, από έρευνες που έχουν διεξαχθεί στον τομέα των FSO επικοινωνιών, υπάρχουν ενδιαφέροντα αποτελέσματα, σχετικά με τον προσδιορισμό κατάλληλων μηκών κύματος για την υποστήριξη των επικοινωνιών του μέλλοντος. Υπάρχει μία λεπτομερής συζήτηση, γύρω από την καταλληλότητα των διάφορων μηκών κύματος που θα χρησιμοποιούνται ανάλογα με το είδος της επικοινωνίας, δηλαδή τις επίγειες (terrestrial) και τις διαστημικές (κοντά στη γη, μακρινού διαστήματος) επικοινωνίες. Τα πρακτικά αποτελέσματα του COST Action IC-802, χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση του FSO καναλιού υπό συνθήκες βροχής, χιονιού, ομίχλης, συννεφιάς, σκόνης και άλλων ατμοσφαιρικών φαινομένων, που προκαλούν πρόσθετη υποβάθμιση. Ο βασικός σκοπός είναι να μπορέσουν να διαλειτουργήσουν οι υπάρχουσες επιτυχημένες τεχνολογίες στα 850 nm, 1064 nm και 1550 nm με τεχνολογίες που είναι υπό ανάπτυξη, όπως για παράδειγμα αυτή στα 10 μm [22].

δ. Επίδοση συστήματος FSO με χρήση BER και SNR

Η επίδοση ενός FSO συστήματος μπορεί να εκτιμηθεί με πολλούς τρόπους και ενδεικτικά αναφέρουμε την ανάλυση του BER και του παράγοντα Q (Q-factor). Ως BER ορίζουμε το λόγο του αριθμού των εσφαλμένων ψηφίων που εντοπίζει ο δέκτης προς το συνολικό αριθμό ψηφίων που εκπέμφθηκαν από τον πομπό. Συνεπώς, υψηλές τιμές για το BER σημαίνει ότι στο δέκτη λαμβάνονται πολλές λανθασμένες αποφάσεις, κατά την αποκωδικοποίηση των ληφθέντων ψηφίων, λόγω της παρουσίας θορύβου και άλλων μη επιθυμητών σημάτων. Το Q, ως παράγοντας ποιότητας, είναι από τους βασικότερους δείκτες για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος και μέσω αυτού μπορεί να υπολογιστεί η τιμή του BER [23]. Επιπλέον, ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) είναι ένα μέγεθος, που χρησιμοποιείται συχνά για να αξιολογηθεί η ποιότητα μια οπτικής ζεύξης.

Το BER εξαρτάται από το επίπεδο της μέσης ισχύος που λαμβάνεται στο δέκτη, το φαινόμενο του σπινθηρισμού και το επίπεδο θορύβου στο δέκτη. Ωστόσο, με κατάλληλο σχεδιασμό του εξοπλισμού (άνοιγμα πομπού και δέκτη) μπορούμε να επιτύχουμε βελτίωση και αύξηση της λαμβανόμενης ισχύος και ταυτόχρονα περιορισμό του φαινομένου του σπινθηρισμού. Μια προσεγγιστική σχέση για τον υπολογισμό του SNR υπό συνθήκες τυρβώδους ροής, είναι η ακόλουθη [20]:

$$\text{SNR (dB)} = 10\log \left[\frac{1}{0.31C_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^{7/6} L^{11/6}} \right] \quad (1.5)$$

όπου, λ το μήκος κύματος, L η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη και η παράμετρος C_n^2 (refractive index structure parameter), είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος για τις επιγείες FSO ζεύξεις, που κυμαίνεται από $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ έως $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, για αδύναμη έως ισχυρή τυρβώδη ροή αντιστοίχως [24] και αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό της απόδοσής των εν λόγω ζεύξεων. Στην παράμετρο C_n^2 αναφερόμαστε πιο εκτενώς στο επόμενο υποκεφάλαιο.

ε. Οπτικό σύστημα και απώλειες ισχύος

Στα οπτικά συστήματα περιλαμβάνονται απώλειες που οφείλονται στη διάχυση (scattering), την απορρόφηση (absorption) και την ανάκλαση σε επιφάνειες. Επιπλέον, καθώς η οπτική δέσμη διαδίδεται από τον πομπό στο δέκτη η δέσμη «ανοίγει» και διασπείρεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ωφέλιμη ισχύς που φτάνει στο δέκτη. Αυτό το φαινόμενο της απώλειας ισχύος είναι γνωστό ως γεωμετρικές απώλειες. Σε οποιαδήποτε FSO ζεύξη, οι γεωμετρικές απώλειες εξαρτώνται από το άνοιγμα της δέσμης του πομπού, την απόσταση πομπού – δέκτη και το άνοιγμα της περιοχής λήψης του δέκτη. Η ισχύς του πομπού εκπέμπεται προς μία ευρύτερη περιοχή S_t [20].

$$S_t = \frac{\pi(\theta l)^2}{4} \quad (1.6)$$

Η πυκνότητα ροής ισχύος στον ανιχνευτή δίνεται από την παρακάτω σχέση [20]:

$$\frac{4P_t}{\pi(\theta l)^2} \quad (1.7)$$

Η πραγματική ισχύς που λαμβάνει όμως ο ανιχνευτής δίνεται από την ακόλουθη σχέση [20]:

$$P_r = \frac{4A_r P_t}{\pi(\theta l)^2} \quad (1.8)$$

όπου, A_r ενεργός περιοχή του ανιχνευτή, l η απόσταση πομπού – δέκτη και θ το άνοιγμα της δέσμης.

Οι δέσμες διασπείρονται σε ακτίνα που είναι μεγαλύτερη από το άνοιγμα του ανιχνευτή στην πλευρά του δέκτη και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ισχύς που βρίσκεται εκτός της ενεργού περιοχής του ανιχνευτή να χάνεται. Συνεπώς για να ελαχιστοποιηθούν οι γεωμετρικές απώλειες, εκπέμπονται στενές δέσμες με πολύ μικρό άνοιγμα, χρησιμοποιούνται ανιχνευτές με μεγαλύτερη ενεργό

περιοχή και συστήματα FSO πολλαπλών δεσμών. Οι γεωμετρικές απώλειες για ένα σύστημα FSO με κανονική κατανομή ισχύος, υπολογίζονται από τη παρακάτω σχέση [25]:

$$A_{\text{geo}}(\text{dB}) = \frac{P_r}{P_t} = 10 \log \left[\frac{4A_r}{\pi(\theta)^2} \right] \quad (1.9)$$

$$A_{\text{geo}}(\text{dB}) = 10 \log \left[\frac{4A_r N_r}{\pi(\theta)^2} \right] \quad (1.10)$$

Η σχέση (1.10) ισχύει όταν το πλήθος των ανιχνευτών του δέκτη είναι N_r .

στ. Απώλειες ευθυγράμμισης (Alignment Losses)

Οι FSO επικοινωνίες, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω χρησιμοποιούν πολύ στενές δέσμες για να αποκαταστήσουν επικοινωνία ανάμεσα σε δύο σημεία, που έχουν οπτική επαφή, προκειμένου να μεταφέρουν δεδομένα από το ένα άκρο στο άλλο. Συνεπώς, η ανεπαρκής ευθυγράμμιση μεταξύ πομπού και δέκτη είναι μια συνηθισμένη πηγή απωλειών για το σύστημα. Δεδομένου ότι, οι παλμοί που χρησιμοποιούνται ακολουθούν τη γκαουσιανή κατανομή (Gaussian Distribution), όταν το κέντρο της κατανομής είναι ευθυγραμμισμένο με το κέντρο του ανιχνευτή, είναι μια καλή συνθήκη για να θεωρήσουμε ότι η ευθυγράμμιση που έχει επιτευχθεί είναι αποδεκτή και θα έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Αντιθέτως, αν ο ανιχνευτής δεν είναι τέλεια ευθυγραμμισμένος με τον πομπό τότε έχουμε υποβάθμιση στην απόδοση της ζεύξης μέσω της εμφάνισης των απωλειών ευθυγράμμισης, καθώς η οπτική ισχύς που δύναται να συλλέξει ο ανιχνευτής δεν είναι αρκετά ισχυρή, από πλευράς ισχύος προκειμένου να μπορέσει να εκτελέσει με μεγάλη ακρίβεια την ανάκτηση των ψηφίων που απεστάλησαν από τον πομπό. Στην πράξη, οι πιο συνηθισμένος λόγος για την εμφάνιση των απωλειών ευθυγράμμισης είναι το building sway, που είναι μικρές μεταβολές της θέσης του κτιρίου οι οποίες μπορεί να οφείλονται στον άνεμο, σε σεισμικές δονήσεις και καθιζήσεις του εδάφους [26]. Η ελαχιστοποίηση των ανωτέρω απωλειών μπορεί να επιτευχθεί μέσω της ενσωμάτωσης ενός αυτόματου συστήματος στόχευσης και παρακολούθησης εντός του FSO συστήματος, το οποίο θα λαμβάνει συνεχώς μετρήσεις και θα προβαίνει δυναμικά και σε πραγματικό χρόνο σε διόρθωση της στόχευσης προκειμένου αυτή να είναι πάντα η βέλτιστη δυνατή για τις συνθήκες που επικρατούν.

1.3.2 Εξωτερικές παράμετροι

Οι εξωτερικές παράμετροι σχετίζονται με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και τις απώλειες που προκαλούν αυτές στο σύστημα. Η απόδοση μιας FSO ζεύξης εξαρτάται πρωτίστως από τα κλιματολογικά και δευτερευόντως από τα φυσικά χαρακτηριστικά της τοποθεσία που είναι εγκατεστημένη. Εν γένει, οι επικρατούσες καιρικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης του συστήματος επηρεάζουν την απόδοση της ζεύξης, μέσω της μείωσης ή περιορισμού της ορατότητα και προκαλούν μεταξύ άλλων την εμφάνιση ατμοσφαιρικών απωλειών, απωλειών ευθυγράμμισης μέσω του building sway, παρεμβολών λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας, του φαινομένου του σπινθηρισμού.

α. Επίδραση βροχής

Οι ατμοσφαιρικές παράμετροι όπως η απορρόφηση, η διάχυση και η μη επιλεκτική διάχυση επιδρούν σημαντικά σε μια FSO ζεύξη, καθώς το μέσο διάδοσης του διαμορφωμένου οπτικού σήματος είναι ο ελεύθερος χώρος. Οι απώλειες απορρόφησης είναι άμεσα εξαρτημένες από την τιμή του μήκους κύματος λειτουργίας και ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η υπεριώδης φασματική περιοχή (κάτω από τα 200 nm) υποφέρει σημαντικά από αυτού του είδους τις απώλειες. Επιπροσθέτως, η διάχυση είναι επίσης ισχυρά εξαρτημένη από το μήκος κύματος και συνδυαζόμενη με τη βροχή δύναται να γίνει μη επιλεκτική όταν το μέγεθος των σταγόνων είναι σχετικά μεγάλο σε σύγκριση με το μήκος κύματος. Για παράδειγμα αν θεωρήσουμε ότι μια FSO ζεύξη είναι εγκατεστημένη σε μια χώρα με τροπικό κλίμα, όπου οι έντονες βροχοπτώσεις είναι συχνό φαινόμενο καθίσταται σαφές ότι η διαθεσιμότητά της θα επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από τη βροχή. Αντιθέτως, αν η ίδια ζεύξη από πλευράς χαρακτηριστικών (πομπός, δέκτης, απόσταση κ.λπ.) ήταν εγκατεστημένη στη χώρα μας η διαθεσιμότητά της θα ήταν εντελώς διαφορετική προς το καλύτερο.

Επιπλέον, ένα χρήσιμο μέγεθος είναι ο προσδιορισμός της έκτασης, όπου λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της βροχόπτωσης και αυτό υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο όριο που έχει τεθεί. Ο υπολογισμός αυτής της έκτασης είναι πολύ σημαντικός, προκειμένου να αποφευχθεί σημαντική υπερεκτίμηση της εκπεμπόμενης ισχύος, καθώς η βροχόπτωση είναι ένα τυχαίο φαινόμενο που ενδεχομένως δεν συμβαίνει σε όλο το μήκος της FSO ζεύξης. Ως εκ τούτου, μπορούν να επιτευχθούν οικονομίες κλίμακας, λαμβάνοντας υπόψη ότι η σχεδίαση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων δεν γίνεται με γνώμονα την κάλυψη της μέγιστης τιμής απόσβεσης, διότι αυτή εμφανίζεται σπανίως.

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών [International Telecommunication Union – Radiocommunication (ITU - R)] έχει προτείνει το γεωγραφικό διαχωρισμό της γης σε δεκαπέντε κλιματικές ζώνες (A, B, C, D, F, G, H, I, J, K, L, M, N, P, Q) [27], για τις οποίες μέσω μιας σειράς κατάλληλων μετρήσεων έχει προσδιορίσει και παρέχει το ρυθμό βροχόπτωσης R (mm/h) για διάφορα ποσοστά του χρόνου. Συνεπώς, αυτές οι συστάσεις αποτελούν ένα πολύ σημαντικό βοήθημα για την καλύτερο υπολογισμό των απωλειών λόγω βροχής.

Επιπρόσθετα, για να σχηματιστεί η πλήρης εικόνα για την μακροσκοπική συμπεριφορά της βροχής θα πρέπει να προσδιοριστεί η κατανομή μεγέθους των βροχοπυρήνων, η οποία περιγράφει τη χωρική κατανομή της βροχής. Ο προσδιορισμός της προαναφερθείσας κατανομής παίζει σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό του ρυθμού βροχόπτωσης και της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής. Είναι προφανές ότι για την ίδια ένταση βροχής μπορούν να προκύψει από διαφορετικές τιμές στην κατανομή του μεγέθους των βροχοπυρήνων. Για παράδειγμα, ένας μεγάλος όγκος σταγόνων μικρής διαμέτρου μπορεί να οδηγήσει σε παρόμοια αποτελέσματα για την ένταση βροχόπτωσης με ένα μικρό όγκο σταγόνων αλλά μεγαλύτερης διαμέτρου, παρόλο που οι κατανομές του μεγέθους των βροχοπυρήνων θα είναι εντελώς διαφορετικές. Επίσης, δύο διαφορετικές κατανομές, με την ίδια ένταση βροχόπτωσης μπορεί να δώσουν διαφορετική απόσβεση λόγω βροχής.

Για την ολοκλήρωση της παρούσας υποπαράγραφου, θα προσπαθήσουμε να συνδυάσουμε όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω προκειμένου να καταλήξουμε σε ένα μοντέλο για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω βροχόπτωσης. Η διαδικασία ανάπτυξης ενός μοντέλου απωλειών πρέπει πρωτίστως να βασίζεται στις οδηγίες που προτείνονται από την ITU – R. Αρχικά, συνίσταται η συλλογή των δεδομένων βροχόπτωσης να επαναλαμβάνεται σε διαστήματα ενός λεπτού για την ακριβέστερη εκτίμηση του ρυθμού βροχόπτωσης. Η φιλοσοφία της μεθόδου έγκειται στην παρατήρηση της εξάρτησης που υπάρχει μεταξύ των συλλεγόμενων δεδομένων για το ρυθμό βροχόπτωσης και της λαμβανόμενης οπτικής ισχύος.

Γενικά, τα μοντέλα πρόβλεψης απωλειών διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες τα φυσικά και τα εμπειρικά. Τα φυσικά ή αναλυτικά μοντέλα βασίζονται στο θεωρητικό υπόβαθρο των μηχανισμών διάδοσης και περιγράφουν τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα από μαθηματικές εκφράσεις. Τα φυσικά μοντέλα θεωρούνται ότι έχουν γενική εφαρμογή και για τον λόγο αυτό η χρησιμοποίηση πειραματικών δεδομένων γίνεται μόνο για την επιβεβαίωση της εγκυρότητά των. Από την άλλη πλευρά, τα εμπειρικά μοντέλα βασίζονται στη στατιστική επεξεργασία μεγάλου πλήθους πειραματικών μετρήσεων πεδίου και καταλήγουν σε απλουστευμένες μαθηματικές σχέσεις, η

οποίες βέβαια δεν τυγχάνουν γενικής εφαρμογής. Η ειδική απόσβεση λόγω βροχόπτωσης είναι ένας παράγοντας ζωτικής σημασίας για τον προσδιορισμό της αξιοπιστίας ενός FSO συστήματος και δίνεται από την μαθηματική εξίσωση [28]:

$$\gamma_R = kR^a = A_{\text{atmo}} \quad (1.11)$$

όπου, γ_R η ειδική απόσβεση λόγω βροχής (σε dB/km), R ο σημειακός ρυθμός βροχόπτωσης (σε mm/h).

Οι συντελεστές k και a εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους, μερικές από τις οποίες είναι το μήκος κύματος (συχνότητα), η κατανομή μεγέθους βροχοπυρήνων και η πόλωση. Για γραμμική και κυκλική πόλωση και για κάθε γεωμετρία ζεύξης, οι συντελεστές k και a υπολογίζονται ως [28]:

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\varphi\cos 2\tau]/2 \quad (1.12)$$

$$a = [k_H a_H + k_V a_V + (k_H a_H - k_V a_V)\cos^2\varphi\cos 2\tau]/2k \quad (1.13)$$

όπου, οι συντελεστές για οριζόντια πόλωση (k_H , a_H) και κατακόρυφη πόλωση (k_V , a_V) δίνονται υπό τη μορφή πινάκων από τη σύσταση ITU-R P.838 [28], φ η γωνία ανύψωσης της ζεύξης που για επίγειες ζεύξεις λαμβάνει πολύ μικρές τιμές και τ η γωνία πόλωσης ($\tau=0^\circ$, 45° , 90° για οριζόντια, κυκλική και κατακόρυφη πόλωση αντιστοίχως).

β. Επίδραση ομίχλης

Όταν αναφερόμαστε στην ομίχλη εννοούμε το φαινόμενο κατά το οποίο σταγονίδια νερού ή πάγου, πολύ μικρών διαστάσεων, βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της γης και προκαλούν διάχυση του φωτός που προσπίπτει πάνω τους, περιορίζοντας την ορατότητα σε μεγάλο βαθμό. Η ομίχλη, ως φαινόμενο, χαρακτηρίζεται από ορατότητα μικρότερη του ενός χιλιομέτρου και υγρασία της τάξης του 100% [29]. Υπάρχουν διάφορες παράμετροι, που καθορίζουν – επηρεάζουν την ομίχλη και ορισμένες από αυτές είναι η κατανομή μεγέθους και η περιεκτικότητα νερού των σταγονιδίων, η θερμοκρασία και το επίπεδο υγρασίας. Η σημαντικότερη όμως είναι η κατανομή του μεγέθους των σταγονιδίων, η οποία στην υπάρχουσα βιβλιογραφία μοντελοποιείται με την τροποποιημένη κατανομή γάμμα.

Τα χαρακτηριστικά της ομίχλης μπορεί να διαφέρουν από μια ομίχλη σε μια άλλη ή ακόμη και κατά τη διάρκεια της ίδιας ομίχλης, αυτό συμβαίνει διότι εξαρτάται από συγκεκριμένες μεταβλητές (εποχή, τοποθεσία, διάρκεια κ.λπ.). Συνεπώς για να προβούμε στην ανάλυση της ομίχλης είναι εξαιρετικά

σημαντικό να γνωρίζουμε τις παραμέτρους που την χαρακτηρίζουν και ιδιαίτερα την κατανομή του μεγέθους των σταγονιδίων. Σε γενικές γραμμές, το μέγεθος των σταγονιδίων της ομίχλης είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος λειτουργίας των FSO ζεύξεων και καθώς αλληλοεπιδρούν, μέσω της σκέδαση, προκαλούνται τεράστιες απώλειες. Ενδεικτικά, αναφέρουμε ότι οι απώλειες διάδοσης οπτικού σήματος σε πυκνή ομίχλη μπορεί να υπερβούν τα 480 dB/km και σε ήπια ομίχλη τα 130 dB/km [30].

Επομένως, για να εκτιμηθεί η επίδραση της ομίχλης σε μια FSO ζεύξη θα πρέπει να είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε το μέγεθος των απωλειών που προκαλεί. Για να υπολογιστεί η εξασθένηση που προκαλεί η ομίχλη είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις βασικές παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ωστόσο, η γνώση αυτών των μεταβλητών είναι δύσκολο να επιτευχθεί και δεν είναι πάντα διαθέσιμη για την τοποθεσία εγκατάστασης της ζεύξης. Η ερευνητική κοινότητα κατάφερε να ξεπεράσει την προηγούμενη δυσκολία, προτείνοντας αναλυτικά μοντέλα που βασίζονται σε δεδομένα της ορατότητας τα οποία είναι συνήθως διαθέσιμα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς των πόλεων. Με τον όρο ορατότητα στα μοντέλα απωλειών λόγω ομίχλης αναφερόμαστε στην απόσταση στην οποία ένα αντικείμενο είναι ξεκάθαρα ορατό εντός της ομίχλης ή άλλων ατμοσφαιρικών συνθηκών που μειώνουν την ορατότητα.

Τα δύο πιο κλασικά μοντέλα για τον υπολογισμό των απωλειών του οπτικού σήματος ήταν τα Kruse και Kim μοντέλα, τα οποία εκτιμούν τις απώλειες με χρήση δεδομένων της ορατότητας. Αυτά τα δύο μοντέλα είναι εξαρτημένα από το μήκος κύματος καθώς η ορατότητα μετρήθηκε με μήκος αναφοράς τα 550 nm, καθώς εδώ το ηλιακό φάσμα υφίσταται τη μεγαλύτερη αντανάκλαση.

Το μοντέλο απωλειών Kruse δίνεται από την παρακάτω σχέση [31]:

$$A = \frac{13}{V(\text{km})} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \left[\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right] \quad (1.14)$$

όπου, λ το μήκος κύματος σε nm, V η ορατότητα σε km και ο παράγοντας q που εξαρτάται από την κατανομή μεγέθους των βροχοπυρήνων και δίνεται από την ακόλουθη έκφραση [31]:

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

Το μοντέλο απωλειών Kruse δεν μπορεί να εκτιμήσει ακριβώς τις απώλειες όταν η ορατότητα είναι μικρότερη του ενός χιλιομέτρου, οπότε ο Kim

μέσω του ομώνυμου μοντέλου προέβη σε μια διόρθωση του παραπάνω παράγοντα q και το μοντέλο Kim έχει, όπως παρακάτω [31]:

$$A = \frac{13}{V(\text{km})} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \left[\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right] \quad (1.16)$$

$$q = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0.16V + 0.34 & 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \\ V - 0.5 & 0.5 \text{ km} < V < 1 \text{ km} \\ 0 & V < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (1.17)$$

Στα προηγούμενα μοντέλα, πληροφορίες για την κατανομή μεγέθους των βροχοπυρήνων και τον τύπο εσωκλείονται εντός της ορατότητας. Οι συγγραφείς του μοντέλου, που ακολουθεί, λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω παραδοχή με χρήση του προγραμματιστικού εργαλείου FASCOD ανέπτυξαν ένα νέο μοντέλο απωλειών, για τη φασματική περιοχή από 690 nm έως 1550 nm και ορατότητες από 50 m έως 1 km. Οι εκφράσεις που μας δίνουν τις απώλειες για δύο είδη ομίχλης (advection και convection) έχουν, ως ακολούθως [32]:

$$A_{\text{adv}} = 4.343 \left(\frac{0.11478\lambda + 3.8367}{V} \right) \left[\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right] \quad (1.18)$$

$$A_{\text{conv}} = 4.343 \left(\frac{0.18126\lambda^2 + 0.13709\lambda + 3.7502}{V} \right) \left[\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right] \quad (1.19)$$

Ακολούθως παρουσιάζεται ένα γενικό μοντέλο που προτάθηκε για την μοντελοποίηση απωλειών, λόγω ομίχλης και καπνού. Οι πειραματικές μετρήσεις διεξήχθησαν σε ελεγχόμενες συνθήκες, εντός του χώρου του εργαστηρίου, αφορούσαν τη φασματική περιοχή από 550 nm έως 1600 nm και ορατότητα που εκτείνεται από 15 m έως 1 km. Η τελική έκφραση που προέκυψε, δίνεται από την παρακάτω σχέση [33]:

$$A = \frac{17}{V(\text{km})} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q(\lambda)} \left[\left(\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right) \right] \quad (1.20)$$

$$q(\lambda) = 0.1428\lambda - 0.0947, \lambda \text{ σε nm} \quad (1.21)$$

γ. Επίδραση τυρβώδους ροής (atmospheric turbulence)

Η τυρβώδης ροή είναι ακόμη ένας σημαντικός παράγοντας που προκαλεί εξασθένηση του οπτικού σήματος καθώς διαδίδεται στον ελεύθερο

χώρο. Οι μεταβολές του δείκτη διάθλασης κατά μήκος ενός FSO μονοπατιού οδηγούν στην εμφάνιση της τυρβώδους ροής, η οποία με τη σειρά της στην πλευρά του δέκτη προκαλεί το φαινόμενο του σπινθηρισμού. Η διακύμανση Rytov χρησιμοποιείται συνήθως για να απεικονίσει την ένταση του οπτικού σπινθηρισμού και δίνεται από την ακόλουθη έκφραση [34]:

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (1.22)$$

όπου, λ το μήκος κύματος, k ο κυματαριθμός ($k=2\pi/\lambda$), L η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη και η παράμετρος C_n^2 (refractive index structure parameter) κυμαίνεται από $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ έως $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, για αδύναμη και ισχυρή τυρβώδη ροή αντιστοίχως.

Η παράμετρος δομής του δείκτη διάθλασης C_n^2 , μεταβάλλεται ανάλογα με την ένταση του φαινομένου της τυρβώδους ροής και αποτελεί μία μετρική της επίδρασης που έχει η τυρβώδης ροή στην επίδοση του συστήματος. Η εξίσωση από την οποία προκύπτει το C_n^2 , γράφεται ως [95]:

$$C_n^2 = \left(79 \times 10^{-6} \frac{P}{T} \right)^2 C_T^2 \quad (1.23)$$

όπου, P η ατμοσφαιρική πίεση (mbars), T η θερμοκρασία (Kelvin) και C_T^2 σταθερά θερμοκρασιακής κατανομής.

Συνεπώς, η ένταση της τυρβώδους ροής ανάλογα με τις τιμές της διακύμανσης Rytov, μπορεί να χαρακτηριστεί ασθενής, μέτρια και ισχυρή, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\text{Τυρβώδης ροής} = \begin{cases} \text{ασθενής} & \sigma_R^2 \leq 0.5 \\ \text{μέτρια προς ισχυρή} & 0.5 < \sigma_R^2 \leq 5 \\ \text{ισχυρή} & 5 < \sigma_R^2 \leq 25 \end{cases}$$

Η θεωρητική μελέτη της τυρβώδους ροής ξεκίνησε πριν αρκετά χρόνια, όμως τα αποτελέσματα που ανέκυπταν δεν έρχονταν σε πλήρη συμφωνία με διάφορα πειράματα που διεξάγονταν. Ωστόσο, η αποδοτική λειτουργία ενός FSO συστήματος, για δεδομένες τιμές BER και SNR, πρέπει να είναι ανεξάρτητη και να μην επηρεάζεται από την υπάρχουσα κατάσταση της τυρβώδους ροής. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, η σωστή εκτίμηση των απωλειών είναι ένας καθοριστικός παράγοντας για την ορθή σχεδίαση και ανάπτυξη ενός FSO συστήματος, με την πάροδο των ετών αναπτύχθηκαν διάφορα μοντέλα για να περιγράψουν τις απώλειες λόγω τυρβώδους ροής, ανάλογα με την ένταση εμφάνισης του φαινομένου. Για παράδειγμα, η κατανομή K παρουσιάζει εξαιρετική συμφωνία μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών δεδομένα, για

κανάλια με έντονη τυρβώδη ροή. Για παράδειγμα, θεωρώντας διάδοση επίπεδου κύματος σε περιβάλλον με χαμηλής έντασης τυρβώδη ροή, τότε η διακύμανση απωλειών δίνεται από την ακόλουθη έκφραση [20]:

$$a_{\text{scint}} = \sqrt{23.12 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 10^9 \right)^{7/6} C_n^2 L^{11/6}} \quad (\text{dB}) \quad (1.24)$$

όπου, λ το μήκος κύματος σε nm και L η απόσταση της ζεύξης σε m.

Τα οπτικά κύματα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις διακυμάνσεις της υγρασία και ο δείκτης διάθλασης είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας που μεταβάλλεται όταν αλλάζει η θερμοκρασία. Συγκρίνοντας, τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα με τα αντίστοιχα θεωρητικά, παρατηρούμε ότι για τα υψηλότερα ατμοσφαιρικά στρώματα (για ύψη άνω των 50 m) συμφωνούν, επιβεβαιώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την ορθότητα και την εγκυρότητά τους. Ωστόσο, για ύψη χαμηλότερα των 50 m κατά τη διάρκεια της ημέρας η σταθερά C_n προσεγγίζεται καλύτερα από τη σχέση $C_n(h) = r^{-4/3}$.

Λαμβάνοντας υπόψη, ότι η τιμή της C_n^2 εξαρτάται τη θερμοκρασία, την ατμοσφαιρική πίεση και τη μερική πίεση των υδρατμών και δεδομένου ότι τα επίγεια FSO συστήματα λειτουργούν κατά κόρο σε ύψη, που κυμαίνονται από 200 – 300m πάνω από την επιφάνεια της γης, οι παραπάνω παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν ακριβώς αν γνωρίζουμε το ύψος, στο οποίο είναι εγκατεστημένος ο εξοπλισμός του συστήματος. Συνεπώς, για το υπολογισμό της τιμής της παραμέτρου C_n^2 συναρτήσει του ύψους έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σε παγκόσμια κλίματα.

Το Hafnagel μοντέλο παρέχει μια καλή προσέγγιση για την παράμετρο C_n^2 , οποία δίνεται με της παρακάτω σχέσης [20]:

$$C_n^2(h) = 2.72 \cdot 10^{-16} \left\{ 3V^2 \left(\frac{h}{10} \right)^{10} \exp(-z) + \exp \left(-\frac{h}{1.5} \right) \right\} \left[(\text{m}^{-2/3}) \right] \quad (1.25)$$

όπου, V η ταχύτητα του ανέμου (m/s) και h το ύψος σε χιλιόμετρα.

Οι απώλειες από την ύπαρξη της τυρβώδους ροής, με βάση το Hafnagel μοντέλο, δίνονται από την ακόλουθη σχέση [20]:

$$a_{\text{scint}} = \sqrt{23.12 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} \cdot 2.72 \cdot 10^{-16} \left\{ 3V^2 \left(\frac{h}{10} \right)^{10} \exp(-z) + \exp \left(-\frac{h}{1.5} \right) \right\} L^{11/6}} \quad (1.26)$$

Ένα δεύτερο μοντέλο που έχει αναπτυχθεί αφορά κυρίως περιοχές που βρίσκονται πάνω από θάλασσα, καθώς εκεί παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια και γράφεται ως εξής [96]:

$$C_n^2(h) = 9.8583 \cdot 10^{-18} + 4.9877 \cdot 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{300}\right) + 2.9228 \cdot 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1200}\right) \left[(m^{-\frac{2}{3}}) \right] \quad (1.27)$$

όπου, h το ύψος σε μέτρα.

Συνεπώς, με βάση όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω το φαινόμενο του σπινθηρισμού ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για την υποβάθμιση της οπτικής ζεύξης καθώς προκαλεί μείωση της λαμβανόμενης ισχύος στην πλευρά του δέκτη. Για το λόγο αυτό, η ερευνητική κοινότητα προέβη στην ανάπτυξη διάφορων νέων τεχνικών για τη μείωση της επίδρασης του φαινομένου, δύο από τις οποίες είναι γνωστές ως σύμφωνη – ομόδυνη ανίχνευση (Coherent-based Homodyne detection) και διαμόρφωση διπλού ανακλαστήρα (Dual Diffuser Modulation - DDM).

Η σύμφωνη – ομόδυνη ανίχνευση είναι μια γνωστή και αποτελεσματική εναλλακτική μέθοδος που χρησιμοποιείται από τα FSO συστήματα για να περιορίσουν την επίδραση του σπινθηρισμού. Η ομόδυνη ανίχνευση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια κλασική τεχνική, όπου το λαμβανόμενο σήμα συνδυάζεται με ένα σήμα αναφοράς που παράγεται μέσω ενός τοπικού ταλαντωτή, που βρίσκεται στο δέκτη και χρησιμοποιεί ανιχνευτή τετραγωνικού νόμου. Η διαμόρφωση διπλού ανακλαστήρα είναι μια νέα τεχνική, που χρησιμοποιεί δύο πομπούς, οι οποίοι λειτουργούν συμπληρωματικά μεταξύ τους, δηλαδή όταν ο ένας εκ των δύο πομπών εκπέμπει το ψηφίο '1' τότε ο άλλος αντιστρέφει το ψηφίο σε '0' και το αποστέλλει ταυτόχρονα, αυξάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο τη λαμβανόμενη ισχύ και το επίπεδο του σήματος κατωφλίου στην πλευρά του δέκτη. Συγκριτικά, με τις συμβατικές τεχνικές IM/DD OOK (Intensity Modulation / Direct Detection On-Off Keying) με ή χωρίς diffuser η διαμόρφωση DDM έχει καλύτερα αποτελέσματα στον περιορισμό του σπινθηρισμού και μπορεί να βοηθήσει τα FSO συστήματα να λειτουργήσουν αποδοτικά υπό συνθήκες τυρβώδους ροής.

δ. Επίδραση μοριακής απορρόφησης (molecular absorption) και διάχυσης (scattering)

Είναι ευρέως γνωστό ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα όταν διαδίδονται στον κενό χώρο εξασθενούν λόγω των φαινομένων της απορρόφησης και της διάχυσης. Η απορρόφηση συμβαίνει όταν ένα ακτινοβολούμενο φωτόνιο

απορροφάτε από μόρια αέρα εντός της ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα να μετατραπεί το φωτόνιο είτε σε κινητική ενέργεια είτε να επανακτινοβολήσει την ενέργεια. Επίσης, είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι η ατμοσφαιρική απορρόφηση είναι ένα φαινόμενο που εξαρτάται από το μήκος κύματος και ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η πιο ισχυρή απορρόφηση λαμβάνει χώρα στα μήκη κύματος που αντιστοιχούν στην υπεριώδη φασματική περιοχή, ενώ ήπια απορρόφηση συμβαίνει στα μήκη κύματος του ορατού φωτός, ήτοι 400 nm έως 700 nm. Πέρα από αυτά, η διάχυση του φωτός είναι επίσης ένα φαινόμενο εξαρτώμενο από το μήκος κύματος. Τα σωματίδια, συμπεριλαμβανομένων των μορίων του αέρα, όταν έχουν διάσταση μικρότερη συγκριτικά με το μήκος κύματος υφίστανται διάχυση Rayleigh, της οποίας η χαρακτηριστική περιγράφεται από τη συμμετρική γωνιακή κατανομή.

Για τα μήκη κύματος που αντιστοιχούν στην υπεριώδη φασματική περιοχή και του ορατού φωτός η σκέδαση Rayleigh είναι μία αξιοσημείωτη παράμετρος εξασθένησης (μήκος κύματος > μέγεθος σωματιδίου). Από την άλλη πλευρά, για μήκη κύματος μεγαλύτερα των 3 μm η επίδραση είναι ασήμαντη. Όταν η σκέδαση προκαλείται από σωματίδια που είναι συγκρίσιμα με το μήκος κύματος τότε έχουμε τη σκέδαση Mie. Τέλος, όταν το μέγεθος των σωματιδίων είναι μεγαλύτερο από το μήκος κύματος η σκέδαση που λαμβάνει χώρα αποκαλείται μη επιλεκτική διάχυση και ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι μεγάλες σταγόνες βροχής.

Η μοριακή απορρόφηση και η σκέδαση είναι φαινόμενα που συχνά συνυπάρχουν και δρουν συνδυαστικά, οπότε η επίδραση τους υπό μορφή μιας εξίσωσης απωλειών μπορεί να εκφραστεί από την παρακάτω σχέση [20]:

$$\gamma(\lambda) = \gamma_a + \gamma_s \quad (1.28)$$

όπου, $\gamma(\lambda)$ ο συντελεστής απωλειών για δεδομένο μήκος κύματος, ενώ οι παράμετροι γ_a και γ_s περιγράφουν τα φαινόμενα της μοριακής απορρόφησης και της σκέδασης αντίστοιχα.

Η διαπερατότητα (transmittance) τ μιας δέσμης λέιζερ η οποία έχει διανύσει μία απόσταση L , θεωρώντας ένα συντελεστή απωλειών γ , περιγράφεται ως ακολούθως [20]:

$$\tau = \exp [-\gamma(\lambda)L] \quad (1.29)$$

οπού, το γινόμενο γL είναι γνωστό και ως οπτικό βάθος.

1.4 Προκλήσεις και κατευθύνσεις ανάπτυξης των οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου

Τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα B5G και 6G εκτιμάται ότι θα κληθούν να διαχειριστούν τεράστιο όγκο δεδομένων, που θα παράγεται από πληθώρα ετερογενών υπηρεσιών και εφαρμογών πολυμέσων, προσπαθώντας ταυτόχρονα να εξασφαλίσουν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Συνεπώς, η τεχνολογία FSO, που παρέχει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων το οποίο δεν χρειάζεται άδεια χρήσης, είναι μια εξαιρετικά ελκυστική και βιώσιμη λύση. Ως εκ τούτου, η τεχνολογία FSO μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά - συνδυαστικά με τα υφιστάμενα RF συστήματα, καθώς αναμένεται ότι αυτά δεν θα είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν στις πολύ υψηλές απαιτήσεις (ρυθμό μετάδοσης, καθυστέρηση, κ.λπ.), που έχουν τεθεί στις προδιαγραφές των σύγχρονων δικτύων.

Παρά τα πλεονεκτήματα των FSO συστημάτων, η αντιμετώπιση της συνεχώς αυξανόμενης ανάπτυξης των έξυπνων συσκευών, του cloud, των συσκευών του IoT/IoE (Internet of Things/ Internet of Everything), της τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) και άλλων συναφών τομέων, απαιτεί την ύπαρξη ενός ανθεκτικού δικτύου, η ανάπτυξη του οποίου είναι μια τεράστια πρόκληση για τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους. Στα επόμενα κεφάλαια θα συζητήσουμε εκτενώς την ενσωμάτωση των FSO συστημάτων στα σύγχρονα δίκτυα, αλλά αξίζει να σημειωθεί ότι η πλήρης αξιοποίησή τους δεν είναι ακόμα σε πολύ ώριμη φάση. Επομένως, υπάρχουν αρκετές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν πριν οδηγηθούμε στην πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων των FSO συστημάτων μερικές από τις οποίες θα αναφέρουμε στις επόμενες υποπαραγράφους.

1.4.1 Χρήση των FSO συστημάτων ως λύση στα δίκτυα B5G και 6G

Είναι προφανές ότι τα FSO συστήματα είναι η πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την υποστήριξη των κυψελωτών δικτύων της επόμενης γενιάς και την εξασφάλιση της μαζικής συνδεσιμότητας (τελικοί χρήστες, έξυπνες συσκευές, αισθητήρες κ.λπ.), που αναμένεται να υπάρξει λόγω του IoT/IoE. Συνεπώς, η εγκατάσταση πληθώρας πομπών (LDs) ενδέχεται να δημιουργήσει υψηλή διακυβελική παρεμβολή (Intercell Interference – ICI) μεταξύ γειτονικών κυψελών και είναι ένα ζήτημα που πρέπει να εξεταστεί λεπτομερώς κατά τη φάση της σχεδίασης της φυσικής τοπολογίας των δικτύων B5G και 6G. Επιπλέον, η μετάβαση σε νέες τεχνικές διαμόρφωσης για τους οπτικούς πομπούς, προκειμένου να ανταπεξέρχονται στις υψηλές απαιτήσεις, δεν θα πρέπει να αμελήσει την πιθανή εμφάνιση του φαινομένου του «αναβοσβήματος (flickering)», το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη απόδοση της οπτικής ζεύξης.

Επιπρόσθετα, η εμφάνιση του προβλήματος συμφόρησης του τελευταίου μιλίου (last mile bottleneck problem) είναι πολύ πιθανή αν τα FSO συστήματα αποτύχουν στη διεκπεραίωση του τεράστιου όγκου δεδομένων και την εξασφάλιση υψηλών προδιαγραφών και αξιόπιστων υπηρεσιών για τους τελικούς χρήστες. Συνεπώς, η βελτίωση της χωρητικότητας της οπισθόζευξης (backhaul) με χρήση FSO συστημάτων είναι μια τεράστια πρόκληση καθώς πέρα από την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος, θα κληθεί να αντιμετωπίσει και τις μεγάλες απαιτήσεις σε μαζική συνδεσιμότητα χρηστών το οποίο θα επιδεινώσει περαιτέρω τη συμφόρηση του δικτύου, μέσω της παραγωγής τεράστιου όγκου δεδομένων. Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, αξίζει να σημειωθεί ότι η αποτελεσματική λειτουργία διαφορετικών τεχνολογιών για την εξασφάλιση backhaul ζεύξεων, υψηλής χωρητικότητας, απαιτεί την ύπαρξη ακριβή συγχρονισμού μεταξύ των εμπλεκόμενων συστημάτων.

Επιπλέον, η χρήση της μηχανικής (Machine Learning – ML) και βαθιάς μάθησης (Deep Learning – DL) με έμφαση τον τομέα της δικτύωσης θα είναι ένα από τα κυρίαρχα χαρακτηριστικά των σύγχρονων κυψελωτών συστημάτων. Εισάγοντας τις παραπάνω τεχνικές μάθησης στα δίκτυα B5G και 6G αναμένεται ότι θα υπάρξει αποδοτική χρήση του δικτύου μοιράζοντας την παραγόμενη κίνηση με βέλτιστο τρόπο μεταξύ των διάφορων τεχνολογιών (RF, FSO, οπτική ίνα κ.λπ.). Επίσης, η μεγάλη ετερογένεια των δεδομένων, η ανάγκη για διαφορετικούς τρόπους διαχείρισής των και ο καθορισμός προτεραιοτήτων ανάλογα με τη φύση της υπηρεσίας, κάνει την ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης στα σύγχρονα δίκτυα επιτακτική ανάγκη, καθώς η επίβλεψη, η δυναμική προσαρμογή στις απαιτήσεις του δικτύου και έλεγχος ενός τέτοιου συστήματος γίνεται μια πολύπλοκη διαδικασία η οποία θα πρέπει να εκτελείται με το βέλτιστο τρόπο.

Τέλος, η ενσωμάτωση του IoT και IoE στα δίκτυα B5G και 6G απαιτεί τη συνεργασία και τη διαλειτουργικότητα διαφορετικών συστημάτων, προκειμένου να εξυπηρετήσουν την πληθώρα εφαρμογών και τις διαφορετικές τεχνολογίες διασύνδεσης (RFID, Wireless Sensor Networks -WSNs, Bluetooth, WiFi κ.λπ.) που υποστηρίζουν. Αρά, βλέποντας τις παραπάνω τεχνολογίες παρατηρούμε ότι το RF φάσμα είναι ήδη αρκετά κορεσμένο, όσον αφορά την υποστήριξη του IoT.

Συνεπώς, η ανάπτυξη και χρήση ενός ένα υβριδικού συστήματος (FSO και VLC) αποτελεί μια υποσχόμενη τεχνολογία, καθώς δεν θα παρεμβάλλεται με την υπάρχουσα RF και διαθέτει εύρος ζώνης υπερπολλαπλάσιο αυτής [35]. Σε αυτό το υβριδικό σύστημα, η τεχνολογία FSO θα είναι υπεύθυνη για την εξασφάλιση σύνδεσης υψηλής χωρητικότητας με τον κορμό του δικτύου και η VLC θα παρέχει το δίκτυο πρόσβασης στους τελικούς χρήστες, δίνοντας τη δυνατότητα για ανάπτυξη έξυπνων πόλεων (smart cities), έξυπνης

καταμέτρησης (smart metering), αυτόνομης οδήγησης και όλων των άλλων συναφών εφαρμογών.

1.4.2 THz και Κβαντικές επικοινωνίες

Η τεχνολογία FSO χρησιμοποιείται για να παράσχει συνδεσιμότητα, υψηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, κατά βάση σε ζεύξεις LOS οι οποίες είναι εγκατεστημένες σε εξωτερικό χώρο και η απαιτούμενη εμβέλεια είναι σχετικά μεγάλη. Παρόλα αυτά, η τεχνολογία FSO μερικές φορές μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράσχει επικοινωνιακή κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους, όπως για παράδειγμα σύνδεση συσκευών εντός ενός γραφείου, νοσοκομείου ή καταστήματος. Οι επικοινωνίες στη φασματική περιοχή των THz μπορούν να συμβάλουν στη μετάδοση δεδομένων για NLOS ζεύξεις, καθώς το μεταδιδόμενο σήμα υφίσταται ανακλάσεις όταν συναντήσει διάφορα αντικείμενα. Επιπλέον, τα THz ασύρματα συστήματα μπορούν να εξασφαλίσουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης σε ζεύξεις LOS και NLOS, οι οποίες λειτουργούν τόσο σε εξωτερικούς όσο και εξωτερικούς χώρους. Ως εκ τούτου, η αποτελεσματική σχεδίαση ενός NLOS FSO συστήματος είναι μια ακόμη πρόκληση, λαμβάνοντας υπόψη ότι απαιτεί λεπτομερή μελέτη της μη γραμμικής απόκρισης του διαύλου και των διαλείψεων λόγω σκίασης.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα της κβαντικής υπολογιστικής (quantum computing) αναμένεται ότι θα οδηγήσει στην ανάπτυξη ασφαλών και αξιόπιστων ζεύξεων, μεταξύ συσκευών που είναι εγκατεστημένες είτε στην ατμόσφαιρα είτε στο διάστημα. Συνεπώς, η ενσωμάτωση των κβαντικών επικοινωνιών στα FSO συστήματα είναι δεδομένο ότι θα εισάγει τις ασύρματες επικοινωνίες σε νέα εποχή.

1.4.3 Εισαγωγή αναμεταδοτών στα FSO δίκτυα

Η απόδοση των επίγειων FSO ζεύξεων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια στόχευσης, τις ατμοσφαιρικές απώλειες και την επίδραση της τυρβώδους ροής. Μια πιθανή λύση για την αντιμετώπιση της υποβάθμισης της απόδοσης της ζεύξης, λόγω των ανωτέρω περιορισμών, είναι η αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος, προκειμένου να αντισταθμιστούν οι επιπλέον απώλειες [36].

Ωστόσο, αυτό δεν είναι η ενδεδειγμένη πρακτική καθώς ενδέχεται να επηρεάσει δυσμενώς το επίπεδο των παρεμβολών και την ασφάλεια της ζεύξης. Συνεπώς, μια άλλη εναλλακτική είναι η εγκατάσταση αναμεταδοτών σε ενδιάμεσα σημεία, περιορίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο την επίδραση της τυρβώδους ροής, καθώς αποφεύγεται την απευθείας ζεύξη. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι μπορεί να είναι εγκατεστημένοι είτε σε σταθερές θέσεις είτε να βρίσκονται

σε μη επανδρωμένα αεροχήματα (Unmanned Aerial Vehicle – UAVs) ή drones. Με την δικτύωση πολλαπλών αλμάτων δίνεται η δυνατότητα να επεκταθεί η περιοχή κάλυψη και να αποκτήσει μεγαλύτερη ευελιξία η τοπολογία του δικτύου καθώς δεν εξαρτάται από την υπάρχουσα τοπολογία. Επίσης, η εισαγωγή της τεχνολογίας οπτικής αναμετάδοσης (all optical relay) είναι μια πρόκληση για τα οπτικά δίκτυα καθώς δεν θα απαιτείται η μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό και το αντίστροφο (Optical-Electrical-Optical – OEO) στους ενδιάμεσους κόμβους [37], μειώνοντας έτσι τις καθυστερήσεις κάτι το οποίο είναι εξαιρετικά σημαντικό για τα δίκτυα B5G και 6G, που θα κληθούν να προσφέρουν εγγυημένη καθυστέρηση μικρότερη του 1 ms. Αν και η ιδέα της χρήσης αναμεταδοτών είναι ήδη υλοποιημένη και χρησιμοποιείται ευρέως στα RF συστήματα, στα οπτικά συστήματα δεν είναι αρκετά ώριμη και χρήζει περεταίρω έρευνας και ανάπτυξης.

1.4.4 Πολυπλεξία μήκους κύματος στις FSO ζεύξεις

Η ενσωμάτωση της πολυπλεξίας μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM) στα FSO συστήματα παρέχει μία ακόμη διάσταση η οποία μπορεί να συμβάλλει στην αύξηση της χωρητικότητας των οπτικών ζεύξεων. Επίσης, με την εισαγωγή της τεχνικής dense WDM (DWDM), που είναι παραλλαγή της τεχνικής WDM, η βελτίωση που θα επέλθει θα είναι ακόμη μεγαλύτερη. Η ακαδημαϊκή κοινότητα έχει ήδη προβεί στην μελέτη των παραπάνω τεχνικών και πραγματοποιήσει δοκιμές αναπτύσσοντας FSO LOS ζεύξη που έχει επιτύχει ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 200 Gbps [38].

Από την άλλη πλευρά, η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης OCDMA (Optical Code Division Multiple Access – OCDMA) συγκεντρώνει επίσης μεγάλο ενδιαφέρον για τα μελλοντικά FSO δίκτυα, καθώς προορίζεται για να υποστηρίξει τις αυξανόμενες ανάγκες για την υπηρεσία FTTH (Fiber To The Home – FTTH), μέσω οπτικής πρόσβασης. Επιπλέον, υπάρχουν αρκετές δημοσιεύσεις οι οποίες έχουν επικεντρωθεί στην εξέταση των οπτικών δακτυλίων με χρήση των τεχνικών OCDMA – WDM στο πλαίσιο της ανάπτυξης των FSO επικοινωνιών, προκειμένου να αποφεύγονται τα σφάλματα σκόπευσης μέσω της διαφορικής λήψης και να επιτυγχάνεται αυξημένη χωρητικότητα και αποδοτικότητα του δικτύου. Η τεχνική πολλαπλών μηκών κύματος (Multiwavelength - MW) OCDMA είναι επίσης μια ελκυστική λύση για την αύξηση της χωρητικότητας, υπό την έννοια ότι μειώνει τις παρεμβολές λόγω πολλαπλής πρόσβασης και crosstalk, καθώς τα δεδομένα πολλών χρηστών πολυπλέκονται και διαδίδονται στο ίδιο κανάλι. Συνεπώς, μια λύση OCDMA – WDM θα συνδυάσει τα πλεονεκτήματα των δύο τεχνικών και θα οδηγήσει σε ένα σύστημα που θα υποστηρίξει τεράστιο αριθμό τελικών χρηστών πάνω από ένα συμβατικό WDM σχήμα και επιπλέον θα εισάγει τη δυνατότητα της δυναμικής προσθήκης

και αφαίρεσης σημάτων, που είναι πολύ σημαντική για τα δίκτυα πρόσβασης των επόμενων γενεών.

1.4.5 Χαρακτηρισμός καναλιού

Με την πάροδο των ετών, έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για να εκτιμήσουν την επίδραση των διαλείψεων και της τυρβώδους ροής σε μια FSO ζεύξη, ορισμένα από τα οποία είναι η λογαριθμοκανονική κατανομή (Lognormal Distribution), η λογαριθμοκανονική – Rician κατανομή (Lognormal - Rician Distribution) και η Gamma – Gamma κατανομή. Η απόδοση των FSO ζεύξεων επηρεάζεται σημαντικά από το φαινόμενο της τυρβώδους ροής, που προκαλεί την εμφάνιση της σκέδασης, του σπινθηρισμού, την απορρόφηση και τη διάθλαση. Επιπρόσθετα, τα καιρικά φαινόμενα όπως βροχή, καταιγίδα, ομίχλη και η σκόνη μπορούν να υποβαθμίσουν σημαντικά την απόδοση μιας οπτικής σύνδεσης, που λειτουργεί σε εξωτερικό χώρο. Επομένως, η ανάπτυξη στατιστικών μοντέλων που συνδυάζουν την επίδραση των ατμοσφαιρικών φαινομένων της τυρβώδους ροής, τη μεταβλητότητα του περιβάλλοντος διάδοσης και των σφαλμάτων σκόπτευσης είναι μια πολύ επίπονη διαδικασία και μέχρι στιγμής αποτελεί μια πρόκληση για την ερευνητική κοινότητα.

Η κατανομή ισχύος και η απόδοση της ζεύξης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις ατμοσφαιρικές απώλειες, συνεπώς εδώ υπάρχει ένα ανοιχτό ερευνητικό πεδίο για την εξεύρεση αποδοτικών τρόπων αντιστάθμισης των εξασθενίσεων, που λαμβάνουν χώρα εξαιτίας των παραπάνω φαινομένων. Επομένως, η ανάπτυξη ενός μεθοδολογικού μοντέλου υπολογισμού των απωλειών, που θα λαμβάνει υπόψη και θα συνδυάζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πομποδεκτών, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και τη μοντελοποίηση του καναλιού, εξακολουθεί να είναι ένα θέμα μελλοντικής έρευνας. Ωστόσο, η μοντελοποίηση οπτικού καναλιού με σκέδαση είναι πολύ πιο δύσκολη συγκριτικά με τις παραδοσιακές FSO ζεύξεις. Αυτό οφείλεται κυρίως στο μήκος της ζεύξης, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη εμβέλεια της ζεύξης τόσο αυξάνει και η πολυπλοκότητα της μοντελοποίησης των απωλειών και φαινομένων, που λαμβάνουν χώρα. Επομένως, η μοντελοποίηση του καναλιού και του συστήματος, για οπτικές επικοινωνίες υπό συνθήκες σκέδασης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, το οποίο γίνεται εντονότερο για τις εφαρμογές του IoT.

1.4.6 Στόχευση, Απόκτηση και Παρακολούθηση (Pointing, Acquisition, Tracking – PAT)

Εν γένει, μια FSO ζεύξη θα την χαρακτηρίζαμε ως μία ευρυζωνική και κατευθυντική σύνδεση σημείου προς σημείο, που χρησιμοποιείται για την

μεταφορά δεδομένα μεταξύ δύο κόμβων (αποστολής και λήψης). Η έννοια του PAT χρησιμοποιείται συνήθως για στατικά και κινητά συστήματα FSO, όπου οι πομποδέκτες εκπέμπουν πολύ στενές οπτικές δέσμες, δηλαδή το άνοιγμά τους είναι της τάξης των μrad [39]. Από την μια πλευρά, η επιλογή μιας τόσο στενής δέσμης συντελεί στην επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης, μεγάλη εμβέλεια ζεύξης, χαμηλό επίπεδο παρεμβολών και μικρή κατανάλωση ενέργειας. Από την άλλη πλευρά όμως, η ίδια ιδιότητα επιφέρει αρκετές δυσκολίες σε ότι αφορά την κατασκευή της FSO ζεύξης, καθώς ο οπτικός πομπός θα πρέπει να είναι τέλεια προσανατολισμένος με τον οπτικό δέκτη για να διατηρείται η σύνδεση μεταξύ τους. Επομένως, η υλοποίηση δυναμικού PAT είναι εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα, που για να επιτευχθεί χρειάζεται μια ολοκληρωμένη και ευέλικτη αρχιτεκτονική υλικού.

Ο μηχανισμός στόχευσης αφορά την ανταλλαγή σηματοδosis συντονισμού - συγχρονισμού μεταξύ των εμπλεκόμενων κόμβων, δηλαδή την εκτέλεση ενός αρχικού «χαιρετισμού» πριν την έναρξη της σύνδεσης. Ο μηχανισμός απόκτησης σχετίζεται με τις τεχνικές διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης. Στην πράξη, η περιοχή λήψης του οπτικού δέκτη είναι σχεδιασμένη για να μπορεί να λάβει πολλαπλές δέσμες και μέσα από διάφορες διεργασίες να αποφασίζει ποια θα αποκωδικοποιήσει κάθε φορά. Το άνοιγμα της περιοχής λήψης στο δέκτη εξαρτάται και προσαρμόζεται ανάλογα με τη στενότητα της οπτικής δέσμης και την απόσταση μεταξύ πομπού – δέκτη. Ο μηχανισμός παρακολούθησης, αφορά την εξασφάλιση όσο το δυνατόν καλύτερης ευθυγράμμισης μεταξύ πομπού – δέκτη, προκειμένου η ζεύξη να λειτουργεί αποδοτικά. Ο ακριβής μηχανισμός παρακολούθησης μπορεί να θεωρείται δεδομένος στην περίπτωση των σταθερών κόμβων, ωστόσο όταν οι κόμβοι γίνουν κινούμενοι η διαδικασία παρακολούθησης γίνεται αρκετά περίπλοκη και πιο δύσκολη.

Οι V2V, V2I και V2X είναι ένας τομέας επικοινωνιών που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα σύγχρονα δίκτυα και το βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι απαιτούν την ύπαρξη οπτικής επαφής. Οι οπτικές τεχνολογίες αναμένεται ότι στις εφαρμογές των έξυπνων πόλεων θα συνδυαστούν σε μεγάλο βαθμό με τον παραπάνω είδος επικοινωνιών (πχ διαχείριση κυκλοφοριακής κίνησης). Σε ένα τέτοιο σενάριο, με κινούμενους τελικούς χρήστες (άνθρωποι, οχήματα, drones κ.λπ.) εντός αστικού ιστού με πληθώρα εμποδίων και ψηλών κτιρίων, αντιλαμβανόμαστε ότι η ορθή υλοποίηση των διαδικασιών απόκτησης και παρακολούθησης αποτελεί μια τεράστια πρόκληση.

1.4.7 Δικτύωση στα FSO συστήματα

Τα βασικά χαρακτηριστικά των δικτύων B5G και 6G είναι ότι θα είναι πάρα πολύ πυκνά και θα εμφανίζουν μεγάλη ετερογένεια, στην προσπάθεια τους

να αυξήσουν τη χωρητικότητά τους. Το trade-off της πύκνωσης είναι η εκτέλεση συχνότερων διαπομπών (handovers) μεταξύ των οπτικών και RF δικτύων και σε ορισμένες περιπτώσεις αυτό θα γίνεται καταχρηστικά χωρίς να υπάρχει λόγος (πχ κινούμενος χρήστης στα όρια δύο κυψελών). Συνεπώς, ο περιορισμός των ανεπιθύμητων διαπομπών και του φαινομένου ring-ring είναι ζωτικής σημασίας, για την επίδοση του δικτύου.

Για να υποστηρίξουν τα σύγχρονα δίκτυα την κινητικότητα των χρηστών είναι σημαντικό να συμπεριλάβουν μηχανισμούς οριζόντιας και κάθετης διαπομπής. Για παράδειγμα, οι τελικοί χρήστες θα πρέπει να μπορούν να κινούνται απρόσκοπτα, εντός διαφορετικών LiFi κυψελών (οριζόντια διαπομπή) και μεταξύ διαφορετικών δικτύων LiFi και WiFi (κάθετη διαπομπή). Επομένως, κινητικότητα των χρηστών είναι μια ακόμη πρόκληση, καθώς επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την εκτίμηση του καναλιού και τους μηχανισμούς εκτέλεσης των διαπομπών.

Επιπρόσθετα, ο χρόνος εκτέλεσης της διαπομπής είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος και για να ικανοποιηθούν οι προδιαγραφές που έχουν τεθεί στα δίκτυα B5G και 6G πρέπει να είναι εξαιρετικά σύντομος. Ο χρόνος που χρειάζεται για να ανταλλαχθούν τα μηνύματα σηματοδότησης μεταξύ του τελικού χρήστη και του σταθμού βάσης εξαρτάται από τον τρόπο υλοποίησης των αλγορίθμων.

1.4.8 Δικτύωση βασισμένη στο λογισμικό (Software Defined Networking – SDN)

Η τεχνολογία SDN μπορεί να διαχειριστεί και ελέγξει αποδοτικά, τα υβριδικά οπτικά δίκτυα μέσω του SDN ελεγκτή που διαθέτει. Πολλές εφαρμογές των οπτικών επικοινωνιών εξαρτώνται από τη ζήτηση που υπάρχει στο δίκτυο και συγκεκριμένα στην κίνηση που προέρχεται από αναδρομολογήσεις ή έλεγχο συμφόρησης, η διαχείριση των οποίων ανήκει στο επίπεδο δεδομένων του SDN. Από την άλλη πλευρά, ο έλεγχος ροής, οι μηχανισμοί επιλογής του δικτύου και η διαχείριση της κινητικότητας ανήκουν στο επίπεδο ελέγχου του SDN. Συνεπώς, η τεχνολογία με κάποιο τρόπο θα πρέπει να ενσωματωθεί στο FSO σύστημα προκειμένου οι ανωτέρω λειτουργίες να εκτελούνται σε ένα κεντρικό σημείο που έχει την πλήρη γνώση του δικτύου και λαμβάνει βέλτιστες αποφάσεις τόσο για την επίδοση του δικτύου όσο και για τον τομέα της κατανάλωσης ενέργειας, που στα σύγχρονα δίκτυα αποτελεί μια σημαντική μετρική παράμετρο.

Κεφάλαιο 2°

Χρήση των FSO επικοινωνιών στα επίγεια (Terrestrial) B5G και 6G δίκτυα

2.1 Εισαγωγή στα δίκτυα B5G και 6G

Η γρήγορη ανάπτυξη των έξυπνων τεχνολογιών, οι οποίες εμφανίζονται συνεχώς στο προσκήνιο, καθώς και τα χαρακτηριστικά αυτών (πχ. υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, διαδραστικές υπηρεσίες κ.λπ.) συνέβαλαν σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση του όγκου των διακινούμενων δεδομένων, οδηγώντας στον κορεσμό τις υπάρχουσες υποδομές των ασύρματων δικτύων, οι οποίες δεν θα είναι σε θέση να τον υποστηρίξουν επαρκώς ακόμη και με την ενσωμάτωση των δικτύων 5G. Αυτό υποδηλώνει ότι τα υπάρχοντα κινητά δίκτυα δεν είναι ικανά να συμβαδίσουν πλήρως και αποτελεσματικά με τις τεχνολογικές εξελίξεις, που πρόκειται να επέλθουν στον τομέα των επικοινωνιών. Συνεπώς, έχει προωθηθεί η ανάπτυξη των δικτύων νέας γενιάς B5G και 6G, τα οποία θα πληρούν αυστηρές και απαιτητικές τεχνικές προδιαγραφές, όσον αφορά το φάσμα και την ενεργειακή απόδοσή τους.

Τα ασύρματα δίκτυα 6G αναμένεται ότι θα υποστηρίξουν ένα εξαιρετικά πυκνό δίκτυο, που θα περιλαμβάνει 500 δισεκατομμύρια συσκευές και η χωρητικότητά του μπορεί να είναι έως και 1000 φορές μεγαλύτερη από αυτή των 5G δικτύων. Επιπλέον, τα δίκτυα B5G και 6G πρόκειται να λειτουργούν σε υψηλότερο φάσμα συχνοτήτων, που σημαίνει μεγαλύτερο εύρος ζώνης και ακόμη υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, οι οποίες συγκριτικά με αυτές που επιτυγχάνουν τα δίκτυα 5G θα είναι από 100 έως 1000 φορές μεγαλύτερες. Πέραν των ανωτέρω, η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης διάδοσης, λόγω της μεγάλης πύκνωσης του δικτύου, είναι άλλη μία βασική παράμετρος, η οποία θα ανοίξει το δρόμο στην εμφάνιση απαιτητικών εφαρμογών όπως η μεμακρυσμένη ιατρική (εξέταση, εκτέλεση εγχείρησης κ.λπ.), η τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) και η εικονική πραγματικότητα (Virtual Reality – VR). Συγκεκριμένα, τα B5G και 6G θα προσφέρουν ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που θα κυμαίνονται από αρκετά Gbps και θα μπορούν να φτάσουν μερικά Tbps, χρησιμοποιώντας συνδυαστικά διάφορες ευρυζωνικές μπάντες συχνοτήτων, όπως η μπάντα 1 – 3 GHz, οι χιλιοστομετρικές συχνότητες [mmWave μπάντα (30 – 300 GHz)] και οι συχνότητες terahertz (THz) [Terahertz μπάντα (0.06 – 10 THz)] [40].

Λαμβάνοντας υπόψη την τάση υπήρχε στις προηγούμενες γενιές ασύρματων δικτύων, όσον αφορά τον τρόπο ανάπτυξης τους, η αρχική προσέγγιση των 6G θα βασίζεται στην τρέχουσα αρχιτεκτονική και τις δυνατότητες του 5G, όπως η χρήση όλο και υψηλότερων συχνοτήτων και η

αποκέντρωση του δικτύου. Παρόλο που τα δίκτυα 5G και 6G εκτιμάται ότι θα προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα σύγχρονα δίκτυα, υπάρχουν και ζητήματα (παρεμβολές, εμβέλεια κ.λπ.) τα οποία θα πρέπει να μελετηθούν, αναλυθούν και επιλυθούν πριν την προτυποποίηση του συστήματος.

Η μεγάλη εξέλιξη στα κινητά δίκτυα ξεκίνησε από την ανάπτυξη των δικτύων 4G, όπου οι χρήστες μπορούσαν να αποκτήσουν πρόσβαση στο δίκτυο οπουδήποτε και οπουδήποτε. Η τέταρτη γενιά των δικτύων είναι συνώνυμη με τον όρο «MAGIC», που αναφέρεται περιφραστικά «κινητά πολυμέσα (mobile multimedia), οπουδήποτε (anywhere), παγκόσμιες λύσεις κινητικότητας (global mobility solutions), μέσω ενσωματωμένων ασύρματων και εξατομικευμένων υπηρεσιών (over integrated wireless and customized services)» [41]. Εν τέλει στα 4G δίκτυα, οι τελικοί χρήστες απολαμβάνουν ομαλή πρόσβαση στο δίκτυο και IP μετάδοση από άκρο σε άκρο, πράγμα που οδήγησε σε υψηλά επίπεδα την ποιότητα παρεχόμενης υπηρεσίας (Quality of Service – QoS), την κινητικότητα (Mobility) και τους ρυθμούς μετάδοσης (της τάξης των 20 Mbps).

Η ευρεία εμπορική χρήση των δικτύων 5G ξεκίνησε το 2019, αφού πρώτα είχε ολοκληρωθεί πλήρως η προτυποποίησή του. Η εισαγωγή του 5G στα κινητά δίκτυα σηματοδότησε μια νέα ψηφιακή εποχή, που επέφερε πραγματική επανάσταση στα κυψελωτά συστήματα βελτιώνοντας σε μεγάλο βαθμό μετρικές του δικτύου, όπως ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, η καθυστέρηση, ο αριθμός συνδεδεμένων συσκευών και η δυνατότητα της κινητικότητας. Ειδικότερα, οι χρήστες των 5G είχαν τη δυνατότητα να απολαμβάνουν υπηρεσίες με υψηλές ταχύτητες μετάδοσης έως και 10 Gbps, εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση (της τάξης των 10 ms), μεγάλη αξιοπιστία και υψηλό QoS [42]. Τα βελτιωμένα αυτά χαρακτηριστικά κάνουν τα δίκτυα 5G να ξεχωρίζουν από τους προκάτοχούς τους στα ασύρματα συστήματα. Επιπρόσθετα, είναι η πρώτη τεχνολογία που εισάγει τη χρησιμοποίηση της χιλιοστομετρικής ζώνης συχνοτήτων, καθώς στις προηγούμενες γενιές ποτέ δεν είχε προταθεί η αξιοποίησή της. Πέραν των ανωτέρω, στα δίκτυα 5G, λόγω της αρχιτεκτονικής και της υποδομής του, βρίσκουν μεγαλύτερη εφαρμογή τεχνολογίες, όπως το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), οι επικοινωνίες συσκευής προς συσκευή (Device-to-Device – D2D), η δικτύωση μέσω λογισμικού (Software Define Networking – SDN) και η χρήση του mMIMO (massive Multiple Input Multiple Output - mMIMO).

Τα δίκτυα 5G συνέβαλλαν στην τεράστια ανάπτυξη των κινητών δικτύων δίνοντας τη δυνατότητα στους τελικούς χρήστες, χρησιμοποιώντας μία μόνο πλατφόρμα να έχουν πρόσβαση σε πληθώρα υπηρεσιών όπως προηγμένες ευρυζωνικές κινητές επικοινωνίες, αυτόνομη οδήγηση (Autonomous Driving), εικονική πραγματικότητα και IoT.

Το 2030 είναι μια χρονολογία σταθμός για τα δίκτυα 6G, καθώς τότε εκτιμάται ότι θα έχει ολοκληρωθεί η προτυποποίηση του και θα είναι δυνατή η εμπορευματοποίησή του, για ευρεία χρήση από το αγοραστικό κοινό. Ο οραματισμός για το 2030 είναι η ύπαρξη μια παγκόσμιας ψηφιακής κοινωνίας, η οποία θα οδηγείτε από τις προηγμένες και ταχύτατες επικοινωνιακές συνδέσεις [43]. Για αυτό, τα δίκτυα 6G αναμένεται να διαδραματίσουν τον κεντρικό ρόλο, καθώς θα ενσωματώνουν σε ένα σύστημα απρόσκοπτες ασύρματες συνδέσεις και πληθώρα τεχνολογικών λειτουργιών (αποθήκευση, υπολογισμοί, έλεγχος, πλοήγηση, εντοπισμός θέσης, συλλογή δεδομένων από αισθητήρες κ.λπ.), που βοηθούν στην ανάπτυξη κάθετων υπηρεσιών (verticals). Βασικά, το 6G θα μπορούσαμε να το παρομοιάσουμε με μια αυτόνομη οντότητα, η οποία μπορεί να μιμείται την ανθρώπινη νοημοσύνη και συνείδηση και να αλληλοεπιδρά με έξυπνα τερματικά, μέσω των κυμάτων του εγκεφάλου ή νευρικών σημάτων, των ματιών και της φωνής.

Συμπερασματικά, αν θεωρήσουμε δεδομένη τη χρήση πολύ υψηλότερου φάσματος συχνοτήτων συγκριτικά με τις προηγούμενες γενιές, η τεχνολογία 6G θα βελτιώσει δραματικά την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, αυξάνοντάς την από 100 έως 1000 σε σχέση τη 6G, προσφέροντας ταχύτητες της τάξης των Gbps έως και των Tbps. Επιπλέον, από πλευράς χωρητικότητας τα δίκτυα 6G στοχεύουν σε μια τεράστια αύξησή της έως και 1000 φορές σε σχέση με αυτή των δικτύων 5G. Για να καταλάβουμε τη διαφορά, αν το επίπεδο συνδεδεμένων αντικειμένων στην υπάρχουσα υποδομή είναι της τάξης των δισεκατομμυρίων, στα σύγχρονα δίκτυα το πλήθος των συνδεδεμένων συσκευών αναμένεται να ανέλθει στο επίπεδο του τρισεκατομμυρίου. Επίσης, από πλευράς καθυστέρησης τα δίκτυα 6G θα προσφέρουν εγγυημένη καθυστέρηση της τάξης των 10 έως 100 μs, το οποίο είναι μια μεγάλη εξέλιξη καθώς στις προηγούμενες γενιές των δικτύων κινητών επικοινωνιών οι προδιαγραφές που τίθεντο εξαρτιόταν από τους χρόνους αντίδρασης του ανθρώπινου οργανισμού, όπως ο χρόνος οπτικής αντίδρασης (~ 10 ms), ο χρόνος ακουστικής αντίδρασης (~ 100 ms) και ο χρόνος αντίδρασης της αντίληψης (~ 1 ms) [44].

Η έκτη γενιά των δικτύων πρόκειται να αλλάξει σημαντικά την εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών καθώς έως ένα βαθμό θα τα μετατρέψει από διασύνδεση αντικειμένων σε συνδέσεις ευφυών οντοτήτων. Συνεπώς, η υποστήριξη και η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στα δίκτυα 6G είναι ζωτικής σημασίας τόσο στον κορμό του δικτύου όσο και στις συσκευές των τελικών χρηστών, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η σχεδίαση, η λειτουργία και δυναμική προσαρμογή στις απαιτήσεις του δικτύου.

2.2 Χρήσεις και εφαρμογές των δικτύων B5G και 6G

Σε αυτή την υποπαράγραφο θα παραθέσουμε εν συντομία μερικές πιθανές χρήσεις και εφαρμογές των συστημάτων B5G και 6G για τη βιομηχανία και τους τελικούς χρήστες. Τα δίκτυα 5G στη παρούσα φάση χρησιμοποιούνται εστιάζοντας κυρίως στην παροχή ευρυζωνικότητας, ενώ άλλες πτυχές, όπως η χαμηλή καθυστέρηση, η υψηλή αξιοπιστία, η αυτόνομη οδήγηση, η μεμακρυσμένη ιατρική, που είχαν τεθεί αρχικά ως στόχοι δεν έχουν ωριμάσει αρκετά και εκτιμάται ότι θα έχουν ευρεία εφαρμογή στα δίκτυα B5G και 6G. Η τεχνολογία των δικτύων εξελίσσεται σε μία ευέλικτη υποδομή που έχει την τάση να αλλάζει, έτσι και τα δίκτυα 6G, όπως ακριβώς συνέβη και στις προηγούμενες γενιές δικτύων, αναμένεται ότι θα επηρεαστούν από τις αναδυόμενες τεχνολογίες της σημερινής εποχής. Είναι βέβαιο ότι τα δίκτυα 6G θα ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις πολλών μελλοντικών τεχνολογικών τάσεων, όπως τα εργοστάσια του μέλλοντος, η αυτόνομη κινητικότητα και ο «μηδενικός» κόσμος (zero world), που αναλύεται σε μηδενική κατανάλωση ενέργειας (zero energy), μηδενική επέμβαση του ανθρώπου (zero touch) και επίτευξη μηδενικών σφαλμάτων (zero error).

Μέχρι στιγμής, τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα μετέδιδαν δεδομένα, τα οποία αλληλοεπιδρούσαν με δύο από τις ανθρώπινες αισθήσεις, ήτοι όραση (εικόνα, βίντεο) και ακοή (ήχος). Όμως, ένας από τους βασικούς στόχους των δικτύων B5G και 6G είναι να μεταδίδουν δεδομένα, που θα διεγείρουν και θα σχετίζονται και με άλλες ανθρώπινες αισθήσεις, όπως η αφή, η όσφρηση και η γεύση. Αυτές οι πρόσθετες αισθητήριες μεταδόσεις αναφέρονται στην τέταρτη διάσταση (Fourth Dimension – 4D), η οποία θα επιτρέψει στα συστήματα επικοινωνιών να μεταφέρουν και άλλες αισθητήριες πληροφορίες όπως ο αέρας, ο θόρυβος και η ρύπανση της ατμόσφαιρας. Με αυτήν την προοπτική, τα δίκτυα 6G μπορούν να χαρακτηριστούν ως η ενοποίηση των επικοινωνιών και των αισθήσεων, που θα οδηγήσει στην ανάπτυξη πιο έξυπνων, σχετικών και εξατομικευμένων υπηρεσιών, ενσωματώνοντας αποτελεσματικά τον πραγματικό και τον εικονικό κόσμο μαζί στο ίδιο σύστημα.

Τα δίκτυα B5G και 6G θα χρησιμοποιήσουν την τεχνολογία των κινητών επικοινωνιών για να παράσχουν την τεχνητή νοημοσύνη σε όλους, οπουδήποτε και οποτεδήποτε, εκμεταλλευόμενη το ασύρματη υποδομή και καθιστώντας την ως ένα δίκτυο αισθητήρων. Επομένως, ενσωματώνοντας στις κλασικές επικοινωνίες την έννοια της αίσθησης και της νοημοσύνης, τα B5G και 6G θα αποτελέσουν ένα ευφυές δίκτυο, που ανοίξει το δρόμο και θα ξεκλειδώσει αρκετές νέες βιομηχανικές εφαρμογές, όπως η έξυπνη ανάλυση βίντεο, τα ευφυή συστήματα επεξεργασίας πραγματικού χρόνου και έξυπνες υπηρεσίες ανάλογα με το συμβόλαιο του πελάτη.

Ευθύς αμέσως, παρατίθενται συνοπτικά μερικές από τις πιθανές εφαρμογές των συστημάτων B5G και 6G:

- **Μεταφορές:** Η χρήση αυτόνομων οχημάτων τα οποία θα αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον (φωτεινοί σηματοδότες, οχήματα, αισθητήρες κ.λπ.) και θα συνεργάζονται για την επίτευξη αποτελεσματικής οδήγησης είτε μεμονωμένα είτε ως κομβίοι.

- **Λιανικό Εμπόριο:** Μπορεί να δώσει μια τεράστια ώθηση στις συναλλαγές, οι οποίες θα πραγματοποιούνται σε σχεδόν πραγματικό χρόνο και χωρίς την απαίτηση φυσικής παρουσίας. Επιπλέον, αν στην εξίσωση βάλουμε τις βελτιώσεις, που μπορεί να επέλθουν στην μεταφορά και γενικότερα την εφοδιαστική αλυσίδα τα οφέλη είναι ακόμη μεγαλύτερα.

- **Κατασκευές:** Υιοθέτηση αυτόνομων γραμμών παραγωγής, οι οποίες δυναμικά θα αναδιαμορφώνονται και θα προσαρμόζονται στην υπάρχουσα ζήτηση, εξασφαλίζοντας μακροπρόθεσμα οικονομίες κλίμακος.

- **Υγεία:** Θα δοθεί πλέον η δυνατότητα για μία άλλη μορφή φροντίδας του ασθενούς, όπως η απομακρυσμένη ιατρική εξέταση και διενέργεια χειρουργικών διαδικασιών ελεγχόμενες από ανθρώπους ή ρομποτικά μηχανήματα. Για όλα αυτά, κριτικής σημασίας είναι η εκμηδένιση σχεδόν της καθυστέρησης, γιατί αντιλαμβανόμαστε ότι η ακρίβεια και ο χρόνος απόκρισης είναι ζωτικής σημασίας για τις εν λόγω εφαρμογές.

- **Βιομηχανία και δημόσια ευρεία χρήση:** Η μαζική ενσωμάτωση της ευφυΐας στο δίκτυο και η δυνατότητα ανάπτυξης δικτύων αισθητήρων με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, μπορούν να συμβάλλουν στη βελτίωση τομέων, όπως η εφοδιαστική αλυσίδα, το κυκλοφοριακό ζήτημα και το περιβάλλον.

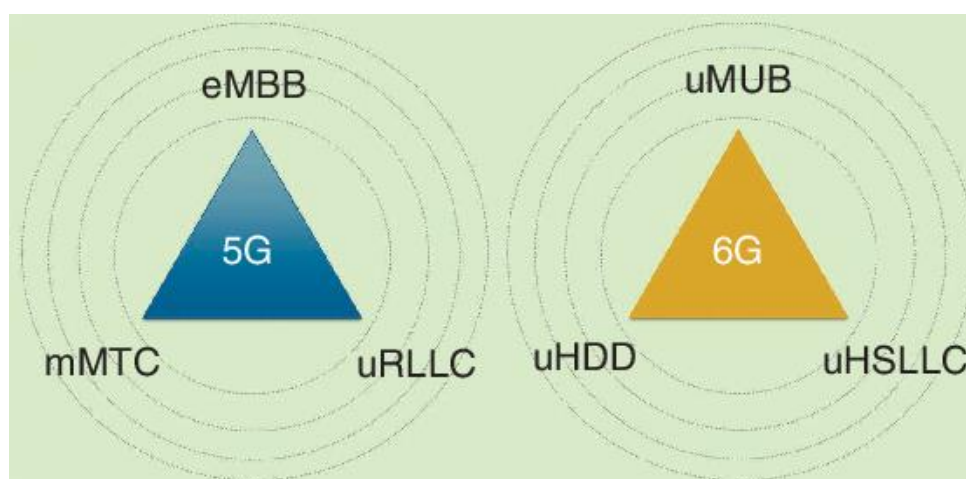
- **Αυτοματοποίηση:** Η είσοδος της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης στα συστήματα ανοίγει ένα τεράστιο πεδίο ανάπτυξης, που αφορά τη συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων, με σκοπό τη βελτιστοποίηση διαδικασιών (πχ βέλτιστη δρομολόγηση, βέλτιστη δρομολόγιο διανομής κ.λπ.).

- **Gaming:** Δίνεται η δυνατότητα στον τελικό χρήστη να απολαμβάνει υψηλού επιπέδου εμπειρία χωρίς να απαιτείται να κατεβάσει το παιχνίδι, άλλα με ενεργοποίηση μιας συνδρομής μπορεί να έχει πρόσβαση στους απαιτούμενους υπολογιστικούς πόρους διαθέτοντας απλά μια αξιόπιστη

και μεγάλης χωρητικότητας σύνδεση, κάτι το οποίο εκλαμβάνεται ως δεδομένο στα σύγχρονα συστήματα.

- Εκτεταμένη πραγματικότητα (Extended Reality – XR): Είναι ο συνδυασμός της εικονικής πραγματικότητας (VR), της επαυξημένης πραγματικότητας (AR) και της μεικτής πραγματικότητας (MR), με σκοπό να χρησιμοποιηθεί στην ψυχαγωγία, την ιατρική, την επιστήμη και την εκπαίδευση.

Στα δίκτυα B5G και 6G οι απαιτήσεις για αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης (Ultra – Reliable Low Latency Communications – uRLLC), βελτιωμένης ευρυζωνικότητας (enhanced Mobile Broadband Communications – eMBB) και μαζικών επικοινωνιών μεταξύ μηχανών (massive Machine – Type Communication – mMTC), που είχαν τεθεί στα δίκτυα 5G, επεκτείνονται σε τρεις επιπλέον διαστάσεις, οι οποίες είναι οι πανταχού παρούσες ευρυζωνικές (ubiquitous Mobile Ultra - Broadband – uMUB), πάρα πολύ πυκνές (ultra High Data Density – uHDD) και πάρα πολύ γρήγορες και χαμηλής καθυστέρησης (ultra High Speed with Low Latency – uHSLLC) επικοινωνίες. Με το uMUB στα συστήματα 6G εννοούμε την επικοινωνιακή υποστήριξη, με οποιαδήποτε επιθυμητή απόδοση από τον πελάτη, για επίγειες, θαλάσσιες, εναέριες και διαστημικές επικοινωνίες [46]. Επιπλέον, καθίσταται σαφές ότι για την επίτευξη των παραπάνω στόχων και την υποστήριξη των εν λόγω εφαρμογών – υπηρεσιών απαιτείται λεπτομερής σχεδιασμός και συνδυασμός των δυνατοτήτων του δικτύου και των απαιτούμενων υπολογιστικών πόρων.



Εικόνα 2.1: Σύγκριση των βασικών παραμέτρων μεταξύ 5G και 6G [46]

2.3 Περιγραφή των απαιτήσεων - δυνατοτήτων των σύγχρονων δικτύων B5G και 6G

Σε αυτήν την υποπαράγραφο θα αναλύσουμε τους κύριους δείκτες αποδοτικότητας (Key Performance Indicators – KPIs), που έχουν τεθεί ως

ελάχιστες απαιτήσεις για να μπορέσουν να ικανοποιηθούν επαρκώς και ποιοτικά οι εφαρμογές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα βασικά KPIs των δικτύων 5G και 6G με τα οποία θα ασχοληθούμε είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης, οι απαιτήσεις κινητικότητας, το πλήθος διασυνδεδεμένων συσκευών (συσκευές/km²), η χωρητικότητα κίνησης περιοχής, η καθυστέρηση, η αξιοπιστία, η φασματική και ενεργειακή απόδοση.

2.3.1 Ρυθμός μετάδοσης

Αν παρακολουθήσουμε διαχρονικά τις τηλεπικοινωνίες θα καταγράψουμε ότι οι απαιτήσεις των τελικών χρηστών όσον αφορά τον ρυθμό μετάδοσης είναι διαρκώς αυξανόμενες. Οι ρυθμοί μετάδοσης στα συστήματα 1G ήταν μερικά kbps και φτάσαμε στο 5G να μιλάμε για ρυθμούς της τάξης των Gbps. Επιβεβαιώνοντας τον κανόνα η απαίτηση για τα 6G συστήματα είναι να επιτευχθούν ρυθμοί μετάδοσης 10 έως 100 φορές μεγαλύτεροι σε σχέση με τα 5G, θέτοντας ως ένα μέγιστο στόχο τα μερικά Tbps. Η προϋπόθεση για να συμβεί όμως αυτό είναι η εξεύρεση εύρους ζώνης, το οποίο με επιλύεται με τη λειτουργία του 6G σε πολύ υψηλές συχνότητες (THz, VLC, FSO κ.λπ.). Η προσδοκία είναι ο ρυθμός μετάδοσης να φτάσει τα 10 Gbps σε μεμονωμένους χρήστες και έως 100 Gbps σε ειδικές χρήσεις των δικτύων [47].

2.3.2 Φασματική απόδοση (Spectral Efficiency)

Για να ενισχύσει την φασματική απόδοση των ασύρματων επικοινωνιών το 6G θα χρησιμοποιήσει έξυπνους τρόπους για να παράσχει στο σύστημα έναν επιπλέον βαθμό ελευθερίας. Για παράδειγμα μέσω της χρήσης των έξυπνων ανακλαστικών επιφανειών (Intelligent Reflective Surfaces – IRS), οι οποίες θα είναι εγκατεστημένες σε προσόψεις κτιρίων και θα μπορούν να λαμβάνουν σήματα και να εξυπηρετούν χρήστες που προηγουμένως δεν ικανοποιούνταν, βελτιώνοντας ταυτόχρονα τη φασματική και ενεργειακή απόδοση [48]. Επιπλέον, η χρήση των ροών, δηλαδή διαφορετικών μεταδόσεων μέσω του ίδιου χωρικού καναλιού μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη φασματική απόδοση του συστήματος. Από την υπάρχουσα βιβλιογραφία, η απαίτηση ξεκινά από τα 100 bps/Hz και ανάλογα τις τεχνολογίες που θα ενσωματωθούν γίνεται ακόμη μεγαλύτερη.

2.3.3 Καθυστέρηση (Latency)

Με τον όρο χαμηλή καθυστέρηση θέλουμε να δηλώσουμε ότι η επικοινωνία είναι γρήγορη και άμεση. Στην πραγματικότητα θέλουμε τα πακέτα να μεταδίδονται γρήγορα, σχεδόν ακαριαία, και να μην υφίστανται πολύπλοκη επεξεργασία που εισάγει πρόσθετη καθυστέρηση. Η προδιαγραφή που τίθεται ως κατώτατο επιτρεπόμενο όριο στα δίκτυα 6G είναι τα 10 μs. Συναφώς, με τις

εφαρμογές που έχουμε αναφέρει, όπως έξυπνες πόλεις, σπίτια, συσκευές, αυτόνομα οχήματα και υγεία, η έννοια της καθυστέρησης συνδυάζεται σε μεγάλο βαθμό και με την αξιοπιστία. Για παράδειγμα, η σύνδεση ενός ιατρού που εκτελεί μια εξέταση ή επέμβαση από μακριά δεν αρκεί μόνο να έχει πολύ μικρή εγγυημένη καθυστέρηση αλλά θα πρέπει να είναι και εξαιρετικά αξιόπιστη έχοντας διαθεσιμότητα της τάξης του 99.999999% [49], διότι μία διακοπή της μπορεί να αποβεί μοιραία για τον ασθενή. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για την αυτόνομη οδήγηση.

2.3.4 Κινητικότητα

Τα δίκτυα 6G, όπως έχουμε αναφέρει, θα χαρακτηρίζονται από μεγάλη ετερογένεια από πλευράς τελικών χρηστών (έξυπνα τηλέφωνα, Η/Υ, αισθητήρες κ.λπ.) και των ζεύξεων (sub 6 GHz, mmWave, THz, VLC κ.λπ.), που θα χρησιμοποιούν για την απόκτηση επικοινωνίας. Ωστόσο, αυτό που πραγματικά θέλει ο τελικός χρήστης είναι να αποκτήσει πρόσβαση στο δίκτυο, αν μιλάμε για κυψελωτό σύστημα, και εν συνεχεία να του εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη και ποιοτική συνδεσιμότητα, καθώς κινείται και εναλλάσσεται μεταξύ των κυψελών και των διαφορετικών τεχνολογιών, χωρίς να το αντιλαμβάνεται και χωρίς να απαιτείται κάποιος χειρισμός από τον ίδιο. Η προδιαγραφή που τίθεται για το 6G είναι η υποστήριξη χρηστών, που θα μπορούν να κινούνται με ταχύτητα έως 1000 km/h [49].

2.3.5 Πλήθος διασυνδεδεμένων συσκευών

Η μαζική συνδεσιμότητα μεταξύ μηχανών - συσκευών (mMTC) είναι ένα σενάριο χρήσης, που απασχολεί σε μεγάλο βαθμό τα σύγχρονα δίκτυα. Σε αυτού του είδους την επικοινωνία οι κλήσεις, τα μηνύματα και οι εντολές μεταβιβάζονται από μηχανή σε μηχανή, χωρίς να απαιτείται η επέμβαση του ανθρώπου. Εκτιμάται ότι τα σύγχρονα συστήματα κινητών επικοινωνιών θα είναι σε θέση να υποστηρίξουν 10^7 συσκευές/km² [50].

2.3.6 Χωρητικότητα κίνησης περιοχής (Area traffic capacity)

Ο διαρκώς αυξανόμενος αριθμός του πλήθους συσκευών/km², που θα κληθούν να εξυπηρετήσουν τα δίκτυα νέας γενιάς, κάνει επιτακτική ανάγκη την ύπαρξη backhaul ζεύξεων υψηλής χωρητικότητας. Για να υποστηριχθούν και να διατηρηθεί η ποιότητα υπηρεσίας των mMTC επικοινωνιών και του IoT/loE, απαιτείται η υλοποίηση αξιόπιστων ζεύξεων με μικρή καθυστέρηση και μεγάλη χωρητικότητα, καθώς ο όγκος των δεδομένων που θα παράγεται από αυτή την πληθωρα των συσκευών και των αισθητήρων θα είναι τεράστιος. Για τους παραπάνω λόγους το ελάχιστο όριο για την χωρητικότητα κίνησης περιοχής είναι 1000 Mbps/m² [51].

2.3.7 Ενεργειακή απόδοση

Τα δίκτυα 6G θα χρειαστεί να ικανοποιήσουν πολλές απαιτήσεις και να υπερκεράσουν διάφορες προκλήσεις, μία εξ αυτών είναι και η εξασφάλιση υψηλής ενεργειακής απόδοσης, κυρίως όσον αφορά την ευρεία χρήση του IoT/IoE και των δικτύων αισθητήρων. Επομένως, η μικρή κατανάλωση ενέργειας και η μεγάλη διάρκεια ζωής των μπαταριών (από πλευρά φόρτισης) είναι δύο βασικά πεδία ερευνάς για το 6G, καθώς αντιμετωπίζουν τις προκλήσεις που αφορούν τη δυσκολία φόρτισης των αισθητήρων και την αύξηση του χρόνου ζωής των, καθώς η φιλοσοφία πίσω από τα δίκτυα αισθητήρων είναι ότι θα διασπείρονται σε διάφορα μέρη (χωράφια, δάση κ.λπ.) χωρίς δυνατότητες φόρτισης και κατά συνέπεια η διάρκεια ζωής του δικτύου θα όση η διάρκεια της φορτισμένης μπαταρίας. Ως εκ τούτου, πρέπει να υπάρξει ένας λεπτομερής σχεδιασμός προκειμένου αυτά τα δίκτυα να γίνουν βιώσιμα και αποδοτικά. Για το λόγο αυτό, η κατεύθυνση που έχει τεθεί για τα συστήματα 6G είναι να επιτύχουν επικοινωνίες που δεν χρειάζονται μπαταρίες οπουδήποτε και οποτεδήποτε, θέτοντας ως στόχο την επίτευξη ενεργειακής απόδοσης 1 pJ/bit [52].

Για να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος, αρχικά οι αισθητήρες και γενικά οι συσκευές που περιορίζονται από τη μπαταρία θα πρέπει να λειτουργούν αποδοτικά, δηλαδή θα πρέπει να είναι συνεχώς σε κατάσταση ύπνου (sleep mode) και θα ενεργοποιούνται περιοδικά μέσα στην ημέρα για να αποστέλλουν τα δεδομένα στο σημείο συλλογής. Επίσης, η εκτέλεση απαιτητικών διεργασιών από πλευράς υπολογιστικών πόρων, απαιτεί την κατανάλωση σημαντικής ποσότητας ενέργειας, συνεπώς θα πρέπει να εξεταστεί η δυνατότητα μεταφορά τους στα σημεία πρόσβασης του δικτύου (Radio Access Network – RAN) και ειδικότερα στους σταθμούς βάσης, όπου υπάρχει υποδομή για ηλεκτρικό ρεύμα. Τέλος, μια πολύ ελπιδοφόρα λύση στο παραπάνω πρόβλημα, εάν είναι δυνατό να επιτευχθεί, θα ήταν η ασύρματη φόρτισης μεγάλης κλίμακας.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα KPIs των δικτύων 6G, όπως προτείνονται στην βιβλιογραφία.

KPI	[53]	[54]	[49]	[55]
Ρυθμός μετάδοσης	100Gbps-1Tbps	1Tbps	1Tbps	10-100Gbps
Καθυστέρηση	0.1 ms	1 ms	0.1 ms	0.1 ms
Χωρητικότητα κίνησης περιοχής	100-10000 Tbps/m ²	-	-	0.1-10 Gbps/ km ³
Πλήθος διασυνδεδεμένων συσκευών	0.1 billion connections /km ²	-	0.01 billion connections /km ²	0.01 - 0.1 billion connections /km ³

Κινητικότητα	>1000 km/h	1000 km/h	1000 km/h	>1000 km/h
Αξιοπιστία	> 99.99999	-	> 99.99999	> 99.99999
Φασματική απόδοση	200-300 bps/Hz	100 bps/Hz	-	-

Πίνακας 2 Σύνοψη των KPIs του 6G [56]

2.4 Αξιοποίηση - ενσωμάτωση των οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου στα δίκτυα B5G και 6G

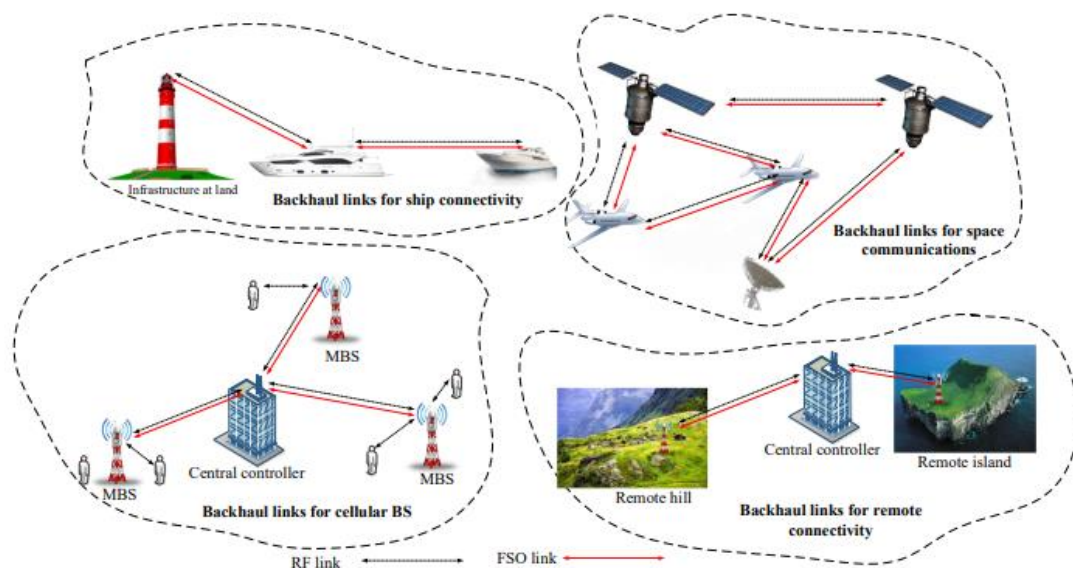
2.4.1 Εφαρμογές χρήσης των οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου

Τα συστήματα FSO μπορούν να υποκαταστήσουν ένα εύρος τεχνολογιών, όπως για παράδειγμα οι ασύρματες RF και ενσύρματες ζεύξεις, που χρησιμοποιούνται στα κινητά συστήματα, για να παράσχουν αξιόπιστη και ποιοτική επικοινωνιακή κάλυψη. Χαρακτηριστικά παραδείγματα χρήσης των εν λόγω τεχνολογιών είναι για υλοποίηση ζεύξεων fronthaul, backhaul, μεταξύ κτιρίων (inter building communications), οχημάτων και δορυφόρων (inter satellite link) [57].

α. Backhaul δίκτυο μεγάλης χωρητικότητας: Το δίκτυο backhaul είναι οι ζεύξεις, που χρησιμοποιούνται για να συνδεθεί το δίκτυο πρόσβασης (Access Network – AN) με το δίκτυο κορμού (Core Network – CN). Στην παρούσα φάση το backhaul δίκτυο υλοποιείται με χρήση οπτικών ινών, μικροκυμματικών συστημάτων P2P και πιο σπάνια μέσω δορυφορικών ζεύξεων. Η ύπαρξη ενός backhaul δικτύου, μεγάλης χωρητικότητας, είναι ζωτικής σημασίας για την απόδοση των δικτύων B5G και 6G, καθώς μέσω αυτού αντικατοπτρίζεται η ικανότητα τους να διακινήσουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων από το δίκτυο πρόσβασης στο δίκτυο κορμού.

Για το λόγο αυτό, ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα που δεν διαθέτει backhaul δίκτυο, μεγάλης χωρητικότητας, θεωρείται έλλειπες ακόμη και αν οι ταχύτητες που υποστηρίζει το δίκτυο πρόσβασης για τους τελικούς χρήστες είναι της τάξης των Gbps. Αντιλαμβανόμαστε πολύ εύκολα ότι ένα backhaul δίκτυο, μικρής χωρητικότητας, θα οδηγή στην εμφάνιση σημείων στένωσης (bottleneck effect), με πολύ αρνητικές επιδράσεις στην απόδοση του δικτύου. Συνεπώς, η χρήση των οπτικών συστημάτων FSO είναι μια αποδοτική λύση στο παραπάνω πρόβλημα, λαμβάνοντας υπόψη ότι, ελλείψει υποδομής δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την οπτική ίνα. Επιπλέον, όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενη ενότητα τα συστήματα FSO είναι εξαιρετική επιλογή για την υλοποίηση backhaul ζεύξεων, μεγάλης χωρητικότητας και απόστασης, που θα λειτουργούν σε εξωτερικούς χώρους.

Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως καθώς μέχρι στιγμής είναι το σύστημα που επιτυγχάνει την υψηλότερη διεκπεραιωτική ικανότητα, μεταξύ των υπάρχουσών τεχνολογιών. Ωστόσο, τα συστήματα FSO θα έχουν διεκπεραιωτική ικανότητα εφάμιλλη με αυτή των οπτικών ινών με πολύ μικρότερο κόστος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα συστήματα οπτικών ινών και FSO χρησιμοποιούν παρόμοιους πομποδέκτες και ως εκ τούτου είναι πολύ πιθανό μελλοντικά και καθώς ωριμάζει η τεχνολογία των FSO να είναι σε θέση να συναγωνιστούν πλήρως τις επιδόσεις των οπτικών ινών. Στην παρακάτω φωτογραφία απεικονίζονται μερικές εφαρμογές backhaul ζεύξεων για τα δίκτυα B5G και 6G.



Εικόνα 2.2: Παραδείγματα Backhaul ζεύξεων [58]

Τεχνολογία	Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης	Καθυστέρηση
Οπτική ίνα	100 Gbps	<1 ms
Μικροκυμματικές ζεύξεις	1 Gbps	<1 ms /hop
mmWave	10 Gbps	<1 ms
FSO	40 Gbps	<1 ms
Δορυφορική Ζεύξη	50 Mbps	250 – 300 ms

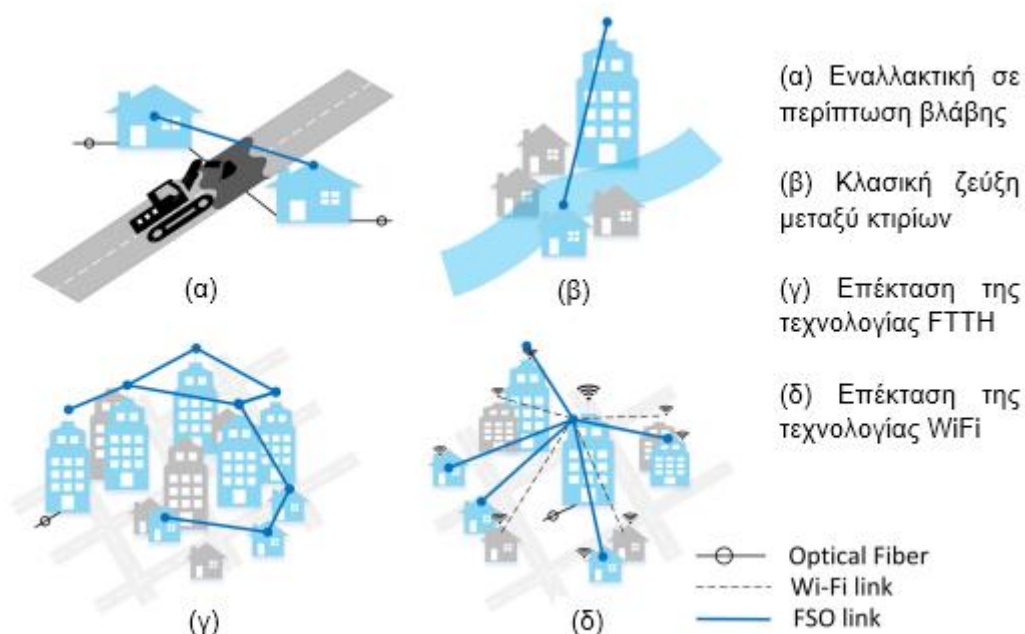
Πίνακας 3 Συγκριτικός πίνακας με τους ρυθμούς μετάδοσης και τη καθυστέρηση διαφόρων Backhaul τεχνολογιών [59]

β. Ζεύξεις μεταξύ κτιρίων (Inter building communications): Οι ζεύξεις μεταξύ κτιρίων είναι μια λύση στην πρόκληση, που συχνά αναφέρεται ως «πρόσβαση τελευταίου μιλίου (last mile access)». Λαμβάνοντας υπόψη ότι, τα δίκτυα οπτικών ινών πλησιάζουν πλέον όσο το δυνατόν περισσότερο τους τελικούς χρήστες, το σημείο συμφόρησης μεταφέρεται στο τελευταίο μίλι των δικτύων. Συνεπώς, ενώ τα οπτικά δίκτυα έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν

υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (της τάξης των Gbps) περιορίζονται από την επίδοσή της RF τεχνολογίας, όπου λόγο του περιορισμένου εύρους ζώνης δεν μπορεί να υποστηρίξει τόσο υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Επομένως, ένα υβριδικό σύστημα FSO ίσως είναι μια καλή επιλογή για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος καθώς μπορεί να προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των Gbps στους τελικούς χρήστες. Επιπλέον, τα FSO συστήματα μπορούν να αποτελέσουν μια εναλλακτική προσέγγιση για την τεχνολογία FTTH (Fiber To The Home), διασυνδέοντας εύκολα και γρήγορα κτίρια μεταξύ τους.

Επιπρόσθετα, μια άλλη προσέγγιση για τις ζεύξεις μεταξύ κτιρίων είναι η παροχή ευρυζωνικών συνδέσεων σε όλες τις εγκαταστάσεις ενός φορέα (πανεπιστήμια, εργοστάσια κ.λπ.) χωρίς να απαιτείται η εγκατάσταση οπτικών ινών. Έτσι, τοποθετώντας FSO συστήματα στις οροφές των κτιρίων μπορούμε να δημιουργήσουμε οπτικές ζεύξεις σημείου προς σημείο, μικρής απόστασης και μεγάλης χωρητικότητας.

Τέλος, σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης και βλαβών όπου δεν είναι δυνατό να προβλεφθούν, μία άμεση και γρήγορη εναλλακτική είναι τα FSO συστήματα. Επίσης, η επικοινωνιακή κάλυψη ενός μεγάλου γεγονότος (συναυλία, Ολυμπιακοί Αγώνες κ.λπ.), όπου δεν είναι απαραίτητο ότι θα υπάρχει ενσύρματη υποδομή, με τα FSO συστήματα μπορούμε να αποκτήσουμε ad hoc πρόσβαση στο δίκτυο.



Εικόνα 2.3: Παραδείγματα FSO ζεύξεων μεταξύ κτιρίων [60]

γ. Ζεύξεις υποστήριξης αυτόνομης οδήγησης: Η υλοποίηση της αυτόνομης οδήγησης είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι των επικοινωνιών της νέας εποχής, που υπόσχονται ότι θα προσφέρουν επικοινωνιακή κάλυψη αξιόπιστη, με μικρή καθυστέρηση και πανταχού παρούσα. Οι επικοινωνίες οχήματος προς οτιδήποτε (V2X) έχουν σκοπό να βελτιώσουν την ασφάλεια των μετακινήσεων και να βελτιστοποιήσουν το κυκλοφοριακό ζήτημα που υπάρχει σε όλες τις πολυπληθείς πόλεις [61]. Οι οπτικές τεχνολογίες (VLC, OCC) είναι πολύ πιθανό ότι θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση αξιόπιστων ζεύξεων μικρών αποστάσεων (μέχρι 60 μ.) και τα συστήματα FSO για ακόμη μεγαλύτερες αποστάσεις.

2.4.2 Ικανοποίηση των KPIs των δικτύων B5G και 6G με χρήση της τεχνολογίας οπτικών επικοινωνιών

Η ικανοποίηση των KPIs για τα δίκτυα B5G και 6G, με χρήση της τεχνολογίας οπτικών επικοινωνιών, θα μπορούσε να χωριστεί σε δύο επιμέρους πεδία, όπου το πρώτο θα αφορά την εξασφάλιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών (μεγάλη χωρητικότητα, υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης, μικρή καθυστέρηση κ.λπ.) και το δεύτερο την ενσωμάτωσή τους στην αρχιτεκτονική και την υποδομή.

α. Ικανοποίηση ποιοτικών χαρακτηριστικών

- Μεγάλη χωρητικότητα: Η εξασφάλιση μεγάλης χωρητικότητας, 1000 φορές μεγαλύτερη από τα δίκτυα της προηγούμενης γενιάς, είναι συνυφασμένη με τη χρήση μεγάλου εύρους ζώνης. Συνεπώς, όταν μιλάμε για συστήματα, που θα λειτουργούν στο οπτικό φάσμα (300 GHz έως 30 PHz), η εξασφάλιση μεγάλου εύρους ζώνης είναι δεδομένη, λαμβάνοντας υπόψη ότι το εύρος ζώνης είναι ποσοστό της φέρουσας συχνότητας. Επομένως, η χρήση του οπτικού φάσματος αποτελεί μια πιθανή λύση για τα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών, που θα πρέπει να παράγουν και να διακινούν, με πολύ υψηλές ταχύτητες, τεράστιους όγκους δεδομένων από ετερογενείς εφαρμογές πολυμέσων, που χρησιμοποιούνται από τους τελικούς χρήστες και γενικότερα το IoT. Επιπλέον, ένα δίκτυο με μεγάλη χωρητικότητα έχει τη δυνατότητα να επιτυγχάνει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, κάτι που θα είναι απαραίτητο στα σύγχρονα δίκτυα, λόγω της μαζικής συνδεσιμότητας που θα υποστηρίξουν.

- Υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης: Ο στόχος που έχει τεθεί για τα δίκτυα B5G και 6G, είναι η επίτευξη πολύ υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, που θα κυμαίνονται από δεκάδες Gbps έως μερικά Tbps. Τα συστήματα FSO, όπως αναλύσαμε στην προηγούμενη υποπαράγραφο, είναι μια πολύ καλή και αποδοτική επιλογή για την εξασφάλιση υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων σε ζεύξεις, που λειτουργούν είτε σε εξωτερικούς είτε εσωτερικούς χώρους.

Επιπλέον, αξίζει να αναφέρουμε και τις υπόλοιπες οπτικές τεχνολογίες (VLC, LiFi, OCC), οι οποίες πληρούν όλες τις προϋποθέσεις και είναι σε θέση να παρέχουν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης στους τελικούς χρήστες. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν δημοσιευμένες έρευνες, που έχουν επιβεβαιώσει την επίτευξη ρυθμού 100 Gbps με χρήση του VLC. Συνεπώς, η χρήση των οπτικών τεχνολογιών είναι μια πολύ καλή επιλογή, που θα λειτουργεί συμπληρωματικά με τις υπάρχουσες RF υποδομές, προσφέροντας υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης στα δίκτυα B5G και 6G.

- Μικρή καθυστέρηση: Γενικά, στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα η μικρή καθυστέρηση είναι ένα σημαντικό κριτήριο. Όμως, στα δίκτυα B5G και 6G γίνεται επιτακτική ανάγκη και βαρύνουσας σημασίας, η εξασφάλιση πολύ μικρής τιμής για τη συγκεκριμένη παράμετρο. Σε αυτό το σημείο, τα οπτικά συστήματα υπερτερούν των RF, αν και τα σήματα (οπτικά και ηλεκτρικά αντίστοιχα) διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός. Ωστόσο, στα οπτικά συστήματα η μετάδοση γίνεται συνεχώς με την ταχύτητα του φωτός και εντός του συστήματος, χωρίς να απαιτούνται ενδιάμεσες διαδικασίες επεξεργασίας και μετατροπές, που εισάγουν πρόσθετες καθυστερήσεις. Επομένως, τα οπτικά συστήματα μπορούν να παράσχουν υπηρεσίες με αμελητέα καθυστέρηση (μικρότερη του 1 ms), από άκρο σε άκρο, ικανοποιώντας την τεθείσα προδιαγραφή για τα δίκτυα B5G και 6G.

- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας: Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας είναι, μεταξύ άλλων βασικών κριτηρίων, μια εξαιρετικά σημαντική παράμετρος για τα σύγχρονα συστήματα B5G και 6G, καθώς έχουν θέσει πολύ αυστηρούς στόχους για τη μείωση του περιβαλλοντολογικού αποτυπώματος των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Οι οπτικές τεχνολογίες βασίζονται κατά κόρο στους πομπούς LED, οι οποίοι έχουν πάρα πολύ μικρή κατανάλωση και εξετάζονται τρόποι για περαιτέρω μείωσή της. Επιπλέον, η διττή χρήση των οπτικών πομπών LED για επικοινωνίες και παροχή φωτισμού, όπου αυτό είναι εφικτό, δίνει άλλο ένα βαθμό ελευθερίας για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος. Ως εκ τούτου, οι οπτικές επικοινωνίες μπορούν να προσφέρουν ενεργειακά αποδοτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα, ικανοποιώντας τις προδιαγραφές των δικτύων B5G και 6G.

- Αξιοπιστία: Η παροχή αξιόπιστων συνδέσεων είναι ένα σημαντικό κριτήριο, που χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση της απόδοσης όλων των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Με τον όρο αξιοπιστία εννοούμε ότι μια ζεύξη λειτουργεί αποδοτικά χωρίς σφάλματα (μεγάλο SNR) και είναι συνεχώς διαθέσιμη (χωρίς διακοπές) στο χρήστη. Αρχικά, τα συστήματα FSO παρέχουν αξιόπιστες ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων, κυρίως εξωτερικών χώρων, καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλό SNR, ωστόσο η διαθεσιμότητα τους εξαρτάται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Επιπρόσθετα, οι λοιπές οπτικές

τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτεταμένα σε εσωτερικούς χώρους, καθώς επίσης διαθέτουν υψηλό SNR και το περιβάλλον είναι ελεγχόμενο. Συνεπώς, η συμπληρωματική λειτουργία των οπτικών τεχνολογιών δίνει τη δυνατότητα εξασφάλισης άλλης μιας εναλλακτικής διαδρομής αυξάνοντας κατά αυτό τον τρόπο την αξιοπιστία του συστήματος.

β. Ενσωμάτωση των οπτικών τεχνολογιών στην αρχιτεκτονική και την υποδομή των δικτύων B5G και 6G.

- Πύκνωση του δικτύου: Η αύξηση της χωρητικότητα ενός δικτύου μπορεί να επιτευχθεί με τρεις πιθανούς τρόπους, που είναι η πύκνωση του δικτύου, η αποδοτική χρήση του φάσματος και η πραγματική αύξηση του χρησιμοποιούμενου φάσματος. Όσον αφορά την πύκνωση του δικτύου επιτυγχάνεται με τον επιμερισμό της απαιτούμενης περιοχής κάλυψης σε μικρότερες κυψέλες, αυξάνοντας έτσι το ποσοστό χρησιμοποίησης του φάσματος, που με τη σειρά του οδηγεί σε αύξηση της χωρητικότητας. Ωστόσο, η πύκνωση του δικτύου πέρα από την αύξηση της χωρητικότητας δημιουργεί και τεράστιο όγκο δεδομένων, που πρέπει να διακινηθούν. Συνεπώς, η πύκνωση θα πρέπει να υποστηρίζεται από την ύπαρξη ενός δικτύου με υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων για είναι αποδοτική. Οι οπτικές τεχνολογίες μπορούν να τύχουν ευρείας εφαρμογής για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιώντας το VLC, LiFi και OCC για επικοινωνίες μικρής εμβέλειας σε εσωτερικούς χώρους (small cells) και για εφαρμογές εξωτερικού χώρου, όπως η αυτόνομη οδήγηση και οι επικοινωνίες μέσω του δημοσίου φωτισμού. Τα συστήματα FSO θα είναι επιφορτισμένα, με την αποκατάσταση μιας αξιόπιστης backhaul ζεύξης, προς τον κορμό του δικτύου, με τεράστια χωρητικότητα.

- Πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική και συνδυασμός των διάφορων τεχνολογιών: Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των μελλοντικών συστημάτων επικοινωνίας, τα δίκτυα θα πρέπει να αποκτήσουν μια αρχιτεκτονική πολλών επιπέδων. Στην πράξη, το ένα επίπεδο θα είναι οι μακροκυψέλες (macrocells), που θα είναι υπεύθυνες για την κάλυψη με μεγάλης γεωγραφικής περιοχής, χρησιμοποιώντας την τεχνική της «ομπρέλας», όπου ο σταθμός βάσης θα έχει αρκετές δυνατότητες και θα λειτουργεί συνεργατικά με τους σταθμούς βάσης του άλλου επιπέδου. Το άλλο επίπεδο θα περιλαμβάνει τις μικροκυψέλες (microcells), που είναι σχετικά μικρές περιοχές κάλυψης, που χρησιμοποιούν τεχνολογίες, όπως WiFi, LiFi, VLC και OCC. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η σημαντική αποσυμφόρηση των μακροκυψελών, καθώς ένας μεγάλος αριθμός τελικών χρηστών, κυρίως εσωτερικού χώρου, θα εξυπηρετείται από τις μικροκυψέλες. Επιπλέον, δεδομένου ότι οι οπτικές τεχνολογίες και οι RF δεν παρεμβάλλουν [62] η μία την άλλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα σε αρχιτεκτονικές πολλών επιπέδων

διατηρώντας χαμηλά το επίπεδο των παρεμβολών, που είναι πολύ σημαντικό για τα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών.

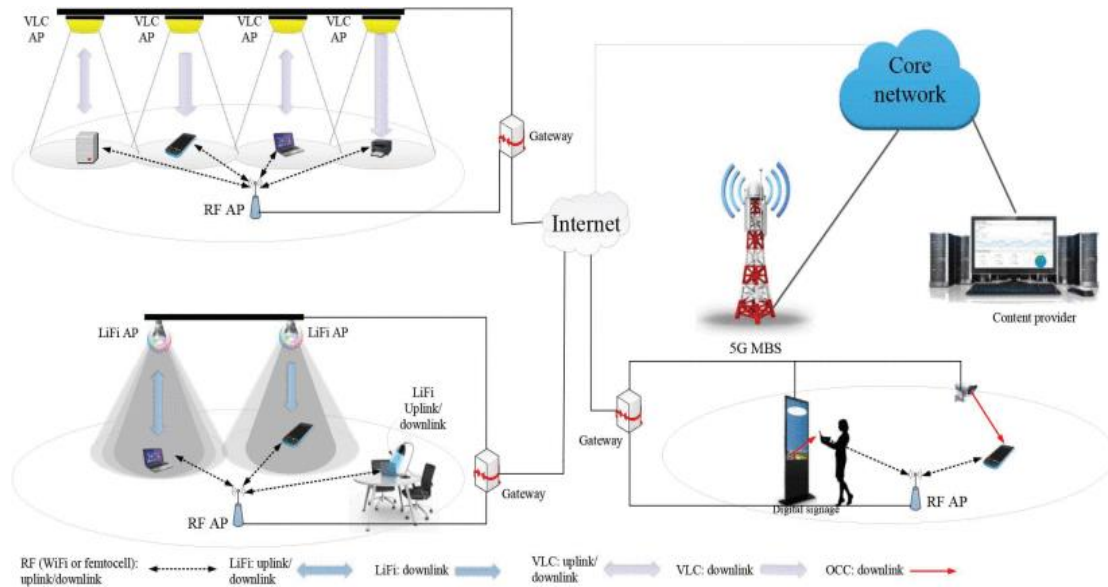
- Υβριδική λειτουργία συστημάτων: Η κάθε τεχνολογία (οπτική και RF) όταν χρησιμοποιηθεί μεμονωμένα έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, αν όμως τις συνδυάσουμε έτσι ώστε να λειτουργούν συμπληρωματικά και η μία να καλύπτει τις αδυναμίες της άλλης θα έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η συνύπαρξη ετερογενών δικτύων βοηθάει στην αύξηση της αξιοπιστίας και της κατανομής του φορτίου. Επιπλέον, ένα υβριδικό σύστημα μπορεί να εξαλείψει την εξάρτηση από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, στις ζεύξεις εξωτερικού χώρου.

- Μαζική συνδεσιμότητα: Η μαζική συνδεσιμότητα είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό, που θα πρέπει να πληρείται από τα μελλοντικά συστήματα επικοινωνιών. Οι συσκευές που θα χρησιμοποιούνται εκτός από πάρα πολλές, σε πλήθος, θα εμφανίζουν εξαιρετικά μεγάλη ετερογένεια, δηλαδή οι τελικοί χρήστες δεν θα είναι μόνο τα κλασικά έξυπνα τηλέφωνα, αλλά θα υπάρχουν επίσης και άλλες συσκευές, όπως οχήματα, ηλεκτρονικές συσκευές σπιτιού, αισθητήρες, που μπορούν να βοηθήσουν στην ανάπτυξη των λεγόμενων «έξυπνων» κοινωνιών. Μέσω τη μαζικής συνδεσιμότητας, το IoT είναι σε θέση να υποστηρίξει την ενσωμάτωση των ανωτέρω συσκευών στο δίκτυο, επιτρέποντας τη μεταξύ τους αλληλεπίδραση και επικοινωνία, χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση. Επιπλέον, η υλοποίηση του IoT, στα δίκτυα 5G και 6G, πέρα από την μαζική συνδεσιμότητα είναι και προς την κατεύθυνση της εξασφάλισης περισσότερης ευφύιας για τις εν λόγω συσκευές.

Οι οπτικές τεχνολογίες αναμένεται ότι θα διαδραματίσουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση της μαζικής συνδεσιμότητας. Αρχικά, η χρήση της τεχνολογίας LED για διάφορους σκοπούς αυξάνεται εκθετικά, λόγω του χαμηλού κόστους, της μικρής κατανάλωσης και τη μεγάλη διάρκεια ζωής. Επιπλέον, η τεχνολογία OCC είναι μια ελκυστική και οικονομικά αποδοτική λύση για να συμπεριληφθεί στις απαιτούμενες εφαρμογές και συνδέσεις του IoT (έξυπνα σπίτια, έξυπνες πόλεις, υγεία κ.λπ.).

Τέλος, αξίζει να σημειώσουμε ότι το IoT πέρα από τη μαζική συνδεσιμότητα, πρέπει να πληροί και κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά όπως το μικρό κόστος εγκατάστασης, η υψηλή ενεργειακή απόδοση και η μεγάλη ασφάλεια. Στην παρούσα φάση, το IoT για τις συνδέσεις χρησιμοποιεί τεχνολογίες όπως το Zigbee, το Bluetooth και το WiFi. Το Zigbee είναι ένα χαμηλού κόστους και ενεργειακά αποδοτικό δίκτυο που χρησιμοποιείται ευρέως στο IoT. Ωστόσο, υποστηρίζει μικρούς ρυθμούς μετάδοσης και το επίπεδο ασφαλείας που επιτυγχάνει δεν είναι αρκετά καλό. Επιπλέον, τα βασικά μειονεκτήματα του WiFi είναι ότι δεν παρέχει εγγυημένη ποιότητα υπηρεσιών και η επίδοση εξαρτάται από τις άλλες τεχνολογίες, καθώς όλες λειτουργούν

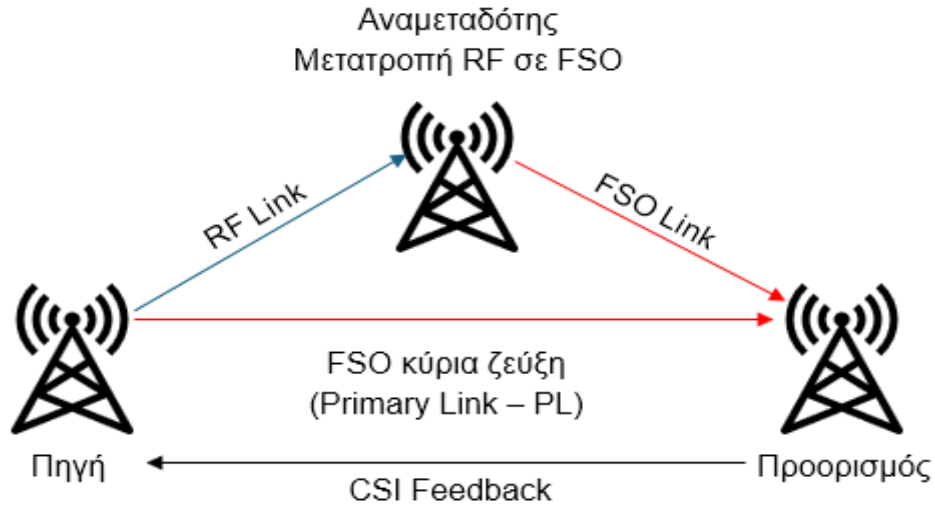
στην ίδια, μη αδειοδοτούμενη, περιοχή συχνοτήτων με αποτέλεσμα να παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Συνεπώς, οι οπτικές τεχνολογίες υπερτερούν των αντίστοιχων ασύρματων τεχνολογιών για την υποστήριξη του IoT.



Εικόνα 2.4: Παραδείγματα υβριδικής υλοποίησης δικτύου με τεχνολογίες RF και OWC [58]

2.5 Ανάλυση της επίδοσης υβριδικού συστήματος FSO/RF με εφεδρική (backup) ζεύξη

Η τοπολογία του συστήματος που θα αναλύσουμε, φαίνεται στην εικόνα 2.5 και περιλαμβάνει δύο ζεύξεις. Η πρώτη είναι μια κλασική ζεύξη FSO που συνδέει απευθείας τον πομπό με τον δέκτη. Η δεύτερη είναι η εφεδρική της πρώτης και υλοποιείται σε δύο άλματα, πομπός – αναμεταδότης (RF ζεύξη) και αναμεταδότης – δέκτης (FSO ζεύξη). Ο δέκτης περιοδικά ενημερώνει τον πομπό για την κατάσταση του καναλιού (Channel State Information - CSI), μέσω μιας εναλλακτικής διαδρομής ανάδρασης, οι οποία τις περισσότερες φορές είναι ενσύρματη. Όταν η κατάσταση της κύριας FSO ζεύξης υποβαθμιστεί αρκετά ή διακοπεί, λόγω τυρβώδους ροής, ομίχλης ή άλλης αιτίας, τότε ο πομπός ενημερώνει το δέκτη και μεταπίπτουν στην εφεδρική ζεύξη.



Εικόνα 2.5: Υλοποίηση δικτύωσης με FSO και υβριδική RF/ FSO ζεύξεις

2.5.1 Μοντελοποίηση της FSO ζεύξης

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function – PDF) του στιγμιαίου λαμβανόμενου λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR), ακολουθεί την κατανομή γάμμα – γάμμα, η οποία έχει όπως παρακάτω [63, 64]:

$$\text{SNR} = \xi_{\text{FSO}} = \frac{(\eta I)^2}{N_0}, \quad \xi_{\text{FSO}} \geq 0 \quad (2.1)$$

$$\text{SNR}_{\text{av}} = \bar{\xi}_{\text{FSO}} = \frac{(\eta \bar{I})^2}{N_0} \quad (2.2)$$

$$f_{\xi_{\text{FSO}}}(\xi_{\text{FSO}}) = \frac{(\alpha_t \beta_t)^{\frac{\alpha_t + \beta_t}{2}}}{\Gamma(\alpha_t) \Gamma(\beta_t) \sqrt{\xi_{\text{FSO}} \bar{\xi}_{\text{FSO}}}} \left(\sqrt{\frac{\xi_{\text{FSO}}}{\bar{\xi}_{\text{FSO}}}} \right)^{\frac{\alpha_t + \beta_t}{2} - 1} K_{\alpha_t - \beta_t} \left(2 \sqrt{\alpha_t \beta_t \frac{\xi_{\text{FSO}}}{\bar{\xi}_{\text{FSO}}}} \right) \quad (2.3)$$

όπου από τις σχέσεις (2.1) και (2.2) έχουμε τη στιγμιαία και μέση τιμή του λόγου σήματος προς θόρυβο αντιστοίχως. Ειδικότερα, η είναι το ποσοστό μετατροπής του φωτο – ρεύματος στο δέκτη, I η λαμβανόμενη ένταση φωτός και N_0 η μονόπλευρη φασματική πυκνότητα ισχύος του προσθετικού λευκού γκαουσιανού θορύβου (Additive White Gaussian Noise – AWGN). Οι συντελεστές α_t και β_t , αντιπροσωπεύουν τους μικρής και μεγάλης κλίμακας στροβίλους λόγω σκέδασης στο περιβάλλον διάδοσης και μαζί καθορίζουν το δείκτη σπινθηρισμού (Scintillation Index – SI), $\text{SI} = 1/\alpha_t + 1/\beta_t + 1/(\alpha_t \beta_t)$, που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της μεταβολής της οπτικής έντασης λόγω τυρβώδους ροής. Επιπλέον, στη σχέση (2.3) ως Γ έχουμε τη συνάρτηση γάμμα και K_n τη τροποποιημένη συνάρτηση Bessel δευτέρου είδους και ν τάξης.

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (Cumulative Distribution Function – CDF) του SNR, υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την PDF (σχέση 2.3), και προκύπτει η ακόλουθη σχέση [64]:

$$F_{\xi_{\text{FSO}}}(\xi_{\text{FSO}}) = \frac{(\alpha_t \beta_t)^{\frac{\alpha_t + \beta_t}{2}}}{2\Gamma(\alpha_t)\Gamma(\beta_t)\xi_{\text{FSO}}^{\tau_1}} \int_0^{\xi_{\text{FSO}}} \xi_{\text{FSO}}^{\tau_1 - 1} G_{0,2}^{2,0} \left[\alpha_t \beta_t \sqrt{\frac{\xi_{\text{FSO}}}{\xi_{\text{FSO}}}} \middle| \frac{\alpha_t - \beta_t}{2}, \frac{\beta_t - \alpha_t}{2} \right] d\xi_{\text{FSO}} \quad (2.4)$$

όπου $\tau_1 = (\alpha_t + \beta_t)/4$ και εναλλακτικά η (2.4) μπορεί να γραφεί ως εξής [64]:

$$F_{\xi_{\text{FSO}}}(\xi_{\text{FSO}}) = \frac{(\alpha_t \beta_t)^{\frac{\alpha_t + \beta_t}{2}}}{\Gamma(\alpha_t)\Gamma(\beta_t)\xi_{\text{FSO}}^{\tau_1}} \xi_{\text{FSO}}^{\frac{\alpha_t + \beta_t}{4}} G_{1,3}^{2,1} \left[\alpha_t \beta_t \sqrt{\frac{\xi_{\text{FSO}}}{\xi_{\text{FSO}}}} \middle| 1 - \frac{\alpha_t + \beta_t}{2}, \frac{\alpha_t - \beta_t}{2}, \frac{\beta_t - \alpha_t}{2} - \frac{\alpha_t + \beta_t}{2} \right] \quad (2.5)$$

Η συνάρτηση Meijer-G ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των G συναρτήσεων και αποτελεί μια γενικευμένη συνάρτηση, μέσω της οποίας μπορούν να αναπαρασταθούν διάφορες γνωστές συναρτήσεις και η μορφή της δίνεται από την παρακάτω μαθηματική εξίσωση [97]:

$$G_{p,q}^{m,n} \left[z \middle| \begin{matrix} a_1, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_q \end{matrix} \right] = \frac{1}{2\pi i} \int_L \frac{\prod_{j=1}^m \Gamma(b_j - s) \prod_{j=1}^n \Gamma(1 - a_j + s)}{\prod_{j=1}^q \Gamma(1 - b_j + s) \prod_{j=1}^m \Gamma(a_j - s)} z^s ds$$

Η συνάρτηση Meijer-G τυγχάνει ευρείας εφαρμογής στον υπολογισμό ολοκληρωμάτων καθώς αντικαθιστά γνωστές συναρτήσεις, που απαιτούν πολυπλοκότερους υπολογισμούς, δημιουργώντας γινόμενα δύο ή τριών συναρτήσεων Meijer-G, μερικές από τις οποίες είναι οι ακόλουθες [97]:

$$e^x = G_{0,1}^{1,0} [-x | 0^-]$$

$$K_\nu(x) = G_{1,2}^{2,0} \left[\frac{x^2}{4} \middle| \frac{\nu}{2}, -\frac{\nu}{2} \right]$$

$$\Gamma(\alpha, x) = G_{1,2}^{2,0} [x | \alpha, 0]$$

2.5.2 Μοντελοποίηση της εφεδρικής RF/FSO ζεύξης

Όταν η κύρια FSO ζεύξη διακοπεί για οποιοδήποτε λόγο, η κίνηση από την πηγή στον προορισμό δρομολογείται μέσω της εφεδρικής ζεύξης, που χρησιμοποιεί τον αναμεταδότη. Στην υλοποίηση έχει θεωρηθεί η ύπαρξη ενός

αναμεταδότη μέσης ισχύος (Average Power Scaling – APS) σταθερής ενίσχυσης και προώθησης (Amplify and Forward – AF), που είναι κατάλληλος για εφαρμογές με μικρό περιθώριο ισχύος.

Η RF ζεύξη, μεταξύ πομπού – αναμεταδότη, μπορεί να χαρακτηριστεί με τις διαλείψεις Rayleigh και αν θεωρήσουμε μέτρια προς ισχυρή τυρβώδη ροή, οι διαταραχές στην FSO ζεύξη μπορούν να περιγραφούν με την κατανομή γάμμα – γάμμα. Η μετατροπή του ηλεκτρικού σε οπτικό σήμα πραγματοποιείται με τη χρήση ενός διαμορφωτή Mach – Zehnder (MZM).

Αν οι στιγμιαίοι λαμβανόμενοι σηματοθορυβικοί λόγοι (SNR), για τα επιμέρους τμήματα της ζεύξης είναι ξ_{RF} (πομπός – αναμεταδότης) και ξ_{FSO} (αναμεταδότης – δέκτης), τότε ο ισοδύναμος σηματοθορυβικός λόγος από άκρο σε άκρο για ένα αναμεταδότη APS – AF, δίνεται από την παρακάτω σχέση [65]:

$$\xi_{mix} = \frac{\xi_{RF}\xi_{FSO}}{(g_r + \xi_{FSO})}, \quad g_r = \left(1 + \frac{1}{N_0}\right) \quad (2.6)$$

Δεδομένου ότι, στο μοντέλο που αναλύεται το τμήμα της RF ζεύξης υπόκειται σε Rayleigh διαλείψεις, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του στιγμιαίου SNR μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη έκφραση [64]:

$$f_{\xi_{RF}}(\xi_{RF}) = (1/\bar{\xi}_{RF}) \exp(-\xi_{RF}/\bar{\xi}_{RF}), \quad \xi_{RF} \geq 0 \quad (2.7)$$

Ομοίως, για το τμήμα της FSO ζεύξης η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του στιγμιαίου SNR, ακολουθεί την κατανομή γάμμα – γάμμα και έχει εκφραστεί παραπάνω με τη σχέση 2.3.

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής CDF του SNR (από άκρο σε άκρο), υπολογίζεται με την ολοκλήρωση της υπό συνθήκη πυκνότητας πάνω σε όλο το εύρος του ξ_{FSO} και προκύπτει η παρακάτω έκφραση κλειστού τύπου [64]:

$$F_{\xi_{mix}}(\xi_{mix}) = 1 - K_1 \exp(-\xi_{mix}/\bar{\xi}_{mix}) \xi_{mix}^{\tau_1} G_{0\ 5}^{5\ 0} [\omega \xi_{mix} | \tau_1] \quad (2.8)$$

όπου

$$K_1 = \frac{(\alpha_t \beta_t)^{\frac{\alpha_t + \beta_t}{2}} (g_r / \bar{\xi}_{RF})^{\tau_1}}{4\pi \Gamma(\alpha_t) \Gamma(\beta_t) \bar{\xi}_{FSO}^{\tau_1}}$$

$$\omega = \frac{\alpha_t^2 \beta_t^2 g_r}{16 \bar{\xi}_{RF} \bar{\xi}_{FSO}}$$

$$\mathcal{P} \in \left\{ \frac{\alpha_t - \beta_t}{4}, \frac{\alpha_t - \beta_t + 2}{4}, \frac{\beta_t - \alpha_t}{4}, \frac{\beta_t - \alpha_t + 2}{4}, -\tau_1 \right\}$$

$$G_{p \ q}^{m \ n} \left[z \middle| \begin{matrix} (a_p) \\ (b_q) \end{matrix} \right], \text{Meijer's G - function}$$

Επιπλέον, μια εναλλακτική έκφραση της 2.7 δίνεται από την ακόλουθη σχέση [64]:

$$f_{\xi_{RF}}(\xi_{RF}) = K_1 \exp(-\xi_{mix}/\bar{\xi}_{mix}) \xi_{mix}^{\tau_1-1} G_{1 \ 6}^{6 \ 0} [\omega \xi_{mix} |_{1-\tau_1, p}^{-\tau_1}] \\ + (K_1/\bar{\xi}_{mix}) \exp(-\xi_{mix}/\bar{\xi}_{mix}) \xi_{mix}^{\tau_1} G_{0 \ 5}^{5 \ 0} [\omega \xi_{mix} |_p^-] \quad (2.9)$$

2.5.3 Ανάλυση της πιθανότητας αποκοπής (Outage Probability) του συστήματος

Η αποκοπή του συστήματος λαμβάνει χώρα όταν για οποιοδήποτε λόγο η κύρια (Primary Link – PL) και η εφεδρική ζεύξη (Secondary Link – SL) τεθούν εκτός λειτουργίας ή το SNR, που πετυχαίνουν δεν ικανοποιεί τις τεθείσες προδιαγραφές. Η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται ως εξής [64]:

$$P_{out} = P_{out}^{FSO(PL)}(\xi_{th}^{FSO}) P_{out}^{mix}(\xi_{th}^{mix}) \quad (2.10)$$

όπου $P_{out}^{FSO(PL)}$ και P_{out}^{mix} οι πιθανότητες αποκοπής της κύριας και της εφεδρικής ζεύξης αντιστοίχως. Τα όρια (thresholds) είναι οι κατώτατες αποδεκτές τιμές του SNR, για τις οποίες η ζεύξη παρέχει εγγυημένο QoS.

Από τη σχέση 2.5 προκύπτει ότι $P_{out}^{FSO(PL)}(\xi_{th}^{FSO}) = F_{\xi_{FSO}}(\xi_{th}^{FSO})$ και η έκφραση παίρνει την ακόλουθη μορφή [64]:

$$P_{out}^{FSO(PL)}(\xi_{th}^{FSO}) = \frac{(\alpha_t \beta_t)^{\frac{\alpha_t + \beta_t}{2}}}{\Gamma(\alpha_t) \Gamma(\beta_t) \bar{\xi}_{FSO}^{\tau_1}} \xi_{th}^{FSO \frac{\alpha_t + \beta_t}{4}} G_{1 \ 3}^{2 \ 1} \left[\alpha_t \beta_t \sqrt{\frac{\xi_{FSO}}{\bar{\xi}_{FSO}}} \left| \begin{matrix} 1 - \frac{\alpha_t + \beta_t}{2} \\ \frac{\alpha_t - \beta_t}{2}, \frac{\beta_t - \alpha_t}{2}, -\frac{\alpha_t + \beta_t}{2} \end{matrix} \right. \right] \quad (2.11)$$

Ομοίως η πιθανότητα αποκοπής της εφεδρικής ζεύξης $P_{out}^{mix}(\xi_{th}^{mix}) = F_{\xi_{mix}}(\xi_{th}^{mix})$, που προκύπτει από τη σχέση 2.8, η οποία γράφεται όπως παρακάτω [64]:

$$P_{out}^{mix}(\xi_{th}^{mix}) = 1 - K_1 \exp(-\xi_{th}^{mix}/\bar{\xi}_{mix}) \xi_{th}^{mix, \tau_1} G_{0 \ 5}^{5 \ 0} [\omega \xi_{th}^{mix} |_p^-] \quad (2.12)$$

Στις εικόνες 2.6 – 2.8, που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και η επιβεβαίωση των μαθηματικών μοντέλων μέσω της προσομοίωσης Monte – Carlo. Για τη διενέργεια των προσομοιώσεων, θεωρήθηκαν σταθερές οι παράμετροι της τυρβώδους ροής ($\alpha_t=5.07$, $\beta_t=1.53$). Η RF ζεύξη, μεταξύ πομπού – αναμεταδότη, θεωρήθηκε ότι υπόκειται σε διαλείψεις Rayleigh και εξετάζοντας μέτρια προς ισχυρή τυρβώδη ροή, οι διαταραχές στην FSO ζεύξη περιεγράφηκαν με την κατανομή γάμμα – γάμμα. Επίσης, σε κάθε μεμονωμένη ζεύξη – άλμα θεωρήθηκε ότι το μέσο ($\bar{\xi}_{mix} = \bar{\xi}_{FSO}^{PL} = \bar{\xi}_{FSO}^{SL} = \bar{\xi}_{RF}$) και το SNR threshold ($\xi_{th}^{mix} = \xi_{th}^{FSO,PL} = \xi_{th}^{FSO,SL} = \xi_{th}^{RF}$) είναι ίδια, για λόγους απλότητας και χωρίς βλάβη της γενικότητας.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, που ακολουθούν (πιθανότητα αποκοπής, BER και χωρητικότητα), εξαχθήκαν υλοποιώντας τον παρακάτω αλγόριθμο μεταγωγής [64]:

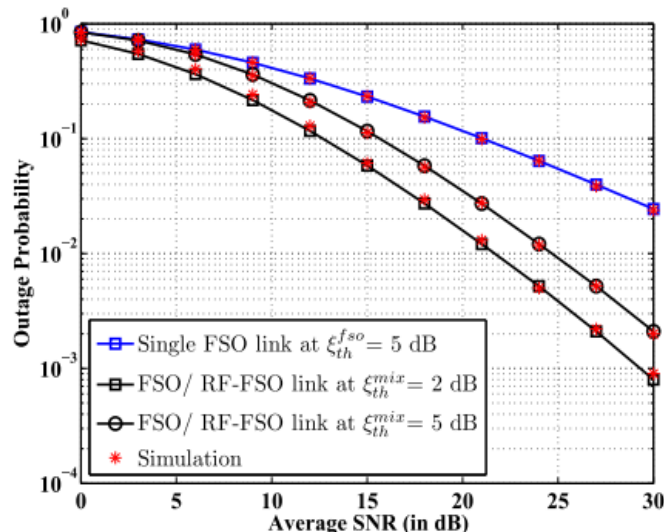
Αν $\xi_{FSO}^{PL} \geq \xi_{th}^{FSO}$ τότε
 ζεύξη(t) ← FSO } Συνθήκη λειτουργίας της κύριας FSO ζεύξης

αλλιώς
 αν $[(\xi_{RF} \geq \xi_{th}^{mix}) \text{ και } (\xi_{FSO}^{SL} \geq \xi_{th}^{mix})]$ τότε
 ζεύξη(t) ← RF – FSO } Συνθήκη λειτουργίας της εφεδρικής RF - FSO ζεύξης ή διακοπής της ζεύξης

αλλιώς
 η ζεύξη διακόπηκε

τέλος αν

τέλος αν



Εικόνα 2.6: Η πιθανότητα αποκοπής της ζεύξης συναρτήσει του SNR¹ [64]

¹ Για την επιβεβαίωση των μαθηματικών μοντέλων εκτελέστηκε προσομοίωση Monte – Carlo και οι τιμές για τις παραμέτρους τυρβώδους ροής είναι ($\alpha_t=5.07$, $\beta_t=1.53$). Η RF ζεύξη, μεταξύ πομπού – αναμεταδότη, θεωρήθηκε ότι υπόκειται σε διαλείψεις Rayleigh και θεωρώντας μέτρια προς ισχυρή τυρβώδη ροή, οι διαταραχές της FSO ζεύξης περιεγράφηκαν με την κατανομή γάμμα – γάμμα.

Συμπερασματικά, από την εικόνα 2.6 επιβεβαιώνουμε όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω ότι τα υπάρχοντα RF συστήματα θα πρέπει να λειτουργήσουν συνεργατικά με τα FSO συστήματα, που πρόκειται να ενταχθούν στις υποδομές, καθώς όπως παρατηρούμε η πιθανότητα αποκοπής μειώνεται εμφανώς στην υβριδική FSO/RF ζεύξη. Επιπλέον, όταν οι απαιτήσεις για το SNR είναι λιγότερο αυστηρές η επίδοση του υβριδικού συστήματος μπορεί να βελτιωθεί ακόμη περισσότερο, όπως φαίνεται από την καμπύλη με $\xi_{th}=2dB$.

2.5.4 Ανάλυση του μέσου ρυθμού εσφαλμένων ψηφίων (Bit Error Rate – BER) του συστήματος

Όταν το σύστημα λειτουργεί αποτελεσματικά, μπορεί οποιοδήποτε τμήμα από τις ζεύξεις που υλοποιούνται να είναι ενεργό. Συνεπώς για να υπολογιστεί το μέσο BER, θα πρέπει να αναγνωριστούν και να ληφθούν υπόψη όλες οι διακριτές περιπτώσεις. Το μέσο BER κατά τη διάρκεια λειτουργίας του μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη έκφραση [64, 66]:

$$BER = \frac{B^{FSO}(\xi_{th}^{FSO})}{1 - P_{out}} + \frac{P_{out}^{RF}(\xi_{th}^{mix})B^{mix}(\xi_{th}^{mix})}{1 - P_{out}^{FSO(PL)}(\xi_{th}^{FSO})} + \frac{P_{out}^{FSO}(\xi_{th}^{mix})B^{mix}(\xi_{th}^{mix})}{(1 - P_{out})(1 - P_{out}^{RF}(\xi_{th}^{mix}))} \quad (2.13)$$

όπου, B^{FSO} και B^{mix} είναι το μέσο BER όταν η κύρια και η εφεδρική ζεύξη είναι ενεργές αντίστοιχα, $P_{out}^{RF}(\xi_{th}^{mix})B^{mix}$ και $P_{out}^{FSO}(\xi_{th}^{mix})$ είναι οι πιθανότητες αποκοπής των τμημάτων της εφεδρικής ζεύξης [πομπός – αναμεταδότης (RF) και αναμεταδότης – δέκτης (FSO)]. Ο πρώτος όρος της 2.13 αφορά την κατάσταση που είναι ενεργή η κύρια ζεύξη δηλαδή $\xi_{FSO}^{PL} > \xi_{th}^{FSO}$. Ο δεύτερος και τρίτος όροι υποδηλώνουν το BER όταν η εφεδρική ζεύξη είναι ενεργή, δηλαδή $\xi_{RF} < \xi_{th}^{mix}$ ή $\xi_{RF} > \xi_{th}^{mix}$ αλλά $\xi_{FSO}^{SL} < \xi_{th}^{mix}$.

Θεωρώντας on – off keying (OOK) διαμόρφωση, η υπό συνθήκη πιθανότητα σφάλματος δίνεται από τη σχέση $P(e|\xi) = (1/2)\text{erfc}(\sqrt{\xi/2})$.

Επομένως, το μέσο BER όταν η κύρια FSO ζεύξη είναι ενεργή υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση [64]:

$$B^{FSO}(\xi_{th}^{FSO}) = \int_{\xi_{th}^{FSO}}^{\infty} P(e|\xi_{FSO}^{PL})f_{\xi_{FSO}}(\xi_{FSO}^{PL})d\xi_{FSO}^{PL} \quad (2.14)$$

Αντικαθιστώντας τη 2.3 στη 2.14 έχουμε την ακόλουθη έκφραση [64]:

$$B^{\text{FSO}}(\xi_{\text{th}}^{\text{FSO}}) = K_2 \int_{\xi_{\text{th}}^{\text{FSO}}}^{\infty} \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{\xi_{\text{FSO}}^{\text{PL}}}{2}}\right) (\xi_{\text{FSO}}^{\text{PL}})^{\tau_1-1} G_{2,2}^{2,0} \left[\alpha_t \beta_t \sqrt{\frac{\xi_{\text{FSO}}^{\text{PL}}}{\xi_{\text{FSO}}^{\text{PL}}}} \left| \frac{\alpha_t - \beta_t}{2}, \frac{\beta_t - \alpha_t}{2} \right. \right] d\xi_{\text{FSO}}^{\text{PL}} \quad (2.15)$$

όπου $K_2 = (\alpha_t \beta_t)^{\frac{\alpha_t + \beta_t}{2}} [4\Gamma(\alpha_t)\Gamma(\beta_t)(\xi_{\text{FSO}}^{\text{PL}})^{\tau_1}]$. Κατόπιν εκτέλεσης πράξεων, εντός των ολοκληρωμάτων, η σχέση 2.15 μπορεί να γραφεί $B^{\text{FSO}}(\xi_{\text{th}}^{\text{FSO}}) = I_1 - (I_{2a} + I_{2b})$, όπου έχουμε [64]:

$$I_1 = \frac{K_2 2^{\tau_1-1}}{\pi^{3/2}} G_{2,5}^{4,2} \left[\frac{(\alpha_t \beta_t)^2}{8 \xi_{\text{FSO}}^{\text{PL}}} \left| \begin{matrix} 1 - \tau_1, \frac{1}{2} - \tau_1 \end{matrix} \right. \right] \quad (2.16)$$

$$I_{2a} = \frac{K_2 (\xi_{\text{th}}^{\text{FSO}})^{\tau_1}}{3} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{(-\xi_{\text{th}}^{\text{FSO}}/2)^{\kappa}}{\kappa!} G_{1,3}^{2,1} \left[\alpha_t \beta_t \sqrt{\frac{\xi_{\text{th}}^{\text{FSO}}}{\xi_{\text{FSO}}^{\text{PL}}}} \left| \begin{matrix} 1 - \frac{\alpha_t + \beta_t}{2} - 2\kappa \\ \frac{\alpha_t - \beta_t}{2}, \frac{\beta_t - \alpha_t}{2} - \frac{\alpha_t + \beta_t}{2} - 2\kappa \end{matrix} \right. \right] \quad (2.17)$$

$$I_{2b} = K_2 (\xi_{\text{th}}^{\text{FSO}})^{\tau_1} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{(-2\xi_{\text{th}}^{\text{FSO}}/3)^{\kappa}}{\kappa!} G_{1,3}^{2,1} \left[\alpha_t \beta_t \sqrt{\frac{\xi_{\text{th}}^{\text{FSO}}}{\xi_{\text{FSO}}^{\text{PL}}}} \left| \begin{matrix} 1 - \frac{\alpha_t + \beta_t}{2} - 2\kappa \\ \frac{\alpha_t - \beta_t}{2}, \frac{\beta_t - \alpha_t}{2} - \frac{\alpha_t + \beta_t}{2} - 2\kappa \end{matrix} \right. \right] \quad (2.18)$$

Ομοίως, το μέσο BER όταν η εφεδρική RF/FSO ζεύξη είναι ενεργή υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση [64]:

$$B^{\text{mix}}(\xi_{\text{th}}^{\text{mix}}) = \int_{\xi_{\text{th}}^{\text{mix}}}^{\infty} P(e|\xi_{\text{mix}}) f_{\xi_{\text{mix}}}(\xi_{\text{mix}}) d\xi_{\text{mix}} \quad (2.19)$$

Έπειτα από μερικούς μαθηματικούς χειρισμούς η 2.19 μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα τεσσάρων μεμονωμένων ολοκληρωμάτων, $B^{\text{mix}}(\xi_{\text{th}}^{\text{mix}}) = (I_{3a} + I_{3b}) + (I_{4a} + I_{4b})$, τα οποία εκφράζονται ως [64]:

$$I_{3a} = \frac{K_1}{12} \left(\frac{1}{\xi_{\text{mix}}} + \frac{1}{2} \right)^{-\tau_1} G_{2,6}^{6,1} \left[\frac{\omega}{\frac{1}{\xi_{\text{mix}}} + \frac{1}{2}} \left| \begin{matrix} -\tau_1 - \tau_1 \end{matrix} \right. \right] \\ - \frac{K_1}{12} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\kappa}}{\kappa!} \left(\frac{1}{\xi_{\text{mix}}} + \frac{1}{2} \right)^{\kappa} \xi_{\text{mix}}^{\tau_1 + \kappa} G_{2,7}^{6,1} [\omega \xi_{\text{mix}} | \begin{matrix} 1 - \tau_1 - \kappa - \tau_1 \\ 1 - \tau_1, \mathcal{P} - \tau_1 - \kappa \end{matrix}] \quad (2.20)$$

$$I_{3b} = \frac{K_1}{4} \left(\frac{1}{\bar{\xi}_{\text{mix}}} + \frac{2}{3} \right)^{-\tau_1} G_{2 \ 6}^{6 \ 1} \left[\frac{\omega}{\frac{1}{\bar{\xi}_{\text{mix}}} + \frac{2}{3}} \right]_{1-\tau_1, \mathcal{P}}^{-\tau_1-\tau_1} \\ - \frac{K_1}{4} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{(-1)^\kappa}{\kappa!} \left(\frac{1}{\bar{\xi}_{\text{mix}}} + \frac{2}{3} \right)^\kappa \xi_{\text{mix}}^{\tau_1+\kappa} G_{2 \ 7}^{6 \ 1} [\omega \xi_{\text{mix}}]_{1-\tau_1, \mathcal{P}-\tau_1-\kappa}^{1-\tau_1-\kappa-\tau_1} \quad (2.21)$$

$$I_{4a} = \frac{K_1}{12\bar{\xi}_{\text{mix}}} \left(\frac{1}{\bar{\xi}_{\text{mix}}} + \frac{1}{2} \right)^{-\tau_1-1} G_{1 \ 5}^{5 \ 1} \left[\frac{\omega}{\frac{1}{\bar{\xi}_{\text{mix}}} + \frac{1}{2}} \right]_{\mathcal{P}}^{-\tau_1} \\ - \frac{K_1}{12\bar{\xi}_{\text{mix}}} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{(-1)^\kappa}{\kappa!} \left(\frac{1}{\bar{\xi}_{\text{mix}}} + \frac{1}{2} \right)^\kappa \xi_{\text{mix}}^{\tau_1+\kappa+1} G_{1 \ 6}^{5 \ 1} [\omega \xi_{\text{mix}}]_{\mathcal{P}-\tau_1-\kappa-1}^{-\tau_1-\kappa} \quad (2.22)$$

$$I_{4b} = \frac{K_1}{4\bar{\xi}_{\text{mix}}} \left(\frac{1}{\bar{\xi}_{\text{mix}}} + \frac{2}{3} \right)^{-\tau_1-1} G_{1 \ 5}^{5 \ 1} \left[\frac{\omega}{\frac{1}{\bar{\xi}_{\text{mix}}} + \frac{2}{3}} \right]_{\mathcal{P}}^{-\tau_1} \\ - \frac{K_1}{12\bar{\xi}_{\text{mix}}} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{(-1)^\kappa}{\kappa!} \left(\frac{1}{\bar{\xi}_{\text{mix}}} + \frac{2}{3} \right)^\kappa \xi_{\text{mix}}^{\tau_1+\kappa+1} G_{1 \ 6}^{5 \ 1} [\omega \xi_{\text{mix}}]_{\mathcal{P}-\tau_1-\kappa-1}^{-\tau_1-\kappa} \quad (2.23)$$

Τώρα, απομένει να προσδιοριστεί ο όρος $P_{\text{out}}^{\text{RF}}(\xi_{\text{th}}^{\text{RF}})$, ο οποίος ορίζεται ως [64]:

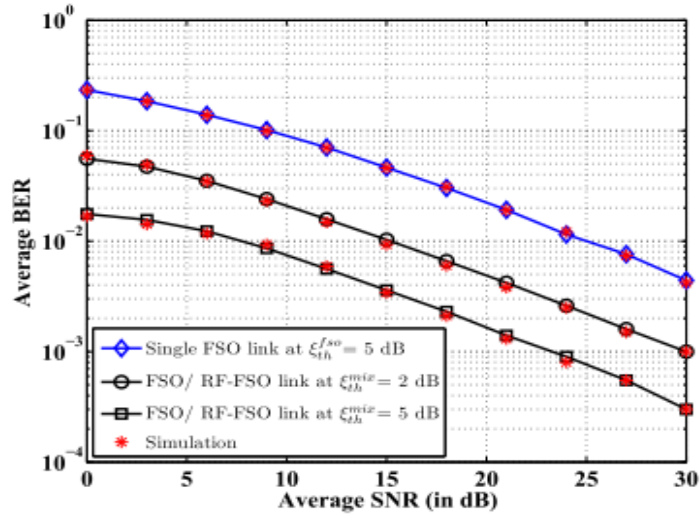
$$P_{\text{out}}^{\text{RF}}(\xi_{\text{th}}^{\text{RF}}) = \int_0^{\xi_{\text{th}}^{\text{RF}}} f_{\xi_{\text{RF}}}(\xi_{\text{RF}}) d\xi_{\text{RF}} \quad (2.24)$$

Αντικαθιστώντας την 2.7 στην 2.24 και χρησιμοποιώντας την κατώτερη ατελή συνάρτηση γάμμα, γράφεται ως [64]:

$$P_{\text{out}}^{\text{RF}}(\xi_{\text{th}}^{\text{RF}}) = \gamma \left(1, \frac{\xi_{\text{th}}^{\text{RF}}}{\xi_{\text{RF}}} \right) = G_{1 \ 2}^{1 \ 1} \left[\frac{\xi_{\text{th}}^{\text{RF}}}{\xi_{\text{RF}}} \right]_{10}^1 \quad (2.25)$$

Τέλος, στην εικόνα 2.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, από όπου μπορούμε να συμπεράνουμε – επιβεβαιώσουμε την καλύτερη απόδοση, από πλευράς BER, της υβριδικής FSO/RF ζεύξη έναντι της FSO ζεύξης, καθώς αν για παράδειγμα θέλουμε να πέτυχουμε ένα BER της τάξης του 10^{-2} με $\xi_{\text{th}}=5\text{dB}$, παρατηρούμε ότι στην FSO/RF ζεύξη αυτό επιτυγχάνεται με $\text{SNR}=10\text{dB}$, ενώ για την FSO ζεύξης με $\text{SNR}=25\text{dB}$, που σημαίνει πρακτικά ότι έχουμε ένα κέρδος 15 dB. Επιπλέον, παρατηρούμε στην

υβριδική υλοποίηση όσο λιγότερες απαιτήσεις έχει το σύστημα από πλευράς SNR, τόσα περισσότερα λάθη εμφανίζονται στο δέκτη.



Εικόνα 2.7: Το μέσο BER συναρτήσει του SNR² [64]

2.5.5 Ανάλυση της μέσης χωρητικότητας του συστήματος

Η μέση χωρητικότητα του υβριδικού συστήματος FSO/RF – FSO, όταν τουλάχιστον μία από τις δύο ζεύξεις είναι ενεργή, μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [64]:

$$C = C_{FSO}^{PL}(\xi_{th}^{FSO}) + P_{out}^{FSO(PL)}(\xi_{th}^{FSO})C^{mix}(\xi_{th}^{mix}) + P_{out}^{RF}(\xi_{th}^{RF})[1 - P_{out}^{FSO(SL)}(\xi_{th}^{mix})]C_{FSO}^{SL}(\xi_{th}^{mix}) \quad (2.26)$$

όπου τα $P_{out}^{FSO(PL)}(\xi_{th}^{FSO})$ και $P_{out}^{RF}(\xi_{th}^{RF})$ υπολογίζονται από τις σχέσεις 2.11 και 2.25 αντιστοίχως. Όταν $\xi_{FSO}^{PL} > \xi_{th}^{FSO}$, τότε η κύρια ζεύξη είναι ενεργή και το $C_{FSO}^{PL}(\xi_{th}^{FSO})$ είναι η μέση χωρητικότητα, ενώ όταν $\xi_{FSO}^{PL} < \xi_{th}^{FSO}$, η κύρια ζεύξη βρίσκεται στην αποκοπή με πιθανότητα $P_{out}^{FSO(PL)}(\xi_{th}^{FSO})$, και η χωρητικότητα της εφεδρικής ζεύξης είναι $C^{mix}(\xi_{th}^{mix})$. Επίσης, όταν $\xi_{RF} < \xi_{th}^{mix}$, λαμβάνει χώρα αποκοπή στο τμήμα πομπός – αναμεταδότης με πιθανότητα αποκοπής P_{out}^{RF} , ωστόσο μπορεί το τμήμα αναμεταδότης – δέκτης να είναι ενεργό και να μεταφέρει δεδομένα, που είναι αποθηκευμένα στον κόμβο του αναμεταδότη, με χωρητικότητα $C_{FSO}^{SL}(\xi_{th}^{mix})$.

² Για την επιβεβαίωση των μαθηματικών μοντέλων εκτελέστηκε προσομοίωση Monte – Carlo και οι τιμές για τις παραμέτρους τυρβώδους ροής είναι ($\alpha=5.07$, $\beta=1.53$). Η RF ζεύξη, μεταξύ πομπού – αναμεταδότη, θεωρήθηκε ότι υπόκειται σε διαλείψεις Rayleigh και θεωρώντας μέτρια προς ισχυρή τυρβώδη ροή, οι διαταραχές της FSO ζεύξης περιεγράφηκαν με την κατανομή γάμμα – γάμμα.

Συνεπώς, ο όρος της χωρητικότητας, που αφορά την κύρια ζεύξη δίνεται από την ακόλουθη έκφραση [64]:

$$C_{\text{FSO}}^{\text{PL}}(\xi_{\text{th}}^{\text{FSO}}) = \int_{\xi_{\text{th}}^{\text{FSO}}}^{\infty} \log_2(1 + \xi_{\text{FSO}}^{\text{PL}}) f_{\xi_{\text{FSO}}}(\xi_{\text{FSO}}^{\text{PL}}) d\xi_{\text{FSO}}^{\text{PL}}$$

$$= \frac{K_1}{\ln(2)} \int_{\xi_{\text{th}}^{\text{FSO}}}^{\infty} \log_2(1 + \xi_{\text{FSO}}^{\text{PL}}) (\xi_{\text{FSO}}^{\text{PL}})^{\tau_1 - 1} G_{0,2}^{2,0} \left[\alpha_t \beta_t \sqrt{\frac{\xi_{\text{FSO}}^{\text{PL}}}{\bar{\xi}_{\text{FSO}}^{\text{PL}}}} \left| \frac{\alpha_t - \beta_t}{2}, \frac{\beta_t - \alpha_t}{2} \right. \right] d\xi_{\text{FSO}}^{\text{PL}} \quad (2.27)$$

Έπειτα από μαθηματικές πράξεις η 2.27 μπορεί να γραφεί $C_{\text{FSO}}^{\text{PL}}(\xi_{\text{th}}^{\text{FSO}}) = I_5 - I_6$, όπου έχουμε [64]:

$$I_5 = \frac{K_1}{2\pi \ln(2)} G_{2,6}^{6,1} \left[\frac{(\alpha_t \beta_t)^2}{16 \bar{\xi}_{\text{FSO}}^{\text{PL}}} \right]_{\mathcal{P}, -\tau_1} \quad (2.28)$$

$$I_6 = \frac{2K_1}{\ln(2)} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\kappa+1}}{\kappa!} (\xi_{\text{th}}^{\text{FSO}})^{\frac{\alpha_t \beta_t + \kappa}{4}} G_{1,3}^{2,1} \left[\alpha_t \beta_t \sqrt{\frac{\xi_{\text{th}}^{\text{FSO}}}{\bar{\xi}_{\text{FSO}}^{\text{PL}}}} \left| \frac{\alpha_t + \beta_t}{2}, -2\kappa \right. \right] \quad (2.29)$$

Ομοίως, ο όρος $C_{\text{FSO}}^{\text{SL}}(\xi_{\text{th}}^{\text{mix}})$ μπορεί να υπολογιστεί αν στη σχέση 2.27 αντικατασταθεί το $\xi_{\text{th}}^{\text{FSO}}$ με το $\xi_{\text{th}}^{\text{mix}}$. Ως εκ τούτου, η μέση χωρητικότητα του συστήματος όταν η εφεδρική ζεύξη είναι ενεργή, δίνεται από την παρακάτω σχέση [64]:

$$C^{\text{mix}}(\xi_{\text{th}}^{\text{mix}}) = \int_{\xi_{\text{th}}^{\text{mix}}}^{\infty} \log_2(1 + \xi_{\text{mix}}) f_{\xi_{\text{mix}}}(\xi_{\text{mix}}) d\xi_{\text{mix}} \quad (2.30)$$

Έπειτα από μερικούς μαθηματικούς χειρισμούς η 2.19 μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα τεσσάρων μεμονωμένων ολοκληρωμάτων, $C^{\text{mix}}(\xi_{\text{th}}^{\text{mix}}) = (C_1 - C_2) + (C_3 - C_4)$, τα οποία εκφράζονται ως ακολούθως [64]:

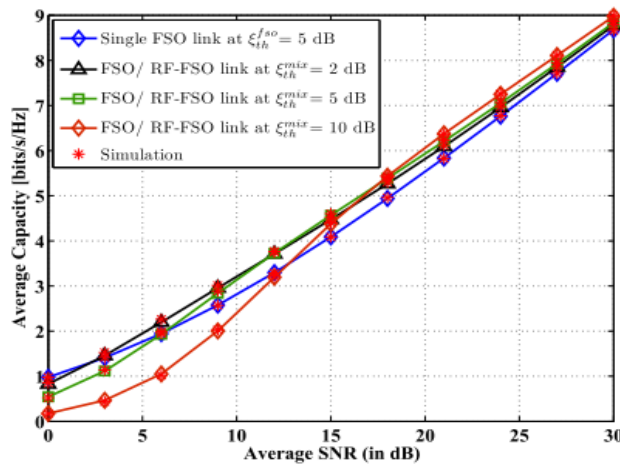
$$C_1 = \frac{K_1}{\ln(2)} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\kappa+1}}{\kappa (\bar{\xi}_{\text{mix}})^{\kappa \tau_1}} G_{2,6}^{6,1} \left[\omega_{\bar{\xi}_{\text{mix}}} \right]_{1-\tau_1, \mathcal{P}}^{1-\kappa-\tau_1-\tau_1} \quad (2.31)$$

$$C_2 = \frac{K_1}{\ln(2)} \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\nu+1}}{\nu} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\kappa}}{\kappa!} (\xi_{\text{th}}^{\text{mix}})^{\nu+\tau_1+\kappa} G_{2,7}^{6,1} \left[\omega_{\xi_{\text{th}}^{\text{mix}}} \right]_{1-\tau_1, \mathcal{P}-\nu-\tau_1-\kappa}^{1-\nu-\tau_1-\kappa-\tau_1} \quad (2.32)$$

$$C_3 = \frac{K_1}{\ln(2)} \sum_{\kappa=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\tau_1}}{\kappa (\bar{\xi}_{\text{mix}})^{(\tau_1+\kappa+2)}} G_{1,5}^{5,1} \left[\omega_{\bar{\xi}_{\text{mix}}} \right]_{\mathcal{P}}^{-\tau_1-\kappa} \quad (2.33)$$

$$C_4 = \frac{K_1}{\ln(2)\bar{\xi}_{\text{mix}}} \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\nu+1}}{\nu} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\kappa}}{\kappa!} (\xi_{\text{th}}^{\text{mix}})^{\tau_1+\nu+\kappa+1} G_{1,6}^{5,1} \left[\omega \xi_{\text{th}}^{\text{mix}} \middle| \begin{matrix} \tau_1-\nu-\kappa \\ \mathcal{P}-\tau_1-\nu-\kappa-1 \end{matrix} \right] \quad (2.34)$$

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, παρατηρούμε ότι η χωρητικότητα του συστήματος για χαμηλές τιμές του μέσου SNR (δηλαδή κακός δίαυλος επικοινωνίας) είναι μικρή, ενώ καθώς η τιμή του μέσου SNR λαμβάνει όλο και μεγαλύτερες τιμές (δηλαδή βελτιώνονται οι συνθήκες διαύλου επικοινωνίας) βαίνει διαρκώς αυξανόμενη, καθώς υπάρχει η δυνατότητα το σύστημα να μεταπίπτει σε μεγαλύτερα σχήματα διαμόρφωσης.



Εικόνα 2.8: Η μέση χωρητικότητα συναρτήσει του SNR³ [64]

³ Για την επιβεβαίωση των μαθηματικών μοντέλων εκτελέστηκε προσομοίωση Monte – Carlo και οι τιμές για τις παραμέτρους τυρβώδους ροής είναι ($\alpha_i=5.07$, $\beta_i=1.53$). Η RF ζεύξη, μεταξύ πομπού – αναμεταδότη, θεωρήθηκε ότι υπόκειται σε διαλείψεις Rayleigh και θεωρώντας μέτρια προς ισχυρή τυρβώδη ροή, οι διαταραχές της FSO ζεύξης περιεγράφηκαν με την κατανομή γάμμα – γάμμα.

Κεφάλαιο 3^ο

Χρήση των FSO επικοινωνιών στα μη επίγεια (Non-Terrestrial - NTN) B5G και 6G δίκτυα

3.1 Εισαγωγή στα Non-Terrestrial δίκτυα

Με την εγκατάσταση των μη επίγειων (NTN) δικτύων, ο οραματισμός για παροχή παγκόσμιας κάλυψης από τα δίκτυα B5G και 6G φαίνεται να επιτυγχάνεται πλήρως. Τα NTN δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα τμήματα του δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των δικτύων ασύρματης πρόσβασης, backhaul και κορμού [67]. Επιπλέον, τα NTN δίκτυα μπορούν να παράσχουν ασύρματη πρόσβαση σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, όπου οι επίγειες υποδομές των δικτύων είναι περιορισμένες ή ανύπαρκτες, όπως για παράδειγμα απομακρυσμένες και μη εξυπηρετούμενες περιοχές.

3.1.1 Τα NTN δίκτυα στο δίκτυο πρόσβασης

Στα αστικά περιβάλλοντα, η ασύρματη πρόσβαση που βασίζεται στα NTN δίκτυα θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μία συμπληρωματική και επικουρική λύση. Για παράδειγμα, μπορούν να αναπτύσσονται και να λειτουργούν για να υποστηρίξουν επικοινωνιακά έκτακτα ή μη μόνιμα γεγονότα, όπως για παράδειγμα συναυλίες, αγώνες ποδοσφαίρου, που για δεδομένο χρονικό διάστημα θα έχουν απαιτήσεις για διακίνηση μεγάλου όγκου δεδομένων. Επίσης, τα NTN δίκτυα μπορούν να παράσχουν στους κινητούς τελικούς χρήστες παγκόσμια πρόσβαση στο δίκτυο, ανεξάρτητα με την γεωγραφική τους θέση. Για παράδειγμα, τελικοί χρήστες που βρίσκονται σε ένα πλοίο στη μέση του ωκεανού ή ταξιδεύουν με τρένο μπορούν να έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο, μέσω των NTN δικτύων, ξεπερνώντας έτσι την απουσία των επίγειων υποδομών. Συνεχίζοντας στο ίδιο μοτίβο, τα NTN δίκτυα είναι μια εξαιρετική εναλλακτική για να παρέχουν επικοινωνιακή κάλυψη, σε περιοχές οι οποίες έχουν πληγεί από φυσικές καταστροφές (σεισμούς, πλημμύρες, φωτιές κ.λπ.) και ενδεχομένως οι επίγειες υποδομές να έχουν καταστραφεί ολοσχερώς ή μερικώς.

3.1.2 Τα NTN δίκτυα στο δίκτυο backhaul

Με βάση όσα έχουν αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, οι ζεύξεις backhaul διασυνδέουν το δίκτυο πρόσβασης με το δίκτυο κορμού (core – backbone network). Η εγκαθίδρυση των εν λόγω συνδέσεων, συνήθως επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας οπτικές ίνες και μικροκυμματικές ζεύξεις σημείου προς σημείου. Η χρήση των οπτικών ινών είναι εξαιρετικά αποδοτική, καθώς παρέχει ένα δίαυλο με τεράστια χωρητικότητα, που δύναται να διακινήσει

τα δεδομένα με πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, σε μεγάλες αποστάσεις, διότι η εξασθένηση του σήματος εντός αυτής είναι πολύ χαμηλή. Επιπλέον, συγκριτικά με τα άλλα μέσα μετάδοσης οι οπτικές είναι παρέχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία, μικρότερη καθυστέρηση και εν γένει καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών.

Ωστόσο, η ανάπτυξη ενός δικτύου οπτικών ινών απαιτείται ένα τεράστιο κόστος επένδυσης καθώς περιλαμβάνει την αγορά του απαιτούμενου υλικοτεχνικού εξοπλισμού και την τοποθέτηση – εγκατάσταση αυτού (εργασίες εκσκαφής, καφάο κ.λπ.). Επίσης, η επέκταση του δικτύου οπτικών ινών σε απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες γεωγραφικές περιοχές (οικισμοί σε πρόποδες βουνού), που είναι εκτός των αστικών κέντρων, μπορεί να γίνει ιδιαίτερα επίπονη και δύσκολη. Επιπρόσθετα, παρόλο που στις μεγάλες πόλεις υπάρχουν οι υποδομές των οπτικών ινών, οι διαδικασίες για την απόκτηση αδειών εκσκαφής, εγκατάστασης και συντήρησης του δικτύου είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες και χρονοβόρες, το οποίο εισάγει πρόσθετους περιορισμούς για την ανάπτυξη δικτύων οπτικών ινών. Για παράδειγμα, στα ασύρματα δίκτυα για να ικανοποιηθεί η πύκνωση του δικτύου χρησιμοποιούνται συνδυαστικά οι μικροκυψέλες, δηλαδή σταθμοί βάσης με μικρή ισχύ εκπομπής και εμβέλεια, με τις μακροκυψέλες, όμως αυτό δεν είναι πολύ εύκολο να γίνει στα δίκτυα οπτικών ινών, λόγω του υψηλού κόστους και της εξάρτησής των από την υπάρχουσα υποδομή.

Ως αποτέλεσμα των περιορισμών που προαναφέρθηκαν και του υψηλού αρχικού κόστους επένδυσης των οπτικών ινών, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι έστρεψαν την προσοχή τους, στην υλοποίηση ασύρματων backhaul ζεύξεων, που προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία όσον αφορά την επέκταση του δικτύου σε απομακρυσμένες και δύσκολα προσπελάσιμες περιοχές. Σύμφωνα με τις προβλέψεις της αγοράς εκτιμάται ότι το 65% των παγκόσμιων backhaul ζεύξεων, στο χρονικό διάστημα 2021-27, θα υλοποιείται από ασύρματες ζεύξεις [68]. Οι τάσεις της αγοράς τάσσονται υπέρ των ασύρματων backhaul ζεύξεων, δίνοντας το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε λύσεις που βασίζονται στα NTN δίκτυα, καθώς είναι οικονομικά αποδοτικότερες ειδικά όταν αναφερόμαστε σε αγροτικές και απομονωμένες, με κακοτράχαλα εδάφη, περιοχές, όπου τα παραδοσιακά επίγεια δίκτυα θα ήταν πολύ δύσκολο να φτάσουν μέχρι εκεί. Ομοίως, οι ασύρματες backhaul, που βασίζονται στα NTN δίκτυα, είναι εξαιρετική επιλογή για την επικοινωνιακή υποστήριξη των μικρών κυψελών στις αστικές περιοχές.

3.1.3 Τα NTN δίκτυα στο δίκτυο κορμού

Τις backhaul ζεύξεις θα μπορούσαμε τις θεωρήσουμε ως δίκτυα διανομής, που μεταφέρουν τα παραγόμενα δεδομένα από τα σημεία πρόσβασης προς τον κορμό του δικτύου. Το δίκτυο κορμού στο μεγαλύτερο

ποσοστό του αποτελείται και υποστηρίζεται από οπτικές ίνες, οι οποίες είναι εγκατεστημένες σε κύριες διαδρομές και διασυνδέουν βασικούς κόμβους, όπως κέντρα δεδομένων (data centers) και τηλεπικοινωνιακά κέντρα, προκειμένου να εξασφαλίζουν την απρόσκοπτη επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών μερών του δικτύου. Με την ανάπτυξη NTN δικτύων κορμού μπορεί να επεκταθεί η συνδεσιμότητα σε απομακρυσμένες και υποεξυπηρετούμενες περιοχές, όπου η υποδομή των επίγειων δικτύων κορμού δεν υπάρχει ή είναι περιορισμένη.

Επιπρόσθετα, τα NTN δίκτυα κορμού μπορούν να συμβάλλουν στη γενικότερη βελτίωση της απόδοσης του τηλεπικοινωνιακού συστήματος, καθώς με τις επιπλέον ανεξάρτητες εναέριες συνδέσεις αποκτά πρόσθετη ανθεκτικότητα και πολλαπλότητα διαδρομών, που συχνά αναφέρεται ως πλεονασμός (redundancy). Συνεπώς, η χρήση των NTN δικτύων κορμού είναι μια μορφή διαφορισμού, που επιτρέπει την ελαχιστοποίηση ή αποφυγή διακοπής συνδέσεων λόγω βλαβών σε καίρια σημεία του δικτύου, τα γνωστά «single point of failure», καθώς αν κάποια βλάβη ή καταστροφή συμβεί στην επίγεια υποδομή θα υπάρχει η δυνατότητα παροχής εναλλακτικών διαδρομών, εξασφαλίζοντας έτσι την αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος.

3.2 Η χρήση των UAV, Drones και δορυφόρων στα δίκτυα B5G και 6G

Τα NTN δίκτυα αποτελούνται από τους εναέριους και διαστημικούς κόμβους. Με τον όρο διαστημικοί κόμβοι εννοούμε τους δορυφόρους, οι οποίοι ανάλογα με το ύψος λειτουργίας διακρίνονται σε χαμηλής (Low Earth Orbit – LEO), μεσαίας (Medium Earth Orbit – MEO) και γεωστατικής τροχιάς (Geostationary Earth Orbit – GEO). Επιπλέον, ως εναέριους κόμβους αναφέρουμε τα μη επανδρωμένα αεροχήματα (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) και τα drones, ήτοι εναέριες πλατφόρμες χαμηλού ύψους (Low Altitude Platform Stations – LAPSs), και τις εναέριες πλατφόρμες μεγάλου ύψους (High Altitude Platform Stations – HAPSs). Οι εναέριες πλατφόρμες μεγάλου ύψους (HAPSs) είναι επίσης γνωστές με τον όρο ψευδο-δορυφόροι μεγάλου ύψους (High Altitude Pseudo Satellites – HAPSs), καθώς έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν στο επίπεδο της στρατόσφαιρας σε ύψος 17 – 22 χλμ. Συνεπώς, το ύψος που επιχειρούν – λειτουργούν οι HAPSs είναι πιο πάνω από το μέγιστο ύψος που εκτελούνται οι εμπορικές αεροπορικές πτήσεις και η μορφή τους είναι σαν αερόστατα (balloons) ή αερόπλοια (airships).

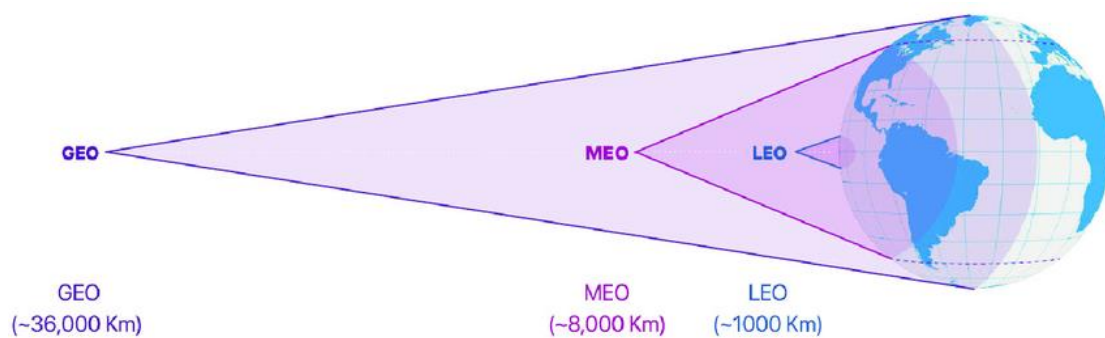
3.2.1 Διαστημικά Δίκτυα

Το βασικό χαρακτηριστικό της υποδομή των διαστημικών δικτύων είναι η χρήση των δορυφόρων, οι οποίοι ανάλογα με το ύψος λειτουργίας τους κατηγοριοποιούνται σε GEO, MEO και LEO [69] και πολύ συνοπτικά οι δυνατότητές τους, έχουν ως ακολούθως:

- GEO: Το επιχειρησιακό ύψος λειτουργίας των γεωστατικών δορυφόρων είναι στα 35786 χλμ (~36000 χλμ). Το χαρακτηριστικό γνώρισμα των GEO δορυφόρων είναι ότι η τροχιά τους ταυτίζεται με την περιστροφή της γης, με αποτέλεσμα η σχετική τους θέση ως προς γη να μην αλλάζει και εμφανίζονται σαν να έχουν σταθερή θέση. Συνεπώς, οι επίγειοι χρήστες βλέπουν το δορυφόρο 24 ώρες το εικοσιτετράωρο.

- MEO: Σε αντίθεση με τους GEO, οι MEO δορυφόροι δεν λειτουργούν σε σταθερό ύψος, αλλά τους συναντάμε σε ύψη, που ανάλογα με την αποστολή τους και τις απαιτήσεις, κυμαίνονται από 2 χλμ έως 36000 χλμ. Η πλειονότητα των MEO δορυφόρων λειτουργεί σε ύψη από 8000 χλμ έως 20000 χλμ. Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης δορυφόρων στην τροχιά MEO είναι ότι επιτυγχάνεται μια εξισορρόπηση μεταξύ της καθυστέρησης διάδοσης και της περιοχής κάλυψης. Το μειονέκτημα των MEO δορυφόρων έγκειται στο γεγονός ότι είναι ορατοί για μερικές ώρες και απαιτούνται διαδικασίες διαπομπής.

- LEO: Το επιχειρησιακό ύψος λειτουργίας των LEO δορυφόρων είναι περί τα 1000 χλμ, από την επιφάνεια της γης. Συνεπώς, λόγω του μικρότερου ύψους λειτουργίας σε σχέση με τις άλλες δύο κατηγορίες, περιστρέφονται πολύ γρηγορότερα από τη γη, με αποτέλεσμα το χρονικό διάστημα που είναι ορατοί είναι πολύ μικρότερο. Ωστόσο, αυτή η εγγύτητα στη γη δίνει το πλεονέκτημα υποστήριξης επικοινωνιών με μικρή καθυστέρηση και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Το tradeoff της εγγύτητας είναι η μικρότερη ακτίνα κάλυψης συγκριτικά με τις άλλες δύο κατηγορίες MEO και GEO.



Εικόνα 3.1: Σύγκριση της ακτίνας κάλυψης ανάλογα με το ύψος λειτουργίας του δορυφόρου [70]

Παράμετρος	Κατηγορία Δορυφόρου		
	LEO	MEO	GEO
Επιχειρησιακό ύψος λειτουργίας	700 μ – 1400 χλμ	10000 – 15000 χλμ	36000 χλμ
Τροχιακή περίοδος	10 - 40 min	2 – 8 h	24 h
Χρόνος ορατότητας	17 min	130 min	24 h
Πλήθος απαιτούμενων δορυφόρων ανά πάροχο	40 – 70	10 – 15	3 - 5
Καθυστέρηση	6.6 ms	66 ms	240 ms
Παροχή παγκόσμιας κάλυψης	Ναι	Ναι	Όχι
Απώλειες διάδοσης	Χαμηλές	Υψηλές	Πολύ υψηλές
Χρόνος ζωής δορυφόρου	3 – 7 yrs	10 – 15 yrs	10 – 15 yrs

Πίνακας 4 Συγκριτικός πίνακας για τις κατηγορίες των δορυφόρων [71,72]

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των διαστημικών δικτύων είναι ότι παρέχουν μεγάλη ακτίνα κάλυψης, μεγάλη χωρητικότητα και ανεξαρτησία από τη μορφολογία του εδάφους. Συνεπώς, η χρησιμοποίησή τους συμπληρωματικά με τα επίγεια δίκτυα για την παροχή επικοινωνιακής κάλυψης σε απομακρυσμένες περιοχές, υποστήριξη επικοινωνιών έκτακτης ανάγκης και υπηρεσιών ευρυεκπομπής, είναι η ενδεδειγμένη λύση για τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, σε ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα μπορούν να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε τεχνολογίας, ώστε να καλύψουν τις αδυναμίες και να επιτύχουν το βέλτιστο αποτέλεσμα για το δίκτυο. Επιπλέον, η κοινή χρήση του φάσματος μεταξύ των επίγειων και διαστημικών δικτύων είναι ένας εύκολος τρόπος για να αποσυμφορηθεί το ήδη βεβαρυσμένο φάσμα, με tradeoff τις παρεμβολές μεταξύ των δύο δικτύων, που είναι αναπόφευκτες όταν μιλάμε για διαμοιρασμό του φάσματος.

3.2.2 Εναέρια Δίκτυα

Τα εναέρια δίκτυα είναι κατανομημένα μεταξύ των επίγειων και διαστημικών δικτύων σε διάφορα ύψη ανάλογα με την πλατφόρμα (LAPS ή HAPS). Η υποδομή τους απαρτίζεται από πτητικά μέσα, όπως αερόπλοια, UAV – drones, balloons (αερόστατα). Οι εναέριοι σταθμοί βάσης μπορούν να λειτουργήσουν σαν επέκταση των επίγειων δικτύων, παρέχοντας κάλυψη σε μεγαλύτερη γεωγραφική περιοχή και εξυπηρετώντας περισσότερους τελικούς

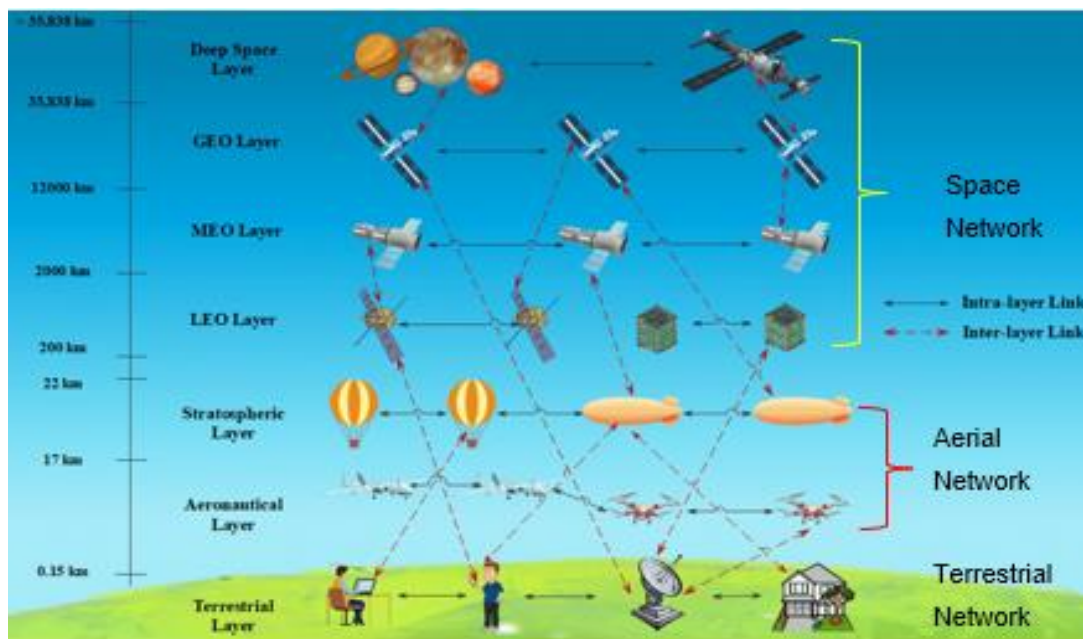
χρήστες. Επίσης, μπορούν να αναλάβουν ρόλο αναμεταδότη μεταξύ των επίγειων και διαστημικών δικτύων. Επιπλέον, δεδομένου ότι υπάρχει μεγάλη απόσταση μεταξύ των επίγειων και εναέριων δικτύων, καθίσταται δυνατή η κοινή χρήση του φάσματος, με ότι αυτό συνεπάγεται στο επίπεδο παρεμβολών μεταξύ των διαφορετικών δικτύων. Οι εναέριες πλατφόρμες ανάλογα με του ύψος λειτουργίας κατηγοριοποιούνται σε LAPS και HAPS, έχοντας τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- LAPS: Οι εναέριες πλατφόρμες LAPS (UAV – drones) είναι καταναμημένες σε διάφορα ύψη λειτουργίας, που εκτείνονται από λίγο πάνω από το έδαφος και μπορούν να φτάσουν έως τα 10 χλμ. [73]. Τα UAV και τα drones κατασκευαστικά συνήθως έχουν σταθερά φτερά ή είναι ελικοφόρα. Τα ελικοφόρα UAV – drones είναι σχεδιασμένα για να επιχειρούν σε ύψη μερικών χιλιομέτρων και έχουν πολλαπλές κατασκευαστικές εκδοχές, ανάλογα με το πλήθος των ελίκων (quadcopters, hexacopters κ.λπ.), που φέρουν επί της ατράκτου και των δυνατοτήτων του κινητήρα τους. Αυτού του είδους τα UAV – drones, εκτελούν κάθετη προσγείωση και απογείωση (Vertical Take-off Landing – VTOL), χρησιμοποιώντας τους έλικες ως μέσο για να δημιουργήσουν ώθηση προς τα πάνω και να διατηρούνται σε πτήση. Επιπλέον, προσαρμόζοντας την ταχύτητα περιστροφής και τις γωνίες των ελίκων, τα UAV μπορούν να αλλάζουν ύψος, κατεύθυνση και προσανατολισμό. Από την άλλη πλευρά, τα UAV – drones με σταθερά φτερά κατασκευάζονται για να επιχειρούν σε μεγαλύτερα ύψη, περίπου στο επίπεδο της τροπόσφαιρας (<17 χλμ). Τα UAV – drones αυτής της κατηγορίας, χρειάζονται διάδρομο απογείωσης ή ειδικό καταπέλτη εκτόξευσης για να ξεκινήσουν την πτήση τους.

Τα τελευταία χρόνια, το πεδίο εφαρμογής των εναέριων πλατφορμών LAPS εξελίσσεται και επεκτείνεται συνεχώς, διεισδύοντας σε σημαντικούς τομείς, όπως για παράδειγμα η έρευνα και διάσωση, σε συνθήκες εκτάκτων αναγκών, και οι επικοινωνίες, παρέχοντας επέκταση στην εμβέλεια του τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, τα UAV – drones συνήθως λειτουργούν σε μη αδειοδοτημένες μπάντες συχνοτήτων και δεδομένου ότι στα σύγχρονα δίκτυα θα υπάρξει μια τεράστια αύξηση στις ασύρματες συσκευές είναι αναγκαίο να εξεταστεί η εξεύρεση νέων φασματικών πόρων για να βελτιωθεί η χωρητικότητα των LAPS δικτύων και να είναι σε θέση να υποστηρίξουν τις αυξημένες απαιτήσεις. Επιπλέον, μια ενναλακτική στην προηγούμενη πρόκληση είναι η αναχρησιμοποίηση του φάσματος των επίγειων δικτύων, για τις επικοινωνίες UAV προς UAV, που θα εκτελούνται σε ασφαλή απόσταση από τη γη.

- HAPS: Οι εναέριες πλατφόρμες HAPS μπορούν να θεωρηθούν ως ένα συμπληρωματικό δίκτυο των επίγειων ή δορυφορικών δικτύων, όπου η συνήθης επιχειρησιακή τους λειτουργία λαμβάνει χώρα σε ύψη, που εκτείνονται

από 17 έως 22 χλμ. Η χρήση τους διαδίδεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια, λόγω της γρήγορης και εύκολης ανάπτυξης, της ευελιξίας και της επέκτασης κάλυψης, που προσφέρουν στο σύστημα. Συγκριτικά με τα επίγεια δίκτυα, οι πλατφόρμες HAPS δύνανται να προσφέρουν μεγαλύτερη εμβέλεια στο σύστημα, ως εκ τούτου μια υβριδική αρχιτεκτονική θα μπορούσε να αυξήσει την εμβέλεια και την αποδοτικότητα του δικτύου. Επιπλέον, συγκρίνοντας τις πλατφόρμες HAPS με τα διαστημικά δίκτυα παρουσιάζουν πολύ μικρότερη καθυστέρηση διάδοσης, συνεπώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αναμεταδότες μεταξύ των επίγειων τελικών χρηστών και διαστημικών δικτύων. Ομοίως, με προηγουμένως ο διαμοιρασμός του φάσματος ανάμεσα στα επίγεια και HAPS δίκτυα είναι εφικτός για επίτευξη καλύτερης φασματικής απόδοσης.



Εικόνα 3.2: Απεικόνιση ενοποιημένου συστήματος επικοινωνιών [6]

3.2.3 Ενοποιημένα Διαστημικά – Εναέρια – Επίγεια Δίκτυα

Στην παρούσα φάση, το ενδιαφέρον των ερευνητών εστιάζεται στις επικοινωνίες, που θα λειτουργούν σε σχετικά μεγάλα ύψη. Με την πλήρη ανάπτυξη και εμπορευματοποίηση των 5G συστημάτων, όλο και περισσότερες συσκευές θα κάνουν την εμφάνισή τους και θα πρέπει να εξυπηρετηθούν από τα διαστημικά και εναέρια δίκτυα, καθώς καθίσταται σαφές ότι η υπάρχουσα επίγεια υποδομή των κυβελωτών συστημάτων δεν είναι σε θέση να παράσχει μια τόσο εκτεταμένη κάλυψη. Επιπλέον, η παροχή παγκόσμιας τρισδιάστατης κάλυψης, οπουδήποτε και οποτεδήποτε, που έχει προαναγγελθεί με την έλευση των 5G και 6G δικτύων, κάνει ακόμη μεγαλύτερη την ανάγκη για ύπαρξη ενός ενοποιημένου συστήματος επικοινωνιών, που θα λειτουργούν απρόσκοπτα αρμονικά και συνεργατικά τα διαστημικά, εναέρια και επίγεια δίκτυα. Σε αυτήν

την υβριδική αρχιτεκτονική οι σταθμοί βάσης που παρέχουν πρόσβαση στο δίκτυο δεν θα βρίσκονται μόνο στις επίγειες υποδομές, αλλά θα υπάρχουν UAV – drones και δορυφόροι που θα αναλαμβάνουν ρόλο σταθμού βάσης ανάλογα με τις συνθήκες και σενάριο λειτουργίας, με σκοπό να αυξήσουν την εμβέλεια και τη χωρητικότητα του δικτύου.

3.2.4 Σενάρια εφαρμογών ενοποιημένου δικτύου

Συγκρίνοντας τα επίγεια με τα εναέρια και διαστημικά δίκτυα, μπορούμε πολύ ευκολά να δούμε ότι η ανάπτυξη των δεύτερων παρουσιάζει μεγαλύτερη ευελιξία και είναι ανεξάρτητη από την μορφολογία της περιοχής που θα καλύψει. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται ευρέως για να παρέχουν επέκταση της γεωγραφικής κάλυψης και γρήγορη αποκατάσταση των επικοινωνιών σε περιπτώσεις εκτάκτων αναγκών.

Εξετάζοντας τις επικοινωνίες εκτάκτων αναγκών, ξεκινάμε από τη διαπίστωση ότι οι υποδομές των επίγειων δικτύων είναι ιδιαίτερος ευάλωτες σε έκτακτα φαινόμενα (πλημμύρες, φωτιές, σεισμοί, κ.λπ.), καθώς λαμβάνουν χώρα βλάβες στον εξοπλισμό, που καθιστούν το σύστημα ανενεργό. Συνεπώς, επειδή τα εναερία και διαστημικά δίκτυα από τη φύση τους είναι υποδομές που δύνανται να αναπτυχθούν εύκολα και γρήγορα, μπορούν να συνδράμουν στην αποκατάσταση των επικοινωνιών των περιοχών που έχουν πληγεί.

Όσον αφορά την επέκταση της κάλυψης του συστήματος, γνωρίζουμε ότι δεν είναι οικονομικά αποδοτικό να γίνει με εγκατάσταση νέων σταθμών βάσης, διότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων οι περιοχές που θέλουμε να καλύψουμε είναι απομακρυσμένες και αραιοκατοικημένες, οπότε η απόσβεση μιας υψηλού κόστους επένδυσης θα είναι αρκετά δύσκολη. Συνεπώς, τα εναέρια και διαστημικά δίκτυα είναι μια πολύ καλή επιλογή για την επέκταση της γεωγραφικής κάλυψης. Επιπλέον, όταν λειτουργήσουν συμπληρωματικά με τα επίγεια δίκτυα μπορεί να επιτευχθεί αποσυμφόρηση του δικτύου είτε παρέχοντας εναλλακτικές διαδρομές είτε εξυπηρετώντας απευθείας μέρος των τελικών χρηστών. Παραμένοντας στο ίδιο μήκος κύματος, τα εναέρια και τα διαστημικά δίκτυα μπορούν να παράσχουν επικοινωνιακή κάλυψη κατά απαίτηση, όπως για παράδειγμα σε ένα στάδιο, όπου λόγω του μεγάλου αριθμού των τελικών χρηστών, που θα βρεθούν συγκεντρωμένοι σε αυτό το σημείο πέρα από τις υπηρεσίες των θεατών θα επηρεαστεί και η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών στην ευρύτερη περιοχή.

Συνοψίζοντας, τα εναέρια και διαστημικά δίκτυα, λόγω του χαμηλού κόστους, της ευκολίας ανάπτυξης και της επέκτασης της κάλυψης που παρέχουν, είναι μια πολύ καλή επιλογή, που θα συμπληρώσει τα επίγεια δίκτυα. Ωστόσο, θέματα που αφορούν την περιορισμένη χωρητικότητα και τη

σταθερότητα της ζεύξης είναι ανοικτές προκλήσεις, που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής και περαιτέρω εξέτασης, για να επιτευχθούν ακόμη περισσότερες βελτιώσεις.

3.3 Τρόποι αξιοποίησης των οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου για βελτίωση της επίδοσης των Non-Terrestrial δικτύων

3.3.1 Υλοποίηση backhaul δικτύου με χρήση FSO συστημάτων

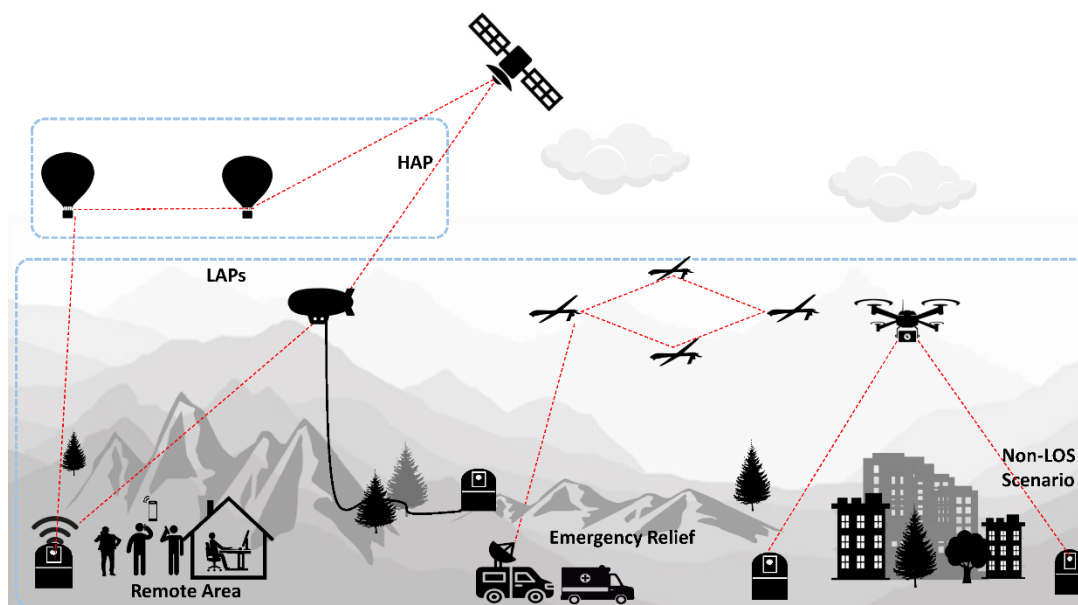
Η αρχιτεκτονική ενός backhaul δικτύου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σενάριο χρήσης, καθώς η ανάπτυξη μιας αρχιτεκτονικής backhaul ενός επιπέδου είναι επαρκής για αγροτικές περιοχές, όμως μπορεί να απαιτούνται αρχιτεκτονικές πολλαπλών επιπέδων όταν αναφερόμαστε σε αστικές περιοχές, όπου η αποκατάσταση ζεύξεων LOS είναι αρκετά πιο δύσκολη [74]. Για να υλοποιηθούν αυτά τα backhaul δίκτυα θα χρησιμοποιηθούν ευρέως οι εναέριες πλατφόρμες HAPS, που λειτουργούν σε μεγάλα ύψη παρέχοντας εκτεταμένη κάλυψη, και LAPS που επιχειρούν σε χαμηλότερα ύψη, συμπληρώνοντας τις αδυναμίες των HAPS.

Για παράδειγμα στην αρχιτεκτονική ενός επιπέδου, οι σταθμοί βάσης θα συνδέονται απευθείας με την πλατφόρμα HAPS, που θα τους εξυπηρετεί. Οι εναέριες πλατφόρμες HAPS διαγράφουν κυκλική τροχιά με σταθερή ταχύτητα στο επίπεδο της στρατόσφαιρας. Προφανώς, για την επίτευξη της συνεχόμενης κάλυψης απαιτούνται περισσότερα του ενός συστήματα, που θα εκτελούν διαφορετικές κυκλικές τροχιές. Συνεπώς, για να επιτευχθεί η συνολική κάλυψη μιας περιοχής, θα πρέπει να τηρηθεί σε μικρότερες κυψέλες και ο σταθμός βάσης που εξυπηρετεί την κυψέλη να αποκαθιστά μια FSO ζεύξη με την εναέρια πλατφόρμα, που τον εξυπηρετεί.

Από την άλλη πλευρά, στην αρχιτεκτονική πολλαπλών επιπέδων οι πλατφόρμες HAPS και LAPS, λειτουργούν συνεργατικά. Οι LAPS (UAV – drones), επιχειρούν σε χαμηλότερα ύψη και μπορούν να έχουν σχεδόν σταθερή θέση, καθώς δεν απαιτείται να εκτελούν προκαθορισμένοι τροχιά. Επομένως, σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ σταθμού βάσης και HAPS, μπορούν να αναπτυχθούν όσα ενδιάμεσα επίπεδα απαιτούνται από LAPS και μέσω πολλαπλών αλμάτων FSO ζεύξεων, να αποκαθίσταται η επικοινωνία των δύο άκρων.

Η υλοποίηση των συγκεκριμένων ζεύξεων μπορεί να φαντάζει απλή, ωστόσο οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι τόσοι πολλοί, που στην βιβλιογραφία υπάρχει μεγάλος αριθμός ερευνών, που διεξάγονται σε αυτό το πλαίσιο, προκειμένου να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα αυτών των

backhaul FSO ζεύξεων. Μέρος αυτών των παραμέτρων έχει αναλυθεί εκτενώς στο 1^ο κεφάλαιο του παρόντος πονήματος.



Εικόνα 3.3: Αρχιτεκτονική backhaul δικτύου με χρήση FSO συστημάτων [75]

3.3.2 Υλοποίηση inter – satellite ζεύξεων με χρήση FSO συστημάτων

Τα παραδοσιακά δορυφορικά συστήματα, όπως το Iridium και Globalstar, που αναπτύχθηκαν το 1990, είναι πολύ δύσκολο να συναγωνιστούν σε ρυθμούς μετάδοσης τα επίγεια δίκτυα, λόγω του πολύ υψηλού κόστους, του περιορισμένου αριθμού δορυφόρων και την έλλειψη φάσματος. Με την πάροδο των ετών και την εξέλιξη της τεχνολογίας, στις μέρες μας έχουν αναπτυχθεί διάφορα δορυφορικά συστήματα, όπως το Starlink, Telesat και OneWeb, που χρησιμοποιούν μεγάλο πλήθος LEO δορυφόρων μικρού μεγέθους, βάρους και ισχύος. Αυτού του είδους τα συστήματα, όπου ο αστερισμός είναι μεγάλης κλίμακας (της τάξης των χιλιάδων δορυφόρων), μπορούν να επιτύχουν ρυθμούς μετάδοσης που θα φτάνουν τα Tbps. Παρατηρώντας, τα παραπάνω συστήματα μπορούμε να δούμε ότι η χωρητικότητα του Telesat μπορεί να πλησιάσει αυτή του OneWeb [76], χρησιμοποιώντας αστερισμό με τους μισούς δορυφόρους, απλά και μόνο επειδή οι δορυφόροι επικοινωνούν απευθείας με inter – satellite ζεύξεις και όχι μέσω των επίγειων σταθμών. Συνεπώς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η χρήση των inter – satellite ζεύξεων μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την επίδοση του συστήματος.

Οι οπτικοί πομποί που χρησιμοποιούνται σε ενεστώτα χρόνο, είναι τα λέιζερ στέρεας κατάστασης καθώς είναι μονοχρωματικά, επιτυγχάνουν υψηλή συγκέντρωση ενέργειας με μεγάλη κατευθυντικότητα και έχουν πολύ μικρή χρονική απόκριση, επιτρέποντας τη χρήση ευρυζωνικής διαμόρφωσης. Τα

μειονεκτήματα των λέιζερ στέρεας κατάστασης είναι η παραγωγή υψηλών θερμοκρασιών και η χαμηλή ενεργειακή απόδοση, που είναι ζωτικής σημασίας για τη διάρκεια ζωής ενός δορυφορικού συστήματος [77]. Οι δίοδοι λέιζερ, που θα μπορούσαν να αποτελέσουν μία εναλλακτική, είναι μεν ενεργειακά αποδοτικοί και μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν σε επίπεδο τσιπ, όμως η ποιότητα της ακτινοβολίας εξόδου δεν είναι επαρκώς κατευθυντική και απαιτεί να συγκεντρωθεί μέσω ενός οπτικού συστήματος.

Μια τυπική αρχιτεκτονική ενός δορυφορικού συστήματος που χρησιμοποιεί inter – satellite ζεύξεις, περιλαμβάνει τα επίπεδα GEO, MEO, LEO και το επίπεδο της γης. Οι δορυφόροι στο επίπεδο LEO διασυνδέονται με inter – satellite ζεύξεις και αποκτούν πρόσβαση στο δίκτυο αποκαθιστώντας επικοινωνία με το επίπεδο της γης. Εν συνεχεία, οι δορυφόροι του επιπέδου LEO λειτουργούν ως αναμεταδότες, για τα υψηλότερα επίπεδα, καθώς λόγω του χαμηλότερου ύψους λειτουργίας απέχουν πολύ λιγότερο από τη γη. Επιπλέον, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται στο διάστημα, ταξιδεύουν ακόμη πιο γρηγορά από ότι στην οπτική ίνα, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι οι inter – satellite ζεύξεις θα μπορούν να καλύψουν μεγάλες αποστάσεις, με εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, που ζωτικής σημασίας για τις εφαρμογές που θα εισάγουν τα δίκτυα B5G και 6G.

Οι δορυφόροι των επιπέδων GEO και MEO, αλληλοεπιδρούν με το επίπεδο LEO ανταλλάσσοντας τόσο πραγματικά δεδομένα όσο και πληροφορίες που αφορούν την κατάσταση του επιπέδου LEO. Επίσης, οι GEO και MEO δορυφόροι μπορούν να στείλουν πληροφορίες ελέγχου, σε μεγάλο πλήθος LEO δορυφόρων, ωστόσο δεν θα πρέπει να είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση καθώς πρέπει να έχουν σωστή και ενημερωμένη εικόνα για την κατάσταση του αστερισμού. Επιπλέον, οι GEO και MEO δορυφόροι είναι κατάλληλοι για να συλλέγουν πληροφορίες για την κατάσταση του επιπέδου LEO και εν συνεχεία να αποστέλλουν εντολές δρομολόγησης και κατανομής πόρων.

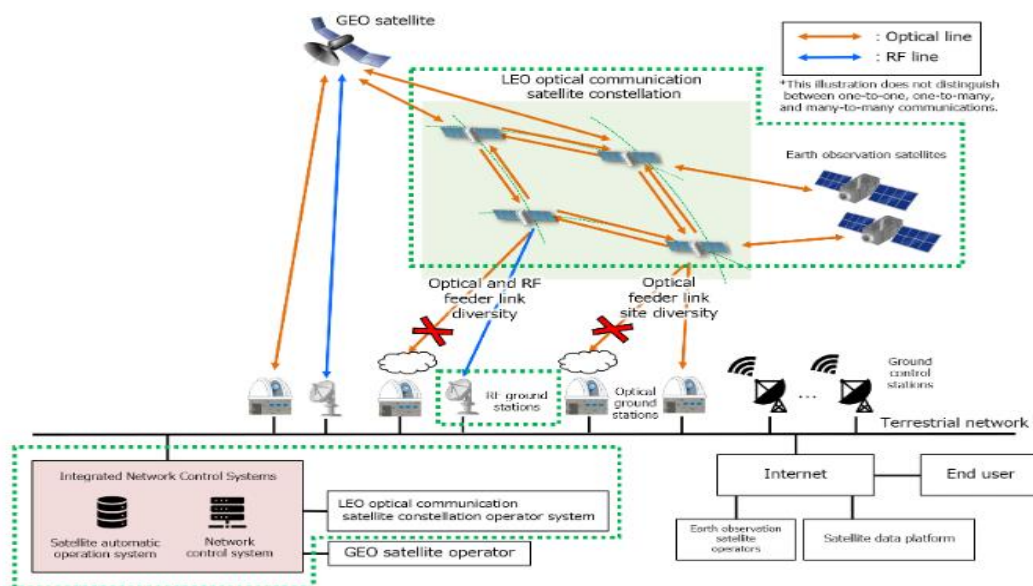
Βασιζόμενοι στα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω για τους οπτικούς πομπούς λέιζερ και τις inter – satellite ζεύξεις καταλήγουμε ότι η επίδραση που θα έχουν στο σύστημα είναι η επέκταση της ακτίνας κάλυψης, η βελτιωμένη επίδοση από πλευράς ρυθμών μετάδοσης και η επαυξημένη ασφάλεια των ζεύξεων.

- Επέκταση της ακτίνας κάλυψης: Για να επιτευχθεί η επέκταση της περιοχής κάλυψης δεν αρκεί μόνο η τοπολογία των δορυφόρων αλλά θα πρέπει να συνδυάζεται με ένα αξιόπιστο σύστημα PAT, καθώς μικρές αποκλίσεις της δέσμης σε μεγάλες αποστάσεις επιφέρουν μεγάλη υποβάθμιση στη ζεύξη,

όποτε η δυναμική ευθυγράμμιση των FSO συστημάτων, είναι ζωτικής σημασίας για την απόδοση του συστήματος.

- **Υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης:** Η επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης μπορεί να επιτευχθεί αξιοποιώντας το μεγάλο εύρος ζώνης του οπτικού φάσματος, όμως δύναται να υποβοηθηθεί ακόμη περισσότερο χρησιμοποιώντας προηγμένα σχήματα διαμόρφωσης και τεχνικές πολυπλεξίας. Η επιλογή σχημάτων ανώτερης τάξης διαμόρφωσης όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν και η χρήση τεχνικών πολυπλεξίας (χρόνου, συχνότητας, μήκους κύματος, πόλωσης) εισάγουν άλλο ένα επίπεδο με το οποίο μπορεί να αυξηθεί η αποδοτικότητα του φάσματος και η χωρητικότητα του συστήματος, όπως απαιτείται στα B5G και 6G δίκτυα.

- **Ασφάλεια ζεύξεων:** Η μεγάλη κατευθυντικότητα και το εξαιρετικά μικρό άνοιγμα της δέσμης του λέιζερ συμβάλλουν σε τεράστιο βαθμό στην ασφάλεια των επικοινωνιών, καθώς είναι πρακτικά αδύνατο ένας κακόβουλος χρήστης να μπορέσει να λάβει το οπτικό σήμα. Επιπλέον, η ακριβής ευθυγράμμιση που απαιτείται μεταξύ πομπού και δέκτη συμβάλλει, κάνει το σύστημα ανθεκτικό στις παρεμβολές, διότι πέρα από τους κόμβους που επικοινωνούν κανείς άλλος δεν θα λάβει οπτική ισχύ. Επιπλέον, μια την ανάπτυξη της κβαντικής τεχνολογίας, η μέθοδος της κβαντικής διανομής κλειδιού (Quantum Distribution Key – QKD) σε συνδυασμό με FSO ζεύξεων θα εισάγει ακόμη μεγαλύτερη ασφάλεια στο σύστημα.



Εικόνα 3.4: Αρχιτεκτονική NTN συστήματος με οπτικές inter – satellite ζεύξεις [78]

3.4 Ανάλυση της επίδοσης – χωρητικότητας των NTN δικτύων

3.4.1 Επίδοση υβριδικού συστήματος RF/FSO για επικοινωνίες εδάφους – αέρος – διαστήματος

3.4.1.1 Μοντελοποίηση του συστήματος

Η ανάλυση, που θα ακολουθήσει, αφορά ένα υβριδικό σύστημα RF/FSO, το οποίο χρησιμοποιείται για την υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου δικτύου για την υποστήριξη επικοινωνιών εδάφους – αέρος – διαστήματος. Θα θεωρήσουμε ότι οι ζεύξεις, που δύνανται να υλοποιηθούν είναι μονού άλματος (σταθμός βάσης – δορυφόρος) και διπλού άλματος (σταθμός βάσης – εναέρια πλατφόρμα – δορυφόρος). Η εναέρια πλατφόρμα θα είναι επιφορτισμένη με τη λειτουργία της αναμετάδοσης, η οποία θα εκτελείται μέσω ενός συστήματος αποκωδικοποίησης – προώθησης (Decode – Forward – DF), που προτιμάται έναντι των συστημάτων ενίσχυσης – προώθησης (Amplify – Forward – AF), που ταυτόχρονα με το σήμα ενισχύουν και το θόρυβο, επιδρώντας αρνητικά στη συνολική επίδοση του συστήματος [79].

Το σήμα βασικής ζώνης που αποστέλλεται από την πηγή (Source – S) και λαμβάνεται στον προορισμό (Destination – D), μέσω την ανοδικής ζεύξης δίνεται από την παρακάτω σχέση [79]:

$$y_{SD}^{FSO} = (\eta_{SD} \frac{P_{GS}^{FSO} G_t^{FSO} G_{rs}^{FSO}}{F_{LSD}} I_{SD})^{b/2} s + n_{SD}^{FSO} \quad (3.1)$$

όπου, η_{SD} ο συντελεστής μετατροπής οπτικού σε ηλεκτρικό, P_{GS}^{FSO} η εκπεμπόμενη οπτική ισχύς του επίγειου σταθμού (Ground Station – GS), G_t^{FSO} το κέρδος εκπομπής του τηλεσκοπίου στον επίγειο σταθμό, G_{rs}^{FSO} το κέρδος λήψης του τηλεσκοπίου στο δορυφόρο, F_L οι απώλειες ελευθέρου χώρου, $I_{SD} = I_{SD}^l I_{SD}^\alpha I_{SD}^P$ οι συνολικές ατμοσφαιρικές απώλειες λόγω των μεταβαλλόμενων καιρικών συνθηκών (I_{SD}^l), της τυρβώδους ροής (I_{SD}^α) και των σφαλμάτων στόχευσης (I_{SD}^P), $b=1$ ή 2 για σχήματα ετερόδυνης ή άμεσης ανίχνευσης, n_{SD}^{FSO} ο προσθετικός λευκός γκαουσιανός θόρυβος (AWGN) στην πλευρά του δέκτη και το σύμβολο s ανήκει σε έναν αστερισμό MPSK.

Για το σενάριο διπλού άλματος το σήμα βασικής ζώνης που εκπέμπεται από την πηγή και λαμβάνεται στον αναμεταδότη μέσω της FSO ζεύξης δίνεται ομοίως [79]:

$$y_{SR}^{FSO} = (\eta_{SR} \frac{P_{GS}^{FSO} G_t^{FSO} G_{rh}^{FSO}}{F_{LSR}} I_{SR})^{b/2} s + n_{SR}^{FSO} \quad (3.2)$$

Ακολουθως, η εκτίμηση του συμβόλου \hat{s} που αποκωδικοποιήθηκε από τον αναμεταδότη εκπέμπεται προς τον προορισμό και το σήμα βασικής ζώνης που λαμβάνεται, έχει ως εξής [79]:

$$y_{RD}^{FSO} = (\eta_{RD} \frac{P_{HAP}^{FSO} G_{th}^{FSO} G_{rs}^{FSO}}{F_{L_{RD}}} I_{RD})^{b/2} \hat{s} + n_{RD}^{FSO} \quad (3.3)$$

Επιπρόσθετα, για τη ζεύξη μονού άλματος το λαμβανόμενο σήμα βασικής ζώνης για την εφεδρική RF ζεύξη, δίνεται από την παρακάτω σχέση [79]:

$$y_{SD}^{RF} = h_{SD} \sqrt{P_{GS}^{RF} g_{SD}^{RF}} s + n_{SD}^{RF} \quad (3.4)$$

όπου, P_{GS}^{RF} η εκπεμπόμενη οπτική ισχύς του επίγειου σταθμού (Ground Station – GS), g_{SD}^{RF} οι απώλειες διαδρομής για την RF ζεύξη και h_{SD} το κέρδος του RF καναλιού θεωρώντας επίπεδες διαλείψεις.

Ομοίως, για την υλοποίηση με δυο άλματα το σήμα βασικής ζώνης, που λαμβάνεται στον αναμεταδότη μέσω της εφεδρική RF ζεύξης, έχει ως ακολούθως [79]:

$$y_{SR}^{RF} = h_{SR} \sqrt{P_{GS}^{RF} g_{SR}^{RF}} s + n_{SR}^{RF} \quad (3.5)$$

Έχοντας πλέον τα λαμβανόμενα σήματα βασικής ζώνης, μπορεί να υπολογιστεί το στιγμιαίο SNR, για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις και δίνονται από τις σχέσεις που ακολουθούν [80]:

$$\gamma_{SD}^{FSO} = \frac{(\eta_{SD} P_{GS}^{FSO} G_t^{FSO} G_{rs}^{FSO} I_{SD})^b}{(F_{L_{SD}})^b (\sigma_{SD}^{FSO})^2} \quad (3.6)$$

$$\gamma_{SR}^{FSO} = \frac{(\eta_{SR} P_{GS}^{FSO} G_t^{FSO} G_{rh}^{FSO} I_{SR})^b}{(F_{L_{SR}})^b (\sigma_{SR}^{FSO})^2} \quad (3.7)$$

$$\gamma_{RD}^{FSO} = \frac{(\eta_{RD} P_{HAP}^{FSO} G_{th}^{FSO} G_{rs}^{FSO} I_{RD})^b}{(F_{L_{RD}})^b (\sigma_{RD}^{FSO})^2} \quad (3.8)$$

όπου, $(\sigma_{XX}^{FSO})^2$ η διακύμανση θορύβου του AWGN καναλιού της FSO ζεύξης.

Συνεπώς, οι αντίστοιχες εκφράσεις, που προκύπτουν για το μέσο SNR, δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις [80]:

$$\Gamma_{SD}^{FSO} = \frac{(\eta_{SD} P_{GS}^{FSO} G_t^{FSO} G_{rs}^{FSO} k_{SD} I_{SD} A_0)^b}{(F_{L_{SD}})^b (\sigma_{SD}^{FSO})^2} \quad (3.9)$$

$$\Gamma_{SR}^{FSO} = \frac{(\eta_{SR} P_{GS}^{FSO} G_t^{FSO} G_{rh}^{FSO} k_{SR} I_{SR} A_0)^b}{(F_{L_{SR}})^b (\sigma_{SR}^{FSO})^2} \quad (3.10)$$

$$\Gamma_{SR}^{FSO} = \frac{(\eta_{RD} P_{HAP}^{FSO} G_{th}^{FSO} G_{rs}^{FSO} k_{SR} I_{RD} A_0)^b}{(F_{L_{RD}})^b (\sigma_{RD}^{FSO})^2} \quad (3.11)$$

όπου, A_0 το κλάσμα της συνολικής ισχύος που συλλέγεται από το άνοιγμα του οπτικού δέκτη, ζ_{xx} οι συντελεστές σφαλμάτων στόχευσης και $\zeta_{xx} = \frac{\zeta_{xx}^2}{\zeta_{xx}^2 + 1}$.

Ομοίως, οι εκφράσεις το στιγμιαίο και μέσο SNR της εφεδρική RF ζεύξης, έχουν ως ακολούθως [79]:

$$\gamma_{SD}^{RF} = \frac{P_{GS}^{RF} g_{SD}^{RF} |h_{SD}|^2}{(\sigma_{SD}^{RF})^2} \quad (3.12)$$

$$\gamma_{SR}^{RF} = \frac{P_{GS}^{RF} g_{SR}^{RF} |h_{SR}|^2}{(\sigma_{SR}^{RF})^2} \quad (3.13)$$

$$\Gamma_{SD}^{RF} = \frac{P_{GS}^{RF} g_{SD}^{RF} \Omega_{SD}}{(\sigma_{SD}^{RF})^2} \quad (3.14)$$

$$\gamma_{SR}^{RF} = \frac{P_{GS}^{RF} g_{SR}^{RF} \Omega_{SR}}{(\sigma_{SR}^{RF})^2} \quad (3.15)$$

όπου, $(\sigma_{xx}^{RF})^2$ η διακύμανση θορύβου του AWGN καναλιού της RF ζεύξης, $\Omega_{xx} = \mathbb{E}[|h_{xx}|^2]$ είναι η μέση ισχύς που λαμβάνεται λόγω LOS, NLOS ή διάχυσης και $\mathbb{E}[*]$ δηλώνει αναμενόμενη τιμή. Η διακύμανση του θορύβου υπολογίζεται από τη σχέση $(\sigma_{xx}^{RF})^2 = P_N N_F$, N_F ο παράγοντας θορύβου του δέκτη, P_N (dB) = $K_{dB} + T_N + BW$, όπου BW το εύρος ζώνης του θορύβου στο δέκτη (σε dBHz), T_N η θερμοκρασία θορύβου του συστήματος (σε dBK) και K_{dB} η σταθερά του Boltzmann, η οποία ισούται με -228.6 dBW/K/Hz.

Οι απώλειες διαδρομής της RF ζεύξης [81] δίνονται από τη σχέση $g_{XX}^{RF} \text{ (dB)} = G_T + G_R - L_F - L_R - L_A - L_O$, όπου G_T και G_R τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης αντιστοίχως, $L_F = 20 \log(4\pi L/\lambda)$ οι απώλειες ελευθέρου χώρου, L_R οι απώλειες λόγω βροχόπτωσης (σε dB/km), L_A οι απώλειες λόγω λοιπών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα και L_O οι πρόσθετες λοιπές απώλειες (κακή στόχευση των κεραιών, λάθος πόλωση, σύζευξης στους κονέκτορες κ.λπ.).

3.4.1.2 Μοντελοποίηση του καναλιού

Για την FSO ζεύξη οι διακυμάνσεις στη λαμβανόμενη οπτική ισχύ λόγω της ατμοσφαιρικής τυρβώδους ροής I_{XX}^α μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας τη γάμμα – γάμμα κατανομή, η οποία είναι η πλέον κατάλληλη για τον χαρακτηρισμό των συνθήκων μέτριας προς δυνατή τυρβώδους ροής. Είναι ένα διπλό στοχαστικό μοντέλο, όπου η ένταση της λαμβανόμενης οπτικής ισχύος I_{XX}^α θεωρείται προϊόν δύο ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών γάμμα, που αντιπροσωπεύουν τις διακυμάνσεις μικρής και μεγάλης κλίμακας. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του I_{XX}^α δίνεται από την παρακάτω σχέση [82]:

$$f_{I_{ii}^\alpha}(x) = \frac{2(\alpha_{ii}\beta_{ii})^{\frac{\alpha_{ii}+\beta_{ii}}{2}} x^{\frac{\alpha_{ii}+\beta_{ii}}{2}-1}}{\Gamma(\alpha_{ii})\Gamma(\beta_{ii})} K_{\alpha_{ii}-\beta_{ii}}(2\sqrt{\alpha_{ii}\beta_{ii}x}), x > 0 \quad (3.16)$$

όπου, $ii \in \{SD, SR, RD\}$, α_{ii} και β_{ii} είναι αντίστοιχα οι παράμετροι μεγάλης και μικρής κλίμακας τυρβώδους ροής σε περιβάλλον σκέδασης, $K_\nu(*)$ η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel ν τάξης και $\Gamma(*)$ το ολοκλήρωμα της συνάρτησης γάμμα.

Η εξασθένηση λόγω σφαλμάτων στόχευσης μπορεί να εκφραστεί ως εξής [79]:

$$I_{ii}^p \approx A_0 \exp\left(-\frac{2r_0^2}{(W_{eq}^{ii})^2}\right) \quad (3.17)$$

όπου, r_0 η ακτινική μετατόπιση μεταξύ του κέντρου της δέσμης και του ανιχνευτή και μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας κατανομή Rayleigh και W_{eq}^{ii} η ισοδύναμη στενή δέσμη στο δέκτη [83]. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του I_{ii}^p δίνεται από την παρακάτω σχέση [84]:

$$f_{I_{ii}^p}(y) = \frac{\zeta_{ii}^2}{A_0 \zeta_{ii}^2} y^{\zeta_{ii}^2-1} \quad (3.18)$$

Οι απώλειες λόγω διάδοσης προσδιορίζονται, χρησιμοποιώντας το νόμο Beers – Lambert και έχουν ως ακολούθως [79]:

$$I_{SD}^l = \exp \left(- \int_0^{L_{SD}} \sigma(z) dz \right) \quad (3.19)$$

$$I_{SR}^l = \exp \left(- \int_0^{L_{SR}} \sigma(z) dz \right) \quad (3.20)$$

όπου, $\sigma(z)$ ο συντελεστής ατμοσφαιρικής εξασθένησης που εξαρτάται από την απόσταση διάδοσης.

Η συνδυασμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατάστασης του ατμοσφαιρικού καναλιού της FSO ζεύξης ($I_{ii} = I_{ii}^l I_{ii}^{\alpha} I_{ii}^p$) μπορεί να γραφεί με όρους της Meijer G – Function [$G_p^m n q (*)$] και να πάρει την παρακάτω μορφή [80]:

$$f_{I_{ii}}(I) = \frac{\zeta_{ii}^2}{\Gamma(\alpha_{ii})\Gamma(\beta_{ii})} G_{1\ 3}^{3\ 0} \left(\frac{\alpha_{ii}\beta_{ii}I}{A_0} \middle| \begin{matrix} \zeta_{ii}^2+1 \\ \zeta_{ii}^2, \alpha_{ii}, \beta_{ii} \end{matrix} \right) \quad (3.21)$$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (ΣΠΠ) του στιγμιαίου SNR της FSO ζεύξης, μπορεί να εξαχθεί από τη 3.21, χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό ισχύος τυχαίας μεταβλητής και η σχέση που προκύπτει, έχει ως εξής [80]:

$$f_{\gamma_{ii}^{FSO}}(I) = \frac{A_{ii}}{\gamma_{ii}} G_{1\ 3}^{3\ 0} \left(D_{ii} \left(\frac{\gamma_{ii}}{\Gamma_{ii}^{FSO}} \right)^{1/b} \middle| \begin{matrix} \zeta_{ii}^2+1 \\ \zeta_{ii}^2, \alpha_{ii}, \beta_{ii} \end{matrix} \right) \quad (3.22)$$

όπου, $A_{ii} = \frac{\zeta_{ii}^2}{b\Gamma(\alpha_{ii})\Gamma(\beta_{ii})}$ και $D_{ii} = \alpha_{ii}\beta_{ii}k_{ii}$

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (ΑΣΚ) του γ_{ii}^{FSO} δίνεται από την ακόλουθη έκφραση [79]:

$$F_{\gamma_{ii}^{FSO}}(\gamma_{ii}) = \mathcal{F}_{ii} \frac{A_{ii}}{\gamma_{ii}} G_{b+1\ 3b+1}^{3b\ 1} \left(\frac{D_{ii}^b \gamma_{ii}}{b^{2b} \Gamma_{ii}^{FSO}} \middle| \begin{matrix} 1, \mathcal{E}_{ii}^1 \\ \mathcal{E}_{ii}^2, 0 \end{matrix} \right) \quad (3.23)$$

όπου, $\mathcal{F}_{ii} = \frac{\zeta_{ii}^2 b^{\alpha_{ii}+\beta_{ii}-2}}{(2\pi)^b \Gamma(\alpha_{ii})\Gamma(\beta_{ii})}$, $\mathcal{E}_{ii}^1 = \left\{ \frac{\zeta_{ii}^2+1}{b}, \dots, \frac{\zeta_{ii}^2+b}{b} \right\}$,

και $\mathcal{E}_{ii}^2 = \left\{ \frac{\zeta_{ii}^2}{b}, \dots, \frac{\zeta_{ii}^2+b-1}{b}, \frac{\alpha_{ii}}{b}, \dots, \frac{\alpha_{ii}+b-1}{b}, \frac{\beta_{ii}}{b}, \dots, \frac{\beta_{ii}+b-1}{b} \right\}$

Στο πλαίσιο της μελέτης, που παρουσιάζουμε για τη μοντελοποίηση του RF έχει θεωρηθεί Shadowed – Rician κατανομή, η οποία ταιριάζει πολύ καλά στην μοντελοποίηση δορυφορικών ζεύξεων. Πρόκειται για ένα γενικευμένο μοντέλο παρουσίασης των RF διαλείψεων του καναλιού, καθώς ενσωματώνει τη Rayleigh και Rician κατανομές. Στο μοντέλο διαλείψεων Shadowed – Rician, το πλάτος της LOS συνιστώσας θεωρείται τυχαίο σε αντίθεση με το Rician μοντέλο και επίσης δύναται να τύχει ευρείας εφαρμογής σε διάφορες μπάντες συχνοτήτων, όπως UHF - μπάντα, C - μπάντα, L – μπάντα, S – μπάντα, Ka – μπάντα.

Η περιβάλλουσα του μοντέλου Shadowed – Rician, για την αναπαράσταση των RF διαλείψεων του καναλιού, μπορεί να γραφεί όπως παρακάτω [85]:

$$h_{ii}(t) = A(t) \exp(j\alpha(t)) + Z(t) \exp(j\zeta_0) \quad (3.24)$$

όπου, $\alpha(t)$ η στάσιμη τυχαία διαδικασία της φάσης που ακολουθεί κανονική κατανομή από $[0, 2\pi)$, ζ_0 η ντετερμινιστική φάση της LOS συνιστώσας. Σημειώνουμε επίσης ότι οι στάσιμες ανεξάρτητες τυχαίες διαδικασίες $A(t)$ και $Z(t)$ εκφράζουν το πλάτος των LOS και NLOS συνιστωσών και ακολουθούν τη Rayleigh και Nakagami-m κατανομές, αντιστοίχως.

Συνεπώς, η ΣΠΠ της Shadowed – Rician περιβάλλουσας του κέρδους των διαλείψεων του καναλιού h_{ii} δίνεται από την ακόλουθη έκφραση [79]:

$$f_{|h_{ii}|}(h') = \left(\frac{2b_1 m_1}{2b_1 m_1 \Omega_1} \right)^{m_1} \frac{h'}{b_1} \exp\left(-\frac{(h')^2}{2b_1} \right) {}_1F_1(m_1; 1; \frac{\Omega_1 (h')^2}{2b_1(2b_1 m_1 + \Omega_1)}) \quad (3.25)$$

όπου, ${}_1F_1$ η «συρρέουσα» υπεργεωμετρική συνάρτηση, $2b_1$ η μέση ισχύς των NLOS συνιστωσών, Ω_1 η μέση ισχύς των LOS συνιστωσών και $0 \leq m_1 \leq \infty$ η παράμετρος έντασης των διαλείψεων Nakagami-m.

Εφαρμόζοντας μετασχηματισμό ισχύος της τυχαίας μεταβλητής της 3.25 χρησιμοποιώντας τις 3.12 – 3.15, αποκτούμε τη ΣΠΠ του στιγμιαίου SNR της RF ζεύξης, η οποία μπορεί να γραφεί, όπως παρακάτω [79]:

$$f_{\gamma_{ii}^{RF}}(\gamma'_{ii}) = \frac{\Omega_{ii} \alpha_1}{\Gamma_{ii}^{RF}} \exp\left(-\frac{\beta_1 \Omega_{ii} \gamma'_{ii}}{\Gamma_{ii}^{RF}} \right) {}_1F_1(m_1; 1; \frac{\Omega_{ii} \delta_1 \gamma'_{ii}}{\Gamma_{ii}^{RF}}) \quad (3.26)$$

όπου, $\Omega_{ii} = 2b_1 + \Omega_1$, $\alpha_1 = \frac{(2b_1 m_1 / (2b_1 m_1 + \Omega_1))^{m_1}}{2b_1}$, $\beta_1 = \frac{1}{2b_1}$ και $\delta_1 = \frac{0.5 \Omega_1}{2b_1^2 m_1 + b_1 \Omega_1}$.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για $m_1 = 0$ και $m_1 = \infty$, η νόρμα του h_{ii} ακολουθεί τις Rayleigh και Rician κατανομές, αντιστοίχως.

Τέλος, η ΑΣΚ του γ_{ii}^{RF} , χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Kummer, δίνεται από την ακόλουθη σχέση [86]:

$$F_{\gamma_{ii}^{RF}}(\gamma'_{ii}) = \sum_{\kappa_1}^{m_1-1} \frac{\Omega_{ii} \alpha_1 \psi(\kappa_1)}{((\beta_1 - \delta_1) \Omega_{ii})^{\kappa_1+1}} \times \gamma \left(\kappa_1 + 1, \frac{(\beta_1 - \delta_1) \gamma'_{ii} \Omega_{ii}}{\Gamma_{ii}^{RF}} \right) \quad (3.27)$$

όπου, $\psi(\kappa_1) = \frac{(m_1-1)! \delta_1^{\kappa_1} (\Omega_1)^{\kappa_1}}{(m_1-1-\kappa_1)! (\kappa_1!)^2}$ και $\gamma(\cdot, \cdot)$ αναπαριστά την ατελή συνάρτηση γαμμά.

3.4.1.3 Ανάλυση επίδοσης

Σε αυτή την υποπαράγραφο θα παραθέσουμε την ανάλυση της επίδοσης αυτών των συστημάτων, μέσω του προσδιορισμού των πιθανοτήτων αποκοπής και λανθασμένου συμβόλου (Symbol Error Probability – SEP). Επιπλέον, θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με την ασυμπτωτική ανάλυση, προκειμένου να προσδιορίσουμε το διαφορικό κέρδος της προτεινόμενης μοντελοποίησης του συστήματος.

Το υβριδικό RF/FSO σύστημα μονού άλματος, περνάει στην αποκοπή όταν ταυτόχρονα για την FSO και RF ζεύξη το SNR, που επιτυγχάνουν είναι μικρότερο από την κατώτερη αποδεκτή τιμή γ_{th}^{FSO} και γ_{th}^{RF} αντιστοίχως. Συνεπώς, η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται, από την παρακάτω σχέση [79]:

$$P_{SH}^{out} = F_{\gamma_{SD}^{FSO}}(\gamma_{th}^{FSO}) F_{\gamma_{SD}^{RF}}(\gamma_{th}^{RF}) \quad (3.28)$$

όπου, οι συναρτήσεις αθροιστικής κατανομής για τις FSO και RF ζεύξεις δίνονται από τις σχέσεις 3.23 και 3.27, αντιστοίχως.

Ομοίως, ένα δορυφορικό σύστημα, διπλού άλματος, που αποτελείται από FSO και RF/FSO ζεύξεις, δεν περνάει στην αποκοπή όταν και οι δύο ζεύξεις έχουν SNR μεγαλύτερο από τις αντίστοιχες τιμές κατωφλίου. Ως εκ τούτου, η πιθανότητα αποκοπής του εν λόγω συστήματος, έχει ως εξής [79]:

$$P_{DH}^{out} = 1 - \{(1 - P_{SR}^{out})(1 - P_{RD}^{out})\} = P_{SR}^{out} + P_{RD}^{out} - P_{SR}^{out} P_{RD}^{out} \quad (3.29)$$

όπου, για τις μεμονωμένες πιθανότητες αποκοπής έχουμε $P_{RD}^{out} = F_{\gamma_{RD}^{FSO}}(\gamma_{th}^{FSO})$ και $P_{SR}^{out} = F_{\gamma_{SR}^{FSO}}(\gamma_{th}^{FSO}) F_{\gamma_{SR}^{RF}}(\gamma_{th}^{RF})$.

Η υπό συνθήκη πιθανότητα λανθασμένου συμβόλου (SEP), χρησιμοποιώντας MPSK σχήμα διαμόρφωσης, εξαρτάται από το στιγμιαίο SNR, και για την υπό εξέταση ζεύξη, γράφεται ως ακολούθως [87]:

$$p(e/\gamma_{ii}) = \frac{A}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma_{ii}}B) \quad (3.30)$$

όπου, $A=1$ όταν η τάξη του σχήματος διαμόρφωσης είναι $M=2$, δηλαδή έχουμε binary phase shift keying (BPSK) και $A=2$ όταν $M>2$, $B=\sin(\pi/M)$ και erfc είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος. Σε αυτό το πλαίσιο και χρησιμοποιώντας τη σχέση, που υπάρχει μεταξύ της erfc και της Meijer G-Function η 3.30, μπορεί να πάρει την παρακάτω μορφή [79]:

$$p(e/\gamma_{ii}) = \frac{A}{2\sqrt{\pi}} G_{12}^{20}(B^2\gamma_{ii}|0, 1/2) \quad (3.31)$$

Επίσης, η υπό συνθήκη SEP μπορεί να εκφραστεί σαν ανάπτυγμα της σειράς Maclaurin και έχει ως εξής [79]:

$$p(e/\gamma_{ii}) = \frac{A}{2} \left\{ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{(-1)^{\kappa} (\gamma_{ii})^{\frac{2\kappa+1}{2}} B^{2\kappa+1}}{\kappa! (2\kappa+1)} \right\} \quad (3.32)$$

Υπό το πρίσμα, των ανωτέρω η μέση SEP για ένα δορυφορικό σύστημα μονού άλματος, θεωρώντας την ύπαρξη μίας υβριδικής RF/FSO ζεύξης δίνεται από την ακόλουθη σχέση [79]:

$$\bar{P}_{eSD} = B_{SD}^{FSO}(\gamma_{th}^{FSO}) + F_{\gamma_{SD}^{FSO}}(\gamma_{th}^{FSO}) B_{SD}^{RF} \quad (3.33)$$

όπου, $B_{SD}^{FSO}(\gamma_{th}^{FSO})$ η μέση SEP για την FSO ζεύξη, μονού άλματος, όταν $\gamma_{SD}^{FSO} > \gamma_{th}^{FSO}$, $F_{\gamma_{SD}^{FSO}}(\gamma_{th}^{FSO})$ η πιθανότητα αποκοπής της FSO ζεύξης και B_{SD}^{RF} η μέση SEP για την RF ζεύξη, μονού άλματος. Η $B_{SD}^{FSO}(\gamma_{th}^{FSO})$ μπορεί να προκύπτει από την παρακάτω μαθηματική έκφραση [79]:

$$B_{SD}^{FSO}(\gamma_{th}^{FSO}) = \int_{\gamma_{th}^{FSO}}^{\infty} p(e/\gamma_{SD}^{FSO}) f_{\gamma_{SD}^{FSO}}(\gamma_{SD}) d\gamma_{SD} \quad (3.34)$$

$$B_{SD}^{FSO}(\gamma_{th}^{FSO}) = \int_0^{\infty} p(e/\gamma_{SD}^{FSO}) f_{\gamma_{SD}^{FSO}}(\gamma_{SD}) d\gamma_{SD} - \int_0^{\gamma_{th}^{FSO}} p(e/\gamma_{SD}^{FSO}) f_{\gamma_{SD}^{FSO}}(\gamma_{SD}) d\gamma_{SD} \quad (3.35)$$

Έπειτα από μαθηματικούς χειρισμούς η τελική μορφή του πρώτου και του δευτέρου όρων της 3.35, σε κλειστό τύπο έχουν ως εξής [79]:

$$I_1 = \frac{A\mathcal{F}_{SD}}{2\sqrt{\pi}} G_{b+2, 3b+1}^{3b, 2} \left(\frac{(D_{SD})^b}{b^{2b} B^2 \Gamma_{SD}^{FSO}} \left| \begin{matrix} 1, \frac{1}{2}, \varepsilon_{SD}^1 \\ \varepsilon_{SD}^2, 0 \end{matrix} \right. \right) \quad (3.36)$$

$$I_2(\gamma_{th}^{FSO}) = \frac{A\mathcal{F}_{SD} f_{\gamma_{th}^{FSO}}(\gamma_{th}^{FSO})}{2} - \frac{A\mathcal{F}_{SD}}{\sqrt{\pi}} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{(-1)^\kappa (\gamma_{th}^{FSO})^{\frac{2\kappa+1}{2}} B^{2\kappa+1}}{\kappa! (2\kappa+1)} \times G_{b+1, 3b+1}^{3b, 1} \left(\frac{(D_{SD})^b \gamma_{th}^{FSO}}{b^{2b} \Gamma_{SD}^{FSO}} \left| \begin{matrix} (1-\kappa-\frac{1}{2}), \varepsilon_{SD}^1 \\ \varepsilon_{SD}^2, (-\kappa-\frac{1}{2}) \end{matrix} \right. \right) \quad (3.37)$$

Επιπρόσθετα, η μέση SEP για την RF ζεύξη υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση [79]:

$$B_{SD}^{RF} = \int_0^{\infty} p(e/\gamma_{SD}^{RF}) f_{\gamma_{SD}^{RF}}(\gamma_{SD}) d\gamma_{SD} \quad (3.38)$$

Αντικαθιστώντας τις 3.26 και 3.30 στην 3.38 και αναπτύσσοντας την ${}_1F_1$ σε όρους μετασχηματισμού Kummer και εκτελώντας μαθηματικούς χειρισμούς η 3.38, λαμβάνει την παρακάτω μορφή [79]:

$$B_{SD}^{RF} = \frac{A\Omega_{SD}\alpha_1}{2} \sum_{\kappa_1=0}^{m_1-1} \frac{\psi(\kappa_1)}{(\Gamma_{SD}^{RF})^{\kappa_1+1}} \left\{ \frac{\Gamma(\kappa_1+1)}{C^{\kappa_1+1}} - \frac{B\kappa_1!}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\kappa_1} \frac{\Gamma(n+0.5)}{n! C^{\kappa_1+1-n} (B^2+C)^{n+0.5}} \right\} \quad (3.39)$$

$$\text{όπου, } C = \frac{(\beta_1 - \delta_1)\Omega_{SD}}{\Gamma_{SD}^{RF}}$$

Με βάση την προτεινόμενη αρχιτεκτονική, διπλού άλματος, αν το στιγμιαίο SNR της FSO ζεύξης (τμήμα πομπός – αναμεταδότης) είναι πάνω από την τιμή κατωφλίου, τότε χρησιμοποιείται αυτή για την μετάδοση των δεδομένων. Αν όμως το στιγμιαίο SNR είναι μικρότερο από το SNR κατωφλίου, τότε επιλέγεται η RF ζεύξη για την μετάδοση. Επιπλέον, αξίζει να σημειώσουμε ότι για το τμήμα αναμεταδότης – δέκτης χρησιμοποιείται μόνο FSO ζεύξη.

Συνεπώς, η μέση SEP για το σύνολο της ζεύξης πομπός – αναμεταδότης – δέκτης υπολογίζεται βρίσκοντας τη μέση υπό συνθήκη SEP, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του στιγμιαίου SNR του κάθε τμήματος, βασιζόμενη στις συνθήκες $\gamma_{SR}^{FSO} > \gamma_{th}$ και $\gamma_{SR}^{FSO} < \gamma_{th}$, και έχει όπως παρακάτω [79]:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{eSRD} = & \int_0^\infty \int_{\gamma_{th}}^\infty P_{eSRD}(\gamma_{SR}^{FSO}, \gamma_{RD}^{FSO}) f_{\gamma_{SR}^{FSO}}(\gamma_{SR}) f_{\gamma_{RD}^{FSO}}(\gamma_{RD}) d\gamma_{SR} d\gamma_{RD} \\ & + F_{\gamma_{SR}^{FSO}} \int_0^\infty \int_0^\infty P_{eSRD}(\gamma_{SR}^{RF}, \gamma_{RD}^{FSO}) f_{\gamma_{SR}^{RF}}(\gamma'_{SR}) f_{\gamma_{RD}^{FSO}}(\gamma_{RD}) d\gamma'_{SR} d\gamma_{RD} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Ως εκ τούτου, η υπό συνθήκη SEP για την FSO ζεύξη πομπός – αναμεταδότης – δέκτης, θεωρώντας MPSK σχήμα διαμόρφωσης μπορεί να γραφεί όπως ακολούθως [88]:

$$P_{eSRD}(\gamma_{SR}^{FSO}, \gamma_{RD}^{FSO}) = P(e/\gamma_{SR}^{FSO}) + P(e/\gamma_{RD}^{FSO}) - P(e/\gamma_{SR}^{FSO})(e/\gamma_{RD}^{FSO}) \quad (3.41)$$

Ομοίως, η υπό συνθήκη SEP για την RF ζεύξη (πομπός – αναμεταδότης) και την FSO ζεύξη (αναμεταδότης – δέκτης), θεωρώντας MPSK σχήμα διαμόρφωσης μπορεί να γραφεί ως εξής [88]:

$$P_{eSRD}(\gamma_{SR}^{RF}, \gamma_{RD}^{FSO}) = P(e/\gamma_{SR}^{RF}) + P(e/\gamma_{RD}^{FSO}) - P(e/\gamma_{SR}^{RF})(e/\gamma_{RD}^{FSO}) \quad (3.42)$$

Αντικαθιστώντας τις 3.41 και 3.42 στην 3.40, η μέση SEP διπλού άλματος μιας δορυφορικής ζεύξης μπορεί να γραφεί όπως παρακάτω [79]:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{eSRD} = & B_{SR}^{FSO}(\gamma_{th}) + F_{\gamma_{SR}^{FSO}}(\gamma_{th}) B_{SR}^{RF} + B_{RD}^{FSO} \\ & - B_{RD}^{FSO} \{ B_{SR}^{FSO}(\gamma_{th}) + F_{\gamma_{SR}^{FSO}}(\gamma_{th}) B_{SD}^{RF} \} \end{aligned} \quad (3.43)$$

όπου, B_{RD}^{FSO} η μέση SEP για την FSO ζεύξη (αναμεταδότης – δέκτης), $B_{SR}^{FSO}(\gamma_{th})$ η μέση SEP για την FSO ζεύξη (πομπός – αναμεταδότης) όταν $\gamma_{SR}^{FSO} > \gamma_{th}$ και B_{SR}^{RF} η μέση SEP για την RF ζεύξη (πομπός – αναμεταδότης). Επομένως, από την 3.43 η μέση SEP έχει ως εξής [79]:

$$\bar{P}_{eSRD} = \bar{P}_{eSR} + \bar{P}_{eRD} - \bar{P}_{eSR} \bar{P}_{eRD} \quad (3.44)$$

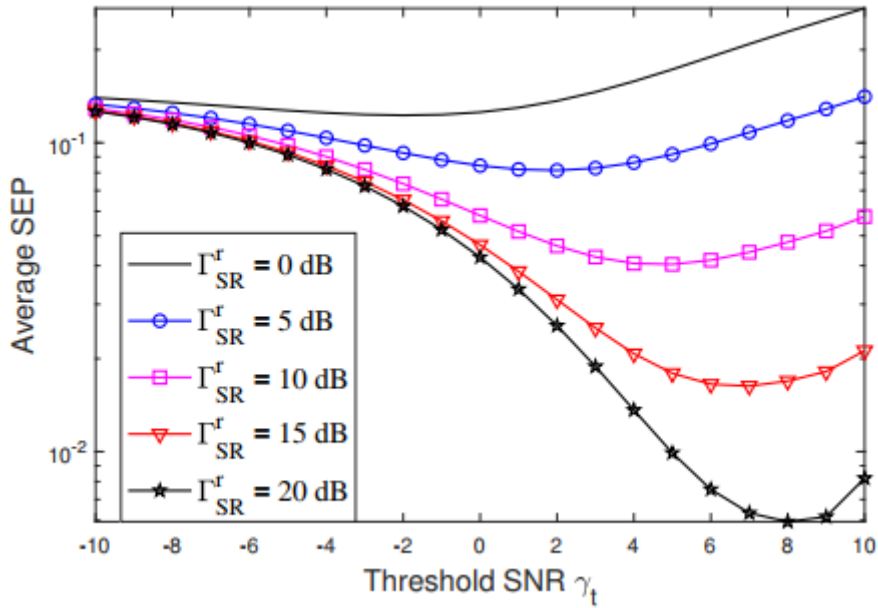
3.4.1.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στην παρούσα υποπαράγραφο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης Monte Carlo για όλες τις αναλύσεις, που έχουν προαναφερθεί.

Παράμετρος	Τιμή
Μήκος κύματος λειτουργίας	1550 nm
Επιχειρησιακό ύψος λειτουργίας HAPS (H_p)	20 km
Επιχειρησιακό ύψος λειτουργίας LEO (H_s)	620 km
Επιχειρησιακό ύψος λειτουργίας GS (H_0)	1 m
Συντελεστής σφαλμάτων στόχευσης	$\zeta_{SR} = 5.2$ και $\zeta_{RD} = 5.2$
Διακύμανση θορύβου του AWGN καναλιού της FSO ζεύξης	$(\sigma_{SR}^{FSO})^2 = 1.445 \cdot 10^{-25} \text{ A}^2/\text{Hz}$ $(\sigma_{SD}^{FSO})^2 = 4.435 \cdot 10^{-28} \text{ A}^2/\text{Hz}$ $(\sigma_{RD}^{FSO})^2 = 4.435 \cdot 10^{-28} \text{ A}^2/\text{Hz}$
Κέρδος τηλεσκοπίου πομπό	$G_t^{FSO} = G_{th}^{FSO} = 5 \text{ dB}$
Κέρδος τηλεσκοπίου δέκτη	$G_{rs}^{FSO} = G_{rh}^{FSO} = 10 \text{ dB}$
Γωνία ανύψωσης θ	$80^\circ, 50^\circ, 40^\circ$
Ταχύτητα ανέμου w	31 m/s, 21 m/s, 11 m/s
Ακτίνα δέσμης στον πομπό W_0^{ii}	2 cm
Ισχυρή σκίαση	$b_1=0.063, m_1=1, \Omega_1=0.0007$
Μέτρια σκίαση	$b_1=0.251, m_1=5, \Omega_1=0.279$
Χαμηλή σκίαση	$b_1=0.158, m_1=19, \Omega_1=1.29$
Φέρουσα συχνότητα RF	$f_{RF} = 5 \text{ GHz}$
Συντελεστής μετατροπής οπτικού σε ηλεκτρικό σήμα	$\eta_{ii} = 0.8$
Κέρδη κεραιών RF	$G_T = 28 \text{ dB}$ και $G_R = 28 \text{ dB}$
Απώλειες RF	$L_R = 0.01 \text{ dB/km}, L_A = 5.4 \cdot 10^{-3} \text{ dB/km}, L_0 = 2 \text{ dB}$
Εύρος ζώνης θορύβου δέκτη RF	$BW = 74.8 \text{ dBHz}$
Θερμοκρασία θορύβου συστήματος	$T_N = 17.6 \text{ dBK}$
Συντελεστή θορύβου	$N_F = 2 \text{ dB}$

Πίνακας 5 Τιμές παραμέτρων για την προσομοίωση του συστήματος [79]

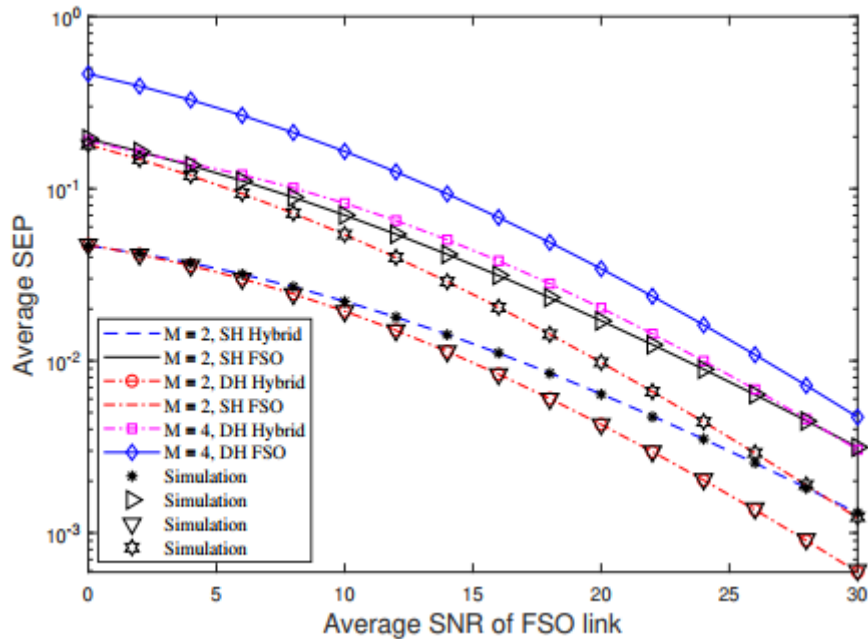
Στην εικόνα 3.5 παρατηρούμε τη μεταβολή του μέσου SEP του υβριδικού RF/FSO συστήματος συναρτήσει του SNR κατωφλίου γ_{th} , με βάση το οποίο εκτελείται η μεταγωγή από τη μία τεχνολογία στην άλλη και όλα αυτά για διάφορες τιμές του μέσου SNR της RF ζεύξης.



Εικόνα 3.5: Απεικόνιση του μέσου SEP συναρτήσει του SNR κατωφλίου για διάφορες τιμές του μέσου SNR της RF ζεύξης⁴ [79]

Παρατηρώντας την εικόνα 3.5, συμπεραίνουμε ότι η βέλτιστη τιμή κατωφλίου για το SNR γ_{th}^{opt} , που αντιστοιχεί στην γ_{th}^{FSO} , είναι η τιμή για την οποία ελαχιστοποιείται η καμπύλη του μέσου SEP. Επιπλέον, καθώς αυξάνεται το μέσο SNR της RF ζεύξης, είναι εμφανές ότι αυξάνεται και η βέλτιστη τιμή κατωφλίου για το SNR γ_{th}^{opt} , που προκαλεί τη μεταγωγή από την FSO στην RF ζεύξη. Ο βασικός λόγος, που συμβαίνει αυτό οφείλονται στο γεγονός ότι καθώς αυξάνεται το SNR γ_{th}^{opt} η FSO ζεύξη θα αποκόπτεται όλο και συχνότερα και η RF ζεύξη θα χρησιμοποιείται με μεγαλύτερη πιθανότητα, προκειμένου να διατηρηθεί η επίδοση του συστήματος σε υψηλό επίπεδο, καλύπτοντας τις διακοπές που θα συνέβαιναν σε διαφορετική περίπτωση. Επομένως, όταν το μέσο SNR της RF ζεύξης διατηρείται σταθερό, τότε ανεξάρτητα από το μέσο SNR της FSO ζεύξης και το SNR γ_{th}^{opt} , θα πρέπει να διατηρείται σταθερό προκειμένου το μέσο SEP να λάβει την ελάχιστη τιμή.

⁴ Για την επιβεβαίωση των μαθηματικών μοντέλων εκτελέστηκε προσομοίωση Monte – Carlo και οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος φαίνονται στον Πίνακα 5.



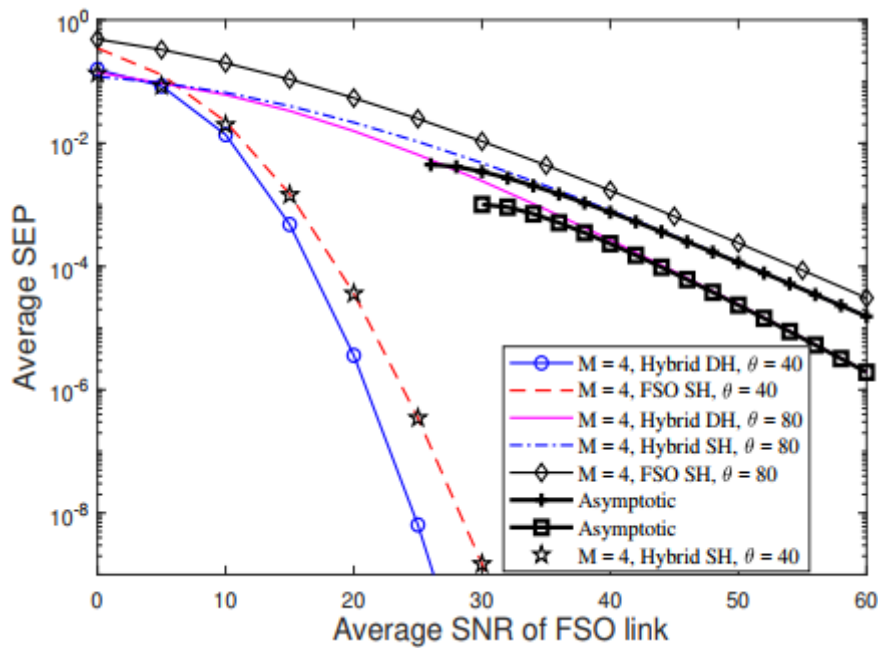
Εικόνα 3.6: Απεικόνιση του μέσου SEP συναρτήσει του SNR της FSO ζεύξης για διάφορα σχήματα ανοδικής ζεύξης⁵ [79]

Στην εικόνα 3.6, έχουμε συγκριτικά αποτελέσματα για υλοποιήσεις συστημάτων FSO και υβριδικού RF/FSO, μονού και διπλού άλματος, συναρτήσει του μέσου SNR της FSO ζεύξης. Η πρώτη παρατήρηση μας αφορά την επιβεβαίωση των αναλυτικών αποτελεσμάτων μέσω της προσομοίωσης Monte – Carlo, καθώς υπάρχει πλήρης ταύτιση μεταξύ των καμπυλών. Επιπλέον, τα υβριδικά συστήματα RF/FSO (μονού και διπλού άλματος) έχουν καλύτερη επίδοση από το FSO σύστημα, καθώς όπως παρατηρούμε για SEP της τάξης του 10^{-2} υπάρχει ένα κέρδος κωδικοποίησης περίπου 5 dB, το οποίο οφείλεται στην ύπαρξη της RF εφεδρικής ζεύξης.

Αυτό το κέρδος διαφορισμού και η βελτίωση στην επίδοση του SEP, που επιτυγχάνονται οφείλονται κατά κύριο λόγο στην εγκατάσταση της ενδιάμεσης εναέριας πλατφόρμας. Δεδομένου ότι, η FSO ζεύξη είναι επιρρεπής σε σφάλματα στόχευσης, εγκαθιστώντας ενδιάμεσα την εναέρια πλατφόρμα επιτυγχάνεται μείωση της απόστασης των ζεύξεων, καθώς πλέον υλοποιούνται σε δύο άλματα, πράγμα που βοηθά την αντιμετώπιση εν μέρει των σφαλμάτων στόχευσης. Επιπρόσθετα, η μείωση της απόστασης στις δύο υλοποιήσεις, μονού και διπλού άλματος, επιδρά στη διακύμανση Rytov, προκαλώντας τη μείωσή της και αντίστοιχα αύξηση των τιμών των παραμέτρων τυρβώδους ροής μικρής και μεγάλης κλίμακας. Υπό το πρίσμα αυτό, γνωρίζοντας ότι το κέρδος διαφορισμού εξαρτάται από τις παραμέτρους τυρβώδους ροής, αναμένουμε

⁵ Για την επιβεβαίωση των μαθηματικών μοντέλων εκτελέστηκε προσομοίωση Monte – Carlo και οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος φαίνονται στον Πίνακα 5.

αυτή τη βελτίωση στο διαφορικό κέρδος μεταξύ της υλοποίησης διπλού και μονού άλματος.



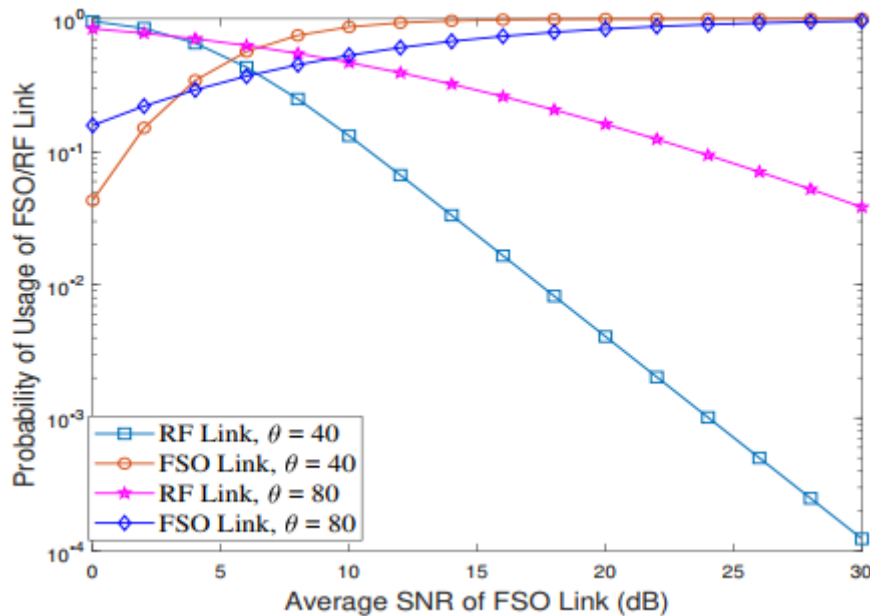
Εικόνα 3.7: Απεικόνιση του μέσου SEP συναρτήσει του SNR της FSO ζεύξης για διάφορες ζενίθ γωνίες⁶ [79]

Στην εικόνα 3.7 παρατηρούμε ότι καθώς μειώνεται η ζενίθ γωνία, που μετριέται ως προς το οριζόντιο επίπεδο, η επίδοση του συστήματος από πλευράς SEP βελτιώνεται σημαντικά. Αυτή η βελτίωση μπορεί να εξηγηθεί με τη διακύμανση Rytov, καθώς η μείωσή της προκαλεί αύξηση των τιμών των παραμέτρων τυρβώδους ροής μικρής και μεγάλης κλίμακας. Λαμβανομένου υπόψη ότι, το κέρδος διαφορισμού εξαρτάται από τις παραμέτρους α_{ii} και β_{ii} , αναμένουμε αυτή τη βελτίωση στο διαφορικό κέρδος λόγω της μείωσης στη ζενίθ γωνία.

Εναλλακτικά, δεδομένου ότι η απόσταση διάδοσης της οπτικής δέσμης γίνεται μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η ζενίθ γωνία, ως εκ τούτου η δέσμη εμφανίζει μεγαλύτερες απώλειες ελευθέρου χώρου και καθίσταται πιο ευάλωτη σε φαινόμενα όπως η τυρβώδης ροή, οι μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες, τα σφάλματα σκόπευσης και οι διαλείψεις, που εντείνουν το πρόβλημα των εξασθενήσεων, καθώς η δέσμη είναι εκτεθειμένη σε αυτά για μεγαλύτερο μήκος. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί η μεγάλη υποβάθμιση, που υφίσταται η απόδοση του συστήματος, όσον αφορά το SEP, καθώς αυξάνεται η ζενίθ γωνία.

⁶ Για την επιβεβαίωση των μαθηματικών μοντέλων εκτελέστηκε προσομοίωση Monte – Carlo και οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος φαίνονται στον Πίνακα 5.

Επιπρόσθετα, παρατηρούμε ότι το κέρδος διαφορισμού, που επιτυγχάνεται, μεταξύ της υβριδικής υλοποίησης RF/FSO, μονού και διπλού άλματος, και της FSO υλοποίησης, υφίσταται έναν κορεσμό καθώς μειώνεται η ζενίθ γωνία.



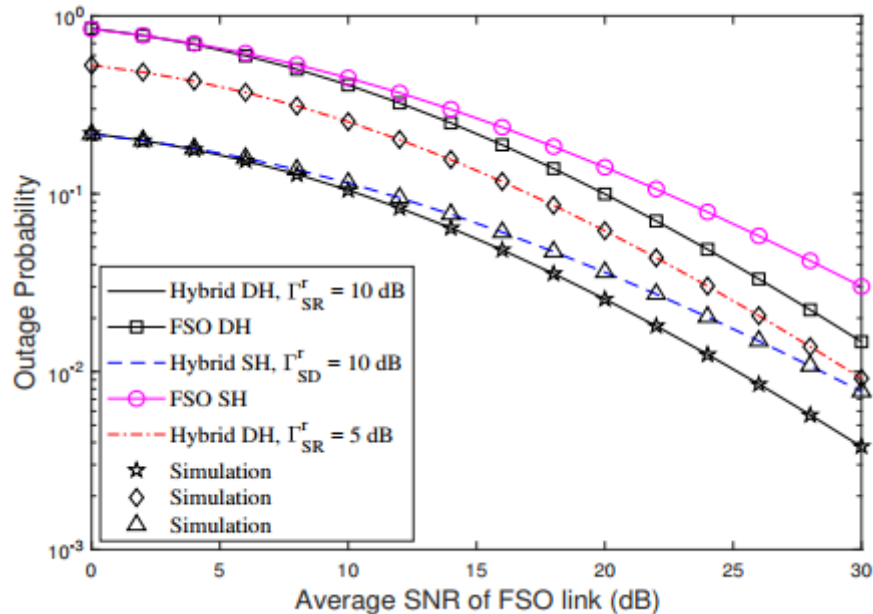
Εικόνα 3.8: Απεικόνιση της πιθανότητας χρησιμοποίησης της RF/FSO ζεύξης για διάφορες ζενίθ γωνίες⁷ [79]

Το υβριδικό σύστημα RF/FSO, παρέχει μεγαλύτερο κέρδος διαφορισμού όταν λειτουργεί υπό δυσμενέστερες συνθήκες, ήτοι υψηλά σφάλματα στόχευσης, μεγαλύτερη απόσταση διάδοσης και υψηλή ταχύτητα αέρα. Αυτό συμβαίνει, διότι η πιθανότητα χρησιμοποίησης της RF ζεύξης είναι μεγαλύτερη όταν οι συνθήκες διάδοσης είναι τέτοιες ώστε η FSO ζεύξη να μην μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά. Αντιθέτως, όταν η συνθήκες στο περιβάλλον διάδοσης είναι σχετικά καλές τότε η πιθανότητα εναλλαγής στην RF ζεύξη, παραμένει σε πολύ χαμηλές τιμές. Συνεπώς, το υψηλό κέρδος διαφορισμού έως ένα μεγάλο βαθμό οφείλεται στην ύπαρξη της εφεδρικής RF ζεύξης.

Οι προηγούμενες διαπιστώσεις επιβεβαιώνονται από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην εικόνα 3.8, όπου αποτυπώνεται η πιθανότητα χρησιμοποίησης της FSO ή RF ζεύξης. Για μεγάλες ζενίθ γωνίες και μικρό μέσο SNR της FSO ζεύξης, παρατηρούμε ότι η χρήση της RF ζεύξης είναι σχεδόν επιβεβλημένη. Ωστόσο, όταν οι συνθήκες διάδοσης είναι ευνοϊκές και το μέσο SNR της FSO ζεύξης λαμβάνει μεγάλες τιμές η χρήση της FSO ζεύξης είναι η

⁷ Για την επιβεβαίωση των μαθηματικών μοντέλων εκτελέστηκε προσομοίωση Monte – Carlo και οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος φαίνονται στον Πίνακα 5.

ενδεδειγμένη επιλογή για την εξασφάλιση όσο το δυνατόν καλύτερη απόδοση στο σύστημα.



Εικόνα 3.9: Απεικόνιση της πιθανότητας αποκοπής συναρτήσει του μέσου SNR της FSO ζεύξης⁸ [79]

Στην εικόνα 3.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πιθανότητας αποκοπής διάφορων υλοποιήσεων για το σύστημα για διαφορετικές τιμές μέσου SNR της RF ζεύξης. Αρχικά, παρατηρούμε ότι προσομοίωση επιβεβαιώνει τα θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα, καθώς υπάρχει πλήρης ταύτιση μεταξύ των καμπυλών. Επιπλέον, όπως ήταν αναμενόμενο το υβριδικό σύστημα RF/FSO έχει καλύτερη επίδοση από το αντίστοιχο FSO. Συνεπώς, μπορούμε για άλλη μια φορά να συμπεράνουμε την μεγάλη αξία της ύπαρξης της εφεδρικής RF ζεύξης, προκειμένου να επιτευχθεί μεγάλη απόδοση στο σύστημα. Επιπρόσθετα, αξίζει να σημειώσουμε και τη βελτίωση που επιτυγχάνεται στην πιθανότητα αποκοπής, για τις υλοποιήσεις διπλού άλματος συγκριτικά με αυτή του μονού.

3.4.2 Επίδοση backhaul δικτύου με χρήση FSO συστημάτων

Ο ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνει μια FSO ζεύξη δίνεται από την παρακάτω σχέση [89]:

⁸ Για την επιβεβαίωση των μαθηματικών μοντέλων εκτελέστηκε προσομοίωση Monte – Carlo και οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος φαίνονται στον Πίνακα 5.

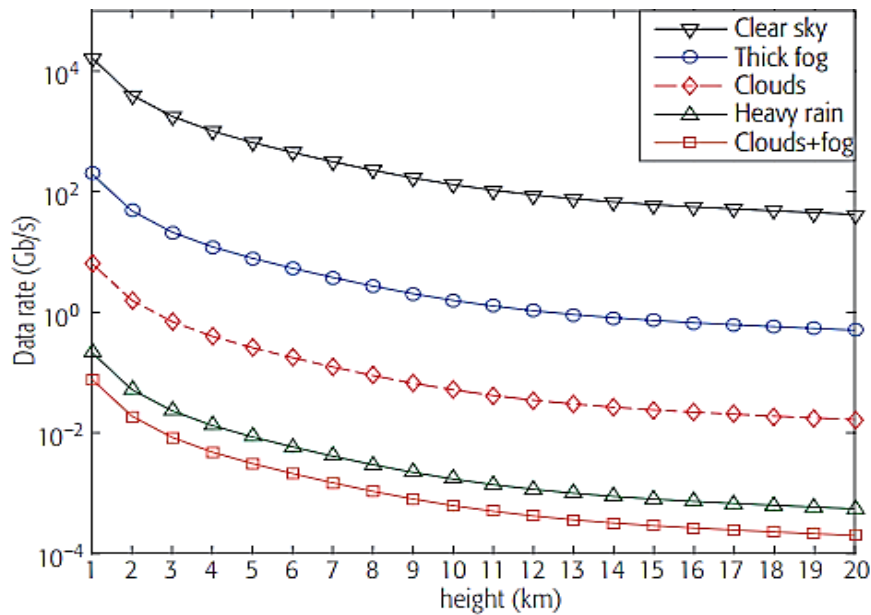
$$R = \frac{P_t \eta_t \eta_r 10^{\frac{-L_{poi}}{10}} 10^{\frac{-L_{atm}}{10}} A_R}{A_B E_p N_b} \left[\frac{\text{bit}}{\text{s}} \right] \quad (3.45)$$

όπου P_t η εκπεμπόμενη ισχύς του πομπού, η_t και η_r η οπτική απόδοση πομπού και δέκτη αντιστοίχως, L_{poi} οι απώλειες στόχευσης (μετρημένες σε dB), L_{atm} οι συνολικές ατμοσφαιρικές απώλειες λόγω βροχής, ομίχλης, συννεφιάς και τυρβώδους ροής (μετρημένες σε dB) για όλο το μήκος της ζεύξης και δίνεται από τη σχέση $L_{atm} = L_{rain} + L_{fog} + L_{cloud} + L_{scint}$, $E_p = h_p c / \lambda$ η ενέργεια των φωτονίων, h_p η σταθερά του Planck, c η ταχύτητα του φωτός, λ το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται για την μετάδοση, N_b η ευαισθησία του δέκτη σε αριθμό φωτονίων/bit, το εμβαδόν της περιοχής λήψης του δέκτη και A_B το εμβαδό που δημιουργεί η δέσμη αφικνούμενη στο δέκτη, με τα A_R και A_B υπολογίζουμε τις γεωμετρικές απώλειες.

Παράμετρος	Τιμή
Ισχύς εκπομπής	$P_t = 200 \text{ mW}$
Απώλειες στόχευσης	$L_{poi} = 2 \text{ dB}$
Οπτικές απώλειες	$L_{opt} = 2 \text{ dB}$
Απόκλιση της δέσμης	$\theta = 1 \text{ mrad}$
Γωνία ανύψωσης	$\varphi = 45^\circ$
Ακτίνα λήψης δέκτη	$r = 0.04 \text{ m}$
Μήκος κύματος λειτουργίας	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
Επιχειρησιακό ύψος λειτουργίας	$h = 1 \text{ km} - 20 \text{ km}$
Ταχύτητα ανέμου	$v = 21 \text{ m/s}$
Ευαισθησία του δέκτη	$N_b = 100 \text{ photons/bit}$
BER	$< 10^{-9}$
Ορατότητα ομίχλης	$V = 50 \text{ m}$
Πάχος στρώματος ομίχλης	$\Delta d_{fog} = 50 \text{ m}$
Ρυθμός βροχόπτωσης	$R_{rain} = 50 \text{ mm/hr}$
Πάχος στρώματος βροχής	$\Delta d_{rain} = 1000 \text{ m}$
Σταθερά του Planck	$h_p = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Πίνακας 6 Τιμές παραμέτρων για την προσομοίωση του συστήματος [89]

Για δεδομένες παραμέτρους ενός τυπικού FSO συστήματος που χρησιμοποιείται για υλοποίηση backhaul ζεύξης με εναέριες πλατφόρμες τα αποτελέσματα που προέκυψαν, από την προσομοίωση για το ρυθμό μετάδοσης της backhaul FSO ζεύξης έχουν, όπως στην ακόλουθη εικόνα:

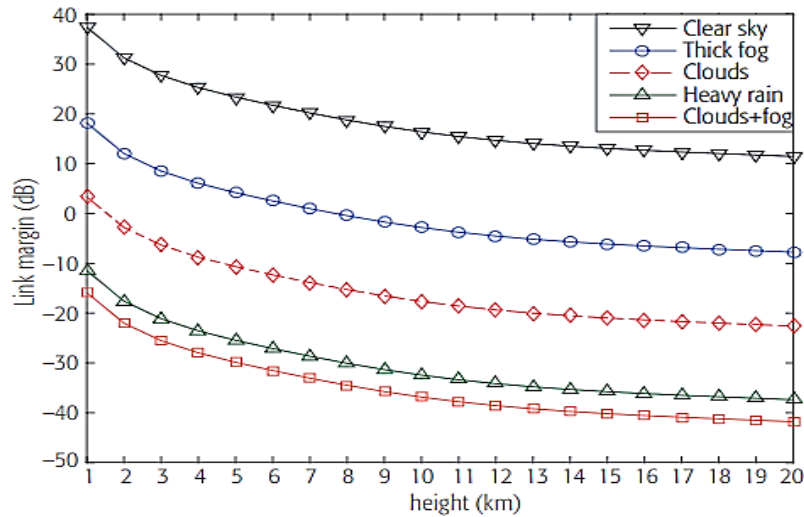


Εικόνα 3.10: Απεικόνιση ρυθμού μετάδοσης της backhaul FSO ζεύξης συναρτήσει του ύψους της πλατφόρμας για διάφορες καιρικές συνθήκες⁹ [89]

Τα συμπεράσματα, που μπορούν να εξαχθούν παρατηρώντας την εικόνα 3.10 είναι ότι οι επιτευκτοί ρυθμοί μετάδοσης μειώνονται καθώς αυξάνεται το ύψος λειτουργίας της εναέριας πλατφόρμας, το οποίο οφείλεται κατά βάση στην αύξηση των γεωμετρικών απωλειών. Επιπλέον, μπορούμε να πούμε ότι οι backhaul FSO ζεύξεις επηρεάζονται πιο πολύ από τη συννεφιά, λόγω της σκέδασης Mie που προκαλούν τα σύννεφα. Επιπρόσθετα, αξίζει να σημειώσουμε ότι σκέδαση Mie προκαλεί και ομίχλη που όπως γνωρίζουμε είναι η βασική πηγή απωλειών στις επίγειες FSO ζεύξεις, ωστόσο επειδή οι backhaul FSO ζεύξεις διατρέχουν κάθετα το φαινόμενο, η σχετική απόσταση διάδοσης εντός της ομίχλης είναι πολύ μικρότερη και για το λόγο αυτό επηρεάζονται λιγότερο. Τέλος, βλέπουμε πόσο σημαντική είναι η υποβάθμιση του ρυθμού μετάδοσης αν έχουμε συνδυασμό από φαινόμενα που δημιουργούν πολύ δυσμενείς συνθήκες διάδοσης.

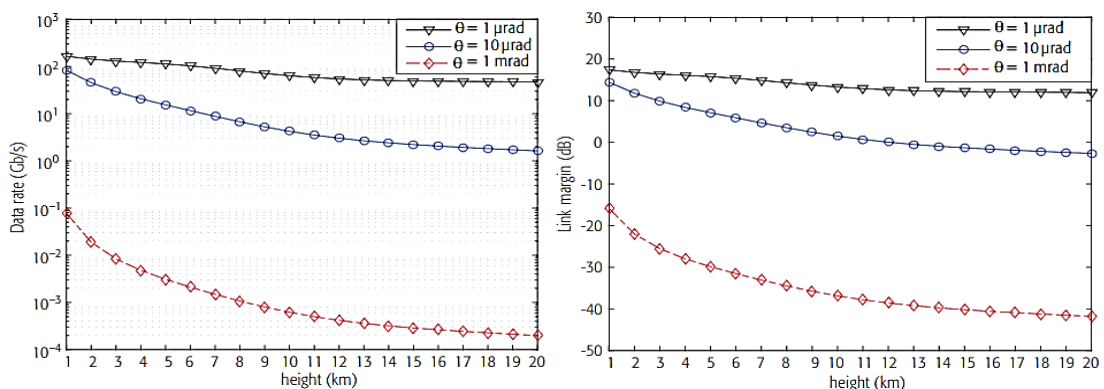
Για τις ίδιες παραμέτρους του συστήματος με πριν, υπολογίστηκε το περιθώριο ισχύος της backhaul FSO ζεύξης για διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έχουν, όπως στην παρακάτω εικόνα:

⁹ Για την επιβεβαίωση των μαθηματικών μοντέλων εκτελέστηκε προσομοίωση και οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος φαίνονται στον Πίνακα 6.



Εικόνα 3.11: Απεικόνιση περιθωρίου ισχύος της backhaul FSO ζεύξης συναρτήσεως του ύψους της πλατφόρμας για διάφορες καιρικές συνθήκες¹⁰ [89]

Παρατηρώντας την εικόνα 3.11 βλέπουμε ότι για συνθήκες καθαρού ουρανού το περιθώριο ισχύος της ζεύξης είναι 20 dB και 12 dB για εναέριες πλατφόρμες που επιχειρούν σε ύψη 6 και 20 χλμ αντιστοίχως, ως εκ τούτου μπορεί να εξεταστεί η χρησιμοποίηση σχημάτων διαμόρφωσης μεγαλύτερης τάξης για να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης ακόμα περισσότερο. Όμως, σε συνθήκες συννεφιάς, ομίχλης και βροχής η backhaul FSO ζεύξη τίθεται εκτός λειτουργίας, καθώς η λαμβανόμενη ισχύς είναι μικρότερη από την ευαισθησία του δέκτη. Επιπρόσθετα, για το χειρότερο σενάριο, δηλαδή να συνυπάρχουν συνθήκες συννεφιάς και βροχής, η προσομοίωση εκτελέστηκε για διάφορες τιμές της απόκλισης θ της δέσμης που εκπέμπεται και τα αποτελέσματα έχουν, όπως ακολούθως:



Εικόνα 3.12: Απεικόνιση ρυθμού μετάδοσης και περιθωρίου ισχύος της backhaul FSO ζεύξης συναρτήσεως του ύψους της πλατφόρμας για διάφορες τιμές της απόκλισης της δέσμης¹⁰ [89]

¹⁰ Για την επιβεβαίωση των μαθηματικών μοντέλων εκτελέστηκε προσομοίωση και οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος φαίνονται στον Πίνακα 6.

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα εξάγουμε το συμπέρασμα ότι μειώνοντας τη γωνία απόκλισης, δηλαδή επιτυγχάνοντας όσο το δυνατό πιο στενή δέσμη, επιτυγχάνεται βελτίωση στο ρυθμό μετάδοσης και το περιθώριο ισχύος της backhaul FSO ζεύξης.

3.5 Μελλοντικές επεκτάσεις – Προκλήσεις

Τα συστήματα FSO αναμένεται ότι θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στα σύγχρονα NTN δίκτυα και κατ' επέκταση στα κυψελωτά συστήματα B5G και 6G. Στις προηγούμενες υποπαραγράφους αναφερθήκαμε εκτενώς στους τρόπους αξιοποίησης των FSO συστημάτων, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση των κινητών συστημάτων της νέας εποχής. Επίσης, το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας, γύρω από τα εναέρια και διαστημικά NTN δίκτυα, είναι ιδιαίτερα αυξημένο και αφορά βελτιώσεις σε τομείς, όπως η επίδοση και η εμβέλεια των FSO συστημάτων. Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, θα αναφέρουμε συνοπτικά ορισμένες μελλοντικές επεκτάσεις, προκλήσεις και πιθανές λύσεις, για τα NTN δίκτυα που βασίζονται στην τεχνολογία FSO.

3.5.1 Χρήση έξυπνων ανακλαστικών επιφανειών στα FSO – NTN δίκτυα

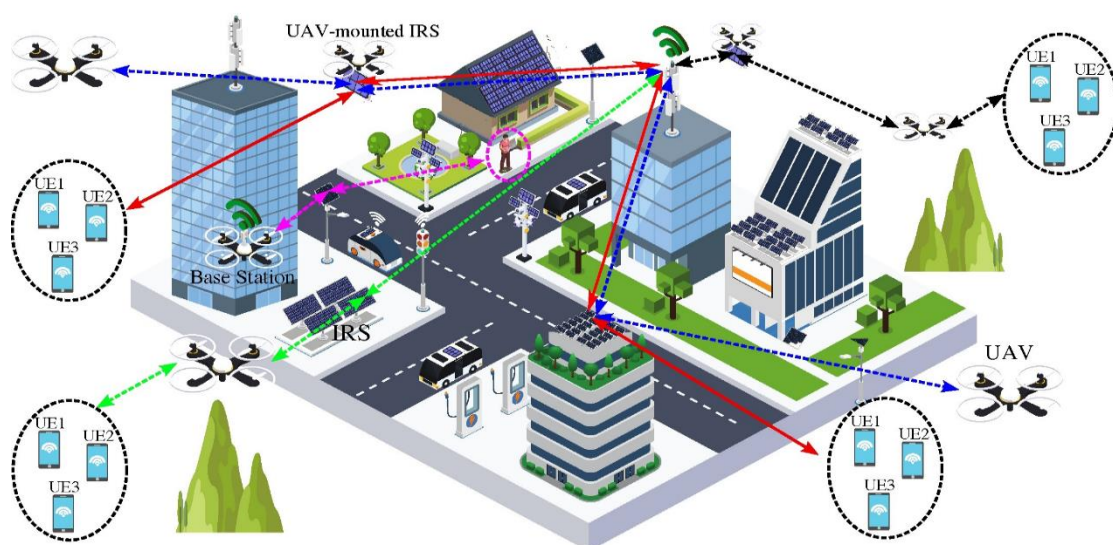
Οι έξυπνες ανακλαστικές επιφάνειες (Intelligent Reflecting Surface – IRS), είναι επίπεδες συσκευές, οι οποίες έχουν κατασκευαστεί και εγκατασταθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να τροποποιήσουν να χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών που προσπίπτουν πάνω τους. Ο βασικός στόχος των IRS είναι να βελτιώσουν την επίδοση και την απόδοση των ασύρματων κινητών συστημάτων, ελέγχοντας με έξυπνο τρόπο τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Στις ασύρματες επικοινωνίες, τα εκπεμπόμενα σήματα, που ανταλλάσσονται μεταξύ των πομποδεκτών, διαδίδονται σε ένα περίπλοκο περιβάλλον (δίαυλο), το οποίο περιλαμβάνει διάφορα αντικείμενα, εμπόδια και επιφάνειες, που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη διάδοσή τους. Η τεχνολογία IRS αφορά επίπεδες επιφάνειες, που αποτελούνται από μεγάλο αριθμό μικρών στοιχείων, που ανάλογα με τη θέση τους μπορούν να ελέγξουν τη φάση, το πλάτος και την κατεύθυνση διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, που προσπίπτει σε αυτές, προσθέτοντας στο παραπάνω περιβάλλον άλλο ένα επίπεδο πολυπλοκότητας. Επομένως, η προσεκτική προσαρμογή των χαρακτηριστικών του κάθε μεμονωμένου στοιχείου της IRS μπορεί να συμβάλει στη χειραγώγηση – έλεγχο της επίδρασης που έχει ο δίαυλος στα ασύρματα σήματα, βελτιώνοντας με τον τρόπο αυτό την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος [92]. Επιπρόσθετα, η συμβολή των IRS θα είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιπτώσεις, που η αποκατάσταση οπτικής επαφής είναι αδύνατη και

απαιτείται η παράκαμψη κάποιου εμποδίου, όπως η συννεφιά. Για παράδειγμα, μια IRS τοποθετημένη στη γη μπορεί να ανακατευθύνει την οπτική δέσμη μιας FSO ζεύξης και να συνδέσει δύο εναέριες πλατφόρμες που δεν έχουν οπτική επαφή.

Αρχικά, η ιδέα των IRS εξετάστηκε στο πλαίσιο των RF επικοινωνιών και για το λόγο αυτό στην παρούσα φάση υπάρχει πληθώρα ερευνητικού έργου. Εν συνεχεία, με την ανάπτυξη των κινητών συστημάτων η παραπάνω ιδέα επεκτάθηκε και στις οπτικές επικοινωνίες. Οι IRS για RF επικοινωνίες στην κατασκευή τους ενσωματώνουν αγώγιμα και διηλεκτρικά υλικά, που λειτουργούν στο φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων, και για τον έλεγχο της διάδοσης εστιάζουν σε στοιχεία όπως τα μεταυλικά και οι κεραίες. Από την άλλη πλευρά, οι IRS στις οπτικές επικοινωνίες χρησιμοποιούν υλικά που εξειδικεύονται στον έλεγχο της οπτικής μετάδοσης, όπως οι φωτονικοί κρύσταλλοι και οι νανοδομές που λειτουργούν στο ορατό, υπέρυθο και υπεριώδες φάσμα. Η κατανόηση των προηγούμενων θεμελιωδών διαφορών είναι ζωτικής σημασίας για τη σχεδίαση των IRS, καθώς αντιλαμβανόμαστε ότι ο κάθε τύπος IRS έχει αποκλειστική χρήση είτε στις RF είτε στις οπτικές επικοινωνίες.

Το επόμενο στάδιο έρευνας, αφορά στην εγκατάσταση των IRS σε UAV – drones, με σκοπό να παράσχουν ακόμη μεγαλύτερη ευελιξία στο δίκτυο. Μια τέτοια υλοποίηση είναι τεράστια πρόκληση για τα NTN δίκτυα, καθώς υπάρχει πληθώρα παραμέτρων, που θα πρέπει να εξεταστούν συνδυαστικά πριν αποφανθούμε για την αποτελεσματικότητα του εγχειρήματος [93]. Ορισμένες από αυτές τις παραμέτρους είναι τα σφάλματα απόκλισης φάσης, που προκαλούνται από τα ανακλαστικά στοιχεία των IRS, η τυρβώδης ροή και τα σφάλματα στόχευσης, που θα προκύψουν λόγω της κινητικότητας των UAV.



Εικόνα 3.13: Απεικόνιση δικτύου με IRS σε εγκαταστάσεις και UAV [91]

3.5.2 Εκτέλεση Διαπομπής (Handover) στα FSO – NTN δίκτυα

Η εξασφάλιση απρόσκοπτης συνδεσιμότητας για τα FSO συστήματα, που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στα NTN δίκτυα απαιτεί την αντιμετώπιση πολλών σημαντικών δυσκολιών - προκλήσεων. Η επίτευξη και διατήρηση ακριβούς ευθυγραμμίσεως μεταξύ πομπού και δέκτη είναι ενδεχομένως η σημαντικότερη πρόκληση που πρέπει υπερκεραστεί, από τους λειτουργούς των δικτύων. Η παραπάνω κατάσταση δυσχεραίνει και γίνεται ακόμη πιο πολύπλοκη καθώς πλησιάζουμε στην υλοποίηση των B5G και 6G δικτύων, που στις υποδομές προστίθενται οι εναέριοι κόμβοι (HAPS, UAV, drones).

Επομένως, στη φάση της σχεδίασης δεν αρκεί να αποφασιστεί ο βέλτιστος αριθμός οπτικών δεσμών που θα υποστηρίζει η κάθε εναέρια πλατφόρμα για επικοινωνία με επίγειους σταθμούς, αλλά θα πρέπει να λάβει υπόψη της και της επιπλέον συνδέσεις που ίσως χρειαστεί να αποκατασταθούν, προκειμένου να εκτελούνται αποτελεσματικά οι διαπομπές. Επιπλέον, ο ακριβής καθορισμός της θέσης των εναέριων συστημάτων σε σχέση με τους επίγειους σταθμούς βάσης είναι άλλη μια παράμετρος βαρύνουσας σημασίας και πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος, που θα την υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια. Συνεπώς, η εξεύρεση μηχανισμών συνεχής παρακολούθησης της θέσης θα συμβάλλει τα μέγιστα στην εξασφάλιση της τέλει ευθυγράμμισης μεταξύ των εμπλεκόμενων συσκευών [94].

Από την πλευρά της διαπομπής, πέρα από την εξασφάλιση των ανωτέρω, απαιτείται η συνεχής παρακολούθηση του επιπέδου ισχύος και της ποιότητας της ζεύξης μεταξύ πομπού και δέκτη. Η διαδικασία της διαπομπής θα πρέπει να ξεκινά όταν η ποιότητα της ζεύξης ή το επίπεδο της λαμβανόμενης ισχύος πέσουν κάτω από τα αποδεκτά κατώφλια. Αυτή η προληπτική προσέγγιση εξασφαλίζει την απρόσκοπτη συνδεσιμότητα, αναζητώντας το ισχυρότερο λαμβανόμενο σήμα ή την καλύτερη ζεύξη, έχοντας ως δεδομένο ότι η εναλλακτική ζεύξη είναι διαθέσιμη προς χρήση. Συνεπώς, η έννοια του πλεονασμού (redundancy), που παίζει σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση εναλλακτικών διαδρομών, μπορεί να βοηθήσει ακόμη περισσότερο την εκτέλεση των διαπομπών.

Επιπρόσθετα, η διαθεσιμότητα των FSO ζεύξεων για την αποτελεσματική εκτέλεση των διαπομπών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σχεδίαση και ανάπτυξη του δικτύου και τη συνεργασία – αλληλεπίδραση με τους κινούμενους εναέριους κόμβους. Ως εκ τούτου, η χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης, μοντέλων πρόβλεψης και εργαλείων διαχείρισης δικτύου κρίνεται απαραίτητη, καθώς έτσι μπορεί να βελτιστοποιηθεί η ανάθεση των πόρων και να μεγιστοποιηθεί η διαθεσιμότητα των FSO ζεύξεων, προκειμένου να καλύπτονται οι απαιτήσεις των διαπομπών.

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, η τεχνητή νοημοσύνη και μηχανική μάθηση είναι μηχανισμοί που μπορούν να συμβάλλουν στην αποτελεσματική εκτέλεση των διαπομπών εφαρμόζοντας μοντέλα πρόβλεψης για το προφίλ κίνησης των τελικών χρηστών και την κατάσταση του δικτύου, εξασφαλίζοντας βέλτιστες αποφάσεις που θα προλαμβάνουν την εμφάνιση δυσμενών συνθηκών. Η ενσωμάτωση αυτών των μηχανισμών στα εργαλεία διαχείρισης του δικτύου θα εξασφαλίσουν την ορθή εκτέλεση των διαπομπών, ωστόσο απόρριψη κλήσεων ή διακοπές συνδέσεων μπορεί ακόμη να συμβαίνουν και να οφείλονται σε διάφορες αιτίες, όπως για παράδειγμα οι καιρικές συνθήκες, οι παρεμβολές και αστοχίες – βλάβες του εξοπλισμού. Συνεπώς, τα υβριδικά RF/FSO συστήματα είναι μια αποτελεσματική λύση, καθώς αναπτύσσεται ένα πλέγμα επικοινωνιών, που περιλαμβάνει δύο διαφορετικές τεχνολογίες συμπληρωματικές, εξασφαλίζοντας όσο το δυνατό μεγαλύτερη διαθεσιμότητα για το σύστημα. Για παράδειγμα, μια RF ζεύξη παρόλο που υποστηρίζει μικρότερους ρυθμούς μετάδοσης μπορεί να αντικαταστήσει παροδικά μία FSO, που δεν είναι διαθέσιμη.

3.5.3 Διαχείριση της ευελιξίας - επεκτασιμότητας

Η επέκταση της εμβέλειας των δικτύων προϋποθέτει την ενσωμάτωση στα NTN δίκτυα πληθώρα συστημάτων (δορυφόρους, UAV, drone κ.λπ.). Ωστόσο, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των εν λόγω πλατφορμών η διαχείριση, η συνεργασία και η διαλειτουργικότητα τους γίνεται εξαιρετικά δύσκολη. Συνεπώς, για να επιτευχθεί η ευελιξία σε ένα NTN δίκτυο, που χρησιμοποιεί FSO συστήματα και εναέρια – δορυφορικά μέσα, απαιτείται η ανάπτυξη πολύ ισχυρών μηχανισμών διαχείρισης και ελέγχου του δικτύου, οι οποίοι θα είναι προσανατολισμένοι στις ιδιαιτερότητες, που εγείρονται από τη φύση των NTN δικτύων. Στους παραπάνω μηχανισμούς περιλαμβάνονται η αποδοτική ανάθεση πόρων, η βελτιστοποίηση των αλγορίθμων δρομολόγησης, ο έλεγχος συμφόρησης, η ανοχή σε βλάβες και η διαχείριση της κίνησης μεταξύ πλήθους ετερογενών συστημάτων.

Επιπρόσθετα, η απόδοση των NTN δικτύων είναι άμεσα εξαρτημένη από την ενεργειακή τους απόδοση και χρειάζεται να υπάρχει μία ισορροπία ανάμεσα στις ενεργειακές απαιτήσεις και την αυτονομία πτήσης, καθώς ο διαθέσιμος χρόνος που θα επιχειρεί ένα ιπτάμενο σύστημα αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα για την επίτευξη της ευελιξίας – επεκτασιμότητας του δικτύου. Επίσης, ο διαρκώς αυξανόμενος αριθμός HAPS και LAPS, που θα επιχειρούν στην ίδια περιοχή, εγείρει θέματα που άπτονται στον τομέα της ασφάλειας των πτήσεων, ως εκ τούτου ο σαφής καθορισμός του νομικού πλαισίου λειτουργίας και η αυστηροποίηση των υπαρχόντων κανονισμών είναι πεδία, που πρέπει να εξεταστούν επισταμένως.

Επιπλέον, το οικονομικό κόστος είναι άλλη μία σημαντική παράμετρος, που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη. Το κόστος είναι ένα πολύπλευρο μέγεθος, καθώς περιλαμβάνει διάφορες πτυχές, όπως τα κόστη απόκτησης των εναέριων – διαστημικών συστημάτων, του οπτικού εξοπλισμού επικοινωνίας, τις επίγειες συμβατές υποδομές και τα κόστη διατήρησης – συντήρησης του δικτύου. Επιπρόσθετα, αν στο μέλλον επιβληθούν κόστη για τη χρησιμοποίηση του οπτικού φάσματος, όπως ισχύει στα RF, μπορεί να προκληθεί σημαντική αύξηση του κόστους. Συνεπώς, η εξεύρεση της χρυσής τομής μεταξύ κόστους και οφέλους, η οποία θα αντανακλάται στην επίδοση και την επεκτασιμότητα του δικτύου είναι μια καίρια πρόκληση για τα NTN δίκτυα.

3.5.4 Ακριβής εντοπισμός και καθορισμός της θέσης

Ο ακριβής εντοπισμός και καθορισμός της θέσης είναι ζωτικής σημασίας για κάθε FSO σύστημα, δεδομένου ότι η αξιοπιστία και η απόδοση των συνδέσεων εξαρτάται ως επί το πλείστο από την ακρίβεια της ευθυγράμμισης πομπού – δέκτη [94]. Η παράμετρος αυτή απόκτα ακόμη μεγαλύτερη σημασία στα NTN δίκτυα, καθώς τα χρησιμοποιούμενα μέσα (εναέριοι, διαστημικοί κόμβοι) είναι κινούμενα. Συνεπώς, για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης απαιτείται η χρήση ενός συνδυασμού των υπαρχόντων συστημάτων στον τομέα του εντοπισμού και καθορισμού της θέσης, όπως το GNSS (Global Navigation Satellite System), το INS (Inertial Navigation System) και τα συστήματα που βασίζονται σε επίγειους σταθμούς αναφοράς.

Το περιβάλλον λειτουργίας των κινούμενων HAPS και LAPS είναι ιδιαίτερα απαιτητικό, καθώς οι περισσότερες μεταδόσεις θα πραγματοποιούνται εντός αστικής δόμησης, που χαρακτηρίζεται από πολλά κτήρια και πληθώρα εμποδίων. Συνεπώς, η διατήρηση της οπτικής ζεύξης είναι συνυφασμένη με τη δυνατότητα παρακολούθησης και ακριβούς καθορισμού της θέσης των ιπτάμενων μέσων σε πραγματικό χρόνο. Μια πρόταση για την αντιμετώπιση της εν λόγω πρόκλησης είναι η ενσωμάτωση των GNSS και INS, προκειμένου να λειτουργούν συμπληρωματικά, προσφέροντας κατά αυτόν τον τρόπο βελτιωμένη ακρίβεια και πλεονασμό (redundancy), εξασφαλίζοντας παροδικά απρόσκοπτες επικοινωνίες σε περίπτωση που για κάποιο αστάθμητο παράγοντα το σύστημα GNSS δεν θα είναι διαθέσιμο.

Όμως, το INS δεν ενδείκνυται να λειτουργεί μόνο του, καθώς με την πάροδο του χρόνου οδηγούμαστε σε σταδιακή υποβάθμιση της ακρίβειας, λόγω των σφαλμάτων που συσσωρεύονται στον αισθητήρα. Συναφώς, πρέπει να εξεταστεί η χρήση εναλλακτικών συστημάτων, όπως για παράδειγμα η επίγεια και εναέρια πλοήγηση, που βασίζονται σε επίγειους σταθμούς αναφοράς ή ουράνια σώματα αντιστοίχως. Τα συστήματα επίγειας πλοήγησης

επειδή εξαρτώνται από την τοπολογία και τη θέση των σταθμών αναφοράς ενδεχομένως να μην είναι κατάλληλη για όλα τα περιβάλλοντα. Από την άλλη πλευρά, η ουράνια πλοήγηση, που χρησιμοποιεί τα αστέρια ή ουράνια σώματα, μπορεί να προσφέρει μεγάλη ακρίβεια, όμως σε συνθήκες καθαρού ουρανού, που δεν είναι πάντα δεδομένο. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που το GNSS δεν είναι διαθέσιμο, η ύπαρξη των παραπάνω εναλλακτικών αποκτά ιδιαίτερη σημασία για αξιοπιστία και του απόδοση των NTN δικτύων.

3.5.5 Αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) στα FSO – NTN δίκτυα

Η ενσωμάτωση των τεχνικών της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης στα σύγχρονα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών είναι μια ιδέα, που κεντρίζει ολοένα και περισσότερο το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας, προκειμένου να εξευρεθούν τρόποι βελτιστοποίησης σημαντικών διαδικασιών (ανάθεση πόρων, σχήμα διαμόρφωσης κ.λπ.), που επηρεάζουν την απόδοσή τους. Συναφώς, αυτές οι πολλά υποσχόμενες τεχνικές θα μπορούσαν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη σχεδίαση και την ανάπτυξη των FSO – NTN δικτύων. Στις παρακάτω υποπαραγράφους θα αναφερθούν εν συντομία ορισμένα προβλήματα – δυσκολίες, που μπορούν να επιλυθούν ή τουλάχιστον να επωφεληθούν από τη χρήση των τεχνικών της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης.

- Προσαρμογή των μεταδόσεων σε πραγματικό χρόνο: Μια αξιοσημείωτη εφαρμογή των AI και ML, σε αυτό το μοτίβο, είναι η βελτιστοποίηση των παραμέτρων της ποιότητας των FSO ζεύξεων με τα επίγεια και εναέρια μέσα, σε πραγματικό χρόνο. Με τη συνεχή παρακολούθηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών και την επίδοση του συστήματος, τα μοντέλα AI και ML θα μπορούσαν να προσαρμόσουν δυναμικά βασικές παραμέτρους, όπως η ισχύς εκπομπής, τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, οι κατευθύνσεις των οπτικών δεσμών, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ποιότητα των FSO ζεύξεων. Με την δυναμική προσαρμογή του συστήματος θα εξασφαλίζεται η αποδοτική μετάδοση δεδομένων ακόμη και σε απαιτητικά περιβάλλοντα διάδοσης, που χαρακτηρίζονται από ισχυρή τυρβώδη ροή ή ταχείες μεταβολές των καιρικών συνθηκών. Επιπρόσθετα, οι αλγόριθμοι AI και ML θα μπορούσαν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη σχεδίαση των τροχιών κίνησης, εξετάζοντας σε πραγματικό χρόνο χαρακτηριστικά, όπως η ποιότητα της ζεύξης, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, οι καιρικές συνθήκες και η κατανάλωση ενέργειας, προκειμένου να βελτιστοποιούνται τα μονοπάτια διάδοσης στα FSO – NTN δίκτυα.

- Σφάλματα σκόπευσης: Τα σφάλματα σκόπευσης στα NTN δίκτυα είναι απόρροια των μετακινήσεων των HAPS και LAPS, που οδηγεί εν τέλει στην απώλεια της ευθυγράμμισης των οπτικών δεσμών. Όταν λαμβάνουν χώρα

αυτά τα σφάλματα η ποιότητα των FSO ζεύξεων μπορεί να υποβαθμιστεί σημαντικά, καθώς οι απώλειες του σήματος είναι τεράστιες. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η πρόκληση, απαιτείται η ανάπτυξη δυναμικών τεχνικών παρακολούθησης, που θα ενσωματώνουν αλγορίθμους AI και ML, οι οποίοι μέσω της ανάλυσης δεδομένων θα μπορούν να διαμορφώνουν προφίλ χρήστη και μοτίβα κινήσεων, για να προσαρμόζουν δυναμικά την κατεύθυνση των δεσμών και να διατηρούν σε ικανοποιητικό επίπεδο την ευθυγράμμιση.

- **Ενεργειακή απόδοση:** Τα μοντέλα AI και ML κατά τη διάρκεια που λειτουργούν οι εναέριες πλατφόρμες, θα πρέπει να υπολογίζουν τόσο την τυχόν παραγόμενη ενέργεια από τα εγκατεστημένα ηλιακά πάνελ στα εν λόγω μέσα και ταυτόχρονα να παρακολουθούν την κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με το φόρτο και τις απαιτήσεις του δικτύου. Συναφώς, τα μοντέλα AI και ML λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παραμέτρους, θα μπορούν να προσαρμόζουν δυναμικά τις διαδρομές και τις τροχιές των UAVs – drones, προκειμένου να εξασφαλίζουν τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση και τη βέλτιστη συλλογή ενέργειας. Επιπλέον, η συλλογή ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί πέρα από τα ηλιακά πάνελ και με χρήση οπτικών πηγών, που εκπέμπουν αποκλειστικά σε πλατφόρμες χαμηλού ύψους για να φορτίζουν. Για παράδειγμα τα balloons μπορούν να έχουν εγκατεστημένα ηλιακά πάνελ και εν συνεχεία να χρησιμοποιούν αποκλειστικές οπτικές πηγές να παράσχουν φόρτιση σε HAPS συστήματα με μικρότερο διαθέσιμο χώρο. Με τη χρήση των τεχνικών AI και ML μπορεί να επιτευχθεί η ενσωμάτωση αυτών των οπτικών πηγών σε κατάλληλες θέσεις, ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη απόδοσή των.

- **IRS στα FSO – NTN δίκτυα:** Η ενσωμάτωση των IRS στα FSO – NTN δίκτυα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω θα συμβάλλουν στην επέκταση της κάλυψης και γενικότερα βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Τα μοντέλα AI και ML, που θα αναπτυχθούν, μπορούν να εστιάσουν σε βασικούς τομείς, όπως ο καθορισμός των βέλτιστων θέσεων εγκατάστασης και ο προγραμματισμός των στοιχείων των IRS, έχοντας ως γνώμονα την καλύτερη αξιοποίηση των IRS. Αυτά τα μοντέλα θα μπορούν να αναλύουν σε πραγματικό χρόνο τις συνθήκες της FSO ζεύξης, συμπεριλαμβάνοντας την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος και τις παρεμβολές, και προσαρμόζοντας δυναμικά τη θέση των στοιχείων των IRS, θα βελτιώνεται η αξιοπιστία και η χωρητικότητα της ζεύξης, καθώς επίσης και η διαθεσιμότητα του συστήματος, διότι θα μπορούν δυναμικά να δημιουργούνται νέα μονοπάτια, ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου κάθε φορά.

- **Επεκτασιμότητα – ευελιξία:** Οι τεχνικές AI και ML αξιοποιώντας τη δυνατότητα της ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, μπορούν να προσαρμόζουν δυναμικά το μέγεθος του δικτύου και να προβαίνουν σε παραμετροποιήσεις προσανατολισμένες στη ζήτηση και τις συνθήκες του

περιβάλλοντος διάδοσης. Με τη συνεχή παρακολούθηση και πρόβλεψη της κίνησης του δικτύου, τα μοντέλα AI και ML μπορούν να διασφαλίσουν την αποδοτική κατανομή πόρων, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση του δικτύου καθώς είναι σε θέση να ανταπεξέρχεται σε διάφορα επίπεδα κίνησης. Η προσαρμοστικότητα και η αποδοτική κατανομή πόρων είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της επεκτασιμότητας – ευελιξίας και της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας των FSO – NTN δικτύων, όπου οι απαιτήσεις συνεχώς αυξάνονται.

- Ακριβής εντοπισμός και καθορισμός της θέσης: Οι αλγόριθμοι AI και ML θα μπορούν να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση των εν λόγω προκλήσεων, χρησιμοποιώντας προηγμένα συστήματα εντοπισμού θέσης, όπως το GNSS, συνδυαζόμενα με ιδανικά σημεία αναφοράς, που προέρχονται από AI μοντέλα. Συνεπώς, με την ενσωμάτωση των τεχνικών AI και ML, το σύστημα θα μπορούσε να εκπαιδεύεται συνεχώς από δεδομένα πραγματικού χρόνου, φτάνοντας έτσι στη βελτίωση της ακρίβειας του και στην απόκτηση ευρωστίας, όσον αφορά τον ακριβή εντοπισμό θέσης αντικειμένων, σε δύσκολα περιβάλλοντα.

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν λεπτομερώς οι τάσεις, που επικρατούν, όσον αφορά τις πιθανές αρχιτεκτονικές των σύγχρονων δικτύων B5G και 6G, προκειμένου να καταστούν ικανά να υποστηρίξουν αποτελεσματικά τις διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις, των τελικών χρηστών, για επικοινωνίες υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, μικρής καθυστέρησης και με μικρή πιθανότητα αποκοπής. Με βάση τις υπό κατάρτιση προδιαγραφές, των δικτύων B5G και 6G, παρατέθηκαν διάφορες αρχιτεκτονικές, που θα συνδυάζουν διάφορες τεχνολογίες, προκειμένου να λειτουργούν συνεργατικά με την RF τεχνολογία, καθώς οι υπάρχουσες τηλεπικοινωνιακές υποδομές τείνουν να φτάσουν στον κόρο, με αποτέλεσμα να μην είναι σε θέση να καλύψουν επαρκώς τις απαιτήσεις και τα όρια, που πρόκειται να τεθούν.

Οι οπτικές επικοινωνίες και ειδικότερα η τεχνολογία FSO είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση, καθώς δύναται να παρέχει επιδόσεις εφάμιλλες με αυτές των οπτικών ινών, χωρίς ωστόσο να απαιτείται η ανάληψη ενός πολύ υψηλού αρχικού κόστους επένδυσης, που αφορά την εκσκαφή για την εγκατάσταση των ινών. Επιπρόσθετα, το πλεονέκτημα της λειτουργίας σε περιοχές του φάσματος συχνοτήτων, οι οποίες δεν απαιτούν άδεια χρήσης είναι άλλος ένας σημαντικός παράγοντας, που κάνει τα FSO συστήματα περισσότερο ελκυστικά. Παρόλα αυτά, όπως έχουμε αναφέρει διεξοδικά σε προηγούμενα κεφάλαια, πέρα από τα πλεονεκτήματα (μεγάλο εύρος ζώνης, μεγάλη χωρητικότητα κ.λπ.) που παρέχει η λειτουργία αυτών των συστημάτων σε πολύ υψηλές ζώνες συχνοτήτων, δημιουργεί ταυτόχρονα και ορισμένες σημαντικές προκλήσεις, όπως η ακριβής ευθυγράμμιση των πομποδεκτών λόγω της μεγάλης κατευθυντηκότητας των κεραιών και η απαίτηση για ύπαρξη οπτικής επαφής, που χρήζουν αντιμετώπισης προκειμένου να αποδώσουν ικανοποιητικά. Επιπλέον, η μεγάλη εξάρτηση της επίδοσης των FSO συστημάτων από τις καιρικές συνθήκες εισάγει ολοένα και περισσότερο την ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων RF/FSO, που θα λειτουργούν συνεργατικά εξασφαλίζοντας την καλύτερη ποιότητα παρεχόμενων υπηρεσιών στους τελικούς χρήστες.

Το δίκτυο κορμού των σύγχρονων κινητών συστημάτων είναι το τμήμα του δικτύου, που χρήζει της μεγαλύτερης προσοχής όσον αφορά τη σχεδίασή των, καθώς ο όγκος των διακινούμενων δεδομένων θα είναι εξαιρετικά μεγάλος και βαίνει συνεχώς αυξανόμενος, λόγω της εκτόξευσης του αριθμού των τελικών χρηστών (άνθρωποι, αισθητήρες, συσκευές IoT κ.λπ.), οι οποίοι θα αιτούνται πρόσβαση στους πόρους του δικτύου. Συνεπώς, η ενσωμάτωση των FSO συστημάτων στο δίκτυο κορμού, για την υλοποίηση των backhaul ζεύξεων, οι οποίες θα διαλειτουργούν σε συνδυασμό με τις υπάρχουσες μικροκυματικές ζεύξεις και τα δίκτυα οπτικών ινών, θεωρείται μια πολύ σημαντική προσθήκη, καθώς θα αυξηθεί η χωρητικότητά του και επίσης με

αυτών των τρόπο δημιουργούνται πρόσθετες εναλλακτικές διαδρομές, οι οποίες κάνουν εν γένει το σύστημα πιο εύρωστο, διότι σε περίπτωση που κάποια από τις ζεύξεις παρουσιάσει βλάβη η κίνηση θα μπορεί να αναδρομολογείται από εναλλακτική – εφεδρική διαδρομή.

Επιπλέον, η ανάπτυξη εναέριων δικτύων με χρήση drone, UAV και δορυφόρων, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα πλέγμα επικοινωνιών, το οποίο θα παρέχει υπηρεσίες κατά απαίτηση, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις των δικτύων B5G και 6G, λόγω των δυσχερειών που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, ήτοι σφάλματα στόχευσης, μεταβλητότητα καιρικών συνθηκών, μεγάλες αποστάσεις διάδοσης, συχνότητα διαπομπών. Ωστόσο, αν ξεπεραστούν αυτές οι δυσκολίες και επιτευχθεί η ενσωμάτωσή τους στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών τα οφέλη θα είναι πολλαπλά και ιδιαίτερα σημαντικά. Ενδεικτικά, αναφέρουμε την αύξηση της ακτίνας κάλυψης των δικτύων, διότι λόγω του μεγάλου ύψους λειτουργίας των σταθμών βάσης θα καταστεί πρόσβαση στο δίκτυο ακόμη και σε δυσπρόσιτες περιοχές, όπου είναι αδύνατο να γίνει επίγεια εγκατάσταση. Επιπλέον, θα δοθεί η δυνατότητα να αναπτύσσονται ad hoc δίκτυα σύμφωνα με τις υπάρχουσες ανάγκες, προκειμένου να καλύπτονται επικοινωνιακά έκτακτα γεγονότα, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο αποσυμφόρηση στο δίκτυο και διατήρηση του επιπέδου των παρεχόμενων υπηρεσιών εντός των προδιαγραφών.

Θα ήταν σημαντική παράλειψη εάν δεν αναφέρουμε, την ανάγκη ενσωμάτωσης και χρησιμοποίησης της τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης για τη βελτιστοποίηση διαδικασιών, που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία του συστήματος. Ο τεράστιος όγκος δεδομένων, που θα κληθούν να διαχειριστούν τα σύγχρονα δίκτυα, δίνουν ταυτόχρονα τη δυνατότητα στους αλγορίθμους μηχανικής μάθησης να «εκμεταλλεύονται» τα εν λόγω δεδομένα, προκειμένου να «εκπαιδεύονται» και να δημιουργούν προφίλ χρηστών ανάλογα με το δρομολόγιο μετακίνησης, τις ώρες διέλευσης από συγκεκριμένα σημεία, προκειμένου οι πόροι να ανατίθενται όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά.

Με την ολοκλήρωση του παρόντος πονήματος και λαμβάνοντας υπόψη τα πλεονεκτήματα, τις προκλήσεις και τις επιδόσεις, που έχουν επιτευχθεί από προσομοιώσεις, προκύπτει ότι η ενδεδειγμένη τοπολογία των σύγχρονων ασυρμάτων κινητών δικτύων, προκειμένου να καταστεί δυνατή η ικανοποίηση των αυστηρών προδιαγραφών λειτουργίας των, θα πρέπει να θεμελιωθεί στη χρήση υβριδικών συστημάτων RF/FSO (Terrestrial και Non – Terrestrial), έχοντας ως γνώμονα τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η αποδοτική λειτουργία των υβριδικών συστημάτων RF/FSO, εδάφους – αέρος – διαστήματος, μπορεί να εκτοξεύσει τις επιδόσεις των δικτύων, ωστόσο δεν μπορεί να θεωρηθεί δεδομένη, καθώς στις ήδη μεγάλες απώλειες, λόγω διάδοσης, εισάγονται πρόσθετες απώλειες, εξαιτίας της μεγάλης ευαισθησίας – εξάρτησής των από τις καιρικές συνθήκες, η οποία

προκαλεί περαιτέρω υποβάθμιση της συνολικής επίδοσης των εν λόγω συστημάτων.

- Οι απώλειες, λόγω σφαλμάτων στόχευσης, είναι μια κρίσιμη παράμετρος της υποβάθμισης της επίδοσης των FSO συστημάτων και αναμένουμε να γίνει ακόμη εντονότερη στα B5G και 6G, όπου σχεδιάζετε η ενσωμάτωση εναέριων οπτικών σταθμών βάσης, η θέση των οποίων είναι αδύνατο να διατηρηθεί σταθερή.

- Η επίδοση των υβριδικών συστημάτων RF/FSO, όπως προέκυψε από τις προσομοιώσεις και τον υπολογισμό βασικών μετρικών, όπως η πιθανότητα αποκοπής, το BER και η χωρητικότητα, είναι καλύτερη έναντι των απλών FSO, παρέχοντας μεγαλύτερη ευρωστία και αξιοπιστία στα σύγχρονα συστήματα κινητών επικοινωνιών.

- Η ανάπτυξη της τεχνολογίας στον τομέα της κατασκευής των λέιζερ, μπορεί να σταθεί σημαντικός αρωγός στην επίτευξη πολύ υψηλών ρυθμών μετάδοσης, καθώς όπως παρατηρήθηκε στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, η εξασφάλιση όσο το δυνατόν μικρότερης απόκλισης δέσμης είναι ζωτικής σημασίας για την επίδοση των FSO συστημάτων.

- Η επέκταση της εμβέλειας και της γεωγραφικής κάλυψης των δικτύων B5G και 6G, μέσω της χρήσης εναέριων πλατφορμών είναι προτιμητέα της πύκνωσης του δικτύου μέσω εγκατάστασης RF σταθμών βάσης, καθώς τα FSO συστήματα προκαλούν ελάχιστες παρεμβολές στις RF υπάρχουσες υποδομές, όπου το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι ήδη βεβαρημένο.

- Ο διαμοιρασμός – κοινή χρήση του διαθέσιμου φάσματος μεταξύ των επίγειων και εναέριων συστημάτων, διαπιστώσαμε ότι είναι μια πολύ καλή λύση για την ικανοποίηση των ιδιαίτερα απαιτητικών προδιαγραφών των σύγχρονων δικτύων, όσον αφορά τη χωρητικότητα και το πλήθος των τελικών χρηστών του δικτύου, καθώς με την πάροδο των ετών αναμένεται εκθετική αύξηση στις απαιτήσεις των εν λόγω μετρικών.

- Η ενσωμάτωση των εναέριων και διαστημικών πλατφορμών στα υπάρχοντα συστήματα κινητών επικοινωνιών, προκειμένου να παράσχουν backhaul ζεύξεις, είναι μεν μια ελκυστική λύση που βοηθά στην επέκταση και αποσυμφόρηση των επίγειων δικτύων, ωστόσο δεν μπορούμε να αμελήσουμε ότι απαιτεί ένα εξαιρετικά υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, που πρέπει να αναληφθεί από τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους. Συνεπώς, εκτιμάτε ότι ίσως απαιτηθεί αρκετός χρόνος μέχρι αυτές οι ιδέες να ωριμάσουν τεχνολογικά και να υλοποιηθούν στην πράξη.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] A. Jahid, M. H. Alsharif and T. J. Hall, "A Contemporary Survey on Free Space Optical Communication: Potential, Technical Challenges, Recent Advances and Research Direction." *Journal of Network and Computer Applications*, November 2020.
- [2] G. Pan, J. Ye and Z. Ding, "Secure Hybrid VLC-RF Systems With Light Energy Harvesting," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 10, pp. 4348-4359, October 2017.
- [3] F. Jin, R. Zhang and L. Hanzo, "Resource Allocation Under Delay-Guarantee Constraints for Heterogeneous Visible-Light and RF Femtocell," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 2, pp. 1020-1034, February 2015.
- [4] M. A. Esmail, A. M. Ragheb, H. A. Fathallah, M. Altamimi and S. A. Alshebeili, "5G-28 GHz Signal Transmission Over Hybrid All-Optical FSO/RF Link in Dusty Weather Conditions," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 24404-24410, February 2019.
- [5] M. Z. Chowdhury, M. T. Hossan, A. Islam and Y. M. Jang, "A Comparative Survey of Optical Wireless Technologies: Architectures and Applications," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 9819-9840, January 2018.
- [6] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, and C. Chen, "What is LiFi?" *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 6, pp. 1533–1544, March 2016.
- [7] H. Haas, L. Yin, C. Chen, S. Videv, D. Parol, E. Poves, H. Alshaer, and M. S. Islam, "Introduction to indoor networking concepts and challenges in LiFi," in *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 12, no. 2, pp. A190–A203, February 2020.
- [8] D. Tsonev, H. Chun, S. Rajbhandari, J. J. McKendry, S. Videv, E. Gu, M. Haji, S. Watson, A. E. Kelly, G. Faulkner, M. D. Dawson, H. Haas and D. O'Brien, "A 3-Gb/s Single-LED OFDM-Based Wireless VLC Link Using a Gallium Nitride μ LED," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 7, pp. 637–640, April 2014.
- [9] H.-H. Lu, C.-Y. Li, H.-W. Chen, C.-M. Ho, M.-T. Cheng, Z.-Y. Yang, and C.-K. Lu, "A 56 Gb/s PAM4 VCSEL-Based LiFi Transmission With Two-Stage Injection-Locked Technique," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, February 2017.

- [10] L. Grobe, A. Paraskevopoulos, J. Hilt, D. Schulz, F. Lassak, F. Hartlieb, C. Kottke, V. Jungnickel, and K.-D. Langer, "High-speed visible light communication systems," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 60–66, December 2013.
- [11] D. Karunatilaka, F. Zafar, V. Kalavally, and R. Parthiban, "LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1649–1678, Third Quarter 2015.
- [12] D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, "Towards a 100 Gb/s visible light wireless access network," in *Optics Express*, vol. 23, no. 2, pp. 1627–1637, January 2015.
- [13] D. T. Nguyen, S. Park, Y. Chae, and Y. Park, "VLC/OCC Hybrid Optical Wireless Systems for Versatile Indoor Applications," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 22 371–22 376, February 2019.
- [14] Z. Ghassemlooy, P. Luo, and S. Zvanovec, "Optical camera communications," in *Optical Wireless Communications Springer*, pp. 547–568, August 2016.
- [15] Y. Goto, I. Takai, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, S. Kawahito, S. Arai, T. Yendo, and K. Kamakura, "A New Automotive VIC System Using Optical Communication Image Sensor," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 3, pp. 1–17, June 2016.
- [16] Y. Qin, T. T. Vu, and Y. Ban, "Toward an Optimal Algorithm for LiDAR Waveform Decomposition," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, no. 3, pp. 482–486, May 2012.
- [17] Y. Zhang, X. Sun, H. Xu, and E. Yao, "Tracking Multi-Vehicles With Reference Points Switches at the Intersection Using a Roadside LiDAR Sensor," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 174 072–174 082, November 2019.
- [18] A. Malik and P. Singh, "Free space optics: Current applications and future challenges," in *International Journal of Optics*, vol. 2015, September 2015.
- [19] F. Yang, J. Cheng, and T. A. Tsiftsis, "Free-Space Optical Communication with Nonzero Boresight Pointing Errors," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 2, pp. 713–725, February 2014.

- [20] S. A. Al-Gailani, M. F. M. Salleh, A. A. Salem, R. Q. Shaddad, U. U. Sheikh, N. A. Algeelani and T. A. Almohamad, "A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 7353-7373, January 2021.
- [21] K. V. Kiran, V. Kumar, A. K. Turuk, and S. K. Das, "Estimation of Link Margin for Performance Analysis of FSO Network," in *Communications in Computer and Information Science*, vol. 827, pp. 444–458, December 2018.
- [22] M. Uysal, C. Capsoni, A. B. Z. Ghassemlooy, and E. Udvary, "Optical Wireless Communications: An Emerging Technology," Cham, Switzerland: Springer, 2016.
- [23] P. Vishwakarma and J. Vijay, "Comparative Analysis of Free Space Optics and Single Mode Fiber," in *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, vol. 2, no. 1, January 2016.
- [24] P. S. Ray, "Broadband Complex Refractive Indices of Ice and Water," in *Applied Optics*, vol. 11, no. 8, pp. 1836–1844, August 1972.
- [25] J. A. R. P. de Carvalho, H. Veiga, P. A. J. Gomes, C. F. F. P. R. Pacheco and A. D. Reis, "Experimental Performance Study of a Very High Speed Free Space Optics Link at the University of Beira Interior Campus: a Case Study," in *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*, pp. 154-157, December 2008.
- [26] X. Liu, "Free-Space Optics Optimization Models for Building Sway and Atmospheric Interference Using Variable Wavelength," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 57, no. 2, pp. 492-498, February 2009.
- [27] International Telecommunication Union - Radiocommunication (ITU - R) R. P. Series, "Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Line-of-Sight Systems", Recommendation ITU-R P.530-12, pp. 1–47, 2006.
- [28] International Telecommunication Union - Radiocommunication (ITU - R) R. P. Series, "Specific attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods", Recommendation ITU-R P.838-3, pp. 1–8, 2005.
- [29] Z. Rahman, S. M. Zafaruddin and V. K. Chaubey, "Performance of Opportunistic Receiver Beam Selection in Multiaperture OWC Systems Over

Foggy Channels," in IEEE Systems Journal, vol. 14, no. 3, pp. 4036-4046, September 2020.

[30] M.S. Khan, E. Leitgeb, S. S. Muhammad, M. S. Awan, V. Kvicera and M. Grabner, "Further Results on Fog Modeling for terrestrial free-space Optical links," in Optical Engineering, vol. 51, no. 3, April 2012.

[31] R. M. Pierce, J. Ramaprasad and E. C. Eisenberg, "Optical attenuation in fog and clouds," in International Symposium on the Convergence of IT and Communications, Proc. SPIE 4530, Optical Wireless Communications IV, November 2001.

[32] A. Alatrash and E. Matida, "Characterization of Medication Velocity and Size Distribution from Pressurized Metered-Dose Inhalers by Phase Doppler Anemometry," in Journal Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery, vol. 29, no. 6, pp. 501–513, December 2016.

[33] M. Ijaz, Z. Ghassemlooy, A. Gholami and X. Tang, "Smoke Attenuation in Free Space Optical Communication Under Laboratory Controlled Conditions," in 7th International Symposium on Telecommunications (IST'2014), pp. 758–762, September 2014.

[34] M. A. Al-Habash, L. C. Andrews and R. Phillips, "Mathematical Model for the Irradiance Probability Density Function of a Laser Beam Propagating Through Turbulent Media," in Optical Engineering, vol. 40, no. 8, p. 1554-1562, August 2001.

[35] N. D. Chatzidiamantis and G. K. Karagiannidis, "On the Distribution of the Sum of Gamma-Gamma Variates and Applications in RF and Optical Wireless Communications," in IEEE Transactions on Communications, vol. 59, no. 5, pp.1298–1308, May 2011.

[36] V. Jamali, D. S. Michalopoulos, M. Uysal, and R. Schober, "Link Allocation for Multiuser Systems with Hybrid RF/FSO Backhaul: Delay-Limited and Delay-Tolerant Designs," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 15, no. 5, pp. 3281–3295, May 2016.

[37] X. Huang, X. Xie, J. Song, T. Duan, H. Hu, X. Xu, and Y. Su, "Performance Comparison of All-Optical Amplify-and-Forward Relaying FSO Communication Systems with OOK and DPSK Modulations," in IEEE Photonics Journal, vol. 10, no. 4, pp. 1–11, August 2018.

- [38] Z. Zhao, Z. Zhang, J. Tan, Y. Liu, and J. Liu, "200 Gb/s FSO WDM Communication System Empowered by Multiwavelength Directly Modulated TOSA for 5G Wireless Networks," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 4, pp. 1–8, August 2018.
- [39] Y. Kaymak, R. Rojas-Cessa, J. Feng, N. Ansari, M. Zhou, and T. Zhang, "A Survey on Acquisition, Tracking, and Pointing Mechanisms for Mobile Free-Space Optical Communications," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 1104–1123, Second Quarter 2018.
- [40] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong and J. C. Zhang, "What Will 5G Be?," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, June 2014.
- [41] B. Kalra, D.K. Chauhan, "A Comparative Study on Mobile Wireless Communication Network: 1G to 5G, " in *International Journal of Computer Science and Information Technology Research*, vol. 2, no. 3, pp. 430–433, September 2014.
- [42] M. Agiwal, A. Roy and N. Saxena, "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617-1655, Third Quarter 2016.
- [43] Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis and P. Fan, "6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 28-41, September 2019.
- [44] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao and S. Li, "6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques," in *IEEE Network*, vol. 33, no. 4, pp. 70-75, July/August 2019.
- [45] S. Alraih, I. Shayea, M. Behjati, R. Nordin, Nor Fadzilah Abdullah, A. Abu-Samah and D. Nandi, "Revolution or Evolution? Technical Requirements and Considerations towards 6G Mobile Communications.", in *Sensors*, vol. 22, no. 3, January 2022.
- [46] B. Zong, C. Fan, X. Wang, X. Duan, B. Wang and J. Wang, "6G Technologies: Key Drivers, Core Requirements, System Architectures, and Enabling Technologies," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 18-27, September 2019.
- [47] T. S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, A. Madanayake, S. Mandal, A. Alkhateeb and G. C. Trichopoulos, "Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 78729-78757, June 2019.

- [48] E. Basar, "Reconfigurable Intelligent Surface-Based Index Modulation: A New Beyond MIMO Paradigm for 6G," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 5, pp. 3187-3196, May 2020.
- [49] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan and M. Zorzi, "Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55-61, March 2020.
- [50] K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang and Y. J. A. Zhang, "The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 8, pp. 84-90, August 2019.
- [51] K. David and H. Berndt, "6G Vision and Requirements: Is There Any Need for Beyond 5G?," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 72-80, September 2018.
- [52] E. Calvanese Strinati, S. Barbarossa, J. L. Gonzalez-Jimenez, D. Kténas, N. Cassiau, L. Maret and C. Dehos, "6G: The Next Frontier: From Holographic Messaging to Artificial Intelligence Using Subterahertz and Visible Light Communication," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 42-50, September 2019.
- [53] L. Yang and Z. Xianrong, "6G: A Survey on Technologies, Scenarios, Challenges, and the Related Issues", in *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 19, September 2020.
- [54] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed and Y. M. Jang, "6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 957-975, July 2020.
- [55] Y. Huang, J. Jin, M. Lou, J. Dong, D. Wu, L. Xia, S. Wang and X. Zhang, "6G mobile network requirements and technical feasibility study," in *China Communications*, vol. 19, no. 6, pp. 123-136, June 2022.
- [56] D. Kokkinis, N. Ioannou, D. Katsianis, and D. Varoutas, "A 6G Techno-Economic Framework for evaluating the feasibility of the proposed technology enablers and business models", in *32nd European Conference of the International Telecommunications Society (ITS)*, Madrid, Spain, 19th – 20st June 2023.
- [57] P. K. Sahoo and A. K. Yadav, "A Comprehensive Road Map of Modern Communication Through Free - Space Optics", in *Journal of Optical Communications*, vol. 44, no. 1, pp. 1497-1513, December 2020.

- [58] M. Z. Chowdhury, M. K. Hasan, M. Shahjalal, M. T. Hossan and Y. M. Jang, "Optical Wireless Hybrid Networks: Trends, Opportunities, Challenges, and Research Directions," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 2, pp. 930-966, Second Quarter 2020.
- [59] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, M. K. Hasan and Y. M. Jang, "The Role of Optical Wireless Communication Technologies in 5G/6G and IoT Solutions: Prospects, Directions, and Challenges, ", in *Applied Sciences*, vol. 9, no. 20, October 2019.
- [60] W. Cai, I. N'Doye, B. S. Ooi, M.-S. Alouini and T. M. Laleg-Kirati, "Modeling and Experimental Study of The Vibration Effects in Urban Free-Space Optical Communication Systems," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, no. 6, pp. 1-13, December 2019.
- [61] S. Chen, J. Hu, Y. Shi, Y. Peng, J. Fang, R. Zhao and L. Zhao, "Vehicle-to-Everything (V2X) Services Supported by LTE-Based Systems and 5G," in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 70-76, June 2017.
- [62] H. A. U. Mustafa, M. A. Imran, M. Z. Shakir, A. Imran and R. Tafazolli, "Separation Framework: An Enabler for Cooperative and D2D Communication for Future 5G Networks," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 419-445, First Quarter 2016.
- [63] M. Uysal, Jing Li and Meng Yu, "Error Rate Performance Analysis of Coded Free-Space Optical Links Over Gamma-Gamma Atmospheric Turbulence Channels," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, no. 6, pp. 1229-1233, June 2006.
- [64] B. Bag, A. Das, I. S. Ansari, A. Prokeš, C. Bose and A. Chandra, "Performance Analysis of Hybrid FSO Systems Using FSO/RF-FSO Link Adaptation," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 1-17, June 2018.
- [65] M. O. Hasna and M.-S. Alouini, "A Performance Study of Dual-Hop Transmissions with Fixed Gain Relays," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 6, pp. 1963-1968, November 2004.
- [66] M. Usman, H.-C. Yang and M.-S. Alouini, "Practical Switching-Based Hybrid FSO/RF Transmission and Its Performance Analysis," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 1-13, October 2014.
- [67] F. Rinaldi, H.-L. Määtänen, J. Torsner, S. Pizzi, S. Andreev, A. Iera, Y. Koucheryavy and G. Araniti, "Non-Terrestrial Networks in 5G & Beyond: A Survey," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 165178-165200, September 2020.

- [68] GSMA, "Wireless Backhaul Evolution Delivering next-generation connectivity, ", Report GSMA, February 2021.
- [69] J. Liu, Y. Shi, Z. M. Fadlullah and N. Kato, "Space-Air-Ground Integrated Network: A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 4, pp. 2714-2741, Fourth Quarter 2018.
- [70] A. Lalbakhsh, A. Pitcairn, K. Mandal, M. Alibakhshikenari, K. P. Esselle and S. Reisenfeld, "Darkening Low-Earth Orbit Satellite Constellations: A Review," in IEEE Access, vol. 10, pp. 24383-24394, February 2022.
- [71] H. Stadler and P. Skritek, "WST 47.2 -22 (197-204).", in Environmental Science, Engineering, 2003.
- [72] INFOLYSIS P.C, "A comparative CAPEX Techno-economic Analysis of NFV Applicability on the ground segment of GEO/MEO/LEO Satellite Systems," , Technical White Paper, 2017.
- [73] Z. Yang and A. Mohammed, "Wireless communications from high altitude platforms: Applications, deployment and development," in IEEE 12th International Conference on Communication Technology, Nanjing, China, pp. 1476-1479, 2010.
- [74] M. Elamassie and M. Uysal, "Free Space Optical Communication: An Enabling Backhaul Technology for 6G Non-Terrestrial Networks" in Photonics, vol. 10, no. 11, pp. 1-45, October 2023.
- [75] N.J. Nzekwu, M.A. Fernandes, G.M. Fernandes, P.P. Monteiro and F.P. Guiomar, "A Comprehensive Review of UAV-Assisted FSO Relay Systems," , in Photonics, vol. 11, no. 3, pp. 1-24, March 2024.
- [76] N. Pachler, I. Del Portillo, E. F. Crawley and B. G. Cameron, "An Updated Comparison of Four Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband," in IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Montreal, QC, Canada, pp. 1-7, 14-23 June 2021.
- [77] G. Wang, F. Yang, J. Song and Z. Han, "Free Space Optical Communication for Inter-Satellite Link: Architecture, Potentials and Trends," in IEEE Communications Magazine, vol. 62, no. 3, pp. 110-116, March 2024.
- [78] Ιστοσελίδα: <https://www.axelspace.com/news/kprogram/> (Axelspace collaborates in the "Development and demonstration of inter-satellite optical communication network system").
- [79] R. Swaminathan, S. Sharma, N. Vishwakarma and A. S. Madhukumar, "HAPS-Based Relaying for Integrated Space–Air–Ground Networks With Hybrid FSO/RF Communication: A Performance Analysis," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 57, no. 3, pp. 1581-1599, June 2021.

- [80] I. S. Ansari, F. Yilmaz and M.-S. Alouini, "Performance Analysis of FSO Links over Unified Gamma-Gamma Turbulence Channels," in IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Glasgow, UK, pp. 1-5, 11-14 May 2015.
- [81] C. Yan, L. Fu, J. Zhang and J. Wang, "A Comprehensive Survey on UAV Communication Channel Modeling," in IEEE Access, vol. 7, pp. 107769-107792, August 2019.
- [82] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 4, pp. 2231-2258, Fourth Quarter 2014.
- [83] S. Sharma, A. S. Madhukumar and S. Ramabadran, "Performance of Dual-Hop Hybrid FSO/RF System with Pointing Errors Optimization," in IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), Antwerp, Belgium, pp. 1-5, 25-28 May 2020.
- [84] E. Zedini, A. Kammoun and M.-S. Alouini, "Performance of Multibeam Very High Throughput Satellite Systems Based on FSO Feeder Links with HPA Nonlinearity," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 9, pp. 5908-5923, September 2020.
- [85] A. Abdi, W. C. Lau, M.-S. Alouini and M. Kaveh, "A New Simple Model for Land Mobile Satellite Channels: First- And Second-Order Statistics," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 2, no. 3, pp. 519-528, May 2003.
- [86] G. Alfano and A. De Maio, "Sum of Squared Shadowed-Rice Random Variables and its Application to Communication Systems Performance Prediction," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 6, no. 10, pp. 3540-3545, October 2007.
- [87] S. Sharma, A. S. Madhukumar and R. Swaminathan, "Switching-Based Cooperative Decode-And-Forward Relaying for Hybrid FSO/RF Networks," in Journal of Optical Communications and Networking, vol. 11, no. 6, pp. 267-281, June 2019.
- [88] R. Swaminathan, G. K. Karagiannidis and R. Roy, "Joint Antenna and Relay Selection Strategies for Decode-and-Forward Relay Networks," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 11, pp. 9041-9056, November 2016.
- [89] M. Alzenad, M. Z. Shakir, H. Yanikomeroglu and M. -S. Alouini, "FSO-Based Vertical Backhaul/Fronthaul Framework for 5G+ Wireless Networks," in IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 1, pp. 218-224, January 2018.

- [90] S. Müncheberg, C. Gal, J. Horwath, H. Kinter, L. Martin Navajas, and M. Soutullo, "Development Status and Breadboard Results of a Laser Communication Terminal for Large LEO Constellations," in Proc. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), International, vol. 11180, pp.1-13, July 2019.
- [91] K.-W. Park, H. M. Kim and O.-S. Shin, "A Survey on Intelligent-Reflecting-Surface-Assisted UAV Communications," in Energies, vol. 15, no. 14, pp.1-20, July 2022.
- [92] Q. Wu and R. Zhang, "Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network," in IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 1, pp. 106-112, January 2020.
- [93] O. S. Badarneh, M. K. Awad, S. Muhaidat and F. S. Almeahmadi, "Performance Analysis of Intelligent Reflecting Surface-Aided Decode-and-Forward UAV Communication Systems," in IEEE Systems Journal, vol. 17, no. 1, pp. 246-257, March 2023.
- [94] Y. Kaymak, R. Rojas-Cessa, J. Feng, N. Ansari, M. Zhou and T. Zhang, "A Survey on Acquisition, Tracking, and Pointing Mechanisms for Mobile Free-Space Optical Communications," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 2, pp. 1104-1123, February 2018.
- [95] M. Uysal, Jing Li and Meng Yu, "Error rate performance analysis of coded free-space optical links over gamma-gamma atmospheric turbulence channels," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 5, no. 6, pp. 1229-1233, June 2006.
- [96] A. Majumdar, "Free-space laser communication performance in the atmospheric channel," in Journal of Optical and Fiber Communications Reports, vol. 2, pp. 345-396, November 2005.
- [97] I.S. Gradshteyn and I.M. Ryzhik, "Table of Integrals, Series, and Products," edited by Alan Jeffrey and Daniel Zwillinger, 7th Edition, 2007.