



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
του
Πλατσατούρα Κωνσταντίνου

**Μελέτη οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου για
δια-δορυφορικές εφαρμογές**

Επιβλέπων : Χάρης Μεσαριτάκης

Μέλη εξεταστικής επιτροπής:

Σάμος, Ιανουάριος 2024

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η χρήση δορυφόρων έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια , με πληθώρα εφαρμογών και λειτουργιών. Αυτή η διπλωματική, ερευνά ένα καινοτόμο κομμάτι των δορυφορικών επικοινωνιών, επικεντρώνοντας στις Οπτικές Ασύρματες Επικοινωνίες (ΟΑΕ),(OWC).Ο κόσμος των συστημάτων επικοινωνίας εξελίσσεται διαρκώς , η ενσωμάτωση του πυκνού διαμοιρασμού κύματος φωτός(DWDM) με τα συστήματα Οπτικής Ασύρματης Επικοινωνίας(ΟΑΕ),(OWC) έχει αναδειχθεί ως ένας ελπιδοφόρος δρόμος για την βελτιστοποίηση των επικοινωνιών. Η συνένωση των οπτικών και δορυφορικών επικοινωνιών υπόσχεται υψηλή ταχύτητα, υψηλό εύρος ζώνης και μετάδοση δεδομένων σε αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων. Ένα οπτικό σύστημα επικοινωνίας ελεύθερου χώρου αποτελείται από τρεις βασικούς πυλώνες: τον πομπό, το κανάλι μετάδοσης και τον δέκτη. Μέσα από την εργασία θα μπορέσουμε να μελετήσουμε τις αρχές ενός οπτικού συστήματος επικοινωνιών ελεύθερου χώρου μεταξύ δορυφόρων αλλά και να αναλύσουμε διάφορες διαμορφώσεις που χρησιμοποιούνται σε διάφορες απαιτήσεις της σύνδεσης, όπως επίσης θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα κάποιων παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση τους συστήματος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι επικοινωνίες στο διάστημα χρησιμοποιούσαν μέχρι σήμερα την RF τεχνολογία για την μεταφορά δεδομένων, καθώς η ανάγκη για μεγαλύτερους ρυθμούς επικοινωνίας μεγαλώνει, ο απαιτούμενος ρυθμός και το απαιτούμενο εύρος ζώνης προτρέπουν την χρήση πιο αποδοτικών τεχνολογιών , η χρήση των οπτικών κρίνεται αναγκαία . Σε αυτή την διπλωματική εργασία ήρθαμε πιο κοντά στην κατανόηση των οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου (OEEX), (FSO), όπου έχει τάσεις να αντικαταστήσει της επικοινωνίες ραδιοσυχνοτήτων και να τις κρατήσει σαν υποστήριξή της. Στο κεφάλαιο 1 θα αναφερθούμε στις δύο μητέρες τεχνολογίες επικοινωνιών στις οποίες βασίζονται οι οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου. Οι οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου αποτελούν κομμάτι των οπτικών ασύρματων επικοινωνιών και αφορούν τις εξωτερικού χώρου επικοινωνίες. Θα Μελετήσουμε τις κατηγορίες της τεχνολογίας OEEX και θα εστιάσουμε στις επικοινωνίες μεταξύ δορυφόρων και τα προβλήματα τους . Τέτοια όπως το φαινόμενο dopler, η διαδικασία απόκτησης , στόχευσης και παρακολούθησης η οποία είναι άκρως απαιτητική όταν πρόκειται για δορυφόρους που κινούνται σε τροχιές γύρω από την γη, οι θόρυβοι καθώς και η δόνηση είναι προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν σε αυτή την τεχνολογία. Αλλά η μεγαλύτερη πρόκληση σε τέτοιες οπτικές δορυφορικές συνδέσεις συναντάτε στις απώλειες λόγω του μέσου διάδοσης .Στην συγκεκριμένη περίπτωση το μέσο διάδοσης είναι η ατμόσφαιρα και τα διαφορετικά στρώματά της τα οποία επηρεάζουν το κάθε ένα διαφορετικά την οπτική

δέσμη που μεταφέρει την πληροφορία από τον πομπό στον δέκτη. Οι ΟΕΕΧ είναι μία ανερχόμενη επικοινωνία λόγω των πλεονεκτημάτων που έχει. Η χρήση οπτικών στους δορυφόρους μπορεί να μειώσει το βάρος των δορυφόρων με αποτέλεσμα την αύξηση ζωής του, λειτουργεί σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και επιπλέον το φάσμα που χρησιμοποιεί η τεχνολογία δεν χρειάζεται αδειοδότηση. Χαρακτηριστικό της τεχνολογίας ΟΕΕΧ είναι το σημαντικά μικρότερο μήκος κύματος σε σχέση με την τεχνολογία ραδιοκυμάτων καθώς και το τεράστιο εύρος ζώνης. Τα κανάλια των οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου είναι απρόσβλητα από τις ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες. Επίσης θα μελετηθούν τα χαρακτηριστικά της οπτικής δέσμης τέτοιων επικοινωνιών.

Στην συνέχεια της εργασίας στο δεύτερο κεφάλαιο πρόκειται να αναλύσουμε την δομή και τα μέρη που αποτελείται ένας πομποδέκτης ιδανικός για συστήματα οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου μεταξύ δορυφόρων. Τι πηγές φωτός χρησιμοποιούμε σε τέτοια συστήματα και πως κατηγοριοποιούνται αυτές. Θα δούμε την αρχή λειτουργίας των δύο βασικών πηγών φωτός των LED και των laser και θα καταλήξουμε στον τρόπο επιλογής της κατάλληλης πηγής φωτός. Θα μελετήσουμε τι είδη διαμόρφωσης χρησιμοποιεί το σύστημα για να μεταφερθεί η οπτική δέσμη που κουβαλάει την πληροφορία καθώς και την λειτουργία ενός διαμορφωτή mach-zehnder. Ο πομποδέκτης είναι ένα μηχάνημα το οποίο είναι ενσωματωμένα όλα τα συστήματα για να σταλθεί και να ληφθεί η πληροφορία, για την αποστολή της πληροφορία χρησιμοποιούνται πηγές φωτός όπως τα λέιζερ και τα led, για την λήψη της πληροφορίας χρησιμοποιούνται ειδικοί Φωτοανιχνευτές είτε από PIN φωτοδίοδους ημιαγωγών είτε από APD ανάλογα τις απαιτήσεις του συστήματος που πρέπει να υλοποιηθεί. Θα δούμε τους βασικού οπτικούς ενισχυτές που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία, τα τηλεσκόπια όπου χρησιμοποιεί η τεχνολογία καθώς και το σύστημα απόκτησης επικοινωνίας, παρακολούθησης και στόχευσης το οποίο είναι βασικό στοιχείο για την ύπαρξη σύνδεσης μεταξύ δορυφόρων. Επίσης οι μικρές αποκλίσεις που μπορεί να έχει η οπτική δέσμη από τον πομπό όταν βρίσκει τον δέκτη μπορεί να έχουν αρνητικό αποτέλεσμα στην ποιότητα της σύνδεσης ή ακόμη και διακοπή της, εκεί είναι πολύ σημαντικό να πετυχαίνετε γρήγορη επαναφορά της ευθυγράμμισης για την αποκατάσταση της επικοινωνίας. Τέλος γι' αυτό το κεφάλαιο είδαμε το πως όλα αυτά τοποθετούνται και ενώνονται σε ειδικό κουτί το οποίο είναι φτιαγμένο με ειδικές προδιαγραφές για να αντέχει στις ατμοσφαιρικές αλλαγές και τα καιρικά φαινόμενα που συναντιούνται στο πρώτο στρώμα της.

Στο τρίτο κεφάλαιο θα κάνουμε μία σύντομη ανάλυση ενός συστήματος ΟΕΕΧ.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύσαμε τις βασικές τοπολογίες που συναντάμε σε συστήματα ΟΕΕΧ όπως από σημείο σε σημείο, δακτυλίδι (ring) άλλα και πλέγματος (mesh).

Τέλος στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας μελετήσαμε και αναλύσαμε κάποιες ενδιαφέρον έρευνες πάνω στον χώρο και ήρθαμε σε συμπεράσματα πάνω στην θεωρητική προετοιμασία που κάναμε.

SUMMARY

Space communications, up to now, mainly rely on Radio Frequency (RF) technology for transfer data. On the other hand, the need for higher transmission rate and thus larger bandwidth, dictate the adoption of more bandwidth-efficient technologies. In this context, the use of optical/photonic technology is of utmost importance, due to inherent advantages that optical communications have over conventional RF systems. In this thesis, we aim to highlight the key architectures and components used in spaceborn free space optical communications (FSO). In detail, in chapter 1 the two main FSO technologies are presented, focusing on inter-satellite communication scenarios and the technical challenges that exist. Such challenges are the Doppler effect, noise, mechanical vibrations and efficient tracking, which is extremely important.

In the following chapters, the unique communication channel is analyzed, which in this case is the atmosphere (earth-satellite). This medium imposes unique challenges, due to its multiple layers that affect signal propagation. Despite the challenges, the key benefits of FSO are also analyzed; that can be summarized to reduced payload, prolonged satellite lifespan, high data-rate, immunity to electromagnetic interference and the fact that the spectrum band utilized is subject to no control.

In chapter 2 of this thesis, the basic building blocks of an inter-satellite transceiver are presented, based on recent literature. This effort consists of highlighting the different type of light sources and modulators such as mach-zehnder. Furthermore, from the data receiving side, different types of photodetectors are discussed, such as typical PIN photodiodes and avalanche photodiodes. Furthermore, the basic optical amplification systems as well as the system of retaining line-of-sight between satellites and earth stations are highlighted., whereas the housing and packaging constraints of such systems is also discussed.

Finally, an analysis of the basic topologies that we use in FSO systems is included in the final chapter of this thesis, alongside recently published and impactful research in the field that can improve spaceborn FSO performance.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Μεσαριτάκη Χάρη για την καθοδήγηση και την βοήθειά του στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας καθόλη την διάρκεια της, για την υπομονή του και την εμπιστοσύνη του από την στιγμή που ανέλαβα το θέμα .Επίσης, ευχαριστώ την οικογένεια μου για την στήριξη της κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος	1
Περίληψη	1
SUMMARY	4
Ευχαριστίες	4
Περιεχόμενα	6
Κατάλογος εικόνων	9
Κατάλογος Σχημάτων	12
Κατάλογος Πινάκων	13
Κατάλογος ακρωνυμίων:	14
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ FreeSpaceOptical-OWC	16
1.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ;	16
1.2 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΟΙ ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ;	19
1.3 ΤΙ ΕΙΝΑΙ Optical wireless Communications-FSO;	21
1.3.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ FSO	24
1.3.2 ΜΕΣΟ ΔΙΑΔΟΣΗΣ	26
1.3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ	28
1.3.4 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ISL	29
1.3.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ISL	33
1.3.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΔΕΣΜΗΣ	34
1.3.6.1 ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ	34
1.3.6.2 ΠΡΟΦΙΛ ΟΠΤΙΚΗΣ ΔΕΣΜΗΣ	34
1.3.6.3 ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΔΕΣΜΗΣ	35
1.3.6.4 ΕΥΡΟΣ RAYLEIGHT	37
1.3.6.5 ΚΟΡΥΦΗ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΜΑΤΟΣ	38
1.3.6.6 ΒΑΘΜΟΣ COHERENT(ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ)	38
1.3.6.7 ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΔΕΣΜΗΣ	38
1.3.6.8 ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ	39
1.3.6.9 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ ΦΩΤΟΣ	39
1.4 Optical Signal to Noise Ratio (OSNR)	Error! Bookmark not defined.
2. Πομποδεκτες(transceivers)	40
2.1 Πηγές φωτός	43
2.1.1 Lasers	43
2.1.2 Light Emitting Diodes	44
2.1.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΠΗΓΗΣ ΦΩΤΟΣ	45

2.2	Διαμορφωτές	46
2.3	Mach-Zehnder Modulator	52
2.4	Φωτοανιχνευτές	53
2.4.1	Παράμετροι Φωτοανιχνευτών	54
2.4.2	Φωτοδίοδοι Ημιαγωγών PIN	56
2.4.3	Φωτοδίοδοι APD	56
2.4.4	Φωτοανιχνευτές με βασικό υλικό την πυρίτιο	58
2.4.5	Φωτοανιχνευτές με βασικά υλικά τα InGaAs	59
2.4.6	Φωτοανιχνευτές με βασικό υλικό το γεράνιο	59
2.4.7	Επιλογή φωτοδέκτη	59
2.5	Οπτικοί ενισχυτές	61
2.5.1	Χαρακτηριστικά Οπτικών ενισχυτών	62
2.6	PAT system	62
2.6.1	Acquisition	63
2.6.2	Pointing	65
2.6.3	Tracking	66
2.7	Πομπός και δέκτης	Error! Bookmark not defined.
2.8	Node and housing	69
3.	ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ	71
3.1	Εισαγωγή	71
3.2	POINTTOPOINTΣΥΣΤΗΜΑFSO(ΣΗΜΕΙΟ ΣΕ ΣΗΜΕΙΟ)	73
3.3	POINTTOMULTI- POINT (ΣΗΜΕΙΟ ΣΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΣΗΜΕΙΑ)	74
3.4	POINTTOMOBILE (ΣΗΜΕΙΟ ΣΕ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟ ΣΗΜΕΙΟ)	74
3.5	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΑΚΤΥΛΙΔΙΟΥRINGFSO	76
3.6	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ MESHSO	76
4.	Πειραματικό μέρος	Error! Bookmark not defined.
4.1	ενίσχυση απόδοση του συστήματος πομποδεκτών για μεγάλες αποστάσεις σε σύστημα επικοινωνίας δορυφόρων στο διάστημα (IS-OWC)	77
4.1.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	78
4.2	ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΠΤΙΚΗΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ μεγάλης ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΝΤΑΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ	82
4.2.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	83
4.2.2	ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΗΛΘΑΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	86
4.2.3	ΣΥΜΕΡΑΣΜΑΤΑ	Error! Bookmark not defined.

4.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΟΠΤΙΚΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΔΙΑΧΥΣΗ ΔΕΣΜΗΣ	92
4.3.1	ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	92
4.3.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	94
4.3.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	Error! Bookmark not defined.
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	102

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1:Εικόνα 1-2:Σχηματική απεικόνιση τροχιακών υψομέτρων και περιοχών κάλυψης από δορυφόρο.	17
Εικόνα 1-3 :Επικοινωνία μεταξύ 2 δορυφόρων. Πηγή:A Review on Inter-Satellite Links Free Space Optical Communication.....	22
Εικόνα 1-4:Κάλυψητης γης από σύστημα δορυφόρων. Πηγή: A Review on Inter-Satellite Links Free Space Optical Communication	22
Εικόνα1-5: point to point FSO. Πηγή: design and analysis of commercially viable FSO communications Link for Diverse Beam Divergence profiles	25
Εικόνα 1-6:δορυφόρος σε mesh τοπολογία Πηγή: photonics media	25
Εικόνα 1-7: Τύποι ISL. Πηγή:Free Space Optics for Next-Generation Satellite Networks	26
Εικόνα 1-8: Inter satellite link block diagram . Πηγή: A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM FOR CUBESATS	Error! Bookmark not defined.
Εικόνα 1-9 :διατομή μίας Γκαουσιανής δέσμης και το προφίλ έντασής της .Πηγή: Laser Beam Pathway Design and Evaluation for Dielectric Laser Acceleration.....	34
Εικόνα 1-10: Απεικόνιση μιας ακτίνας Gauss μαζί με μερικά από τα χαρακτηριστικά της. Πηγή: Laser Beam Pathway Design and Evaluation for Dielectric Laser Acceleration	36
Εικόνα 2-1: Μήκη κύματος διαφόρων λέιζερ ημιαγωγών . Πηγή: A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM FOR CUBESATS.....	46
Εικόνα 2-2 Off-Axis Newtonian Telescope Πηγή: A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS.....	67
Εικόνα 2-3 Cassegrain Telescope Πηγή: A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS	67
Εικόνα 2-4 Off-Axis Gregorian Πηγή: A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS.....	68
Εικόνα 2-5 Cassegrain with refractive elements Telescope Πηγή: A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS.....	68
Εικόνα 2-6 Schmidt-Cassegrain Telescope Πηγή: A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS	68
Εικόνα 2-7Εικόνα Maksutov-Cassegrain Telescope Πηγή A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS..	69
Εικόνα3-1. Point to point σύνδεσης. Πηγή: free space optical network for ultra broad band services.....	73
Εικόνα 3-2: point to multipoint παράδειγμα σύνδεσης. Πηγή: free space optical network for ultra broad band services	74
Εικόνα 3-3: Απλή rig τοπολογία μίας κατεύθυνσης:Πηγή: free space optical network for ultra broad band services	76
Εικόνα 4-1:Το οπτικό φάσμα της CSRZ διαμόρφωσης με ένα laser CW (continuous wave) στα 193,1 THz.Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats.....	84
Εικόνα 4-2: Το οπτικό φάσμα της DRZ διαμόρφωσης στα 193,1 THz. Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats.....	85
Εικόνα 4-3: το οπτικό φάσμα της MDRZ διαμόρφωσης στα 193,1 THz.Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats.....	86
Εικόνα 4-4:Τα Eye diagram και ο παράγοντας Q των (α) CSRZ, (β) DRZ και (γ) μορφή διαμόρφωσης MDRZ στα 10 Gbps. Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats	87
Εικόνα 4-5: Τα Eye diagram και ο παράγοντας Q των (α) CSRZ, (β) DRZ και (γ) μορφή διαμόρφωσης MDRZ στα 20 Gbps .Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats	88

Εικόνα 4-6: Τα Eye diagram και ο παράγοντας Q των (α) CSRZ, (β) DRZ και (γ) μορφή διαμόρφωσης MDRZ στα 40 Gbps Πηγή : Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats.....	89
Εικόνα 4-7:Μέγιστος παράγοντας Q έναντι του χρόνου (περίοδος bit) σε διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης bit: (α) 10 Gbps, (β) 20 Gbps και (γ) 40 Gbps. Πηγή : Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats.....	90
Εικόνα 4-8:Εξασθένιση έναντι της ορατότητας για διαφορετικά μήκη κύματος.Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats.....	90
Εικόνα 4-9:Μέγιστος συντελεστής Q σε σχέση με την ισχύ εισόδου για διαφορετική μορφή διαμόρφωσης: (α) Ρυθμοί bit 10 Gbps, (β) Ρυθμοί bit 20 Gbps, (γ) Ρυθμοί bit 40 Gbps.: Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats.....	91
Εικόνα 4-10: Ο Προτεινόμενος σχεδιασμός συστήματος επικοινωνιακού συστήματος FSO που βασίζεται σε εμπορικές εφαρμογές. Πηγή: Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles .	92
Εικόνα 4-11: Οπτικό φάσμα σχεδιασμένου συστήματος FSO: στον πομπό. Πηγή: Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles .	94
Εικόνα 4-12: Οπτικό φάσμα σχεδιασμένου συστήματος FSO: στον δέκτη (απόκλιση δέσμης 2 mrad) . ΠΗΓΗ Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles	94
Εικόνα 4-13: Οπτικό φάσμα σχεδιασμένου συστήματος FSO: στον δέκτη (απόκλιση δέσμης από 4 mrad). Πηγή: Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles	95
Εικόνα 4-14: Οπτικό φάσμα σχεδιασμένου συστήματος FSO: στον δέκτη (απόκλιση δέσμης 6 mrad). Πηγή: Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles	95
Εικόνα 4-15: Διάγραμμα ισχύος λήψης σήματος έναντι απόστασης για διαφορετικά σενάρια απόκλισης δέσμης. ΠΗΓΗ Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles	96
Εικόνα 4-16: Διάγραμμα SNR έναντι απόστασης για διαφορετικά σενάρια απόκλισης δέσμης. Πηγή: Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles	97
Εικόνα 4-17: Διάγραμμα ποιοτικού παράγοντα Q έναντι απόστασης για διαφορετικά σενάρια απόκλισης δέσμης. Πηγή: Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles	97
Εικόνα 4-18: Διάγραμμα BER έναντι απόστασης για διαφορετικά σενάρια απόκλισης δέσμης. Πηγή: Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles	98
Εικόνα 4-19: Διάγραμμα eye σχεδιασμένου συστήματος FSO σε εμβέλεια ζεύξης 3 km για απόκλιση δέσμης 2 mrad. Πηγή: Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles .	99
Εικόνα 4-20: Διάγραμμα eye σχεδιασμένου συστήματος FSO σε εμβέλεια ζεύξης 3 km για απόκλιση δέσμης 4 mrad. Πηγή: Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profile .	100

<i>Εικόνα 4-21: Διάγραμμα eye σχεδιασμένου συστήματος FSO σε εμβέλεια ζεύξης 3 km για απόκλιση δέσμης 6 mrad. Πηγή: Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles .</i>	<i>101</i>
---	------------

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1: Αύξηση γινομένου ταχύτητας μετάδοσης με απόσταση 1850-2000 Πηγή: (σχήμα από βιβλίο συστήματα επικοινωνιών με οπτικές ίνες Govind P. Agrawal).	19
Σχήμα 1-2: Κατηγοριοποίηση οπτικών ασύρματων επικοινωνιών. Πηγή: Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques).....	21
Σχήμα 1-4: Έννοια του PAA στις διαστημικές επικοινωνίες. Πηγή: A Review on Inter-Satellite Links Free Space Optical Communication.....	30
Σχήμα1-5:Το σύστημαATP μεταξύ επίγειου σταθμού και ενσωματωμένου δορυφόρου. Πηγή: A Review on Inter-Satellite Links Free Space Optical Communication.....	33
Σχήμα 4-1: Το μοντέλο σχεδίασης του συστήματος IS-OWC.Πηγή: Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances.	78
Σχήμα 4-2: Q-factor για IS-OWC με χρήση για πηγής φωτός VCSEL και CWλέιζερ χρησιμοποιώντας σχήματα NRZ και RZ με ρυθμό μετάδοσης 10Gb/s για διαφορετικές αποστάσεις. Πηγή: Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances.	78
Σχήμα 4-3: Μέγιστο Q-factor έναντι των διακυμάνσεων εύρους διάδοσης για διάφορες οπτικές πηγές VCSEL βασισμένες σε κωδικοποίηση γραμμής . Πηγή: Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances.	79
Σχήμα 4-4:Μέγιστο Q-factor έναντι διακυμάνσεων εύρους διάδοσης για.....	79
Σχήμα 4-5:Μέγιστο Q-factor έναντι διακυμάνσεων εύρους διάδοσης για Διάφορη οπτική πηγή VCSEL βασισμένη σε κωδικοποίηση γραμμής με 10 Gbps Πηγή: Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances.	80
Σχήμα 4-6::Μέγιστο Q-factor έναντι διακυμάνσεων εύρους διάδοσης για Διάφορη οπτική πηγή VCSEL βασισμένη σε κωδικοποίηση γραμμής με 40 Gbps.Πηγή: Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances.	80
Σχήμα 4-7: Q-factorγια σύνδεση IS-OWC που χρησιμοποιεί δίοδο λείζερ VCSEL για NRZ.....	81
Σχήμα 4-8: Σχέδιο της CSRZ Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats	84
Σχήμα 4-9: Το σχέδιο της DRZ. Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats	85
Σχήμα4-10:Σχέδιο MDRZ Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats	86
Σχήμα 4-11:Το διάγραμμα του προτεινόμενου συστήματος DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing 64 καναλιών για OWC με καθορισμένη απόσταση 1250 χιλιόμετρα. Πηγή : Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats.....	87

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-1: Σύγκριση δορυφόρων GEO, MEO και LEO.....	18
Πίνακας 2-1 Υλικά των τηλεσκοπίων Πηγή A_SYSTEM_DESIGN_OF_AN_OPTICAL_WIRELESS.....	69
Πίνακας 2-2 Σύνοψη παραμέτρων οπτικού ωφέλιμου φορτίου. Πηγή A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS.....	Error! Bookmark not defined.
Πίνακας 4-1: Ο παράγοντας Q και το BER της σύνδεσης IS-OWC χρησιμοποιώντας πηγές λέιζερ VCSEL και CW για μορφές NRZ και RZ σε 10 Gb/s σε διαφορετικές αποστάσεις. Πηγή: Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances.	81
Πίνακας 4-2: Ο παράγοντας Q και το BER της σύνδεσης IS-OWC χρησιμοποιώντας δίοδο VCSEL για σχήματα NRZ και RZ σε ρυθμούς δεδομένων 10 και 40 Gb/s σε διαφορετικές αποστάσεις. Πηγή: Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances.	82
Πίνακας 4-3: Παράμετροι σύνδεσης του προτεινόμενου συστήματος FSO .Πηγή: Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles	93
Πίνακας 4-4: Ανάλυση χαρακτηριστικών απόδοσης σχεδιασμένου συστήματος FSO για διαφορετικά σενάρια απόκλισης δέσμης. Πηγή: Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles	98
Πίνακας 4-5: Μέγιστα επιτεύξιμα εύρη σύνδεσης του σχεδιασμένου συστήματος FSO για διαφορετικά σενάρια απόκλισης δέσμης. Πηγή: Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles	98

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ:

DWDM:	DENSE WAVELENGTH-DIVISION MULTIPLEXING
FSO:	FREE SPACE OPTICALS
OWC:	OPTICAL WIRELESS COMMUNICATIONS
RF:	RADIO FREQUENCY
LED:	LIGHT EMMITING DIODE
LASER:	LIGHTAMPLIFICATIONBYSTIMULATEDEMISSIONOF RADIATION
APD:	AVALANCE PHOTODIOEDE
BER:	BIT ERROR RATE
GaAs:	GALLIUM ARSENIDE
InGaAsP:	INDIUM GALLIUM ARSENIDE
WDM:	WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING
Is-OWCs:	INTER SATELLITE COMUNICATIONS
GSA:	GEOMETRICAL SPREADING ATTENUATION
HAPSS:	HIGH ATTITUDE PLATFORMS
ISL:	INTER SATELLITE LINKS
UV:	ULTRAVIOLET
SAN:	STORAGE AREA NETWORK
LAN:	LOCAL AREA NETWORK
MAN:	METROPOLITAN AREA NETWORK
PAA:	POINT AHEAD ANGLE
PAT:	POINT AQCUISITION TRAKING
DoC:	DEGREE OF COHERENCE
SAC OCDMA:	SPECTRAL AMPLITUDE CODING OPTICAL CODE DIVISION MULTIPLE ACCESS
OFDM-FSO:	ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING FREE SPACE OPTICS
SWDM:	SHORTWAVE WAVELENGHT DIVISION MULTIPLEXING
LiNbO3:	LITHIUM NIOBATE
IM/DD:	intensity modulation/direct detection
PSK:	PHASE SHIFTING MODULATION
FSK:	FREQUENCY SIFTING MODULATION
SoPSK:	SHAPED OFFSET
OOK:	ON OFF KEYING
PPM:	PULSE POSITION MODULATION
SIM:	SUBCARRIER INTENCITY MODULATOR
RZ:	RETURN TO ZERO

NRZ:	NON RETURN TO ZERO
CSRZ:	CARRIER SUPPRESSED RETURN TO ZERO
DRZ:	DUO BINARY RETURN TO ZERO
MDRZ:	MODIFIED DUO BINARY RETURN TO ZERO
Inp:	INDIUM PHOSPHIDE
InSb:	INDIUM ANTIMONIDE
SNR:	SIGNAL TO NOISE RATIO
Si:	SILICON
Ge:	GERANIUM
VCSEL:	VERTICAL CAVITY SURFACE EMITTING LASER
CW:	CONTINUES WAVE
O-E-O:	OPTICAL-ELECTRICAL-OPTICAL
O-O:	OPTICAL-OPTICAL
EDFA:	ERIDIUM DOPED AMPLIFIERS
GPS:	GLOBAL POSSITIONING SYSTEM
INS:	INERTIAL NAVIGATION SYSTEM
OSNR:	OPTICAL SIGNAL TO NOISE RATIO
GEO:	GEOSYNCHRONOYS EARTH ORBIT
MEO:	MEDIUM EARTH ORBIT
LEO:	LOW EARTH ORBIT
LPF:	LOW PASS FILTER
IR:	INFARED RADIATION
DFG:	DIFFERENT FREQUENCY GENERATION
MIMO:	MULTIPLE INPUT MULTIPLE OUTPUT
SMSR:	SIDE MODE SUPPRESSION RATIO

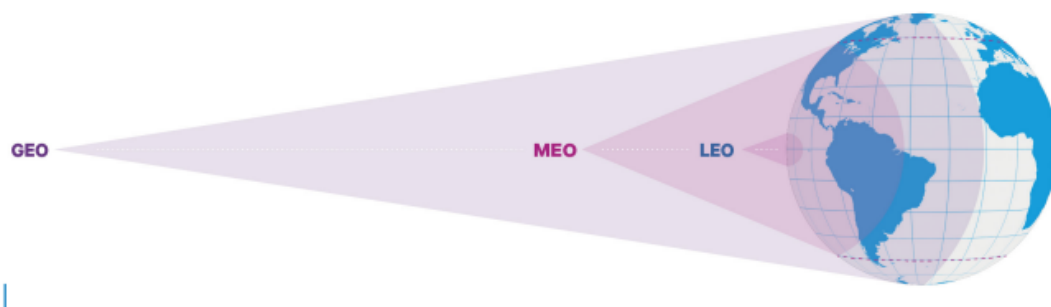
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΟΕΕΧ

Οι οπτικές επικοινωνίες ελευθέρου χώρου είναι μία τεχνολογία επικοινωνίας η οποία αναφέρεται στις οπτικές ασύρματες επικοινωνίες οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε εξωτερικά περιβάλλοντα , όπου με την χρήση οπτικών ακτινών μεταφέρεται η πληροφορία με μεγάλους ρυθμούς μεταφοράς. Η τεχνολογία των οπτικών ασύρματων επικοινωνιών και συγκεκριμένα η τεχνολογία οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου χρησιμοποιεί ως μέσο μετάδοσης ένα μη καθοδηγούμενο κανάλι όπως είναι η ατμόσφαιρα , ή το κενό στο διάστημα, αντί να χρησιμοποιεί ένα καθοδηγούμενο μέσο όπως η οπτική ίνα ή κάποιο συνηθισμένο καλώδιο. Για την μεταφορά των δεδομένων οι ΟΕΕΧ επικοινωνίες χρησιμοποιούν ακτίνες laser, το laser χρησιμοποιείται εξαιτίας στις συνεκτικές ιδιότητές του. Η χρήση της τεχνολογίας των ΟΕΕΧ έχει θετικά αποτελέσματα στις επικοινωνίες , οι ταχύτητες που πετυχαίνουν είναι πολύ υψηλές και το εύρος ζώνης είναι αρκετά μεγάλο, η τεχνολογία αυτή πετυχαίνει υψηλά επίπεδα μετάδοσης bit για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, λιγότερη κατανάλωση αλλά και πολύ μικρότερο βάρος δορυφόρων.

1.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΟΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ;

Η επικοινωνία είναι μία από τις μεγαλύτερες ανάγκες των ανθρώπων. Με το πέρασ του 20^{ου} αιώνα εξελίχθηκαν οι τηλεπικοινωνίες οι οποίες άλλαξαν τον τρόπο ζωής των ανθρώπων. Σήμερα η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων δίνει την δυνατότητα να επικοινωνήσουμε με οποιονδήποτε, οποιαδήποτε στιγμή και οποιοδήποτε μέρος. Για περισσότερο από 30 χρόνια τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα χρησιμοποιούν τεχνητούς δορυφόρους με την οποία επιτυγχάνεται η διηπειρωτική επικοινωνία. Οι δορυφορικές επικοινωνίες αποτελούν μία τεχνολογία μετάδοσης και λήψης πληροφοριών, δεδομένων μεταξύ διαφόρων σημείων πάνω στην γη κάνοντας χρήση τεχνητών δορυφόρων οι οποίοι τοποθετούνται σε τροχιά γύρω από την Γη. Όπου τεχνητός δορυφόρος λέμε ότι είναι οποιοδήποτε αντικείμενο το οποίο έχει τοποθετηθεί σκόπιμα σε τροχιά είτε γύρω από τη Γη είτε άλλους πλανήτες. . Αποτέλεσαν την επανάσταση των ασύρματων επικοινωνιών. Το 1965 ο Early Bird ήταν ο πρώτος γεωστατικός δορυφόρος που άρχισε να παρέχει τηλεφωνικές υπηρεσίες κατά μήκος του ατλαντικού. Οι δορυφορικές επικοινωνίες αρχικά αναπτύχθηκαν έτσι ώστε να μπορούν να παρέχουν τηλεφωνικές υπηρεσίες μεταξύ μεγάλων αποστάσεων. Σήμερα οι δορυφόροι χρησιμοποιούνται για μετάδοση τηλεοπτικού σήματος, τηλεφωνικές κλήσεις από άκρη σε άκρη της Γης, καθώς επίσης για μεταφορά πληροφορίας και σύνδεση στο ιντερνέτ. Πριν όμως από τον Early Bird είχαμε και κάποιους ακόμα δορυφόρους οι οποίοι έκανα τα πρώτα βήματα στον τομέα αυτό. Τον Οκτώβριο του

1957 εκτοξεύτηκε από την Σοβιετική ένωση ένας δορυφόρος μικρών διαστάσεων με όνομα Sputnik 1, ο δορυφόρος αυτός είχε στην διάθεση του μόνο έναν πομπό και δεν υποστήριζε διεξαγωγή αμφίδρομης επικοινωνίας. Η εταιρία Bell Telephone Laboratories έθεσε σε τροχιά τους δύο της δορυφόρους Telstar 1,2 τον Ιούλη του 1962 ο πρώτος και τον Μάιο 1963 τον δεύτερο. Οι δύο αυτοί δορυφόροι είχαν συχνότητα άνω ζεύξης (uplink) 6389 MHz, και συχνότητα κάτω ζεύξης (downlink) 4169 MHz και εύρος ζώνης 50 MHz, οι δορυφόροι αυτοί διέθεταν ηλιακούς συλλέκτες και μπαταρίες οι οποίες τον βοηθούσαν στην συνεχή λειτουργία του. Μέχρι το 1963 οι περισσότεροι δορυφόροι οι οποίοι είχαν τεθεί σε τροχιά γύρω από την Γη ήταν σε σχετικά χαμηλό υψόμετρο κοντά στην επιφάνεια της Γης στην κατώτερη τροχιά της Γης, χαμηλής γήινης τροχιάς (ΧΓΤ) (LEO) η οποία εκτείνεται από τα 500 στα 1,200 χιλιόμετρα[1]. Οι δορυφόροι χαμηλής γήινης τροχιάς ΧΓΤ και οι δορυφόροι μέσης γήινης τροχιάς (ΜΓΤ) (ΜΕΟ) με έκταση από 5,000 έως 20,000 χιλιόμετρα, εκείνη την εποχή είχαν πιο εύκολα προσβάσιμες τροχιές από την γεωστατική γήινη τροχιά (ΓΓΤ) (ΓΕΟ) η οποία είχε έκταση 36.000 χιλιόμετρα, με την τεχνολογία πυραύλων που είχαν διαθέσιμη εκείνη την εποχή. Οι δορυφόροι γεωστατικής τροχιάς λόγω της ίδιας ταχύτητας περιστροφής με την γη παραμένουν πάνω από το σημείο που εκτοξεύτηκαν αρχικά[2].



Εικόνα 1-1: Σχηματική απεικόνιση τροχιακών υψομέτρων και περιοχών κάλυψης από δορυφόρο. Πηγή : Darkening Low-Earth Orbit Satellite Constellations: A Review

	GEO (36,000km)	MEO (5,000-20,000km)	LEO (500-1,200km)
Altitude latency ¹	High	Low	Very low
Earth coverage	Very large	Large	Small
Satellites required	Three	Six	Hundreds
Data gateways	Few fixed	Regional flexible	Local numerous
Antenna speed	Stationary	1-hour slow tracking	10-minute fast tracking

Advantages	High throughput (HTS) technologies enable basic broadband internet applications	Proven low latency comparable to terrestrial networks, offers fibre-equivalent performance	Claims support for high-frequency trading, virtual gaming, and high-performance computing applications
	Fewer satellites over very large fixed geographical areas	Simple equatorial orbit covers 96% of global population	Smaller, lower power satellites batch-launched more cheaply than GEO
Disadvantages	High altitude and distant ground networking impacts latency-sensitive applications	Dual tracking antennas required to maintain continuous connectivity	Very complex tracking and ground network, plus complete constellation must be in place before service starts
	Signal power losses require larger satellites and antennas	Inclined plane orbits needed to cover high latitudes	Unproven business model, risky technology, and space debris risk

Πίνακας 1-1: Σύγκριση δορυφόρων GEO, MEO και LEO Πηγή <https://www.satellitetoday.com/content-collection/ses-hub-geo-meo-and-leo/>

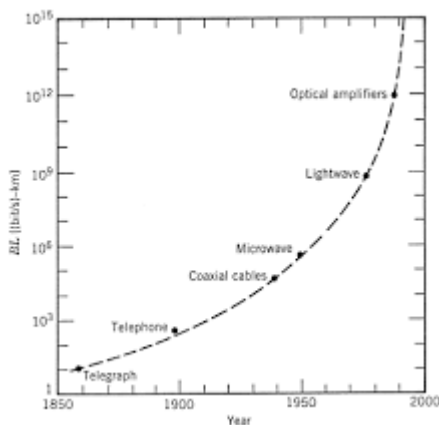
Το πρώτο εμπορικό δορυφορικό σύστημα με δορυφόρους σε ΜΓΤ αποτελείται από 12 δορυφόρους. Το ποσοστό επιτυχίας των εκτοξεύσεων είναι 1 προς 4 το οποίο σημαίνει ότι ένα τέτοιο σύστημα θα χρειαζόταν 48 προσπάθειες για να εδραιωθεί. Σε αντίθεση με ένα γεωστατικό σύστημα το οποίο με την χρήση μόνο ενός δορυφόρου μπορεί να καλύψει το ένα τρίτο της Γης.

Έτσι απαιτούνται μόνο 12 εκτοξεύσεις για να καλύψουμε ολόκληρη την Γη για 24ωρη κάλυψη, έτσι και έγινε η επιλογή της γεωστατικής τροχιάς από την Intelsat για τον πρώτο της δορυφόρο με όνομα Intelsat 1 ο οποίος τέθηκε σε τροχιά το 1965. Ζύγιζε 39 κιλά και διέθετε δύο αναμεταδότες 6 και 4 GHz με εύρος ζώνης 25MHz έκαστος. Έτσι τα μέσα του 1965 είχαμε την πρώτη δια ατλαντική δορυφορική σύνδεση[1]. Η μεγάλη επιτυχία της Intelsat οδήγησε πολλές χώρες να επενδύσουν στα δορυφορικά συστήματα. Η ανάπτυξη των γεωστατικών δορυφορικών συστημάτων οδήγησε αρκετά γρήγορα το διαθέσιμο φάσμα στην ζώνη C εξαντλήθηκε με αποτέλεσμα την επέκταση στην Ku ζώνη. Στα τέλη του 1995 η Ku μπάντα γέμισε και μία καινούρια ζώνη η Ka θα ήταν απαραίτητη. Για την μετάδοση δεδομένων χρειάζεται ένας επαναλήπτης ο οποίος είναι απαραίτητος για να μεταφέρει την πληροφορία . Ο επαναλήπτης λειτουργεί ταυτόχρονα ως πομπός και ως δέκτης χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές συχνότητες , άνω και κάτω ζεύξης. Ένας επαναλήπτης δέχεται σήμα από έναν επίγειο σταθμό, το

ενισχύει και το αναμεταδίδει σε έναν άλλον επίγειο σταθμό. Οι περισσότεροι τηλεοικοινωνιακοί δορυφόροι βρίσκονται σε 35.786 χιλιόμετρα. Τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα εξασθενούν με το τετράγωνο της απόστασης που διανεύουν, έτσι το σήμα που λαμβάνει ο δορυφόρος φτάνει εκεί εξασθενημένο. Έτσι χρησιμοποιούνται μεγάλες κεραίες με διάμετρο πάνω από 30 μέτρα ώστε να μπορούν να λαμβάνουν το εξασθενημένο σήμα. Τα πρώτα χρόνια της λειτουργίας των δορυφορικών συστημάτων τα σήματα που χρησιμοποιούνταν ήταν αναλογικά, σήμερα η πλειοψηφία των σημάτων είναι ψηφιακά. [1]

1.2 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΟΙ ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ;

Αν ερμηνεύσουμε την έννοια των οπτικών επικοινωνιών με την ευρεία έννοια η χρήση του φωτός για σκοπούς επικοινωνίας εμφανίζεται από τα αρχαία χρόνια, όπου αρκετές πληροφορίες μας λένε για διάφορους πολιτισμούς που μέσω της φωτιάς και του καπνού μετέφεραν γεγονότα και μέσα από δικές τους κωδικοποιήσεις, πληροφορία. Ο πρώτος επιτυχημένος οπτικός τηλεγράφος τέθηκε σε λειτουργία μεταξύ των γαλλικών πόλεων Παρίσι και Λιλ το 1792 και μετέφερε με μηχανικό τρόπο κωδικοποιημένα μηνύματα σε μεγάλες αποστάσεις. Η απόσταση των πόλεων ήταν 200 χιλιόμετρα. Ο ρόλος του φωτός ήταν να κάνει ορατά τα κωδικοποιημένα μηνύματα στους σταθμούς αναμετάδοσης. Ο ρυθμός μετάδοσης ενός τέτοιου συστήματος ήταν μικρότερος από ένα bit το δευτερόλεπτο.



Σχήμα 1-1: Αύξηση γινομένου ταχύτητας μετάδοσης με απόσταση 1850-2000 Πηγή: (σχήμα από βιβλίο συστήματα επικοινωνιών με οπτικές ίνες Govind P. Agrawal).

Οι οπτικές επικοινωνίες είναι οι επικοινωνίες όπου με την χρήση οπτικών τεχνολογιών πετυχαίνουν μετάδοση της πληροφορίας καθώς και την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών σημείων. Η πληροφορία μεταδίδεται μέσω οπτικών φασμάτων, όπως παραδείγματος χάρη, το ορατό φάσμα του φωτός ή το ευρύτερο φάσμα της οπτικής ακτινοβολίας. Προσφέρουν υψηλή ταχύτητα μετάδοσης της πληροφορίας, μεγάλη χωρητικότητα καναλιού μετάδοσης του σήματος με παρουσία μικρών καθυστερήσεων, καθιστώντας τις ιδανικές για την μετάδοση πληροφορίας σε ευρυζωνικά δίκτυα.

Υπάρχει το τηλεπικοινωνιακό κανάλι το οποίο είναι υπεύθυνο για την μετάδοση του οπτικού σήματος από τον πομπό στον δέκτη με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες. Τα περισσότερα συστήματα οπτικών επικοινωνιών χρησιμοποιούν τις οπτικές ίνες για τηλεπικοινωνιακό κανάλι διότι οι οπτικές ίνες από την φύση τους μπορούν να μεταδώσουν το φως με σχετικά μικρές απώλειες ισχύος έως και 0,2 Db/km. Ο ρόλος του οπτικού πομπού σε ένα οπτικό σύστημα είναι να μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε μία οπτική μορφή και να εισάγει το τελικό σήμα μέσα στην οπτική ίνα ή το κάθε μέσο μετάδοσης που μπορεί να έχει το σύστημα. Ο πομπός αποτελείται από μία οπτική πηγή, έναν διαμορφωτή και ένα ζεύκτη με το επικοινωνιακό κανάλι. Σαν οπτικές πηγές χρησιμοποιούνται κάποια LED ή κάποια λέιζερ ημιαγωγών. Το οπτικό σήμα δημιουργείται με την διαμόρφωση του οπτικού φέροντος κύματος, υπάρχουν φορές που χρησιμοποιείται και ένας εξωτερικός διαμορφωτής αλλά τις περισσότερες φορές παραλείπεται, αφού η έξοδος μίας οπτικής πηγής από ημιαγωγό μπορεί να διαμορφωθεί κατευθείαν αλλάζοντας το ρεύμα που την διαρρέει, μία τέτοια τεχνική είναι γενικά αποδοτική ως προς το κόστος αλλά και απλοποιεί την σχεδίαση του πομπού.

Ο ρόλος του οπτικού δέκτη είναι να μετατρέπει το λαμβανόμενο οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό σήμα. Ένας οπτικός δέκτης αποτελείται από ένα ζεύκτη, έναν φωτοανιχνευτή και ένα αποδιαμορφωτή. Ο ζευκτης εστιάζει το λαμβανόμενο σήμα πάνω στον φωτοανιχνευτή, ως Φωτοανιχνευτές χρησιμοποιούνται φωτοδίοδοι ημιαγωγών λόγω της συμβατότητάς τους με το σύστημα. Η σχεδίαση του αποδιαμορφωτή εξαρτάται από το είδος της διαμόρφωσης της οποίας το σύστημά μας είναι σχεδιασμένο να χρησιμοποιεί.

Η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος χαρακτηρίζεται από τον ρυθμό εσφαλμένων bit. Ο ρυθμός εσφαλμένων bit σχετίζεται άμεσα με τον ρυθμό μετάδοσης των bit.

Η έρευνα πάνω στις οπτικές επικοινωνίες άρχισε περίπου το 1975. Από τότε γενιά με γενιά γινόντουσαν θεμελιώδεις αλλαγές με αποτέλεσμα την συνεχή βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων. Η πρώτη γενιά οπτικών επικοινωνιών λειτουργούσε κοντά στα 0,8μm και χρησιμοποιούσε ημιαγωγούς λέιζερ GaAs.

Οι απώλειες των οπτικών αυτών συστημάτων όταν λειτουργεί σε μήκη κύματος κοντά στα 1,3μm, είναι κάτω από 1 db/km, οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν ελάχιστες απώλειες σε αυτή την περιοχή μηκών κύματος. Έτσι στη συνέχεια έχουμε την ανάπτυξη λέιζερ και ανιχνευτών από ημιαγωγούς InGaAsP οι οποίοι λειτουργούσαν σε μήκη κύματος κοντά στα 1,3μm. Το 1980 εμφανίζεται η δεύτερη γενιά συστημάτων με οπτικές ίνες αλλά ο ρυθμός μετάδοσης αυτού του συστήματος δεν ξεπερνούσε τα 100 Mb/s λόγω διασποράς σε πολύτροπες ίνες.

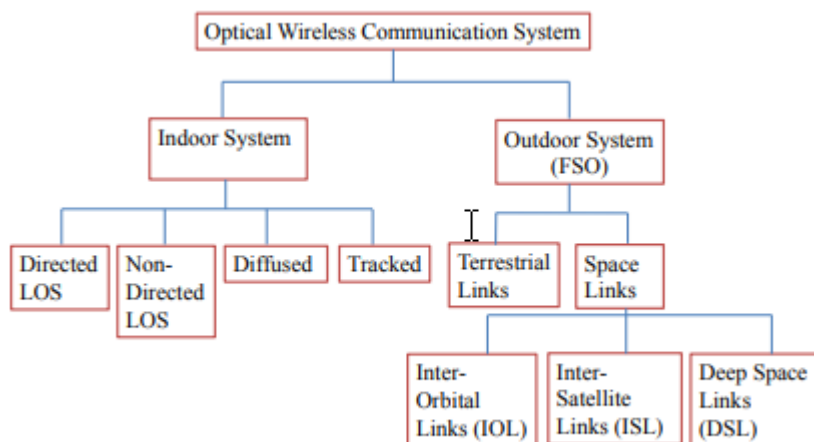
Το 1990 έχουμε την Τρίτη γενιά οπτικών συστημάτων η οποία λειτουργούσε στα 2,5Gb/s τα συστήματα αυτά μπορούσαν να λειτουργήσουν μέχρι και 10 Gb/s, η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ίνες με ολίσθηση στη διασπορά σε συνδυασμό με λέιζερ διαμήκους τρόπου μετάδοσης. Ένα μειονέκτημα των συστημάτων τρίτης γενιάς τα οποία λειτουργούν 1,55μm είναι ότι το σήμα ανάγεται περιοδικά με

την χρήση οπτικών επαναληπτών που απέχουν απόσταση 60 περίπου χιλιομέτρων. Στην συνέχεια έχουμε την τέταρτη γενιά οπτικών συστημάτων η οποία χρησιμοποιεί την οπτική ενίσχυση για αύξηση της απόστασης μεταξύ επαναληπτών και την πολυπλεξία με διαίρεση του μήκους κύματος (ΠΔΜΚ),(WDM) με σκοπό την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης. Η πολυπλεξία είναι ένας από τους λόγους όπου από την εμφάνιση της είχαμε κάθε ένα εξάμηνο διπλασιασμό της χωρητικότητας του καναλιού και οδήγησε το 2001 να έχουμε πετύχει ρυθμό μετάδοσης 10 Tb/sec. Η Πέμπτη γενιά έχει ως σκοπό την αύξηση της φασματικής απόδοσης των συστημάτων ΠΔΜΚ. Επιπλέον ένα καινούριο είδος οπτικής ίνας αναπτύχθηκε η λεγόμενη ξηρή ίνα η οποία έχει πολύ μικρότερες απώλειες. Η διαθεσιμότητα αυτών των ινών μπορεί να οδηγήσει σε συστήματα με χιλιάδες κανάλια ΠΔΜΚ. Θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν ειδικές προηγμένες μορφές διαμορφώσεων στις οποίες η πληροφορία θα κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα και το πλάτος και την φάση του οπτικού μεταφορέα. Παρόλο της μικρής περιόδου που οι οπτικές επικοινωνίες ερευνώνται, η πρόοδος είναι ραγδαία και η τεχνολογία έχει ωριμάσει αρκετά έτσι ώστε να μπορεί να συνδυαστεί ακόμα και με άλλες τεχνολογίες για την επίτευξη μεγαλύτερων έργων[3].

1.3 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΟΙ ΟΠΤΙΚΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΟΙ ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ;

Οι ΟΑΕ είναι μία τεχνολογία επικοινωνίας όπου μία διαμορφωμένη οπτική δέσμη είτε ορατή είτε υπεριώδης , προερχόμενη από πηγή φωτός, λέιζερ ή LED , χρησιμοποιείται με σκοπό την μεταφορά δεδομένων , πετυχαίνοντας πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης χρησιμοποιώντας ως μέσο μετάδοσης το κανάλι της ατμόσφαιρας και το κενό.

Οι ΟΑΕ χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις εσωτερικού χώρου και τις εξωτερικού χώρου. Οι εξωτερικού χώρου αναφέρονται και ως ΟΕΕΧ και είναι η τεχνολογία η οποία θα μελετήσουμε. [4,5]



Σχήμα 1-2: Κατηγοριοποίηση οπτικών ασύρματων επικοινωνιών. Πηγή: *Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques*



Εικόνα 1-2 :Επικοινωνία μεταξύ 2 δορυφόρων. Πηγή: A Review on Inter-Satellite Links Free Space Optical Communication

Σήμερα η τεχνολογία των οπτικών ινών έχει πολύ καλά αποτελέσματα και δεν δείχνει ότι θα πάρει την θέση της κάποια άλλη τεχνολογία για αρκετά χρόνια η ανάγκη για μεγαλύτερες ταχύτητες και η δυσκολία εγκατάστασης οπτικών παντού ωθεί στην μελέτη ενός άλλου κλάδου της τεχνολογίας των οπτικών τις ΟΕΕΧ. Οι ΟΕΕΧ είναι ένας συνδυασμός των δύο προηγούμενων τεχνολογιών επικοινωνιών, οπτικών και δορυφορικών. Είναι μία επικοινωνία Line of Sight, με αυτόν τον όρο εννοούμε την φανταστική ευθεία γραμμή η οποία υπάρχει και ξεκινάει από τον πομπό και καταλήγει στον δέκτη. Το να μην υπάρχουν εμπόδια σε αυτή την νοητή ευθεία γραμμή είναι πολύ σημαντικό για την επίτευξη μεγάλων ταχυτήτων στις επικοινωνίες. Ένας περιοριστικός παράγοντας είναι η καμπυλότητα της Γης. Όταν δύο αντικείμενα, πομπός δέκτης, απομακρύνονται το ένα από το άλλο η Γη εμποδίζει την μεταξύ τους νοητή ευθεία γραμμή αλλά αν τα αντικείμενα απομακρυνθούν αρκετά από την Γη θα μπορούσε να υπάρξει νοητή γραμμή μεταξύ των δύο αντικειμένων. Εκεί είναι που ευνοούνται οι δορυφορικές οπτικές επικοινωνίες. Οι δορυφόροι οι οποίοι βρίσκονται σε υψηλό υψόμετρο, σε διάφορες τροχιές στο διάστημα, έχουν καθαρή από εμπόδια, νοητή ευθεία γραμμή σε αρκετούς κοντινούς δορυφόρους και σε αρκετούς επίγειους σταθμούς. Οι ταχύτητες που υπόσχεται η τεχνολογία είναι μεγαλύτερες από 1Gbps ανά σύνδεση και εφόσον χρησιμοποιηθεί η τεχνική πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος τότε οι ταχύτητες μπορεί να φτάσουν τα 10 Gbps ή ακόμα και τα 50 Gbps ή τα 120 Gbps[6].

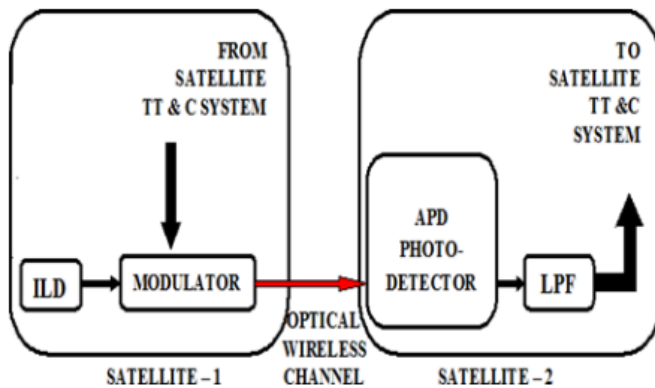


Εικόνα 1-3:Κάλυψη της γης από σύστημα δορυφόρων. Πηγή: A Review on Inter-Satellite Links Free Space Optical Communication

Ένα σύστημα οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου για να μπορέσει να μεταδώσει την πληροφορία πολύ γρήγορα προϋποθέτει την χρήση μονοχρωματικής και πολύ στενής δέσμης φωτός και φυσικά το επιθυμητό μήκος κύματος . Αυτό δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί χωρίς την ανακάλυψη του λέιζερ το 1960 από τον Theodore Maiman ο οποίος ήταν ο πρώτος ο οποίος δημιούργησε ένα λέιζερ το οποίο δούλεψε με επιτυχία. Ύστερα από αυτή την ανακάλυψη οι ΟΑΕ ερευνήθηκαν για στρατιωτικές εφαρμογές επικοινωνίας με το πεδίο μάχης με ασφάλεια καθώς η κλοπή του σήματος ήταν δύσκολη για την εποχή, οργανισμοί όπως οι NASA έχουν επενδύσει σε διάφορα προγράμματα δια δορυφορικής επικοινωνίας. Στα μέσα της πρώτης δεκαετίας του 2000 είχαν επιτευχθεί ταχύτητες των 10 Gbps.

Οι ΟΕΕΧ παρουσιάζουν μεγάλη απώλειά λόγω ατμοσφαιρικών φαινομένων. Ωστόσο σε συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας δίχως βροχή, ομίχλη σκόνη και λοιπά φαινόμενα έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Αυτή η τεχνολογία μπορεί να αλλάξει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο τα δεδομένα μπορούν να μεταφερθούν μέσω διαφορετικών οπτικών συνδέσεων όπως από την Γη στον δορυφόρο ή και από δορυφόρο σε δορυφόρο . Οι συνδέσεις οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου μπορούν να μεταφέρουν δεδομένα και προς τις δύο κατευθύνσεις. Ανάλογα το μήκος κύματος που χρησιμοποιούν έχουμε δύο κατηγορίες συνδέσεων. Αυτές που δουλεύουν στα 800-900nm και αυτές που δουλεύουν στα 1310 nm ή κοντά στα 1550 nm. Οι πρώτες συνδέσεις χρησιμοποιούν VCSEL λέιζερ τα οποία είναι χαμηλού κόστους και χαμηλής δύναμης και προτείνονται για συνδέσεις με χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης και μικρές αποστάσεις. Οι δεύτερες συνδέσεις χρησιμοποιούν ενισχυμένα VCSEL λέιζερ και DBF λέιζερ τα οποία παράγουν μεγαλύτερη οπτική δύναμη[6] .



Σχήμα 1-3 :Βασική αρχή λειτουργίας. Πηγή: *A Review on Inter-Satellite Links Free Space Optical Communication*

Στον πομπό γίνεται η μετατροπή των δεδομένων εισόδου σε ειδικά διαμορφωμένα ηλεκτρικά σήματα και ελέγχεται η ένταση του φωτός που βγαίνει από το laser. Το τηλεσκόπιο του πομπού εστιάζει στο τηλεσκόπιο του δέκτη και στέλνει την διαμορφωμένη ακτίνα laser. Στην συνέχεια το σήμα ταξιδεύει μέσω του μέσου και λαμβάνεται από τον δέκτη. Έπειτα ο φωτοανιχνευτής του δέκτη μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό σήμα το οποίο στην συνέχεια αποδιαμορφώνεται για την ανάκτηση

των δεδομένων. Ένα αποτελεσματικό σύστημα ΟΕΕΧ θα πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά[7,8]:

- Το σύστημα θα πρέπει να έχει δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλά επίπεδα ισχύος για επίτευξη επικοινωνίας μεγαλύτερων αποστάσεων .
- Για συστήματα με υψηλή ταχύτητα είναι απαραίτητες διαμορφώσεις υψηλής ταχύτητας.
- Ο σχεδιασμός του συστήματος θα πρέπει να έχει μικρό αποτύπωμα και χαμηλή κατανάλωση ρεύματος.
- Το σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος θερμοκρασίας.
- Ο μέσος χρόνος μεταξύ των βλαβών του συστήματος να είναι πάνω από 10 χρόνια.

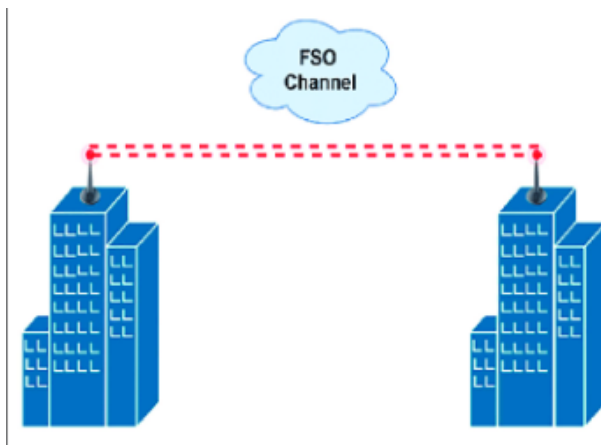
Οι συνδέσεις ραδιοσυχνοτήτων , οι οποίες είναι η βάση των δορυφορικών επικοινωνιών , έχουν εύρος ζώνης το οποίο στις μέρες μας λόγω της αυξημένης ζήτησης μεγάλων ταχυτήτων στην μετάδοση πληροφορίας είναι πλέον περιορισμένο. Σε αντίθεση οι οπτικές συνδέσεις λειτουργούν σε μήκη κύματος τα οποία δεν χρειάζονται αδειοδότηση.

Τα τελευταία χρόνια η ερευνητική κοινότητα έχει στρέψει το ενδιαφέρον της στο να μπορέσουν μέσω της τεχνολογίας των ΟΕΕΧ να πετύχουν μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης καθώς και μεγαλύτερες συνδέσεις με την χρήση mesh τοπολογίας. Η τεχνολογία που χρησιμοποιεί τα laser σε συνδέσεις ΟΕΕΧ μεταξύ δορυφόρων όπου βρίσκονται σε διαφορετική τροχιά έχει ονομαστεί ως inter-satellites optical wireless communications (Is-OWCs) όπου και μελετάμε σε αυτήν την διπλωματική εργασία[9].

1.3.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΟΕΕΧ

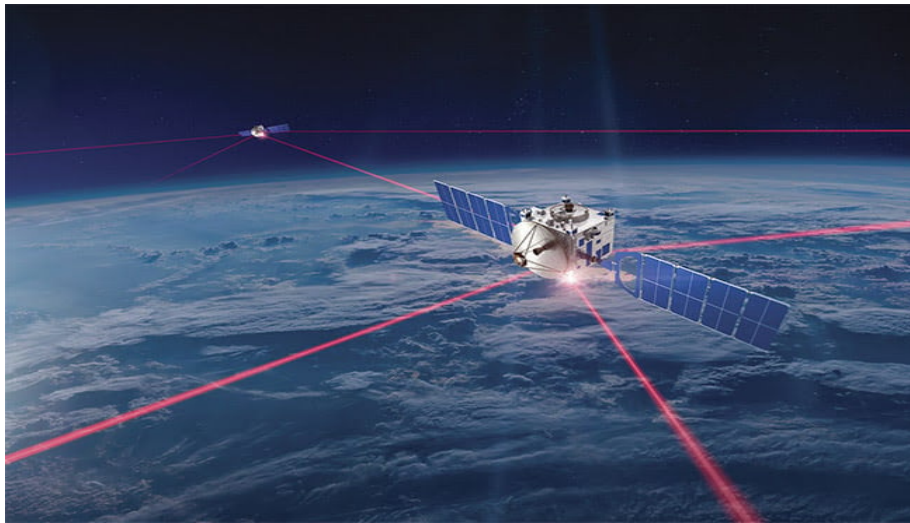
Σε συνέχεια οι εξωτερικού χώρου ΟΑΕ μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε τέσσερις υποκατηγορίες[5]:

- Α. τις επίγειες, ένα παράδειγμα επίγειων ΟΕΕΧ είναι οι συνδέσεις από κτίριο σε κτίριο με την χρήση laser πομποδεκτών



Εικόνα1-4: point to point FSO. Πηγή: design and analysis of commercially viable FSO communications Link for Diverse Beam Divergence profiles

- B. τις μη επίγειες ή αλλιώς εναέριες, ένα παράδειγμα τέτοιων συνδέσεων είναι οι συνδέσεις που περιλαμβάνουν:
 - i. έναν επίγειο σταθμό και ένα μη επανδρωμένο εναέριο όχημα,
 - ii. έναν επίγειο σταθμό και μία πλατφόρμα υψηλού υψομέτρου, HAPSs
 - iii. δύο πλατφόρμες υψηλού υψομέτρου ,HAPS to HAPS
- C. τις διαστημικές, όπως συνδέσεις μεταξύ δορυφόρων ή επίγειων σταθμών με δορυφόρους
- D. τις διαστημικές βαθέως διαστήματος, συνδέσεις όπως ενός διαστημικού σταθμού στην Γη και ενός διαστημόπλοιου στο βαθύ διάστημα.

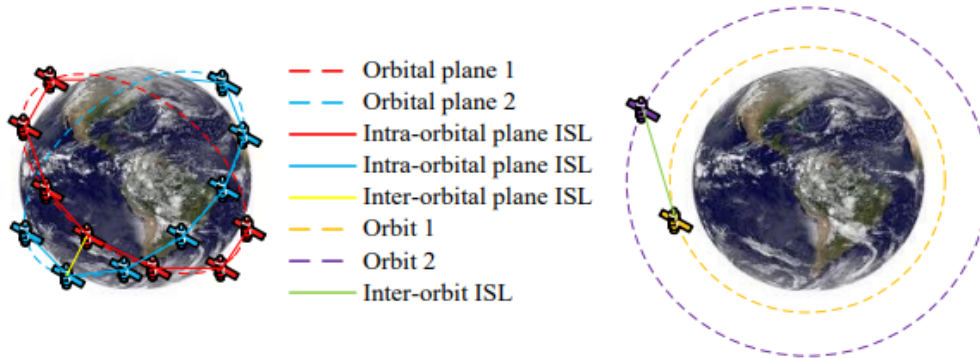


Εικόνα 1-5:δορυφόρος σε mesh topologia Πηγή: photonics media

Οι συνδέσεις δορυφόρων μεταξύ τους σε μία σύνδεση οπτικών ασύρματων επικοινωνιών ελεύθερου χώρου ονομάζονται ως διαδορυφορικές ζεύξεις (ΔΖ), (ISL). Ανάλογα με την θέση των δορυφόρων οι διαδορυφορικές ζεύξεις λέιζερ μπορούν να ταξινομηθούν και αυτές με την σειρά τους σε τρεις διαφορετικούς τύπους[5]:

1. Ενδοτροχιακές, δηλαδή επικοινωνίες δορυφόρων που βρίσκονται σε ίδιο τροχιακό επίπεδο και στο ίδιο τροχιακό σύνολο δορυφόρων.
2. Διατροχιακές, δηλαδή επικοινωνίες δορυφόρων οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετικό τροχιακό επίπεδο και σε διαφορετικό τροχιακό σύνολο δορυφόρων αλλά στο ίδιο υψόμετρο.
3. Διαφορετικών τροχιών, είναι η επικοινωνία δορυφόρων οι οποίοι κινούνται σε διαφορετικές τροχιές.

Μέσα σε ένα τροχιακό σύνολο δορυφόρων οι δορυφόροι κινούνται στο ίδιο τροχιακό επίπεδο και έχουν την ίδια κατεύθυνση και ταχύτητα. Σε διαφορετικά τροχιακά επίπεδα, οι δορυφόροι βρίσκονται στο ίδιο ύψος και σε διαφορετικό επίπεδο και μπορούν ακόμα και να διασταυρώνονται μεταξύ τους. Οι δορυφόροι οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετικές τροχιές σημαίνει ότι έχουν, διαφορετικό υψόμετρο ή ακόμα και διαφορετική κατεύθυνση.



Εικόνα 1-6: Τύποι ISL. Πηγή: Free Space Optics for Next-Generation Satellite Networks

Η διατήρηση ενδοτροχιακών συνδέσεων μπορεί πιο εύκολα να καθοριστεί και να διατηρηθεί διότι οι δορυφόροι κινούνται σε ίδιο επίπεδο, κατεύθυνσή και ταχύτητα, ενώ σε αντίθεση η διατροχιακές συνδέσεις είναι λίγο πιο δύσκολο να καθοριστούν.[5]

1.3.2 ΜΕΣΟ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

Το μέσο διάδοσης του οπτικού σήματος είναι τα στρώματα της ατμόσφαιρας και το κενό. Στο κενό δεν υπάρχουν απώλειες λόγω των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Η ατμόσφαιρα είναι ένα δυναμικό μέσο διάδοσης με συνεχείς αλλαγές στις συνθήκες καιρού, οι περισσότερες αλλαγές γίνονται στην τροπόσφαιρα[12]. Η θερμοκρασία, η πίεση, η υγρασία αλλά και το χιόνι, η βροχή, η ομίχλη μπορούν να επηρεάσουν την μετάδοση του οπτικού σήματος. Για παράδειγμα τα ακραία καιρικά φαινόμενα μπορούν να αναστατώσουν την σύνδεση. Το εξωτερικό κομμάτι του πομποδέκτη είναι εκτεθειμένο σε πολύ υψηλές αλλά και χαμηλές θερμοκρασίες. Οι θερμοκρασίες στις οποίες οι οπτικές διατάξεις μπορούν να δουλέψουν αποδοτικά είναι οι -30 έως και 60 βαθμούς Κελσίου. Είναι πιθανό η υγρασία σε συνδυασμό με τις χαμηλές θερμοκρασίες να παγώσουν το εξωτερικό κομμάτι του πομποδέκτη, σε αυτή τη περίπτωση προτείνονται εξωτερικές μονάδες οι οποίες είναι αδιάβροχες αλλά και αυτοθερμενόμενες. Αντίστοιχα σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες η εξωτερική μονάδα θα πρέπει να έχει σύστημα ψύξης για την σωστή λειτουργία. Κρίνεται συνεπώς απαραίτητη η χρήση αυτόματης διόρθωσης της θερμοκρασίας, με την χρήση αισθητήρων, για την σωστή λειτουργία των οπτικών μονάδων.

Η βαριά ομίχλη και η πυκνή χιονόπτωση επηρεάζουν αρνητικά μία σύνδεση ΟΕΕΧ . Μπορούν να επηρεάσουν τόσο πολύ τα οπτικά με αποτέλεσμα την διακοπή της σύνδεσης. Εκεί μπορεί να υπάρξει μία παράλληλη σύνδεση ραδιοσυχνοτήτων η οποία ενεργοποιείται αυτόματα όταν πέσει η σύνδεση ΟΕΕΧ προκειμένου το δίκτυο να είναι βιώσιμο , ο συνδιασμός των δύο αυτών τεχνολογιών μπορεί να αυξήσει την διαθεσιμότητα και την ποιότητα του δικτύου . Η επικοινωνία μέσω ραδιοσυχνοτήτων διατηρείται μέχρι τα καιρικά φαινόμενα να πάψουν και να μπορέσει η οπτική δέσμη να ταξιδέψει από τον πομπό στον δέκτη [13,14]. Η ατμόσφαιρα αποτελείται από διάφορα αέρια σε διαφορετικές ποσότητες το κάθε ένα, όπως άζωτο 78 % , οξυγόνο 21%, διοξείδιο του άνθρακα και κάποια ακόμα σε πιο μικρές ποσότητες, όπως επίσης έχουμε ύπαρξη σκόνης . Η κατανομή των αερίων λόγω της βαρύτητας είναι διαφορετική ανάλογα με το ύψος και την θέση, όπως επίσης η πίεση και η θερμοκρασία[11]. Συνεπώς ανάλογα το υψόμετρο θα έχουμε και διαφορετικές επιρροές του μέσου πάνω στο οπτικό σήμα της σύνδεσης. Μπορούμε να χωρίσουμε την ατμόσφαιρα σε κάποια ατμοσφαιρικά στρώματα ανάλογα το υψόμετρο.

Έτσι έχουμε:

1. Τροπόσφαιρα, η οποία εκτείνεται από το επίπεδο της θάλασσας μέχρι το υψόμετρο των 7-17 χιλιομέτρων. Το πάχος αυτού του στρώματος είναι λεπτότερο στα άκρα της Γης δηλαδή στους πόλους, και συγκεκριμένα είναι περίπου το μισό από ότι είναι στον ισημερινό . Έχει την υψηλότερη μοριακή πυκνότητα από όλα τα άλλα ατμοσφαιρικά στρώματα και η πίεση που παρουσιάζει στην επιφάνεια της θάλασσας είναι 1 ατμόσφαιρα ή αλλιώς 14,7 psi. Η πίεση μειώνεται κατά 63% κάθε 7,64 χιλιόμετρα αύξησης του υψομέτρου. Επίσης όσο αυξάνεται το ύψος τόσο μειώνεται η πυκνότητα του αέρα, η οποία στο επίπεδο της θάλασσας είναι 1,2KG/m³, η τιμή της πυκνότητας του αέρα δεν παραμένει σταθερή αλλά αλλάζει μέσα στην ημέρα αλλά και μέσα στην διάρκεια του χρόνου. Τα περισσότερα ατμοσφαιρικά φαινόμενα(χιόνι ομίχλη, βροχή κεραυνούς, σύννεφα) τα οποία δημιουργούν θέματα στην σύνδεση τα συναντάμε στην τροπόσφαιρα.
2. Στρατόσφαιρα, εκτείνεται από την τροπόσφαιρα δηλαδή από τα 7-17 χιλιόμετρα υψόμετρο και μπορεί να φτάσει μέχρι τα 50 χιλιόμετρα. Παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας όσο αυξάνεται το ύψος. Έχει περιεκτικότητα σε όζον από τα 15 έως τα 35 χιλιόμετρα. Αυτή η περιοχή ονομάζεται οζονόσφαιρα και δημιουργείται χάρης στις υπεριώδεις ακτίνες του ηλίου UV.
3. Μεσόσφαιρα, εκτείνεται από τα 50 χιλιόμετρα υψόμετρο μέχρι τα 80-85 χιλιόμετρα. Παρατηρείται μεγάλη πτώση της θερμοκρασίας φτάνοντας θερμοκρασίες πολύ χαμηλές κοντά στους -100 βαθμούς κελσίου. Είναι το στρώμα όπου οι μετεωρίτες καίγονται όταν εισέλθουν σε αυτό.
4. Θερμόσφαιρα, εκτείνεται από τα 85 χιλιόμετρα μέχρι τα 640 χιλιόμετρα από την επιφάνεια της θάλασσας. Η θερμοκρασία παρουσιάζει πάλι τρομερή αύξηση φτάνοντας ακόμα και τους 1500

βαθμούς κελσίου. Αρκετές τροχιές βρίσκονται σε αυτό το στρώμα σε υψόμετρο 320-380 χιλιόμετρα και αποτελούν low earth orbit.

5. Ιονόσφαιρα, είναι το στρώμα που εκτείνεται από τα 50 έως τα 1000 χιλιόμετρα, αποτελείται από φορτισμένα ή αλλιώς ιονισμένα σωματίδια, είναι πολύ σημαντικό στρώμα για τις ράδιο επικοινωνίες.
6. Εξώσφαιρα, εκτείνεται από τα 5000 χιλιόμετρα έως και πάνω από 10.000 χιλιόμετρα. Είναι το σύνορο με το διάστημα, περιέχει λίγα σωματίδια αλλά παρόλα αυτά προκαλεί ατμοσφαιρικές αλλοιώσεις στο οπτικό σήμα που μεταφέρεται από δορυφόρο σε δορυφόρο.

Τα στρώματα ανάμεσα στα βασικά στρωματά που είδαμε έχουν και αυτά όνομα. Ανάμεσα της τροπόσφαιρας και της στρατόσφαιρας έχουμε την tropopause, ανάμεσα στην στρατόσφαιρα και την Μεσόσφαιρα ονομάζεται stratopause και ανάμεσα στην Μεσόσφαιρα και την Θερμόσφαιρα mesopause.

Οι συνδέσεις ΟΕΕΧ από την Γη σε δορυφόρο ή από την Γη σε κάποιο άλλο σημείο της Γης θα μεταφέρουν την πληροφορία και θα διασχίσουν σίγουρα την τροπόσφαιρα, εκεί συμβαίνουν τα περισσότερα καιρικά φαινόμενά τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα της μετάδοσης του οπτικού σήματος. Η τροπόσφαιρα είναι ένα ασταθές μέσο το οποίο παρουσιάζει συχνές αλλαγές τις οποίες θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν στην κατασκευή μίας σύνδεσης[6].

1.3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΟΕΕΧ

Οι συνδέσεις ΟΕΕΧ έχουν πληθώρα εφαρμογών, κάποιες από αυτές τις εφαρμογές είναι[8,23]:

- Μεταφορά δεδομένων (βίντεο και φωνή)
- Επικοινωνία σε περιοχές όπου δεν φτάνουν οι κοινές τεχνολογίες
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί από παρόχους ασύρματων υπηρεσιών για επικοινωνία (τηλεφωνική), αυτή η εφαρμογή δεν απαιτεί άδεια χρήσης όπως οι μπάντες των μικροκυμάτων.
- Δίκτυο αποθήκευσης δεδομένων (ΔΑΔ) (SAN), η εφαρμογή αυτή χρησιμοποιεί κόμβους ΟΕΕΧ για να σχηματίσει ένα δίκτυο ΔΑΔ, ο σκοπός του δικτύου αυτού είναι η παροχή πρόσβασης σε ενοποιημένα αποθηκευμένα δεδομένα.
- Σύνδεση τελευταίου/πρώτου μιλίου, για να καταλάβουμε τον όρο σύνδεση τελευταίου/πρώτου μιλίου μπορούμε να δώσουμε ένα παράδειγμα. Η τοποθέτηση καλωδίων από τον τελευταίο κόμβο του δικτύου του παρόχου προς όλους τους χρήστες είναι μία δαπανηρή εργασία και κοστοβόρα για τον πάροχο. Η τεχνολογία ΟΕΕΧ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να λύσει αυτό το πρόβλημα αντικαθιστώντας τα καλώδια.
- LAN σε LAN σύνδεση για πανεπιστήμια.

- Εφεδρική σύνδεση σε περίπτωση αποτυχίας μετάδοσης του κύριου δικτύου.
- Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παροχή άμεση εξυπηρέτηση στους πελάτες όταν η υποδομή οπτικών ινών τους αναπτύσσεται .
- Κινητός σταθμός για σύνδεση σε δίκτυο.
- Επικοινωνίες έκτακτης ανάγκης σε καταστροφές
- Επικοινωνίες δορυφόρων μεταξύ τους αλλά και επικοινωνία με επίγειους σταθμούς με μετάδοση δεδομένων προς όλες τις κατευθύνσεις καθώς και επικοινωνία βαθέως διαστήματος .
- Επικοινωνία κινητού κόμβου πχ μη επανδρωμένο όχημα με κάποιον σταθερό σταθμό.
- Στρατιωτικές εφαρμογές καθώς είναι μία ασφαλής και μη ανιχνεύσιμη τεχνολογία που μπορεί να συνδέσει μεγάλες περιοχές με ασφάλεια σε ελάχιστο χρόνο πράγμα που το κάνει κατάλληλο για τέτοιου είδους εφαρμογές.

1.3.4 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΟΕΕΧ ΜΕΤΑΞΥ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ (ΔΖ)

Το οπτικό σήμα είναι ευαίσθητό στις ατμοσφαιρικές και καιρικές αλλαγές , όπως ευαίσθητα είναι τα κομμάτια των πομποδεκτών, τα οποία πρέπει να προστατευτούν μέσα σε ειδικές κατασκευές προκειμένου να αντέξουν σε αντίξοες συνθήκες. Κάποια βασικά προβλήματα που θα αντιμετωπίσει η οπτική δέσμη είναι[4,7,8] :

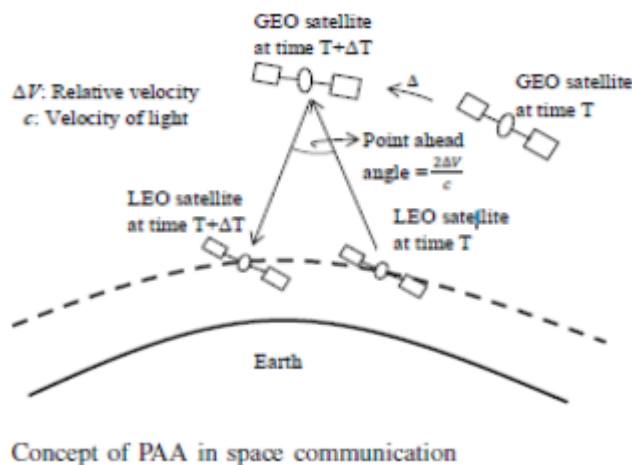
- Τα φυσικά εμπόδια που μπορούν να εμφανιστούν και να μπλοκάρουν προσωρινά την οπτική δέσμη.
- Ο σπινθηρισμός .
- Οι γεωμετρικές απώλειες , εξασθένηση οπτικού σήματος.
- Η απορρόφηση που προκαλείται από τα μόρια νερού που αιωρούνται χαμηλά στην ατμόσφαιρα. Η ισχύς των φωτονίων θα απορροφήθει από αυτά τα σωματίδια νερού και η πυκνότητα ισχύος της οπτικής δέσμης μειώνεται . η διαθεσιμότητα της σύνδεσης επηρεάζεται άμεσα από την απορρόφηση.
- Ατμοσφαιρικές αναταράξεις οι οποίες προκαλούν διακυμάνσεις στην πυκνότητα του αέρα και οδηγεί σε μεταβολή του δείκτη διάθλασης του αέρα.
- Ατμοσφαιρική εξασθένηση ως αποτέλεσμα των καιρικών φαινομένων, (σκόνη, βροχή , ομίχλη, χιόνι, νέφος).Η εξασθένηση του σήματος μία καθαρή μέρα μπορεί να έχει τιμή 0,2 dB/KM αλλά μία μέρα με ομίχλη η εξασθένηση μπορεί να εκτοξευτεί στα 300 dB/KM.
- Η ατμοσφαιρική παλίρροιά, η περιοδική κίνηση γύρω από τον ήλιο δημιουργεί ατμοσφαιρική παλίρροια στην τροπόσφαιρα και στην στρατόσφαιρα. Τα φαινόμενα της ατμοσφαιρικής παλίρροιας συναντιόνται περιοδικά ανά 24 ώρες. Η ελάχιστες τιμές συναντιόνται από τις 4 μετά τα μεσάνυχτα έως τις 4 μετά το μεσημέρι και οι μέγιστες τιμές από τις 10 μετά τα μεσάνυχτα έως τις 10 μετά το μεσημέρι.

- Σκέδαση , σκέδαση Rayleigh, σκέδαση Mie, γεωμετρική σκέδαση.
- Ο αέρας, μπορεί να αποπροσανατολίσει τον πομπό στην επικοινωνία με τον δέκτη και έτσι να χαλάσει η ευθυγράμμιση και το οπτικό σήμα να περιπλανιέται.

Σε συστήματα OEECH μεταξύ δορυφόρων, όταν σε μία σύνδεση οι τροχιές διασταυρώνονται και είναι στο ίδιο ύψος είτε είναι τελείως διαφορετικές έχουμε την εμφάνιση κάποιων προβλημάτων όπως η μετατόπιση Doppler, point-ahead angle (PAA), pointing acquisition tracking (ATP). Η μικρή διάμετρος του στίγματος του λέιζερ αποτελεί επίσης ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν στην υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος. Είναι πολύ δύσκολο από έναν κινούμενο δορυφόρο να στοχεύεις με λέιζερ και να πετύχεις έναν άλλον δορυφόρο επίσης κινούμενο δορυφόρο λόγω της στενής δέσμης φωτός και τις πιθανές διαφορετικές τροχιές και κατευθύνσεις των δορυφόρων. Η αποτελεσματική σύνδεση δύο δορυφόρων αποτελεί πρόκληση. Κάποια επιπλέον προβλήματα μίας σύνδεσης OEECH είναι τα παρακάτω[4,9]:

- Pointing Ahead Angle

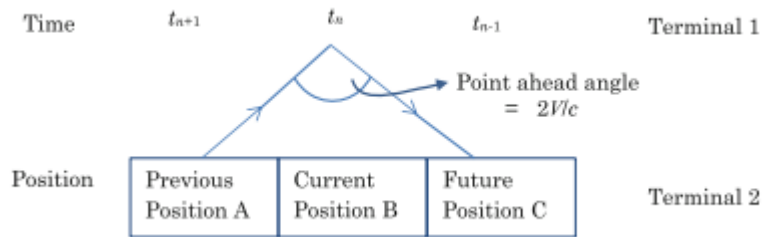
Η συγκριτική κίνηση μεταξύ των ακροδεκτών πομπού και δέκτη απαιτεί το σήμα άφιξης να έχει μετατόπιση από την θέση της δεσμίδας με στόχο να χτυπήσει επαρκώς τον δέκτη με μία κατάλληλη τοποθεσία γνωστή ως χωροχρονική τοποθεσία.



Σχήμα 1-3: Έννοια του PAA στις διαστημικές επικοινωνίες. Πηγή: *A Review on Inter-Satellite Links Free Space Optical Communication*

Η κατεύθυνση της απόκλισης αυτής ονομάζεται Pointing ahead angle. Ο χρόνος που απαιτείται για να ταξιδέψει το σήμα σε μεγάλες αποστάσεις εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα των δύο δορυφόρων και η τιμή της γωνίας PAA είναι κάποια εκατοντάδες μικροακτίνια . Η ρύθμιση της λήψης και της εκπομπής στα τερματικά γίνονται χρησιμοποιώντας τον έλεγχο συντήρησης ζεύξης και τον αλγόριθμο παρακολούθησης. Ας υποθέσουμε ότι ένας δορυφόρος Α θέλει να στείλει σήμα μέσω μίας δέσμης φωτός σε έναν άλλον δορυφόρο Β. Λόγω των διαφορετικών ταχυτήτων των δορυφόρων πρέπει το σήμα που στέλνει ο Α στον Β να υπολογίσει πόσο θα έχει αλλάξει η θέση του Β

λαμβάνοντας υπόψιν την χωρική και χρονική θέση του στόχου. Αυτή η μετατόπιση που δέχεται το σήμα ονομάζεται point-ahead angle το οποίο διαχειρίζεται το σύστημα ATP.



Εικόνα 1-7 Point ahead angle πηγή Acquisition, Tracking and Pointing

- Φαινόμενο Doppler

Το φαινόμενο Doppler προκαλείται λόγω της σχετικής κίνησης μεταξύ του πομπού και του δέκτη, ειδικά όταν οι δορυφόροι οι οποίοι κινούνται σε χαμηλές τροχιές κινούνται με μεγαλύτερες ταχύτητες από αυτούς που βρίσκονται σε υψηλότερο τροχιές. Η μετατόπιση Doppler αναφέρεται στην ποικιλία της συχνότητας του ληφθέντος σήματος που προκαλείται από την σχετική κίνηση. Η συχνотική μετατόπιση για την μετάδοση μεταξύ δορυφόρων σε χαμηλή τροχιά και γεωστατική τροχιά είναι συν πλην 7,5 GHz. Η συχνότητα δύο δορυφόρων σε χαμηλή τροχιά μπορεί να μετατοπισθεί με αντίθετους τρόπους, η μετατόπιση μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική ανάλογα με την σχετική κίνηση.

- Pointing Acquisition Tracking

Η διαδικασία παρακολούθησης, απόκτησης και κατάδειξης τέτοιων συστημάτων είναι μία δύσκολη αποστολή για τις οπτικές συνδέσεις ελεύθερου χώρου. Το κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί περεταίρω στην συνέχεια της εργασίας.

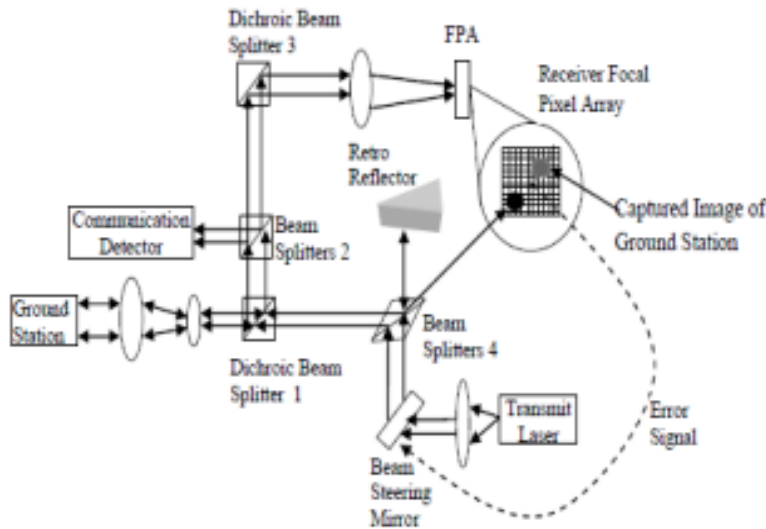
- Background Noise Source

Ένα ακόμη πρόβλημα που παρουσιάζει η τεχνολογία αυτή είναι οι θόρυβοι οι οποίοι παρατηρούνται των οποίων η προέλευση βασίζεται στην μέθοδο ανίχνευσης του σήματος, είτε το σύστημα είναι προ ενισχυμένο οπτικά είτε όχι. Στον δέκτη παρατηρούνται θόρυβοι που προέρχονται από το σκοτεινό ρεύμα δηλαδή το ρεύμα που υπάρχει μέσα στον δέκτη όταν αυτός δεν διαπερνάτε από ρεύμα προερχόμενο από την μετατροπή της οπτικής δέσμης σε ηλεκτρική ενέργεια, οι θόρυβοι που παρουσιάζονται στο σύστημα είναι αυτοί της προ ενίσχυσης, ο θερμικός και τέλος ο θόρυβος βολής (θόρυβος λόγω του οπτικού σήματος).

- Satellite Vibration and tracking

Η δόνηση και η ταρακούνηση του συστήματος μπορεί να προκαλέσει περαιτέρω προβλήματα στην διατήρηση της σύνδεσης αλλά και στην ευθυγράμμιση του συστήματος. Η δονήσεις μπορεί να κουνήσουν έναν από τους δύο πομποδέκτες που διατηρούν σύνδεσή μεταξύ τους και έτσι η σύνδεση να χαθεί. Η σύνδεση ξανά επαναφέρεται με την χρήση αυτόματων μηχανισμών ευθυγράμμισης.

1.3.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΟΕΕΧ ΓΙΑ



Σχήμα1-4: Το σύστημα ATP μεταξύ επίγειου σταθμού και ενσωματωμένου δορυφόρου. Πηγή: *A Review on Inter-Satellite Links Free Space Optical Communication*

Σύμφωνα με τις πηγές [4,7,8,13,14,23] η τεχνολογία παρέχει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων καθώς και το φάσμα που χρησιμοποιεί η τεχνολογία δεν χρειάζεται αδειοδότηση. Η οπτική διαδορυφορική επικοινωνία δεν έχει ανάγκη άδειας φάσματος για την συχνότητα που λειτουργεί σε αντίθεση με τα συστήματα ραδιοφώνου και μικροκυμάτων. Ένα σημαντικό προτέρημα είναι ότι τα κανάλια επικοινωνίας των οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου είναι απρόσβλητα από τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Το μικρό πλάτος του στίγματος του λέιζερ είναι ένα από τα πιο κύρια πλεονεκτήματα της τεχνολογίας καθώς εξαλείφει τις παρεμβολές από γειτονικές συνδέσεις και είναι πολύ δύσκολο το σήμα να κλαπεί συνεπώς το καθιστά ασφαλές.

Οι ΟΕΕΧ έχουν σημαντικά μικρότερο μήκος κύματος σε σχέση με τα μικροκύματα και τεράστιο εύρος ζώνης. Μεγάλο πλεονέκτημα είναι η μείωση του μεγέθους της κεραίας μετάδοσης του σήματος με αποτέλεσμα να μειώνεται το βάρος του δορυφόρου συνεπώς και η ανάγκη του δορυφόρου για περισσότερη ισχύς. Έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας προκειμένου να παραχθεί και να σταλθεί μία τεράστια πληροφορία το οποίο το καθιστά ως πιο φιλικό ως το περιβάλλον σύστημα, δεν δημιουργείται μόλυνση στο περιβάλλον. Τέλος η εγκατάσταση είναι πολύ γρήγορη με χρόνο ολοκλήρωσης της λιγότερο από μισή ώρα.

Γενικά το κόστος των διατάξεων όπου αποτελείται μία σύνδεση ΟΕΕΧ είναι πιο μικρό από άλλες αντίστοιχες τεχνολογίες[5].

1.3.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΔΕΣΜΗΣ

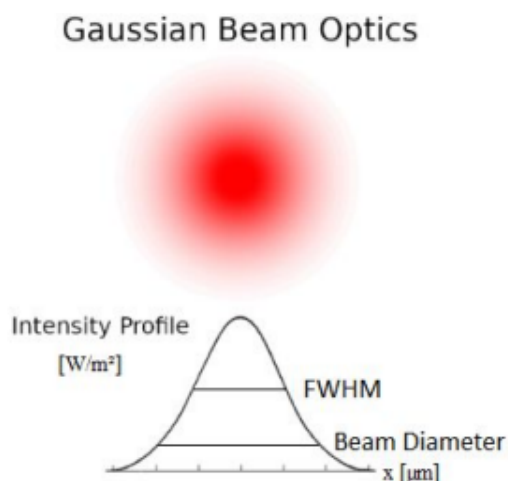
1.3.6.1 ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

Η οπτική δέσμη που χρησιμοποιείται στις συνδέσεις ΟΕΕΧ έχουν μήκος κύματος είτε 800nm, είτε 1310 nm είτε 1550nm[4,6,13]. Το πιο δημοφιλές μήκος κύματος είναι αυτό των 1550nmγια τους ακόλουθους λόγους:

- Τα 800nm δημιουργούνται από χαμηλού κόστους VCSEL λέιζερ , η οπτική δέσμη δεν είναι τόσο ισχυρή με αποτέλεσμα να είναι διαμορφώσιμη σε πολύ χαμηλές ταχύτητες επικοινωνίας μέχρι τα 100Mb/s και το μήκος αυτών των συνδέσεων δεν ξεπεράσει τα λίγα εκατοντάδες μετρά.
- Τα 1310 nm υποστηρίζουν μεγαλύτερη δύναμη από τα VCSEL λέιζερ και προσφέρουν μεγαλύτερες ταχύτητες σύνδεσης και μεγαλύτερα μήκη σύνδεσης, λέιζερ που λειτουργούν στα 1310nm είναι τα Fabry Perot και τα distributed feedback (DFB).
- Τα 1550nm υποστηρίζουν την μεγαλύτερη ισχύ-δύναμη, τις μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης σε Gb/s, μεγαλύτερο μήκος συνδέσεων αλλά και πολυπλεξία μήκους κύματος [15],σε μερικές εφαρμογές πολυπλεξίας δύο διαφορετικά μήκη κύματος συνδυάζονται τα 1310 με τα 1550 δημιουργούν μία δικάναλη επικοινωνία .

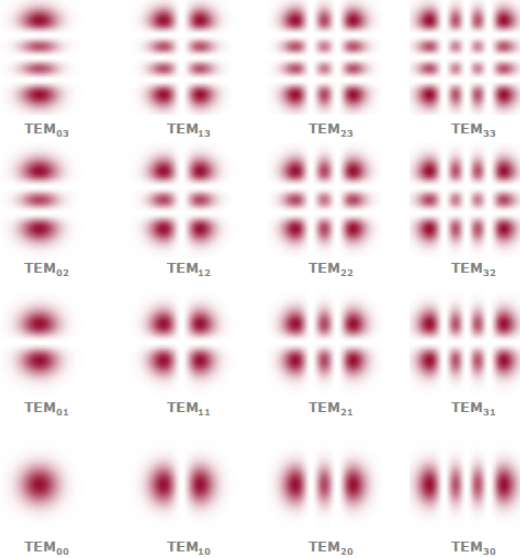
1.3.6.2 ΠΡΟΦΙΛ ΟΠΤΙΚΗΣ ΔΕΣΜΗΣ

Ένα σημαντικό στοιχείο είναι η χωρική κατανομή της ισχύος σε μία οπτική δέσμη. Εάν η κατανομή είναι Γκαουσιανή τότε και η οπτική δέσμη φωτός ονομάζεται Γκαουσιανή. Το προφίλ της οπτικής δέσμης γενικά υποτίθεται ότι είναι κυκλικό με μορφή Γκαουσιανής κατανομής 360°. Τυπικά τα λέιζερ που παράγουν οπτική δέσμη με Γκαουσιανή κατανομή λειτουργούν στην θεμελιώδης εγκάρσια λειτουργία ή «TEM 00 mode».[6]



Εικόνα 1-8 :διατομή μίας Γκαουσιανής δέσμης και το προφίλ έντασής της .Πηγή: *Laser Beam Pathway Design and Evaluation for Dielectric Laser Acceleration*

Γενικά η ανάλυση του προφίλ της οπτικής δέσμης είναι πολύπλοκη και για την ανάλυση της χρησιμοποιείται μία εξίσωση η οποία περιγράφει το προφίλ της δέσμης. Αυτό το προφίλ συμβολίζεται ως «TEM_{mn}» όπου mn είναι πολυωνυμικοί δείκτες. Στην Γκαουσιανή κατανομή το m και το n είναι 0 άρα TEM₀₀. Ωστόσο κάποια λέιζερ έχουν εκπέμπουν δέσμες με διαφορετικό προφίλ.



Εικόνα 10: Hermite gaussian προφίλ οπτικής δέσμης. Πηγή:RP photonics encyclopedia.

1.3.6.3 ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΔΕΣΜΗΣ

Εκτός από την ανομοιομορφία της διατομής της οπτικής δέσμης, η οπτική δέσμη δεν είναι καθαρά παράλληλη με την κατεύθυνση του άξονα ζ, η οποία είναι η κατεύθυνση της διάδοσης του οπτικού σήματος. Ακόμα και αν η οπτική δέσμη βγει από το πομπό παράλληλη στον άξονα ζ, δεν θα παραμείνει έτσι λόγω της χωρικής περίθλασης που προκαλείται στην οπτική δέσμη στο πρώτο στένεμα που ονομάζεται και ως μέσο, μετά το μέσο η διάδοση συνεχίζεται σε μία αποκλίνουσα γωνία Θ [6].

Σύμφωνα με την πηγή [16], μία οπτική δέσμη που κατευθύνεται στον άξονα ζ με Γκαουσιανή κατανομή στην δέσμη περιγράφεται μαθηματικά από τον τύπο.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, z) = \mathbf{E} \times \left[\frac{W_0}{W(z)} \right] \times \exp \left[\frac{-r^2}{w^2(z)} \right] \times \exp \left[-ik \frac{r^2}{2R(z)} \right] \times \exp[i\psi(z)]$$

Εξίσωση 1

Όπου : r είναι η ακτινική απόσταση από το κέντρο της δέσμης, z είναι η αξονική απόσταση από τη μέση της οπτικής δέσμης (εστίαση της οπτικής δέσμης), E είναι το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου στην αρχή, W₀ η ακτίνα της μέσης, Το R(z) αντιπροσωπεύει την ακτίνα καμπυλότητας των μετώπων κύματος,

Το "ψ(z)" είναι η φάση Gouy

Το "w(z)" αντιπροσωπεύει την ακτίνα στην οποία η ένταση πέφτει στο 1/e² της μέγιστης τιμής της και προσδιορίζεται από τον τύπο[16] :

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z\lambda}{\pi W_0^2}\right)^2}$$

Εξίσωση 2

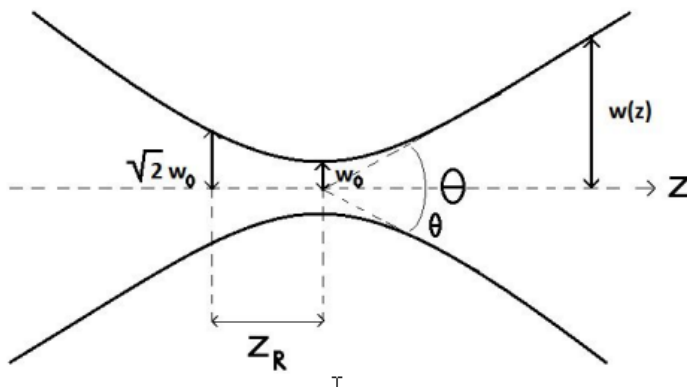
Η απόκλιση της δέσμης επεκτείνει την διάμετρο της διατομής της οπτικής δέσμης, όταν η απόσταση διάδοσης μεγαλώνει αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως γεωμετρική διασπορά. Μία οπτική δέσμη η οποία αρχικά θα έχει διάμετρο λιγότερη από 1 χιλιοστό στην συσκευή, μετά από διάδοση της μερικά χιλιόμετρα η διάμετρος της θα έχει μεγαλώσει σε μερικά μέτρα και αυτό λόγω της γεωμετρικής διασποράς. Η κατανομή και η διατομή της οπτικής δέσμης μπορεί να μην είναι ούτε κυκλική ούτε Γκαουσιανή. Η μη κυκλική διατομή της οπτικής δέσμης λόγω ακανόνιστης κατανομής ισχύος και ακανόνιστης απόκλισης μειώνει την απόδοση της σύζευξης από την οπτική δέσμη στον δέκτη. Για τον υπολογισμό του μέσου και της ακτίνας σε ένα μη Γκαουσιανή προφίλ οπτικής δέσμης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας ολοκληρωμένος τύπος[6].

Για το βέλτιστο μέσο μίας Γκαουσιανής οπτικής δέσμης W_0 optimum με μήκος κύματος λ και απόσταση z από την πηγή ορίζεται ο τύπος[6]:

$$W_0 \text{ optimum} = \left[\frac{\lambda \times z}{\pi} \right]_2^1$$

Εξίσωση 3.

Αντίστοιχα η απόσταση στη οποία η ακτίνα εξαπλώνεται κατά παράγοντα $\sqrt[2]{2}$ Ονομάζεται εύρος Rayleigh [6].



Εικόνα 1-9: Απεικόνιση μιας ακτίνας Gauss μαζί με μερικά από τα χαρακτηριστικά της. Πηγή: *Laser Beam Pathway Design and Evaluation for Dielectric Laser Acceleration*

Γεωμετρικά, η απόκλιση της δέσμης είναι το παράγωγο της ακτίνας της δέσμης. Η απόκλιση της δέσμης στον δέκτη επηρεάζει αρνητικά το σύστημα. Η οπτική ισχύς ανά τετραγωνική μονάδα επιφάνειας της διατομής της οπτικής δέσμης εξασθενεί γρήγορα

καθώς διαδίδεται. Η περιοχή λήψης του φωτοανιχνευτή είναι αρκετά μικρή, μερικά εκατοστά, έτσι η ισχύς που προσκρούει στον φωτοανιχνευτή δεν είναι αρκετή για την λήψη του σήματος γιατί η οπτική δέσμη έχει μεγαλώσει πολύ, και μόνο ένα της κομμάτι φτάνει στον φωτοανιχνευτή το υπόλοιπο χάνεται. Στον δέκτη η γεωμετρική διασπορά είναι ισοδύναμη με την εξασθένηση ισχύος, επειδή η οπτική δέσμη εξαπλώνεται συνεχώς καθώς ταξιδεύει στο μέσο [6], η γεωμετρική εξασθένηση (ΓΕ),(GSA) εξαρτάται από την απόκλιση της οπτικής δέσμης και το μήκος της σύνδεσης και ορίζεται ως:

$$ΓΕ = \frac{\text{διάφραγμα του δέκτη}}{\text{Επιφάνεια διατομής οπτικής δέσμης στον δέκτη}}$$

Εξίσωση 4

1.3.6.4 ΕΥΡΟΣ RAYLEIGHT

Το σημείο από την μέση της οπτικής δέσμης όπου διπλασιάζεται η διάμετρος της οπτικής δέσμης ονομάζεται μήκος Rayleigh. Στην πραγματικότητα είναι η απόσταση από την μέση της οπτικής δέσμης όπου η ακτίνα της αυξάνεται κατά $\sqrt[2]{2}$ [6]. Για τις οπτικές δέσμες με Γκαουσιανή κατανομή το εύρος Rayleigh zR καθορίζεται από την ακτίνα και το μέσο W_0 και το μήκος κύματος λ , ο τύπος είναι [16] :

$$zR = \frac{\pi \times W_0^2}{\lambda}$$

Εξίσωση 5

Το διπλάσιο του μήκους Rayleigh ονομάζεται ομοεστιακός παράγοντας b [17,18].

Στην μετάδοση των Γκαουσιανών οπτικών δεσμίδων στον ελεύθερο χώρο η διάμετρος της οπτικής δέσμης σε μία απόσταση z , $W(z)$ εκφράζεται με όρους, την μέση της οπτικής δέσμης και του εύρους Rayleigh ως [6]:

$$W(z) = W_0 \times \sqrt{1 + \left(\frac{z}{zR}\right)^2}$$

Εξίσωση 6

όπου η αρχή του άξονα z είναι στην μέση της οπτικής δέσμης.

Αντίστοιχα το βάθος της οπτικής δέσμης σε αποστάσεις Rayleigh zR είναι $W_0\sqrt{2}$. Και ο ομοεστιακός παράγοντας b είναι [6] :

$$b = 2 \times zR = \left(\frac{2 \times \pi \times W_0^2}{\lambda}\right).$$

Εξίσωση 7

Για σημεία μακριά από το εύρος Rayleigh $z \gg zR$ η απόκλιση της δέσμης υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi \times W_0}$$

Εξίσωση 8

και η συνολική γωνιακή εξάπλωση της οπτικής δέσμης θα είναι $\Theta=2\theta$.

1.3.6.5 ΚΟΡΥΦΗ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΜΑΤΟΣ

Το μήκος κύματος με την υψηλότερη ένταση ακτινοβολίας της πηγής ονομάζεται κορυφή του μήκους κύματος.

1.3.6.6 ΒΑΘΜΟΣ COHERENT

Οι ακτίνες λέιζερ εξ ορισμού μπορούν να θεωρηθούν σύμφωνες, διότι όλες οι ακτίνες που φεύγουν από τη συσκευή βρίσκονται σε φάση, ο βαθμός της συμφωνίας αντιστοιχεί στο ποσοστό των ακτίνων που βρίσκονται σε φάση μέσα στην οπτική δέσμη [6]. Για παράδειγμα αν σε ένα πείραμα παρεμβολής η ελάχιστη και η μέγιστη ένταση του μοτίβου είναι I_{min} I_{max} αντίστοιχα τότε ο βαθμός της συνάφειας ορίζεται ως:

$$DoC = \frac{(I_{max} - I_{min})}{(I_{max} + I_{min})}$$

Εξίσωση 9

Μία οπτική δέσμη λέγεται σύμφωνη οπτική δέσμη όταν το αποτέλεσμα αυτού του τύπου είναι μεγαλύτερο από την τιμή 0.88, όταν η τιμή είναι λιγότερο από 0.88 και περισσότερο από 0.55 τότε η δέσμη λέγεται εν μέρη σύμφωνη και τέλος για τιμές μικρότερες του 0.5 οι οπτική δέσμη είναι μη σύμφωνη [6].

1.3.6.7 ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΔΕΣΜΗΣ

Η οπτική ισχύς $P(r,z)$ μέσω μίας κυκλικής οπής ακτίνας r στο εγκάρσιο επίπεδο στο σημείο z του άξονα της διάδοσης του σήματος σύμφωνα με την πηγή [6], υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P(r, z) = P_0 \times \left[1 - \exp \left\{ \frac{-2r^2}{W(z)^2} \right\} \right]$$

Εξίσωση 10

Όπου P_0 είναι η ισχύς της οπτικής δέσμης που παράγεται από το λέιζερ:

$$P_0 = \pi \times I_0 \times \frac{W_0^2}{2}$$

Εξίσωση 11

Όπου I_0 η κορυφή του μήκους κύματος της οπτικής δέσμης.

1.3.6.8 ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ

Στα συστήματα ΟΕΕΧ προκειμένου να εκμεταλλευτούμε καλύτερα το εύρος ζώνης αλλά και να περιορίσουμε διάφορα φαινόμενα που αλλοιώνουν την ποιότητα της ζεύξης χρησιμοποιούμε διάφορες τεχνικές πολυπλεξίας με τις πιο βασικές μορφές της να γίνονται στον χρόνο (TDM) και στην συχνότητα (FDM). Κάποιες πιο εξελιγμένες τεχνικές πολυπλεξίας που χρησιμοποιούνται είναι της διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) και η πολυπλεξία διαίρεσης χώρου, η οποία είναι κατάλληλη για συστήματα MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). Προκειμένου όμως να επιτευχθεί ακόμα καλύτερη απόδοση των συστημάτων για συστήματα πολύ μεγάλων αποστάσεων γίνεται χρήση και των δύο παραπάνω τεχνικών. Υπάρχουν κάποιες τεχνικές που βοηθούν στην βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, μερικές από αυτές τις τεχνικές είναι[8]:

- Φασματική κωδικοποίηση πλάτους με διαίρεση οπτικού κώδικα πολλαπλής πρόσβασης (SACO CDMA), αυτό το σύστημα πολυπλεξίας παρουσιάζει ευελιξία κατανομής των καναλιών, ασύγχρονη λειτουργική ικανότητα, βελτίωση του απορρήτου καθώς και αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου.
- Ορθογώνια διαμόρφωση συχνότητας σε οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου (OFDM-FSO), μπορεί να δώσει λύσεις για την μεταφορά δεδομένων σε μεγάλες ταχύτητες ακόμα και στις χειρότερες καιρικές συνθήκες όπως πολύ ομίχλη. Εφαρμόζεται με την χρήση δύο σχημάτων διαμόρφωσης OSTB και OSSB.
- Χρήση WDM συστημάτων.

1.3.6.9 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ ΦΩΤΟΣ

Η πηγή φωτός είναι το πιο σημαντικό κομμάτι του πομποδέκτη, το φως πρέπει να είναι μονοχρωματικό, σταθερό και να έχει διάρκεια ζωής πολλά έτη. Αρχικά οι πηγές φωτός μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες[3,6]:

- Τις coherent (σύμφωνες). Είναι οι πηγές φωτός όπου η οπτική ακτινοβολία είναι προϊόν εξαναγκασμένης εκπομπής, συνεπώς όλα τα διεγερμένα φωτόνια έχουν την ίδια οπτική φάση. Όλων των ειδών τα laser ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.
- Και τις noncoherent (ασύμφωνες). Είναι οι πηγές όπου τα διεγερμένα φωτόνια βρίσκονται σε τυχαίες φάσεις. Τα LED και οι λαμπτήρες πυρακτώσεως ανήκουν σε αυτή την κατηγορία πηγών φωτός.

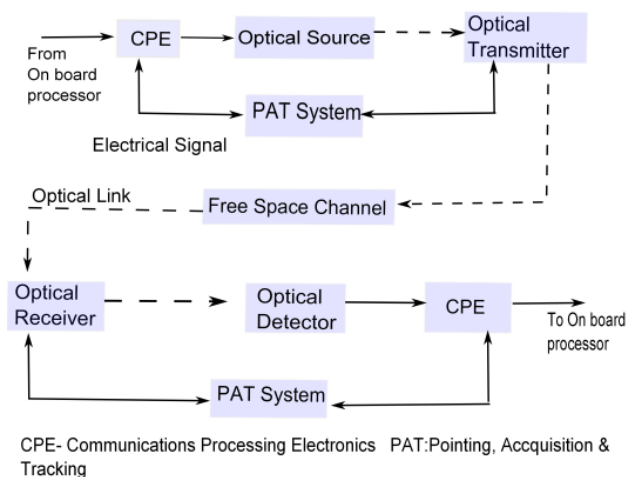
Μπορούμε επίσης να κατηγοριοποιήσουμε τα laser με βάση την εμβέλειά τους, δηλαδή την μέγιστη απόσταση που μπορεί ο δέκτης να λάβει το οπτικό σήμα από τον πομπό.

Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που πρέπει να γίνει η σύνδεση τόσο και πιο ισχυρά λέιζερ θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε στο σύστημά μας. Έτσι έχουμε την εξής κατηγοριοποίηση των πηγών φωτός [6]:

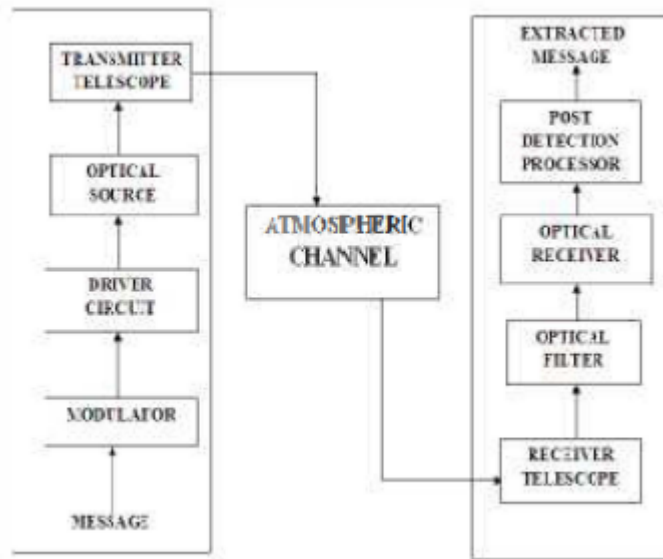
- Τα πολύ μεγάλης εμβέλειας laser όπου η οπτική ισχύς τους είναι τέτοια ώστε να μπορεί να υποστηρίξει συνδέσεις σε αποστάσεις > 80 χιλιόμετρα μακριά.
- Τα μεγάλης εμβέλειας laser τα οποία έχουν οπτική ισχύ ικανή να υποστηρίξει ζεύξεις 40 χιλιόμετρα μακριά
- Τα μέσης εμβέλειας laser τα οποία υποστηρίζουν ζεύξεις 15 χιλιόμετρα.
- Τα μικρής εμβέλειας laser τα οποία μπορούν να στείλουν την οπτική δέσμη μέχρι και 2 χιλιόμετρα μακριά
- Τις πολύ μικρής εμβέλειας πηγές φωτός που έχουν δύναμη για να στείλουν την οπτική δέσμη σε απόσταση μικρότερη από το 1 χιλιόμετρο, σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα light emitting diodes, LED.

2. ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΕΣ(TRANSCIVERS)

Ένας transceiver ο οποίος χρησιμοποιείται στις ΟΕΕΧ αποτελείται από ένα ζεύγος ενός οπτικού πομπού και ενός οπτικού δέκτη. Ο πομπός μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε οπτικό σήμα και ρυθμίζει τη δέσμη λέιζερ προκειμένου να μεταφερθούν τα δεδομένα στον πομπό μέσω του μέσου διάδοσης. Ο πομπός αποτελείται από τον διαμορφωτή λέιζερ, το κύκλωμα, την οπτική πηγή, από το σύστημα για την διαχείριση του ΑΤΡ, έναν οπτικό ενισχυτή ο οποίος ανάλογα με τις ανάγκες της σύνδεσης μπορεί και να παραλείπεται και τέλος το τηλεσκόπιο. Το σήμα ταξιδεύει στο μέσο διάδοσης και φτάνει στον δέκτη. Ο δέκτης με την σειρά του αποτελείται από ένα τηλεσκόπιο, από το σύστημα για την διαχείριση του ΑΤΡ[6], οπτικά φίλτρα και μία φωτοδίοδο για την μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό[11]. Τα κομμάτια που αποτελούνται ο πομπός και ο δέκτης φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



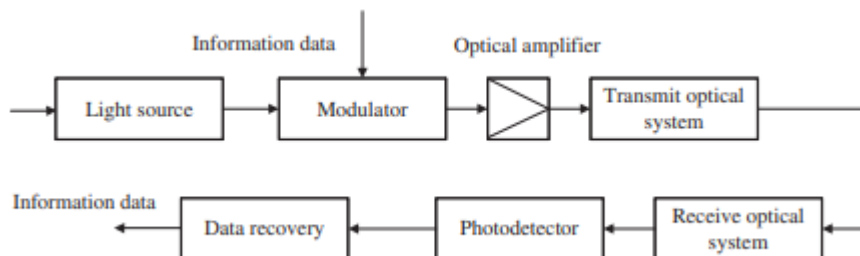
Εικόνα 2-1 Inter satellite link block diagram . Πηγή: A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM FOR CUBESATS



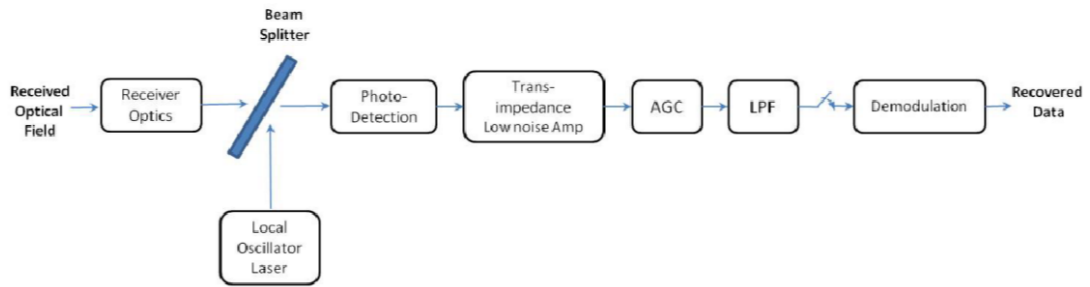
Εικόνα 2-2 Υποσύστημα FSO Πηγή: Basic Concept of Free Space Optics Communication (FSO): An Overview

Τα συστήματα διαδορυφορικών ΟΕΕΧ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση το είδος της ανίχνευσης που χρησιμοποιείται στον δέκτη και με βάση το είδος της διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται, σε σύμφωνα συστήματα και συστήματα διαμόρφωσης έντασης -άμεσης ανίχνευσης[20].

Στα σύμφωνα συστήματα μπορεί να χρησιμοποιηθούν διαμορφώσεις πλάτους, συχνότητας και φάσης. Η κύρια διαφορά μεταξύ των σύμφωνα συστημάτων και των συστημάτων άμεσης ανίχνευσης είναι στον διαφορετικό τρόπο ανίχνευσης στον δέκτη. Στον δέκτη ενός σύμφωνα συστήματος προστίθεται ένας οπτικός μικτής με δύο εισόδους, μία της οπτικής δέσμης και μία ενός οπτικού ταλαντωτή μετά την διέλευση από τον μικτή η συνιστώσα ισχύος του σήματος εξόδου περιέχει όλες τις πληροφορίες (ένταση, συχνότητα, φάση) οπότε οποιαδήποτε μέθοδος διαμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκε από τον πομπό μπορεί να διατηρηθεί, τα συστήματα αυτά έχουν ανώτερη απόδοση όσον αφορά την απόρριψη της εξασθένησης από αναταράξεις καθώς και παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία δέκτη. [20].



Εικόνα 2-3 Διάγραμμα συστήματος άμεσης ανίχνευσης. πηγή laser inter satellite link technology



Εικόνα 2-4 Διάγραμμα σύμφωνου δέκτη, πηγή *Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective*

Στα συστήματα άμεσης ανίχνευσης (IM/DD) η ένταση του εκπεμπόμενου φωτός χρησιμοποιείται για την μετάδοση της πληροφορίας, ο φωτοανιχνευτής στον δέκτη ανιχνεύει άμεσα τις μεταβολές της έντασης του φωτός χωρίς την χρήση τοπικού ταλαντωτή.



Εικόνα 2-5 Διάγραμμα δέκτη άμεσης ανίχνευσης, πηγή *Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective*

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε τα μέρη που αποτελούν έναν πομποδέκτη. Οι πομποδέκτες αυτοί έχουν θετικά όπως το μικρό τους μέγεθος, το μικρό τους βάρος και είναι αρκετά οικονομικοί. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα πυκνής τοποθέτησης τέτοιων πομποδεκτών 1000+ σε κάτι λίγο περισσότερο από ένα τετραγωνικό μέτρο. Καθώς οι απαιτήσεις για μεγαλύτερης διάρκειας και αξιοπιστίας οδήγησαν στην εξέλιξη αυτών των πομποδεκτών έτσι ώστε να μπορούν να προσφέρουν την μεγαλύτερη διάρκεια επικοινωνίας και να μπορούν να δημιουργήσουν μία σταθερή σύνδεση. Συγχρόνως, αυτοί οι πομποδέκτες έχουν χαμηλή κατανάλωση (100μW για κάθε 10 με 100 Mbps), μπορούν να διαμορφωθούν σε υψηλές ταχύτητες της τάξης του 1 GHz για LED/VCSEL αλλά και ακόμα πιο υψηλές ταχύτητες για διόδους λείζερ.

2.1 ΠΗΓΕΣ ΦΩΤΟΣ

2.1.1 Lasers

Η λέξη laser προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων light amplification by stimulated emission of radiation. Αν η ενέργεια φωτονίου του προσπίπτοντος φωτός είναι περίπου ίδια με την διαφορά ενέργειας της διεγερμένης με της βασική κατάσταση του ατόμου, το φωτόνιο απορροφάτε από το άτομο και το άτομο καταλέγει στην κατάσταση διέγερσης. Τα άτομα που βρίσκονται σε διεγερμένη κατάσταση τελικά καταλήγουν στην βασική κατάσταση, αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η παραγωγή οπτικής και ακουστικής ενέργειας, η εκπομπή του φωτός μπορεί να γίνει μέσω δύο διαδικασιών, την αυθόρμητη εκπομπή και την διεγερμένη εκπομπή, στην αυθόρμητη εκπομπή τα φωτόνια εκπέμπονται προς τυχαίες διευθύνσεις με τις φάσεις τους να μην έχουν καμία σχέση μεταξύ τους, αντίθετα η διεγερμένη εκπομπή αρχίζει με την ύπαρξη ενός φωτονίου, το εκπεμπόμενο φωτόνιο ταιριάζει με το αρχικό ως προς την ενέργεια και την διεύθυνση διάδοσης του, όλα τα λέιζερ εκπέμπουν φως με την διαδικασία διεγερμένης εκπομπής[3,19].

Σύμφωνα με την πηγή [6] τα διεγερμένα φωτόνια μπαίνουν σε μία περιοχή γνωστή και ως κοιλότητα συντονισμού, η οποία είναι μία ισχυρή κατευθυνόμενη σύμφωνη οπτική μονοχρωματική δέσμη, τα φωτόνια που ταξιδεύουν προς άλλες κατευθύνσεις χάνονται εκτός της κοιλότητας και δεν συμβάλουν στην δέσμη φωτός. Η κοιλότητα συντονισμού έχει συγκεκριμένες διαστάσεις και είτε έχει γυαλισμένα άκρα είτε κάποιου είδους σχάρας δημιουργώντας καθρέπτες προκειμένου να σχηματίζουν μηχανισμό επιλογής συχνότητας της οπτικής δέσμης. Τα λέιζερ ημιαγωγών από υλικά όπως τα AlGaAs (αλουμίνιο, γάλιο, Αρσένιο) και τα InGaAs (ίνδιο, γάλιο, Αρσένιο, φωσφίδιο) τα οποία διεγείρουν φωτόνια είναι τα πλέον κατάλληλα λέιζερ για διαδορυφορικές συνδέσεις, λόγω του χαμηλού όγκου και της αποδοτικότητάς τους, οι τιμές του ρεύματος που χρειάζεται για να λειτουργήσει ένα λέιζερ είναι μεγαλύτερες από 10 mA αλλά μικρότερες από 1A προκειμένου να παράγουν οπτική ισχύ εξόδου κοντά στα 10 mW -25 mW. Τα στοιχεία ημιαγωγών βρίσκονται ανάμεσα σε στοιχεία που βρίσκονται στο θετικό και στο αρνητικό στρώμα, το μέρος ανάμεσα στα στοιχεία ονομάζεται στρώμα επένδυσης. Γενικά σε αρκετά λέιζερ η ενέργεια της δέσμης αποδίδεται κατά 95 % στο μπροστινό μέρος της συσκευής ενώ ένα 5% γυρνάει στο πίσω μέρος της συσκευής για να μπορεί να εμφανίσει δεδομένα και στοιχεία για την μετάδοση πληροφορίας[6]. Τα στερεάς κατάστασης λέιζερ ημιαγωγών παράγουν σήμα εξόδου πολλών kilowatt με αποτέλεσμα να είναι χρήσιμα για συνδέσεις τύπου βαθέως διαστήματος καθώς και για διαδορυφορικές συνδέσεις με αποστάσεις που μπορούν να καλύψουν ακόμα και 40.000 χιλιόμετρα. Η οπτική δέσμη δημιουργείται σε μία ενεργή περιοχή όπου το σήμα μπορεί να διαμορφωθεί είτε άμεσα είτε έμμεσα. Η άμεση διαμόρφωση σε συνδέσεις με μεγάλο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στην σύνδεση με την εμφάνιση τερετίσματος. Όταν το ρεύμα

αλλάζει από κατάσταση 0 σε κατάσταση 1 και αντίστροφα, οι ανακλαστικές επιφάνειες αλλάζουν και αλλάζουν τα χαρακτηριστικά της κοιλότητας συντονισμού. Το τερέτισμα μπορεί να μειωθεί αν το laser εκπέμψει με την μορφή του συνεχούς κύματος. Και αυξάνετε όσο αυξάνεται το ρεύμα που διαπερνά τους ημιαγωγούς. Σε μικρές ταχύτητες το τερέτισμα είναι πιο εύκολα αντιμετωπίσιμο. Η πρακτικότητα της συσκευής λέιζερ είναι πολύ σημαντική στις επικοινωνίες όπως και κάποια άλλα εργαλεία όπως διαμορφωτές, ενισχυτές, φίλτρα. Το σταθερό σήμα και το σταθερό μήκος κύματος είναι σημαντικό για τις εφαρμογές, η σταθερότητα εξαρτιέται από το τι υλικό είναι φτιαγμένος ο ημιαγωγός, πόσο ρεύμα τον διαρρέει αλλά και η θερμοκρασία που βρίσκεται και αναπτύσσεται όταν αυτό λειτουργεί που μπορεί να κυμαίνεται από 20 έως και 100 βαθμούς κελσίου. Στις συνδέσεις με μεγάλο ρυθμό μετάδοσης η σταθεροποίηση της συχνότητας και της ενίσχυσης επιτυγχάνεται με την χρήση ψυκτικών συσκευών για τις συσκευές λέιζερ, προκειμένου να κρατήσουν το μηχάνημα σε θερμοκρασία λειτουργίας. Υπάρχουν οι παρακάτω τύποι λέιζερ [6]:

1. Fabry-Perot
2. distributed feedback
3. Vertical emitting lasers
4. βασισμένο σε τιτάνιο ζαφείρι
5. Quantum cascade

2.1.2 Light Emitting Diodes

Τα LED είναι μονολιθικά αναπτυγμένες συσκευές ημιαγωγών δύο στοιχείων p-n, με χαρακτηριστικά αντίστοιχα με τους κλασσικούς διόδους. Κατά την διαδικασία ανασυγκρότησης όπου γίνεται η διασταύρωση των στοιχείων απελευθερώνεται ενέργεια η οποία έχει την μορφή φωτός καθώς και τη μορφή θερμότητας[6].

Το πλήθος των φωτονίων που ενεργοποιούνται δηλαδή το φως που βγαίνει από την συσκευή εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που θα διαρρεύσει την διασταύρωση των στοιχείων. Η ανασυγκρότηση είναι ένα τυχαίο γεγονός και το φως το οποίο παράγει δεν είναι σύμφωνη[19]. Το φάσμα που παράγει το LED είναι το όριο του παραγόμενου μήκους κύματος. Όσο μεγαλύτερες θερμοκρασίες παράγονται κατά την διαρροή των στοιχείων από ρεύμα τόσο μεγαλύτερο γίνεται το εύρος που μπορεί να πάρει το μήκος κύματος. Η θερμοκρασία έχει κάποιες δυσμενείς συνέπειες για την σταθερότητα του LED, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, το μήκος κύματος μετατοπίζεται και η ένταση του φωτός μειώνεται. Όποτε καταλαβαίνουμε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι ένα σημείο κερδίζουμε σε μήκος κύματος και έχουμε την επιθυμητή ένταση αλλά με την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας δεν έχουμε την επιθυμητή απόδοση με την αύξηση του BER[6].

Συνοψίζοντας το εύρος ζώνης των LED εξαρτάται από τα υλικά της συσκευής των ημιαγωγών. Η οπτική δύναμη των LED εξαρτάται από την πυκνότητα του ρεύματος που διαπερνά την συσκευή, εξαρτάται επίσης από την θερμοκρασία, όπως και από την

Θερμοκρασία εξαρτάται και το οπτικό φάσμα των LEDs, η οπτική ενέργεια που παράγεται δεν είναι σύμφωνη. Τα LED είναι γενικά συσκευές με αργό ρυθμό μετάδοσης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επικοινωνίες με χαμηλές απαιτήσεις επικοινωνίας, το κόστος τους είναι χαμηλό πράγμα που του καθιστά πολύ προσιτούς για εφαρμογές με χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης. Η βαριά βιομηχανία – αυτοκινητοβιομηχανία κάνει χρήση LEDs λόγω της χαμηλής τους κατανάλωσης σε σχέση με την αυξημένη παραγόμενη ενέργεια. Παρόλο αυτά δεν είναι κατάλληλα για επικοινωνίες σε μεγάλες αποστάσεις όπως οι δια διαστημικές επικοινωνίες.

2.1.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΠΗΓΗΣ ΦΩΤΟΣ

Η επιλογή της πηγής φωτός στα συστήματα OEEH αναδύεται ως ένας κρίσιμος παράγοντας για την απόδοση και την αξιοπιστία της μεταφοράς δεδομένων στο μέσω διάδοσης. Οι πηγές φωτός όπως τα LED και τα laser, προσφέρουν διαφορετικά πλεονεκτήματα και προκλήσεις στο πεδίο των OEEH. Τα LED αντιπροσωπεύουν μια ευρέως χρησιμοποιούμενη πηγή φωτός στα συστήματα OEEH λόγω της απλότητας τους και του χαμηλού κόστους. Η χρήση των LEDs συνήθως καταλήγει σε συστήματα χαμηλότερης ταχύτητας μετάδοσης, αλλά προσφέρει σταθερή και αξιόπιστη απόδοση σε περιβάλλοντα με χαμηλές απαιτήσεις επικοινωνίας. Τα LEDs μπορούν να παράγουν φωτεινότητα σε μεγάλο εύρος μήκους κύματος, με φάσμα να εξαρτάται από τα υλικά τους και την θερμοκρασία λειτουργίας. Παρότι διαθέτουν χαμηλότερη ισχύ σε σχέση με τα Laser, η σταθερότητα της απόδοσης τους κατά την αλλαγή της θερμοκρασίας αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα. Από την άλλη πλευρά, τα laser αναδύονται ως πηγές φωτός με εντυπωσιακή δυναμική και ευκολία στη διαμόρφωση του σήματος. Προσφέρουν μεγαλύτερη εστίαση και στενότερο πλάτος οπτικής δέσμης σε σύγκριση με τα LED καθώς είναι συναφής οπτική πηγή, επιτρέποντας έτσι μεγαλύτερη ακρίβεια στην μετάδοση του φωτός στο μέσο διάδοσης. Η σταθερότητα του μήκους κύματος και η ευκολία στον έλεγχο του σήματος καθιστούν τα laser κατάλληλα για υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης της πληροφορίας. Ωστόσο, η χρήση laser μπορεί να απαιτήσει πιο περίπλοκη διαχείριση της θερμοκρασίας λειτουργίας και να ενεργοποιήσει φαινόμενα όπως το τερέτισμα. Όσον αφορά την πολυπλεξία η οποία είναι ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό στα συστήματα επικοινωνίας, αναφέρεται στην δυνατότητα μεταφοράς πολλαπλών ανεξάρτητων ροών δεδομένων πάνω σε ένα κοινό κανάλι επικοινωνίας. Τα Laser λόγω της στενής και συγκεντρωμένης δέσμης που παράγουν, είναι κατάλληλα για εφαρμογές πολυπλεξίας. Η δυνατότητα εστίασης του φωτός σε στενές γωνίες επιτρέπει τη χρήση πολλαπλών laser για τη μετάδοση διαφορετικών σημάτων παράλληλα, χρησιμοποιώντας διαφορετικές γωνίες και κατευθύνσεις. Αυτό γίνεται γνωστό ως σύστημα SWDM (συγχρονισμένης πολλαπλής πολύπλεξης) και χρησιμοποιείται για την αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού επικοινωνίας. Όσον αφορά την πολυπλεξία και τα LEDs, λόγω της ευρείας δέσμης που παράγουν, δυσκολεύονται να επιτύχουν το ίδιο επίπεδο πολυπλεξίας με τα Laser. Ωστόσο, μπορεί

να χρησιμοποιηθούν σε απλές εφαρμογές πολυπλεξίας με την αρχή του WDM, όπου διαφορετικά χρώματα LED μεταφέρουν διαφορετικά σήματα. Συνολικά, ενώ και οι δύο πηγές φωτός μπορούν στο μπορούν να συμβάλουν στην πολυπλεξία, τα laser προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και αποδοτικότητα σε πολυπλεκτικά συστήματα επικοινωνίας, επιτρέποντας την μετάδοση πολλαπλών ανεξάρτητων ροών δεδομένων με υψηλότερη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος. Εν κατακλείδι, η επιλογή της κατάλληλης πηγής φωτός στα συστήματα OEEH εξαρτάται από τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής που υλοποιείται. Τα Laser ημιαγωγών προσφέρουν υψηλή απόδοση και ευελιξία για εφαρμογές με ανάγκη υψηλότερης ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων και επίτευξη μεγαλύτερης απόστασης επικοινωνίας. [20]

Type of Laser Diode	Wavelength(um)
Diode Pumped Nd:YAG(YAG)	0.503-1.064
Indium Gallium Arsenide Phosphide (InGaAsP)	1.3-1.5
Aluminium Gallium Arsenide (AlGaAs)	0.8
VSCEL	0.75-1.050

Εικόνα 2-6: Μήκη κύματος διαφόρων λέιζερ ημιαγωγών. Πηγή: A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM FOR CUBESATS

2.2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ-ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΕΣ

Σύμφωνα με τα διάφορα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στον οπτικό τομέα, η μορφή οπτικής διαμόρφωσης δεδομένων μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις μορφές την έντασης, την συχνότητα, τη φάσης και τη πόλωσης[21]. Όπως αναφέραμε στην αρχή του κεφαλαίου ένα οπτικό σύστημα μπορεί να χωριστεί σε 2 συστήματα ανάλογα τη μέθοδο διαμόρφωσης και την μέθοδο ανίχνευσης που χρησιμοποιεί σε σύμφωνο σύστημα και σύστημα διαμόρφωσης έντασης - άμεσης ανίχνευσης. Σύμφωνα με την [6] τα οπτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στους ημιαγωγούς έχουν κάποιες επιθυμητές ιδιότητες που επηρεάζουν την συχνότητα εκπομπής, την φάση και την πόλωση του σήματος επίσης επηρεάζουν την ένταση της μονοχρωματικής δέσμης φωτός η οποία τα διαπερνάει. Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται στους διαμορφωτές. Υπάρχουν δύο είδη διαμορφώσεων που χρησιμοποιούνται[6]:

1. άμεση διαμόρφωση, είναι η διαμόρφωση η οποία η συσκευή λέιζερ από μόνη της εκμεταλλεύεται τις ιδιότητες του φωτός και διαμορφώνει κατευθείαν το σήμα που παράγεται βάζοντας μία διαμορφωμένη ηλεκτρική τάση σε αυτό για να δημιουργηθούν παλμοί που αναπαριστούν τα ψηφιακά bit. Ωστόσο η άμεση διαμόρφωση σε αρκετά μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης προκαλεί τετέρισμα και θόρυβο καθώς, η συσκευή λέιζερ πρέπει να σχεδιαστεί με προσοχή προκειμένου να εξαλειφθούν τέτοια φαινόμενα. Η άμεση ανίχνευση χρησιμοποιεί την ανίχνευση τετραγωνικού νόμου του φωτοανιχνευτή οπότε μόνο η πληροφορία πλάτους μπορεί να ανιχνευθεί. Η χρήση αυτής της διαμόρφωσης προτιμάται λόγω της απλότητας της[32].

2. Έμμεση η διαμόρφωση αυτή χρησιμοποιείται για ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους από 5 Gb/s , είναι η διαμόρφωση όπου μία συσκευή διαμορφωτή τοποθετείται ακριβώς πάνω στο οπτικό μονοπάτι της οπτικής δέσμης ενός συνεχόμενου κύματος λέιζερ, καθώς η δέσμη διαπερνάει την συσκευή κάποιο από τα χαρακτηριστικά του φωτός επηρεάζεται και αλλάζει εφαρμόζοντας σε αυτό διαμορφωμένο ηλεκτρικό σήμα από τον διαμορφωτή. Ο διαμορφωτής μπορεί να τοποθετηθεί εξωτερικά κολλημένος πάνω στο λέιζερ αλλά και σε μία ελάχιστη απόσταση. Η χρήση ενός εξωτερικού διαμορφωτή παρέχει επικοινωνίες υψηλής ταχύτητας σε μεγάλες αποστάσεις επειδή μειώνει την διασπορά του συστήματος λόγω του chirp παρόλα αυτά αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Για την διαμόρφωση του σήματος στις έμμεσες διαμορφώσεις χρησιμοποιείται ένας οπτικός διαμορφωτής, ο οπτικός διαμορφωτής διαμορφώνει το ηλεκτρικό σήμα που μεταφέρει τα δεδομένα στο οπτικό φέρον που παράγεται από το λέιζερ για να πραγματοποιήσει την ηλεκτρική-οπτική μετατροπή. Οι διαμορφωτές φωτός που χρησιμοποιούνται συνήθως βασίζονται γενικά στην ηλεκτρο-οπτική ιδιότητα του υλικού - ο δείκτης διάθλασης του ηλεκτροοπτικού υλικού μεταβάλλεται με την εφαρμοζόμενη εξωτερική τάση για την επίτευξη οπτικής διαμόρφωσης συχνότητας, φάσης και πλάτους. Ο μηχανισμός λειτουργίας του διαμορφωτή φάσης βασίζεται ακριβώς στο ηλεκτροοπτικό φαινόμενο για την αλλαγή της ταχύτητας διάδοσης και της φάσης του φωτεινού κύματος. Ένας τέτοιος οπτικός διαμορφωτής είναι ο Mach Zehnder ο οποίος περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο[21].

Οι παράμετροι οι οποίοι χαρακτηρίζουν την απόδοση των οπτικών διαμορφωτών είναι

- Το βάθος της διαμόρφωσης
- το εύρος ζώνης
- απώλειες
- βαθμός της απομόνωσης
- η δύναμη διαμόρφωσης

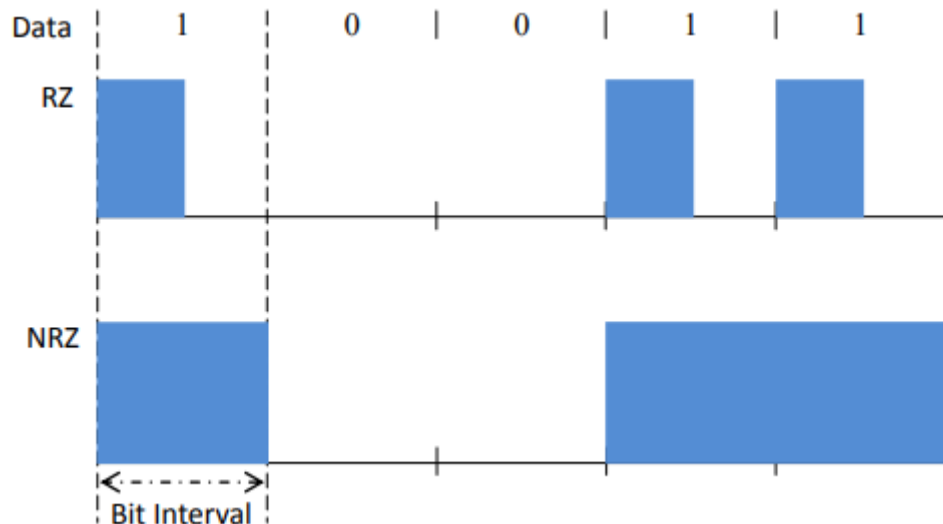
κάποιοι εξίσου σημαντικοί παράμετροι είναι:

- Η ευαισθησία του διαμορφωτή πόλωση
- Ανταπόκριση της συχνότητας
- Απώλεια εισαγωγής
- Τερέτισμα

2.2.1 ΟΠΤΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

Οι κύριες τεχνικές διαμόρφωσης κατάλληλες για μη σύμφωνα συστήματα IM/DD είναι οι εξής [22]:

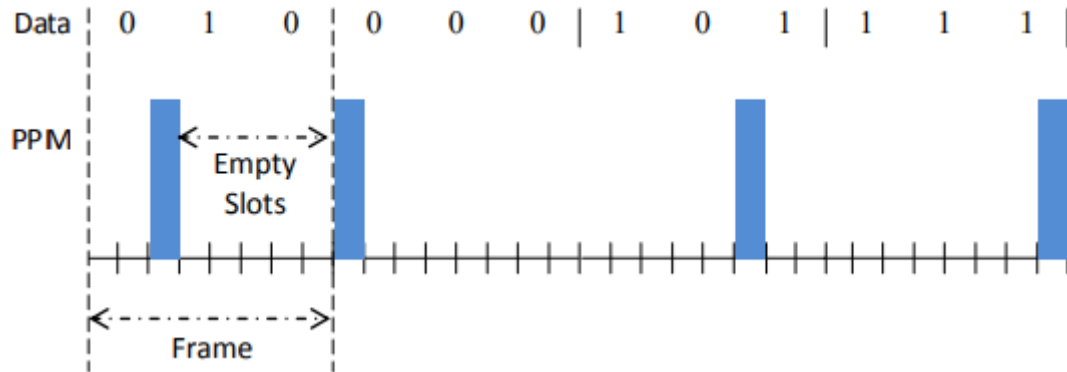
- Η ΟΟΚ είναι η πιο βασική έκδοση της παλμικής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται σε τέτοια FSO συστήματα, χρησιμοποιείται στους δυαδικούς δέκτες, είναι μία διαμόρφωση πλάτους ASK όπου το πλάτος A παίρνει θετικές τιμές όταν ανιχνεύει το σύμβολο 1 και τιμή 0 όταν το σύμβολο που παίρνει είναι 0. Η ΟΟΚ διαμόρφωση μπορεί να επιτευχθεί είτε με άμεση διαμόρφωση είτε με έμμεση διαμόρφωση χρησιμοποιώντας έναν εξωτερικό διαμορφωτή είναι ιδιαίτερα αποδοτική για οπτικά συστήματα επικοινωνίας αλλά ταυτόχρονα είναι επιρρεπής στις ατμοσφαιρικές αναταράξεις. Η διαμόρφωση on-off keying έχει κάποιες παραλλαγές. Κάποιες από αυτές τις παραλλαγές είναι πιο επιρρεπής σφάλματα από ότι άλλες, καθώς η φυσική του καναλιού επικοινωνίας περιορίζει τα σχήματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν αξιόπιστα σε μία οπτική σύνδεση ελεύθερου χώρου[6]. Οι παραλλαγές αυτές είναι:
 1. Η RZ: η κωδικοποίηση όπου στέλνει το σήμα στην κατάσταση μηδέν σε κάθε χρονική περίοδο ενός bit. 1 bit ανταποκρίνεται από μία κατάσταση ON του λείζερ για μόνο το μισό μίας χρονικής περιόδου ενός bit. Ακόμα και στην κατάσταση 1 το bit είναι μηδέν για το άλλο μισό της χρονικής περιόδου του. Τέτοιες κωδικοποιήσεις προτείνονται ως βάση για ορισμένα συστήματα οπτικής διαίρεσης χρονικού πολλαπλασιασμού (OTDM), αυτό συμβαίνει επειδή υπάρχει κάποιο χρονικό διάστημα σε κάθε χρονική περίοδο ενός bit για να προσαρμοστεί το σήμα σε μικρές ανεπιθύμητες διακυμάνσεις. Μπορεί να οδηγήσει όμως σε σπατάλη ενέργειας στο φέρον σήμα κατά τα διαστήματα μηδενικής έντασης φωτός, γεγονός που μπορεί να κάνει την ενίσχυση λιγότερο αποτελεσματική και να συμβάλει στην συνολική παραμόρφωση του σήματος.
 2. Η NRZ όπου χρησιμοποιείται όταν η ροή των δυαδικών ψηφίων πρόκειται να σταλθεί με βάση την παρουσία ή την απουσία φωτός η απλούστερη δυνατή κωδικοποίηση είναι αυτή. Η NRZ κωδικοποίηση χρησιμοποιείται για ορισμένες οπτικές συνδέσεις πολύ χαμηλής ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων.



Εικόνα 2-7: Αναπαράσταση RZ και NRZ OOK διαμόρφωσης. Πηγή: *Review of Modulation and Performance Analysis Methods for FSO Communication Systems*.

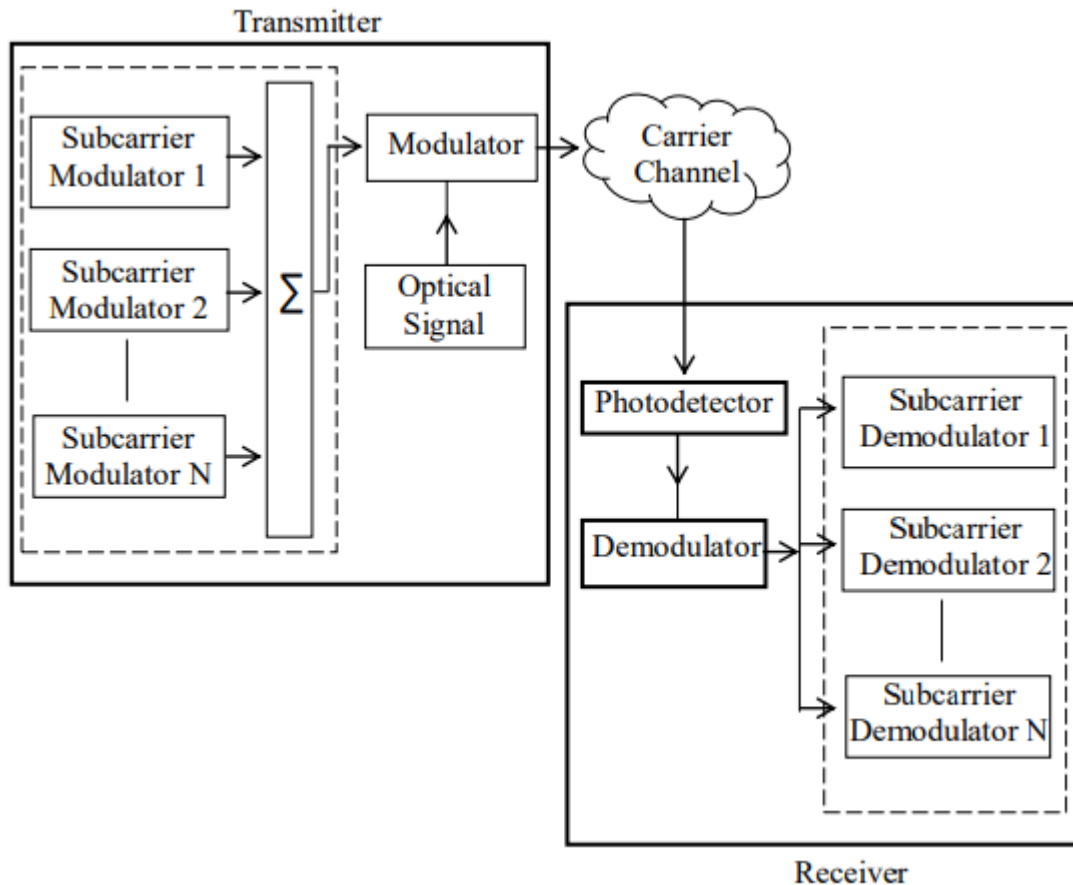
3. Η CSRZ, η οποία είναι μία τροποποιημένη έκδοση της κωδικοποίησης RZ όπου η φέρουσα συχνότητα μειώνεται κατά την διάρκεια διαστημάτων μηδενικής έντασης μεταξύ των παλμών των bit. Στόχος αυτής της κωδικοποίησης είναι η βελτίωση της απόδοσης της οπτικής ενίσχυσης στη μετάδοση οπτικών σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις
 4. Η DRZ η οποία είναι ένας τύπος κωδικοποίησης που μεταδίδει R bits/s χρησιμοποιώντας λιγότερο από R/2 Hz του εύρους ζώνης. Αυτό το είδος διαμόρφωσης μπορεί να αυξήσει την ανοχή στα αποτελέσματα της χρωματική διασποράς καθώς και να βελτιώσει το οπτικό φιλτράρισμα στενής ζώνης.
 5. Η MDRZ η οποία είναι ο τύπος της κωδικοποίησης όπου περιλαμβάνει την χρήση ενός συνδυασμού της δυαδικής σηματοδότησης και ενός ιστορικού σηματοδότησης για την μετάδοση των δεδομένων. Βελτιώνεται με αυτόν τον τρόπο η αποτελεσματικότητα του εύρους ζώνης ενός καναλιού επικοινωνίας, ενώ χρησιμοποιείται ακόμα ένα δυαδικό σήμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται τροποποιημένη έκδοση της δυαδικής κωδικοποίησης η οποία χρησιμοποιεί μόνο δύο επίπεδα +1, -1 με αποτέλεσμα ένα δυαδικό σήμα. Η κωδικοποίηση αυτή χρησιμοποιείται για την επίτευξη μεγαλύτερων ρυθμών δεδομένων και βελτιωμένης ποιότητας οπτικού σήματος. Χρησιμοποιώντας μία τροποποιημένη δυαδική προσέγγιση, το σήμα μπορεί να προσαρμοστεί καλύτερα στα χαρακτηριστικά του καναλιού.
- Η PPM αποτελείται από n πιθανές χρονοθυρίδες διατεταγμένες διαδοχικά εντός ενός πλαισίου. Κάθε πλαίσιο αποτελείται από I bits όπου ισχύει $n = 2^I$, για ένα πλαίσιο, ο παλμός που περιέχει την πληροφορία που πρέπει να αποσταλεί τοποθετείται στην χρονοθυρίδα που έχει τον ίδιο αριθμό με την δεκαδική τιμή του αριθμού που φτιάχνουν τα I bits, οι υπόλοιπες χρονοθυρίδες παραμένουν κενές. Δηλαδή αν ένα πλαίσιο αποτελείται από 3 bits έχει 8 χρονοθυρίδες αριθμημένες από το 0 έως το 7 αν τα 3 bits σχηματίζουν τον αριθμό 010

η δεκαδική τιμή του οποίου είναι 3 ο παλμός θα τοποθετηθεί στην Τρίτη χρονοθυρίδα νούμερο 2. Το προηγούμενο παράδειγμα αποτελεί μία 8PPM διαμόρφωση η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η αύξηση του M δηλαδή των πλήθος των bits ανά πλαίσιο οδηγεί σε μείωση της απαίτησης ισχύος συνεπώς σε καλύτερη απόδοσή και αύξηση του εύρους ζώνης[6].



Εικόνα 2-8: Αναπαράσταση 8PPM διαμόρφωσης. Πηγή: *Review of Modulation and Performance Analysis Methods for FSO Communication Systems*.

- Η SIM είναι η διαμόρφωση όπου η ένταση της οπτικής πηγής διαμορφώνεται από το άθροισμα των διαμορφωμένων σημάτων του κάθε υποφορέα. Κάθε υποφορέας μπορεί να διαμορφωθεί με διάφορα σχήματα διαμόρφωσης όπως PSK, FSK, ASK, QAM.



Εικόνα 2-9:διάγραμμα SIM διαμόρφωσης . Πηγή: *Review of Modulation and Performance Analysis Methods for FSO Communication Systems*.

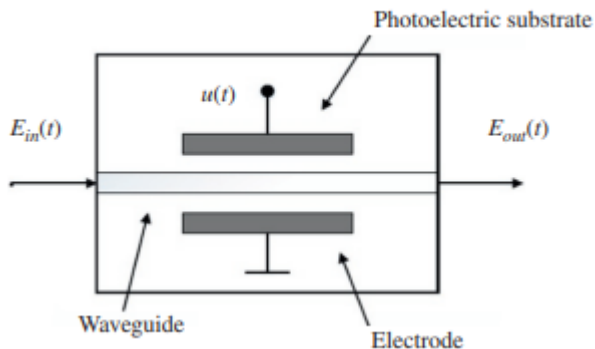
Οι βασικές διαμορφώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σύμφωνα οπτικά συστήματα είναι οι εξής:

- BPSK
- QPSK
- 8PSK
- 8QAM

Γενικά οι σύμφωνες διαμορφώσεις έχουν υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων από τις αντίστοιχες μη σύμφωνες διαμορφώσεις, βέβαια αρκετά συστήματα OEEΧ, χρησιμοποιούν τις μη σύμφωνες διαμορφώσεις, λόγω της απλότητάς τους. Το κύριο μειονέκτημα των μη σύμφωνων διαμορφώσεων σε σχέση με τις σύμφωνες είναι το μεγάλο BER, η χαμηλή ισχύς που φτάνει στον δέκτη και το χαμηλό εύρος ζώνης.

2.2.2 ΟΠΤΙΚΟΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΗΣ

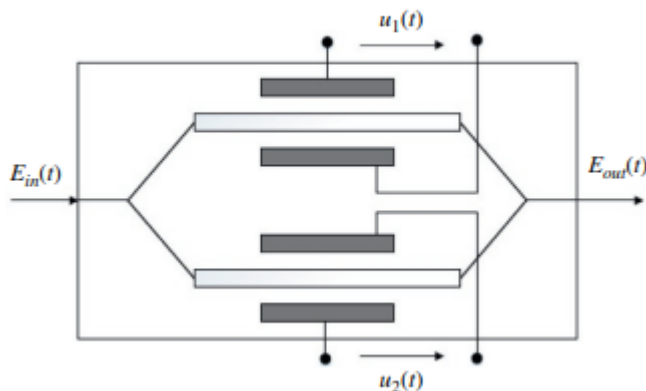
Ο συνεκτικός οπτικός διαμορφωτής, διαμορφώνει το ηλεκτρικό σήμα που μεταφέρει τα δεδομένα μέσω του οπτικού φορέα που δημιουργείται από το λέιζερ. Οι διαμορφωτές αυτοί βασίζονται στην ηλεκτροοπτική ιδιότητα του υλικού δηλαδή με την εφαρμογή εξωτερικής τάσης αλλάζει ο δείκτης διάθλασης του υλικού προκειμένου να επιτευχθεί η οπτική διαμόρφωση συχνότητας, φάσης ή πλάτους. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την δομή ενός διαμορφωτή φάσης.



Εικόνα 2-10 Δομή οπτικού διαμορφωτή φάσης κρυστάλλου LiNbO_3 πηγή: *laser inter satellite link technology*

2.2.2.1 Mach-Zehnder Modulator

Είναι μία συμβολομετρική δομή μέτρησης η οποία είναι κατασκευασμένη από διάφορα υλικά όπως LiNbO_3 , GaAs , InP , συνδυάζει παράλληλα δύο διαμορφωτές φάσης. Η εφαρμογή ηλεκτρικών πεδίων στους βραχίονες αλλάζει τα μήκη της οπτικής διαδρομής με αποτέλεσμα την διαμόρφωση φάσης. Ο συνδυασμός δύο βραχιόνων με διαφορετική διαμόρφωση φάσης μεταρέπει τη διαμόρφωση φάσης σε διαμόρφωση έντασης. Εάν η μετατόπιση φάσης μεταξύ των δύο κυμάτων είναι 0 μοίρες, τότε υπάρχει μέγιστη εποικοδομητική παρεμβολή και η ένταση εξόδου είναι υψηλότερη (λογικό 1) εάν όμως η μετατόπιση φάσης μεταξύ των δύο κυμάτων είναι 180 μοίρες, τότε υπάρχει μέγιστη καταστροφική παρεμβολή και η ένταση εξόδου είναι χαμηλότερη (λογικό 0) [21].



Εικόνα 2-11 δομή διαμορφωτή Mach-Zender . Πηγή: laser inter satellite link technology

2.3 ΦΩΤΟΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ

Από τις δουλειές στα [6,24] έχουμε ,οι Φωτοανιχνευτές είναι συσκευές μετατροπείς όπου αλλάζουν τις παραμέτρους τους ανάλογα με το πλήθος των φωτονίων που προσκρούουν σε αυτές, μετατρέπουν το οπτικό σήμα σε ένα ηλεκτρικό σήμα. Το φως μπορεί να επηρεάσει την αγωγιμότητα του, τις ηλεκτροχημικές ιδιότητες του αλλά και το πλήθος των ζευγαριών ηλεκτρονίων τρυπών δηλαδή τις φωτοδίοδους. Οι δύο πιο σημαντικοί Φωτοανιχνευτές είναι οι Φωτοανιχνευτές από φωτοδίοδους PIN, APD. Οι φωτοδίοδοι είναι συσκευές ημιαγωγών παρόμοιες με τις διόδους , με μόνη διαφορά ότι ο πολυμερισμός των στοιχείων μπορεί να δεχτεί ενέργεια από φως εξωτερικής πηγής. Όταν ένα φωτόνιο προσκρούει και αντιδρά με τα στοιχεία, ένα ηλεκτρόνιο διεγείρεται από την θέση σθένους στην ζώνη συνθηκών. Ωστόσο ο χρόνος απόκρισης των φωτοδίοδων ,η ευαισθησία και η ικανότητα δημιουργία ζευγαριών ηλεκτρονίων - τρυπών διαφέρει από φωτοδίοδο σε φωτοδίοδο.

Οι φωτοδίοδοι ημιαγωγών έχουν πολλά προτερήματα και έχουν χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών ανά τα χρόνια. Έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής και παράγουν μετρήσιμο ρεύμα, το μήκος κύματος όπου μπορεί να ανταποκριθεί βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές 190 με 2000nm. Όταν οι φωτοδίοδοι εκθέτονται σε χαμηλή οπτική δύναμη το πρόβλημα του θερμικού θορύβου εμφανίζεται. Στις επικοινωνίες η γρήγορη απόκριση, η φασματική απόκριση, η δύναμη ευαισθησίας είναι πολύ σημαντικές συνθήκες. Τα δύο υλικά που χρησιμοποιούνται περισσότερο για την κατασκευή φωτοδεκτών είναι το πυρίτιο Si και ο συνδυασμός ίνδιου γάλιου και αρσένιου (InGaAs) και ο λόγος είναι η ευρεία φασματική απόκριση κοντά στο φάσμα των υπέρυθρων ακτινοβολιών, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες.

Οι φωτοδίοδοι του πυριτίου ανταποκρίνονται σε εύρος 190 μέχρι 1100 nm και οι φωτοδίοδοι InGaAs ανταποκρίνονται σε εύρος 800 μέχρι 1800 nm. Το γερμάνιο είναι και αυτό κατάλληλο για ανταπόκριση στα 1600 nm αλλά δεν πολυχρησιμοποιείται λόγω του θορύβου που δημιουργείται. Επειδή τα υλικά έχουν ευρύ φασματική απόκριση και δεν επιλέγουν ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος για λειτουργία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πολυπλεξία μηκών κύματος, έτσι με την χρήση κάποιων εξωτερικών φίλτρων μπορούν να απομονώσουν κάποια συγκεκριμένα μήκη κύματος. Γενικότερα προτιμώνται φωτοδέκτες με φασματική ευαισθησία, γρήγορη ταχύτητα απόκρισης καθώς και ανταπόκριση σε μήκη κύματος τα οποία ταιριάζουν με τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται για την μετάδοση. Τέτοιοι Φωτοανιχνευτές χρησιμοποιούν φωτοδίοδους ημιαγωγών PIN και οι φωτοδίοδους χιονοστιβάδας APD.

2.3.1 Παράμετροι Φωτοανιχνευτών

Οι πιο σημαντικοί παράμετροι των φωτοανιχνευτών στις επικοινωνίες ελεύθερου χώρου είναι :

- η φασματική απόκριση , συσχετίζει την ποσότητα του παραγόμενου ρεύματος με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός, τα διαφορετικά υλικά ανταποκρίνονται διαφορετικά στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Οι φωτοδέκτες πυριτίου ανταποκρίνονται καλά στα μικρά μήκη κύματος (0,5-1,2 μm) και είναι συμβατοί με αναβαθμισμένες μηχανές πυριτίου, είναι φτηνοί αλλά δεν κάνουν για πολυπλεξία με εύρος 1,3-1,6 μm . Ενώ οι φωτοδέκτες από ίνδιο και αντιμόνιο InSb ανταποκρίνονται καλύτερα σε πιο ευρύ εύρος μήκος κύματος 0,5-5,1 μm .
- Η ευαισθησία στο φως είναι η αναλογία της οπτικής ισχύς σε Watts που αντιστοιχεί στη συσκευή προς το ρεύμα που προκύπτει σε amperes. Αυτή η παράμετρος είναι γνωστή και ως ανταπόκριση.
- Η απόκριση στην φασματική δύναμη, είναι η αναλογία της εξόδου του ρεύματος στον φωτοδέκτη προς την φασματική ακτινοβολούμενη ροή στην είσοδο του φωτοδέκτη.
- Η ευαισθησία είναι η ελάχιστη εισερχόμενη οπτική δύναμη η οποία μπορεί να γίνει αντιληπτή από τον δέκτη μετριέται σε dBm.
- Η κβαντική αποτελεσματικότητα, είναι το σύνολο των ζευγαριών ηλεκτρονίων στον πολυμερισμό δηλαδή το ρεύμα διαιρεμένο με το πλήθος των φωτονίων.
- 3 dB εύρος ζώνης είναι ο υψηλότερος ρυθμός όπου η ταλάντευση του ρεύματος εξόδου πέφτει στο μισό της μέγιστης τιμής του.
- Dark current είναι το πλήθος του ρεύματος που ρέει μέσα στη φωτοδίοδο ενώ υπάρχει απουσία φωτός.
- Forward biased noise είναι ο θόρυβος που προκαλεί το ρεύμα που σχετίζεται με την αντίσταση διακλάδωσης της συσκευής.
- Ισοδυναμία θορύβου – δύναμης
- Χρόνος απόκρισης, ο χρόνος όπου το εξωτερικό σήμα φτάνει από 10% στο 90% του εύρους του, γνωστό και ως χρόνος ανόδου. Και αντίστοιχα από 90%-10% , χρόνος καθόδου.
- Εύρος ζώνης της συχνότητας, είναι το εύρος συχνοτήτων όπου ο φωτοανιχνευτής είναι ευαίσθητος , δηλαδή μπορεί να λάβει αυτές τις συχνότητες.
- Cut of frequency είναι η ανώτατη συχνότητα όπου ο φωτοανιχνευτής μπορεί να ανιχνεύσει.

Ο θόρυβος κρότου Is από έναν φωτοανιχνευτή εκφράζεται από την σχέση:

$$I_s = \sqrt{[2e(I_d + I_p)B]}$$

Εξίσωση 12

Όπου I_d το ρεύμα που υπάρχει στην συσκευή εν απουσία οπτικού σήματος, I_p είναι το ρεύμα που παράγεται από το οπτικό σήμα και τέλος B είναι το εύρος ζώνης του φωτοανιχνευτή.

Όταν δημιουργείται ρεύμα μέσα στον φωτοανιχνευτή και δημιουργείται θερμικός θόρυβος I_t

$$I_t = \sqrt{\left[\frac{4kTB}{R} \right]}$$

Εξίσωση 13

Όπου T η θερμοκρασία σε kelvin, το B είναι το εύρος ζώνης του φωτοανιχνευτή, k η σταθερά bolzman, και R η αντίσταση του ρεύματος όταν περνά την συσκευή του φωτοανιχνευτή.

Και το SNR υπολογίζεται από τον τύπο:

$$10 \log \left[\frac{\text{Signalpower}}{\text{Totalnoise power}} \right] = 10 \log \left[\frac{I_t^2}{I_s^2 + I_t^2} \right]$$

Εξίσωση 14

Για μία ρεαλιστική τιμή του SNR θα πρέπει να συνυπολογιστεί και ο οπτικός θόρυβος που κουβαλάει το οπτικό σήμα.

Η ποσότητα της ισχύος θορύβου στην ισχύ του σήματος είναι πολύ σημαντική για το δίκτυο. Είναι η αναλογία του οπτικού σήματος προς τον θόρυβο. Το OSNR σχετίζεται άμεσα με το ποσοστό σφάλματος των bit BER. Ο τύπος που για τον υπολογισμό του BER είναι :

$$\log_{10} BER = 1.7 - 1.45(OSNR)dB.$$

Εξίσωση 15

Στις οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου η οπτική ισχύς η οποία επηρεάζει το διάφραγμα του φωτοανιχνευτή πρέπει να είναι ίση ή και μεγαλύτερη από την ευαισθησία του φωτοανιχνευτή. Η λαμβανόμενη ισχύς στον δέκτη εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως:

- Ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων
- Οπτικές αντανakλάσεις
- Χαρακτηριστικά της οπτικής δέσμης του laser
- Το μήκος κύματος του καναλιού
- Την μέθοδο διαμόρφωσης του οπτικού σήματος
- Το μήκος της σύνδεσης
- Παράμετροι του μέσου διάδοσης (ατμόσφαιρας)
- Θόρυβος ενίσχυσης
- Αναμενόμενο BER

Στις οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου οι πηγές των λείζερ καθώς και οι οπτικοί ενισχυτές και το ασταθές μέσο συμβάλουν στον παραγόμενο οπτικό θόρυβο που επηρεάζει το OSNR και το BER.

2.3.2 Φωτοδίοδοι Ημιαγωγών PIN

Οι φωτοδίοδοι ημιαγωγών PIN, αποτελούνται από μία εγγενή περιοχή μεταξύ ενός θετικού τύπου υλικό και ενός αρνητικού τύπου. Όταν υπάρχει αντίστροφη πόλωση, η εσωτερική αντίσταση είναι σχεδόν άπειρη και το ρεύμα εξόδου του είναι ανάλογο με την οπτική ισχύ εισόδου. Έχουν απόκριση ανάμεσα σε τιμές εύρους από 0,5-0,7A/W. Η σχέση εισόδου εξόδου η οποία καθορίζει την ανταπόκριση R και την κβαντική αποδοτικότητα των φωτοδίοδων αυτών είναι

$$R = \frac{\text{output current } I}{(\text{input optical power } P) \left(\frac{\text{Amperes}}{\text{Watts}} \right)}$$

Εξίσωση 16

και

$$\eta = \frac{\text{number of output electrons}}{\text{Number of input photons}}$$

Εξίσωση 17

Οι ποσότητες R και η σχετίζονται με την σχέση:

$$R = \frac{(e\eta)}{(h\nu)}$$

Εξίσωση 18

Όπου e η φόρτιση ηλεκτρονίων, h η σταθερά Plank και ν η συχνότητα.

Σε χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης, μικρότερους από ένα Gb/s, η παρασιτική επαγωγή των PIN φωτοδίοδων μπορεί να παραμεληθεί. Ωστόσο όσο ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται πάνω από το ένα Gb/s δημιουργούνται παράσιτα τα οποία προκαλούν θόρυβο κρότου.

2.3.3 Φωτοδίοδοι APD

Οι Φωτοδίοδοι avalanche είναι συσκευές ημιαγωγών η οποίες έχουν παρόμοια λειτουργία με αυτές των φωτοπολλαπλασιαστών και χρησιμοποιούνται όταν η οπτική δύναμη που φτάνει στον δέκτη δεν είναι αρκετά μεγάλη. Αποτελείται από 2 στρώματα ημιαγωγών όπου το πάνω στρώμα είναι αρνητικά φορτισμένο και το κάτω πολύ θετικά ντοπαρισμένο. Έχουν απόκριση ανάμεσα σε τιμές εύρους από 20-80A/W. Χρησιμοποιούνται για ζεύξεις μεγαλύτερων αποστάσεων.

Όταν δεν διαπερνάτε από ρεύμα η φωτοδίοδος δεν είναι τελείως κενή αλλά έχει απομείνει μέσα της ελάχιστο ρεύμα, το οποίο είναι πηγή πρόκλησης θορύβου. Αυτό το ρεύμα που βρίσκεται μέσα στην φωτοδίοδο ονομάζεται **dark current**. Όταν η συσκευή εκτεθεί σε οπτική δύναμη το ενεργητικό ηλεκτρόνιο δίνει ένα μέρος της κινητικής του ενέργειας σε ένα άλλο ηλεκτρόνιο στην ζώνη σθένους, το οποίο μεταφέρεται στην ζώνη αγωγιμότητας αφήνοντας πίσω μία οπή, έτσι ένα αρχικό ηλεκτρόνιο που δημιουργήθηκε από την απορρόφηση ενός φωτονίου δημιουργεί πολλά δευτερεύοντα ηλεκτρόνια και οπές. Η αρχική οπή μπορεί να δημιουργήσει επιπλέον ζευγάρια ηλεκτρονίων-οπών. Στην πραγματικότητα το αρχικό ηλεκτρόνιο πήρε παραπάνω ενέργεια από όσο χρειαζόταν για την δημιουργία ενός ζευγαριού και έτσι έχει ενέργεια για την δημιουργία περισσότερων ζευγαριών, τα οποία ζευγάρια με την σειρά τους θα δημιουργήσουν εκ νέου άλλα ζευγάρια, η διαδικασία μοιάζει σαν χιονοστιβάδα όπου το προηγούμενο κομμάτι χιόνι παρασύρει το επόμενο, αυτή η διαδικασία είναι παρόμοια με αυτήν των φωτοπολλαπλασιαστών. Τα παραγόμενα ηλεκτρόνια δημιουργούν ένα φορτίο και εφόσον η τάση της πόλωσης είναι κάτω από το σημείο διάσπασης, τα συσσωρευμένα φορτία δημιουργούν ένα δυναμικό όπου εξουδετερώνει τον μηχανισμό παραγωγής χιονοστιβάδας και έτσι σταματάει. Εάν όμως η τάση πόλωσης είναι πάνω από το σημείο διάσπασης συνεχίζεται η παραγωγή χιονοστιβάδας και μεγάλο ποσό ρεύματος παράγεται μόνο από ένα απλό φωτόνιο.

Οι APD φωτοδίοδοι χρησιμοποιούν υλικά όπως Si, InGaAs ή Ge, η δομή τους μπορεί να χωριστούν σε 3 τύπους:

- Βαθιάς διάσχισης
- Reach-through
- Super-ionization

Κατά την διαδικασία πολλαπλασιασμού ο θόρυβος κρότου πολλαπλασιάζεται και αυτός και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Shot - noise = 2eIG^2F$$

Εξίσωση 19

Όπου F είναι ο παράγοντας θορύβου της APD και G είναι το κέρδος της APD φωτοδίοδου και εκφράζεται ως:

$$G = \frac{I_{apd}}{I_{primary}}$$

Εξίσωση 20

Όπου I_{apd} είναι το ρεύμα εξόδου της APD φωτοδίοδου και $I_{primary}$ είναι το ρεύμα λόγω της μετατροπής φωτονίων σε ηλεκτρόνια.

Ορίζουμε σαν τ τον πραγματικό χρόνο διέλευσης από την περιοχή του πολλαπλασιασμού (χιονοστιβάδας), τότε το εύρος ζώνης προσεγγίζεται από τον τύπο:

$$B_{apd} = \frac{1}{(2\pi G\tau)}$$

Εξίσωση 21

Το ρεύμα εξόδου του σήματος μίας APD φωτοδίοδου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$I_o = G R_o P_i$$

Εξίσωση 22

Όπου R_o είναι η εγγενής απόκριση της APD φωτοδίοδου όταν το κέρδος G είναι ίσο με 1 και λ το μήκος κύματος, το P_i είναι η προσπίπτουσα οπτική ισχύς.

Ανάλογα τον τύπο και ανάλογα τα υλικά που χρησιμοποιούν οι φωτοδίοδοι APD έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και διαφορετική απόδοση. Για παράδειγμα το InGaAs ανταποκρίνεται καλά στα 900 με 1700 nm (κατάλληλο για επικοινωνίες), παρουσιάζει χαμηλό θόρυβο, υψηλές ταχύτητες αλλά είναι ακριβός ως προς τη αγορά. Οι Φωτοανιχνευτές που χρησιμοποιούν πυρίτιο ανταποκρίνονται καλά σε πιο χαμηλό εύρος των 400 με 1100nm, είναι αρκετά φθηνοί και εύκολο να συνδυαστεί με άλλες συσκευές που χρησιμοποιούν το πυρίτιο ως βασικό υλικό.

Η απόδοση ενός δέκτη που χρησιμοποιεί APD φωτοδίοδο είναι καλύτερη από την απόδοση ενός δέκτη που χρησιμοποιεί PIN φωτοδίοδο έτσι είναι προτιμότερη η χρήση APD φωτοδίοδου αντί για PIN προκειμένου να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα στην σύνδεση, ως αυτού οι φωτοδίοδοι APD είναι καλύτεροι για τις δορυφορικές επικοινωνίες διότι σε τέτοιου είδους επικοινωνίες το σήμα πρέπει να καλύψει μεγαλύτερες αποστάσεις με αποτέλεσμα η ισχύς στον δέκτη να είναι μικρότερη.[12,24]

Material	Wavelength(nm)
Silicon	190-1100
Germanium	400-1700
Indium gallium Arsenide	800-2600
Lead II sulphide	<1000-3500

Εικόνα 2-12: μήκη κύματος διαφόρων φωτοανιχνευτών ημιαγωγών. Πηγή: A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM FOR CUBESATS

2.3.4 Φωτοανιχνευτές με βασικό υλικό την πυρίτιο

Το πυρίτιο χρησιμοποιείται σε Φωτοανιχνευτές με οπτικό εύρος κοντά στο υπεριώδες μήκος κύματος, μπορούν να υποστηρίξουν ταχύτητες με ψηλό ρυθμό μετάδοσης έως και 10 Gb/s, χρησιμοποιούνται πολύ επειδή πολλά μηχανήματα έχουν κατασκευαστεί με βασικό υλικό το πυρίτιο, έχουμε εύκολη προσβασιμότητα από μηχανήμα σε μηχανήμα. Το κόστος κατασκευής είναι αρκετά χαμηλό. Ανταποκρίνονται από τα 300-1100nm με μέγιστη ευαισθησία κοντά στα 850 nm, αυτό τα καθιστά κατάλληλα για μικρού μήκους κύματος VCSEL λέιζερ. Η ευαισθησία στα 1000 nm είναι πολύ χαμηλή και το cutoff του μήκους κύματος βρίσκεται στα 1100nm. Για εφαρμογές με χαμηλότερες απαιτήσεις σε ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, δηλαδή ταχύτητες έως και 1 Gb/s χρησιμοποιούνται δέκτες πυριτίου PIN και δέκτες πυριτίου APD.

Η ευαισθησία για έναν Si-PIN είναι -34 dBm στα 155 Mb/s και ενός Si-APD είναι -52 dBm στα 155 Mb/s.

2.3.5 Φωτοανιχνευτές με βασικά υλικά τα InGaAs

Ανταποκρίνονται σε εύρος πάνω από 1300 μέχρι τα 1620nm , με μέγιστο 1550 nm χωρίς την ύπαρξη θορύβου, τα περισσότερα συστήματα οπτικών επικοινωνιών με ίνες χρησιμοποιούν Φωτοανιχνευτές με υλικά InGaAs . Οι Φωτοανιχνευτές InGaAs βασίζονται σε PIN και APD φωτοδίοδους. Ανάμεσα στους δύο οι APD είναι πιο ευαίσθητοι. Η ευαισθησία για τους InGaAs APD Φωτοανιχνευτές είναι -46 dBm στα 155 Mb/s και -36 dBm στα 1,25 Gb/s.

2.3.6 Φωτοανιχνευτές με βασικό υλικό το γερμάνιο

Αυτοί οι Φωτοανιχνευτές ανταποκρίνονται σε εύρος μήκους κύματος από 800 έως τα 1600 nm, παράγουν μεγαλύτερο θόρυβο από τα InGaAs APD , ωστόσο τα Ge-APD είναι πιο καλά για εφαρμογές με μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης και προσφέρουν μεγαλύτερη ευαισθησία από τους PIN.

2.3.7 Επιλογή φωτοδέκτη

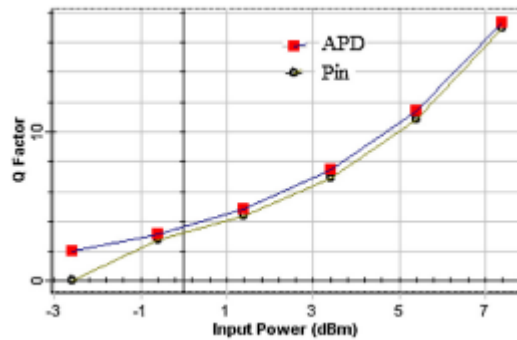
Με βάση τα παραπάνω, οι επιλογές φωτοανιχνευτή είναι πολλαπλές , υπάρχουν Φωτοανιχνευτές που χρησιμοποιούν φωτοδίοδους PIN, APD από υλικά όπως γερμάνιο, πυρίτιο ή InGaAs, η επιλογή του υλικού γίνεται βάση το μήκος κύματος που δουλεύει το σύστημα .

Ο συνδυασμός των παραπάνω προσφέρει λειτουργία σε διάφορα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου. Ανάλογα τις απαιτήσεις της εφαρμογής επιλέγονται οι Φωτοανιχνευτές και οι φωτοδίοδοι. Γενικά οι APD προσφέρουν πιο υψηλή ευαισθησία στο σύστημα από ότι οι PIN σε μεσαίο ή υψηλό εύρος ζώνης και είναι κατάλληλοι για συνδέσεις με υψηλές απαιτήσεις σε γρήγορη ταχύτητα δεδομένων. Σε αυτού του είδους τεχνολογίας επικοινωνιών η ευαισθησία και η χαμηλή παρουσία θορύβου έχουν καθοριστικό ρόλο στην μετάδοση του σήματος. Αντιθέτως οι PIN παρουσιάζουν καλύτερο SNR από τους APD. Η σωστή επιλογή υλικού που θα χρησιμοποιεί ο πομπός και ο δέκτης είναι πολύ σημαντική στην σχεδίαση των πομποδεκτών και γενικότερα στην απόδοση του δια δορυφορικού συστήματος. Στην συνέχεια βλέπουμε το διάγραμμα ποιότητας σε σχέση με την εισαγόμενη ενέργεια για τα δύο είδη φωτοδίοδων καθώς και τις τιμές του παράγοντα Q και του BER , για το παρακάτω σύστημα[24] .

Fixed parameters used in simulation.

Parameter	Value
Aperture diameter Tx	10 cm
Aperture diameter Rx	10 cm
Optics efficiency Tx/Rx	0.8
Modulation scheme	NRZ, RZ
Gain (APD)	3
Responsivity	1 A/W
Dark current	10 nA
Receiver filter type	Bessel filter
Receiver sensitivity	-31 dBm
MZ modulator with Extinction ratio	30 dB
Line-width	10 MHz
Wavelength	850 nm

Πίνακας 2 Παράμετροι συστήματος πηγή Analysis of inter satellite free space optical link performance considering different system

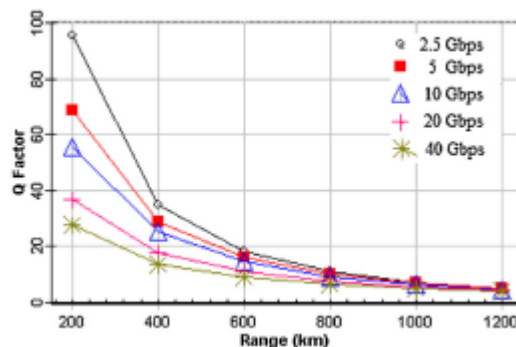


Εικόνα 2-13 Παράγοντας Q σε συνάρτηση με την μέγιστη δύναμη που χρειάζεται στον πομπό για διαφορετικές φωτοδιόδους. πηγή Analysis of inter satellite free space optical link performance considering different system

Input Power (dBm)	PIN		APD	
	BER	Q-factor	BER	Q factor
-3	1	0	0.02	2
-1	2×10^{-3}	2.75	8×10^{-4}	3.12
1	6.2×10^{-6}	4.3	7.4×10^{-7}	4.8
3	2×10^{-12}	6.97	4×10^{-14}	7.41
5	8×10^{-28}	10.86	2×10^{-30}	11.3
7	7×10^{-65}	16.9	7.5×10^{-68}	17.3

Εικόνα 2-14 Παράγοντας Q και BER, PIN APD φωτοδιόδων . πηγή Analysis of inter satellite free space optical link performance considering different system

Όπως θα παρατηρήσουμε στο παρακάτω διάγραμμα ,η απόδοση του συστήματος μειώνεται όσο αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων αλλά και η απόσταση μεταξύ του αρχικού και του τελικού κόμβου της σύνδεσης.



Εικόνα 2-15 Απόδοση συστήματος σε διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης σε σχέση παράγοντα Q με απόσταση πηγή *Analysis of inter satellite free space optical link performance considering different system*

2.4 ΟΠΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

Στις συνδέσεις ΟΕΕΧ στις οποίες το μήκος είναι μικρό, δηλαδή κάτω από δύο χιλιόμετρα από πομπό σε δέκτη, δεν γίνεται χρήση οπτικών ενισχυτών καθώς η σύνδεση έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε ο δέκτης να είναι αρκετά ευαίσθητος προκειμένου να λάβει το οπτικό σήμα του πομπού, λαμβάνοντας φυσικά υπόψιν την εξασθένηση του σήματος. Ωστόσο σε μεγαλύτερα συστήματα χρειάζεται η ενίσχυση του σήματος από ενδιάμεσους οπτικούς ενισχυτές προκειμένου το σήμα να φτάσει στον προορισμό στόχο. Τα συστήματα ενίσχυσης του οπτικού σήματος μπορούν να δουλεύουν σύμφωνα με 2 μοτίβα, το πρώτο μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό και το ξανά μετατρέπει σε οπτικό Ο-Ε-Ο και το προωθεί, το δεύτερο προωθεί κατευθείαν το οπτικό σήμα ενισχυμένο Ο-Ο.

Η ενίσχυση Ο-Ε-Ο είναι μία πολυδιάστατη διαδικασία, αρχικά το οπτικό σήμα που δέχεται ο ενισχυτής μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, το ηλεκτρικό σήμα χρονομετρείται εκ νέου καθώς ενισχύεται και αναδιαμορφώνεται, στην συνέχεια το ηλεκτρικό σήμα μετατρέπεται σε οπτικό ξανά, η διαδικασία αυτή ονομάζεται αναγέννηση σήματος. η ενίσχυση Ο-Ε-Ο έχει μεγαλύτερη διαδικασία από την ενίσχυση Ο-Ο, με αποτέλεσμα να είναι ακριβότερη από την Ο-Ο .

Οι τύποι ενισχυτών για τις οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου είναι οι : οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγών και οι οπτικοί ενισχυτές ινών.

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι οπτικών ενισχυτών είναι οι EDFA. Οι EDFA χρησιμοποιούνται πιο συχνά καθώς παρέχουν χαμηλό θόρυβο και έχουν καλύτερη απόδοση . Οι ενισχυτές οπτικής ίνας ποτισμένοι με έρβιο είναι ευρέως διαδεδομένοι διότι η φασματική εκπομπή τους ταιριάζει με την μπάντα C και επειδή ερεθίζεται σε αρκετές συχνότητες, 514 nm, 532nm, 667nm, 800nm, 980nm, 1480nm οι δύο τελευταίες συχνότητες είναι οι πιο διάσημες για χρήση σε οπτικές επικοινωνίες .

Οι οπτικοί ενισχυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι σε WDM συστήματα καθώς μπορεί να βοηθήσει στον μετριασμό της απώλειας διαχωρισμού των σημάτων. Μπορούν να τοποθετηθούν σε όλο το μήκος της σύνδεσης. Με την ενίσχυση όμως υπάρχει αύξηση του θορύβου και σαν συνέπεια την υποβάθμιση του SNR[6].

2.4.1 Χαρακτηριστικά Οπτικών ενισχυτών

Τα κύρια χαρακτηριστικά των οπτικών ενισχυτών είναι :

- Το κέρδος (gain), είναι η αναλογία της ενέργειας εξόδου ως προς την ενέργεια εισόδου.
- Το αποτέλεσμα του κέρδους (gain efficiency), είναι το κέρδος ως συνάρτηση της εισαγόμενης ενέργειας, μετριέται σε (dB/mW).
- Εύρος ζώνης , είναι μία συνάρτηση συχνότητας , και κέρδος εύρους ζώνης (gain bandwidth) είναι το εύρος των συχνοτήτων πάνω στις οποίες ο ενισχυτής είναι αποτελεσματικός.
- Ύπαρξη κορεσμού (gain saturation), είναι η μέγιστη δύναμη εξόδου του ενισχυτή, ανεξάρτητα την δύναμη εισόδου.
- Ο θόρυβος είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των οπτικών ενισχυτών, στους ηλεκτρικούς οπτικούς ενισχυτές ο θόρυβος οφείλεται στον τυχαίο αυθόρμητο ανασυνδιασμό ζευγών ηλεκτρονίων και τρυπών , έτσι ένα ανεπιθύμητο σήμα προσθέτετε στο σήμα που πρόκειται να ενισχυθεί.
- Η ευαισθησία στην πόλωση , είναι η εξάρτηση του κέρδους των οπτικών ενισχυτών στην πόλωση του σήματος.
- Κορεσμός ισχύς εξόδου, ορίζεται η δύναμη εξόδου για τη οποία το κέρδος του οπτικού ενισχυτή έχει δεχτεί πτώση για 3 db.

Με βάση την λειτουργία των οπτικών ενισχυτών μπορούν να διακριθούν σε :

1. Οπτικούς ενισχυτές ημιαγωγών (Fabry-Perot ενισχυτές , ενισχυτές ημιαγωγού, DFB)
2. Ενισχυτές οπτικής ίνας
3. Διεγερμένοι ενισχυτές Raman(δεν είναι κατάλληλοι για οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου)
4. Διεγερμένοι ενισχυτές Brillouin(δεν είναι κατάλληλοι για οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου)

2.5 ΣΥΣΤΗΜΑ ΡΑΤ

Οι οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου είναι μία επικοινωνία όπου ο πομπός και ο δέκτης πρέπει να είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένοι μεταξύ τους. Οι πομποδέκτες (transceivers) είναι τοποθετημένοι ο καθένας σε μία από τις δύο άκρες της σύνδεσης, η ευθυγράμμιση αυτών των δύο πρέπει να γίνει , είτε χειροκίνητα είτε ημί - χειροκίνητα. Η χειροκίνητη ευθυγράμμιση των δύο πομποδεκτών χρησιμοποιεί ένα τηλεσκόπιο έτσι ώστε ο ένας χειριστής να βρίσκει τον άλλον πομποδέκτη, στο τέλος της άλλης πλευράς της σύνδεσης, αντίστοιχη διαδικασία γίνεται και στον άλλον πομποδέκτη προκειμένου να βρει τον πομποδέκτη στόχο του και έτσι οι δύο πομποδέκτες (transceivers) είναι ευθυγραμμισμένοι μεταξύ τους. Η αρχικοποίηση της ευθυγράμμισης είναι σχετικά εύκολη , με δύο χειριστές η ευθυγράμμιση μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα σε λίγα

λεπτά, ωστόσο μετά την πρώτη ευθυγράμμιση, ο αέρας, η βροχή και άλλα φυσικά φαινόμενα μπορεί επηρεάσουν την θέση και των δύο πομποδεκτών, εφόσον η μετατόπιση λόγω των φαινομένων είναι μερικές μοίρες, τότε το λέιζερ από και προς τους δύο πομποδέκτες χάνεται και μαζί του χάνεται και η ευθυγράμμιση, η οποία πρέπει να ξανά αποκατασταθεί για την διατήρηση της σύνδεσης. Για την συνεχής ευθυγράμμιση χρησιμοποιείται ένα αυτόματο σύστημα εντοπισμού το οποίο χρειάζεται ειδικό λογισμικό και εξαρτήματα να εγκατασταθούν στους transceivers για να λειτουργήσει[6].

2.5.1 Acquisition

Η φάση της απόκτησης επικοινωνίας (acquisition) μεταξύ δύο πομποδεκτών (transceivers) είναι μία διπλή διαδικασία, όπου ο κάθε πομποδέκτης προσπαθεί να εντοπίσει τον πομποδέκτη στόχο πάνω στην σύνδεση για πρώτη φορά. Η φάση της απόκτησης επικοινωνίας μπορεί να υλοποιηθεί με δύο ενέργειες μία από κάθε πομποδέκτη, οι πομποδέκτες τοποθετούνται στα άκρα της σύνδεσης και κάνοντας χρήση ειδικού τηλεσκοπίου με την ταυτόχρονη γνώση των συντεταγμένων του στόχου. Απαραίτητη προϋπόθεση η ευθεία επικοινωνία των δύο πομποδεκτών (LoS). Σε αρκετές περιπτώσεις όμως, δεν υπάρχουν 2 πομποδέκτες που προσπαθούν να συνδεθούν, αντιθέτως μπορεί να είναι ένας πομποδέκτης ή ακόμα και κανένας, στις οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου συναντάμε αυτό το φαινόμενο και σε συνδέσεις μεταξύ δορυφόρων (γιατί οι δορυφόροι κινούνται και μπορεί σε κάποιο σημείο να μην έχουν οπτική επαφή λόγω παρεμβολής της Γης αλλά και σε συνδέσεις επίγειων σταθμών με αεροπλάνα ή μη επανδρωμένα σκάφη. Η φάση της απόκτησης επικοινωνίας μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στις εξής περιπτώσεις:

- Στατικές: και οι δύο πομποδέκτες της σύνδεσης έχουν σταθερές συντεταγμένες
- Ημί-στατικές: ο ένας πομποδέκτης της σύνδεσης έχει σταθερές συντεταγμένες και ο άλλος κινείται.
- Κινητές: και οι δύο πομποί της σύνδεσης κινούνται

Το κλειδί στην απόκτηση επικοινωνίας δύο πομποδεκτών σε μία οπτική σύνδεση ελεύθερου χώρου είναι ο χρόνος απόκτησης της επικοινωνίας, ο οποίος εξαρτάται από την μέθοδο και την τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Ο χρόνος απόκτησης επικοινωνίας μπορεί να είναι από ένα λεπτό ή μερικά λεπτά έως μία ώρα το πολύ.

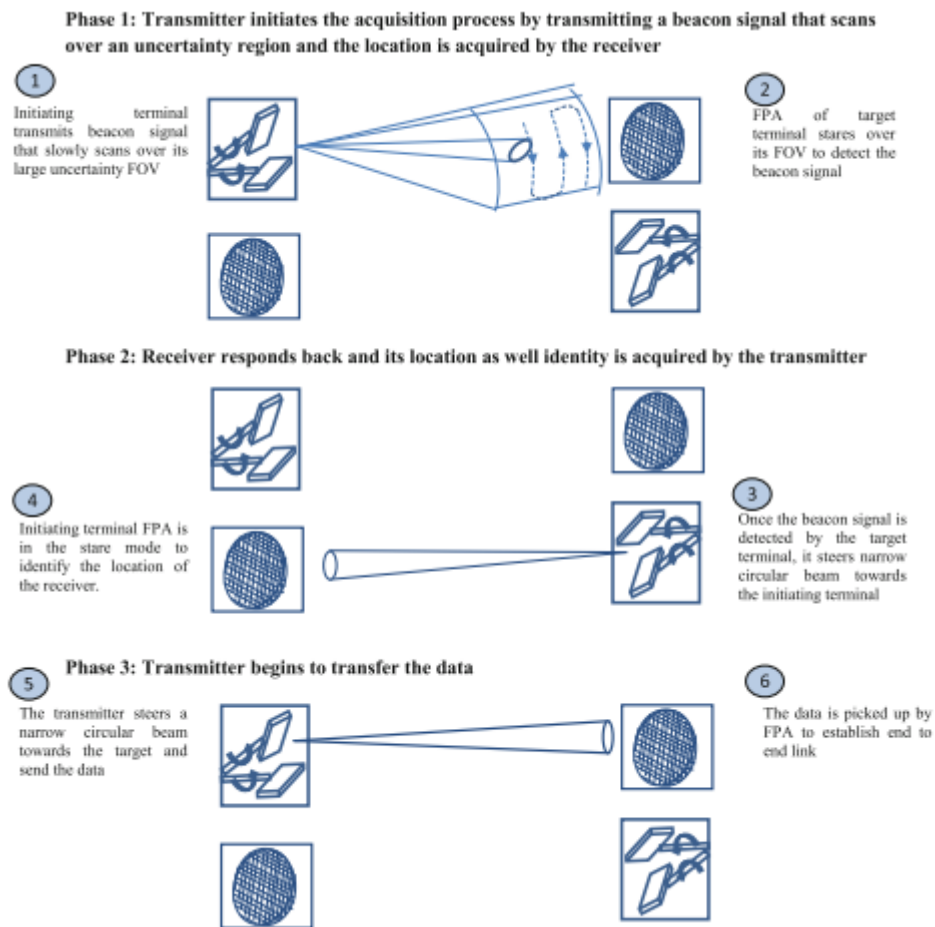
Στις στατικές περιπτώσεις για την υλοποίηση της απόκτησης επικοινωνίας χρειάζεται ο κάθε πομποδέκτης να γνωρίζει τις συντεταγμένες και ένα διάνυσμα προσανατολισμού του πομποδέκτη που αποτελεί την πληροφορία, η άλλη πλευρά της σύνδεσης αντίστοιχα πρέπει να γνωρίζει την τοπολογία του αποστολέα. Το μικρό μήκος και η ευθεία γραμμή μεταξύ των δύο πομποδεκτών σε συνδυασμό μία καθαρή ατμόσφαιρα μπορούν να βοηθήσουν στην επιτυχής απόκτηση επικοινωνίας μεταξύ των άκρων της σύνδεσης.

Σε μία ημιαστική περίπτωση σύνδεσης η απόκτηση επικοινωνίας γίνεται πιο πολύπλοκη και σύνθετη, λόγω της συνεχούς κίνησης του ενός άκρου της σύνδεσης, θέτοντα προκλήσεις για το σύστημα. Η απόκτηση επικοινωνίας με το σταθερό άκρο της σύνδεσης είναι σχετικά πιο εύκολη διότι οι συντεταγμένες του σταθερού άκρου είναι ίδιες και δεν αλλάζουν. Ωστόσο η απόκτηση επικοινωνίας με το κινούμενο άκρο είναι πιο απαιτητική διότι το σταθερό άκρο πρέπει να βρει ένα κινούμενο στόχο, ο οποίος μπορεί να μην κινείται σε κάποια προκαθορισμένη τροχία και να μην έχει συνέχεια την ίδια κατεύθυνση (όπως ένα πολεμικό αεροσκάφος στο πεδίο της μάχης). Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται άλλες τεχνολογίες όπως το GPS αλλά και το INS οι πληροφορίες αυτές μεταφέρονται με βοηθητικές συνδέσεις ραδιοσυχνοτήτων. Οι τεχνολογίες GPS προσφέρουν ακριβής τοποθεσία με απόκλιση συν πλην 1 μέτρο, τόση περίπου είναι και η διασπορά της οπτικής δέσμης του λέιζερ σε αποστάσεις έως και 2 χιλιόμετρα, πράγμα το οποίο βοηθάει στην φάση απόκτησης επικοινωνίας.

Σε κινητές περιπτώσεις, όπου και τα δύο άκρα της σύνδεσης δεν είναι σταθερά και κινούνται συνεχώς, η απόκτηση επικοινωνίας είναι αρκετά απαιτητική και σίγουρα η πιο απαιτητική από όλες τις άλλες περιπτώσεις. Σε αυτή την περίπτωση η χρήση των GPS και INS τεχνολογιών καθώς και η χρήση μίας βοηθητικής σύνδεσης RF είναι απαραίτητα και στα δύο άκρα της σύνδεσης δηλαδή και στους δύο πομποδέκτες. Επειδή οι δύο κινούμενοι κόμβοι μπορεί να πάρει αρκετή ώρα να γίνει απόκτηση επικοινωνίας, ένας τρίτος σταθερός κόμβος επικοινωνεί μέσω σύνδεσης RF και με τους δύο και βοηθάει την διαδικασία. Αυτός ο κόμβος επικοινωνεί και με τους δύο άλλους κόμβους, βρίσκει τις συντεταγμένες και την κατεύθυνσή τους και στέλνει αυτές τις πληροφορίες στους άλλους δύο κινούμενους κόμβους. Όταν οι δύο κινούμενοι κόμβοι ολοκληρώσουν για πρώτη φορά την διαδικασία απόκτησης, στόχευσης, παρακολούθησης τότε η βοηθητική σύνδεση RF είναι περιττή. Επειδή στις επικοινωνίες μεταξύ δορυφόρων οι αποστάσεις είναι μεγαλύτερες και το GPS μπορεί να «πέσει έξω» 1 μέτρο στα 2 χιλιόμετρα είναι απαραίτητη η χρήση λέιζερ με πολύ λεπτή δέσμη φωτός έτσι ώστε να μην διασκορπιστεί στα πολλά χιλιόμετρα που πρέπει να διανύσει για να φτάσει τον άλλον πομποδέκτη. Εάν η δεσμίδα λέιζερ αποκλίνει πολύ υπάρχει μεγάλη απώλεια απόκλισης και η οπτική δύναμη στον δέκτη φτάνει αρκετά αδύναμη, πιθανό πιο αδύναμη από ότι μπορεί να δει ο δέκτης λόγω της ευαισθησίας του.

Στην διαδικασία απόκτησης και στόχευσης χρησιμοποιείται μία αποκλίνουσα δέσμη φωτός γνωστή και ως δέσμη ανίχνευσης. Έστω ότι έχουμε δύο συνεχώς κινούμενους κόμβους Α και Β η διαδικασία απόκτησης αποτελείται από 3 φάσεις. Στην πρώτη φάση ο πρώτος κόμβος σκανάρει το πεδίο που περιμένει να βρίσκεται ο Β κόμβος με μία λεπτή δέσμη λέιζερ. Η δεύτερη φάση ξεκινάει όταν η δέσμη βρει στον κόμβο στόχο Β και ο κόμβος Β λάβει την δέσμη αυτή τότε αυτός με την σειρά του στέλνει ή την αντανάκλαση του οπτικού σήματος του Α ή στέλνει μία καινούρια πιο λεπτή δέσμη φωτός. Η ανάκλαση γίνεται μέσω ειδικών ανακλαστήρων οι οποίοι κατευθύνουν το σήμα πίσω από την κατεύθυνση που ήρθε. Τέλος η Τρίτη φάση ξεκινάει όταν ο Α κόμβος λάβει το οπτικό σήμα του Β για να αποκτηθεί η επικοινωνία μεταξύ τους μένει ο Α να

αντανακλάσει το οπτικό σήμα του B πάλι πίσω ή να στείλει μία πιο στενή δέσμη φωτός η οποία και θα είναι η δέσμη επικοινωνίας όπου θα μεταφερθούν τα δεδομένα[26]. Αντίστοιχες τεχνικές μπορεί κάποιος να συναντήσει στην επικοινωνία των δορυφόρων ARTEMIS[25] .



Εικόνα 2-16 Σχέδιο δημιουργίας σύνδεσης απόκτησης επικοινωνίας Πηγή: Acquisition, Tracking and Pointing

2.5.2 Pointing

Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία απόκτησης επικοινωνίας (Acquisition) ο κάθε πομποδέκτης γνωρίζει την ακριβή τοποθεσία του άλλου πομποδέκτη που βρίσκεται στο άλλο άκρο της σύνδεσης, εδώ είναι που ξεκινάει η διαδικασία της στόχευσης. Στόχευση είναι η λειτουργία της απευθείας επικοινωνίας του πομπού , μέσω της οπτικής δέσμης, με τον δέκτη. Η ακρίβεια με την οποία γίνεται αυτή η διαδικασία ονομάζεται ανάλυση της στόχευσης και μετριέται σε μοίρες της γωνίας θ η οποία πρέπει να είναι μικρότερη από την γωνία απόκλισης της οπτικής δέσμης, η ανάλυση της στόχευσης κυμαίνεται από 1 έως 200 μrad [27]. Όσο αυτή η ανάλυση αυξάνεται τόσο και το μέγεθος της πληροφορίας που μεταφέρεται μέσω της οπτικής δέσμης αυξάνεται. Η ανάλυση στόχευσης του διαστημοπλοίου ARTEMIS είναι 1 arcsecond το μισό της απόκλισης της

δεσμίδας της[25]. Ανάλογα τις περιπτώσεις η στόχευση μπορεί να αντιμετωπίσει προκλήσεις όπως[6] :

- Στα στατικά συστήματα η στόχευση έχει να αντιμετωπίσει δυνατούς ανέμους που μετακινούν ελάχιστα την τοποθεσία των πομποδεκτών
- Στα ημιαστικά συστήματα η στόχευση έχει να αντιμετωπίσει και εδώ τον αέρα αλλά και την κίνηση του κόμβου στόχου.
- Στα κινητά συστήματα η στόχευση έχει να αντιμετωπίσει αλληπάλληλες αλλαγές κατεύθυνσης. Στις επικοινωνίες δορυφόρων η στόχευση είναι πιο εύκολη σε δορυφόρους που βρίσκονται στην γεωσυγχρονη τροχιά από δορυφόρους που βρίσκονται σε πιο χαμηλές τροχιές (LEO). Όταν ολοκληρωθεί η φάση της στόχευσης και η δέσμη φωτός κλειδώσει στον στόχο , τότε ενεργοποιείται ένα αυτόνομο σύστημα παρακολούθησης του δορυφόρου θα αναλάβει την συντήρηση της επικοινωνίας των δύο άκρων της οπτικής σύνδεσης ελεύθερου χώρου.

2.5.3 Tracking

Όταν έχουν ολοκληρωθεί οι διαδικασίες του εντοπισμού της σύνδεσης αλλά και της στόχευσης έχουμε δημιουργήσει μία σύνδεση μεταξύ των δύο κόμβων. Ωστόσο κάποιο από τα δύο άκρα μπορεί να μετακινηθεί ή να επηρεαστεί ελάχιστα από τον άνεμο πχ, πρέπει να υπάρχει ένας μηχανισμός ο οποίος να διασφαλίζει ότι η κατεύθυνση της οπτικής δέσμης είναι σωστή και ευθυγραμμισμένη μεταξύ των δύο άκρων της σύνδεσης, η διαδικασία αυτή πρέπει να γίνεται και στα δύο άκρα. Ο μηχανισμός αυτός είναι απαραίτητος σε όλες τις περιπτώσεις συνδέσεων (στατικές, ημιστατικές ,κινητές) ανάλογα την περίπτωση σύνδεσης που έχουμε αντιμετωπίζουμε διαφορετικά προβλήματα.

Η παρακολούθηση είναι ένα κλειστό επαναλαμβανόμενο σύστημα, για παράδειγμα, ο κόμβος Α στέλνει μία οπτική δέσμη στον κόμβο Β, εάν κάποιος από τους δύο κόμβους της σύνδεση μετακινηθεί έστω και λίγο, ο ένας κόμβος θα λαμβάνει το οπτικό σήμα λίγο εξασθενημένο , πράγμα το οποίο ο κόμβος που στέλνει το σήμα δεν το ξέρει. Έτσι ένας ή και οι δύο κόμβοι πρέπει από μόνοι τους να φτιάξουν την σύνδεση και την ευθυγράμμιση. Έτσι θα πρέπει να είναι γνωστά κάποια στοιχεία που θα βοηθήσουν στην παρακολούθηση και διατήρηση της επικοινωνίας, όπως[6]:

- Η συχνότητα παρακολούθησης
- Η ανάλυση της παρακολούθησης
- Η ταχύτητα της παρακολούθησης
- Το εύρος της διόρθωσης (πόσο μπορεί το σύστημα να κινηθεί για να διατηρήσει την σύνδεση)
- Η ικανότητα του συστήματος να ανταπεξέλθει σε χιόνι βροχή και ομίχλη.

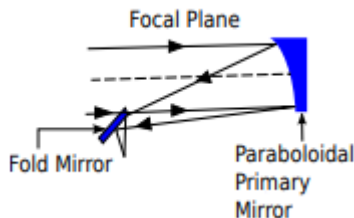
Σε μία σύνδεση όπου οι κόμβοι κινούνται με μικρή σχετική ταχύτητα, η συχνότητα παρακολούθησης μπορεί να είναι και αυτή πιο αργή[27].

Γενικά τα τυπικά συστήματα παρακολούθησης έχουν το λέιζερ τοποθετημένο σε ένα σταθεροποιητή ο οποίος ελέγχεται από κάποιους μηχανισμούς. Διαφορετικά το λέιζερ μπορεί να είναι τοποθετημένο σταθερά και ένας καθρέπτης να έχει τοποθετηθεί στον σταθεροποιητή. Η κίνηση του σταθεροποιητή μπορεί να στείλει την οπτική δέσμη σε 3 διαστάσεις, η κίνηση του σταθεροποιητή όμως μπορεί να προσθέσει θόρυβο καθώς ο σταθεροποιητής είναι ένα μηχάνημα. Στα σύγχρονα μοντέλα συνδέσεων οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου χρησιμοποιούνται μηχανισμοί χωρίς σταθεροποιητές. Στην θέση τους τοποθετούνται ηλεκτροπτικές ή ακουστικοοπτικές συσκευές οι οποίες είναι κατάλληλες για συνδέσεις όπου οι κόμβοι μετακινούνται με μεγάλες ταχύτητες, όπως για παράδειγμα τα αεροπλάνα και τα διαστημόπλοια.

2.6 ΤΗΛΕΣΚΟΠΙΑ

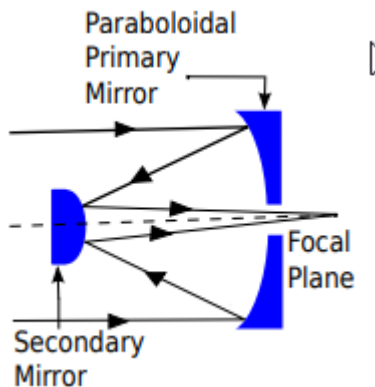
Ο οπτικός πομπός και ο οπτικός δέκτης είναι πολύ σημαντικά μέρη των συστημάτων επικοινωνίας με λέιζερ. Ο πρώτος είναι η επιφάνεια εκκίνησης για το οπτικό σήμα και ο δεύτερος λειτουργεί ως μέσο εστίασης του εισερχόμενου σήματος στα οπτικά συστήματα τα οποία με την σειρά τους αναμεταδίδουν το σήμα στους οπτικούς ανιχνευτές. Για την λειτουργία του πομπού και του δέκτη η χρήση των τηλεσκοπίων είναι απαραίτητη[10]. Κάποια από τα πιο συνηθισμένα αστρονομικά τηλεσκόπια είναι:

- Off-Axis Newtonian



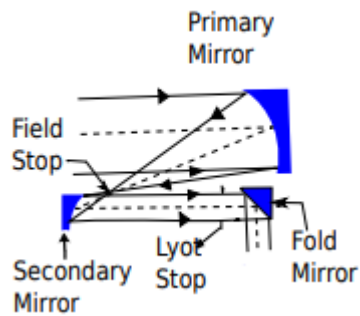
Εικόνα 2-17 Off-Axis Newtonian Telescope Πηγή: A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS

- Cassegrain



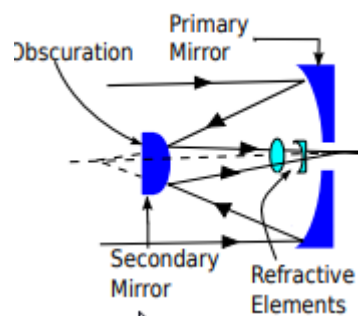
Εικόνα 2-18 Cassegrain Telescope Πηγή: A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS

- Off-Axis Gregorian



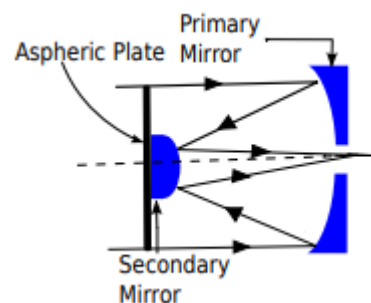
Εικόνα 2-19 Off-Axis Gregorian Πηγή: A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS

- Cassegrain with refractive elements



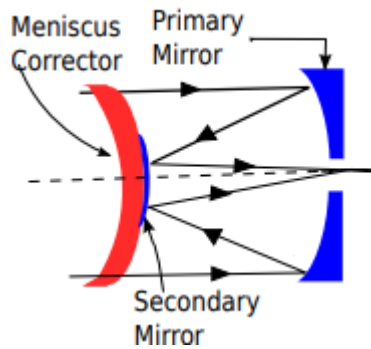
Εικόνα 2-20 Cassegrain with refractive elements Telescope Πηγή: A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS

- Schmidt-Cassegrain



Εικόνα 2-21 Schmidt-Cassegrain Telescope Πηγή: A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS

- Maksutov-Cassegrain



Εικόνα 2-22 Maksutov-Cassegrain Telescope Πηγή A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS

Κάποια βασικά υλικά κατασκευής αυτών των τηλεσκοπίων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα με την πυκνότητα του κάθε υλικού.

Material	Density gm/cm^3
Beryllium	1.85
Aluminum	2.70
ULE	2.20
Glass	2.53
Fused Silica 2.02	
Zerodur	2.53
Invar 36	8.03
Titanium	4.43
SXA(Al)	2.91
Graphite Epoxy	1.78

Εικόνα 2-23 Υλικά των τηλεσκοπίων Πηγή A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS

2.7 NODE AND HOUSING

Η σχεδίαση ενός κόμβου μίας οπτικής επικοινωνίας ελεύθερου χώρου χωρίζεται σε δύο μέρη, το εξωτερικό μέρος(outside plant) και το εσωτερικό μέρος(inside plant). Στο εξωτερικό μέρος στεγάζεται ο πομποδέκτης μαζί με την βάση του, στο εσωτερικό μέρος στεγάζονται οι δρομολογητές, μαζί με κάποια καλώδια οπτικών ινών. Η σύνδεση αυτών των δύο κομματιών είναι αρκετά απαιτητική διότι τα κομμάτια αυτά αποτελούνται από διάφορα οπτικοηλεκτροακουστικά μηχανήματα τα οποία είναι συνεχώς εκτεθειμένα στα ατμοσφαιρικά στοιχεία όπως η βροχή, ο αέρας, η παγωνιά καθώς και οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες συνεπώς η φθορά τους είναι μεγάλη. Γενικά ένα προστατευτικό για το σύστημα του πομποδέκτη πρέπει να λειτουργεί από -20 βαθμούς κελσίου έως το 50 βαθμούς. Η σύνδεση ανάμεσα στο εξωτερικό μέρος και το εσωτερικό μέρος του προστατευτικού γίνεται με την χρήση καλωδίων οπτικών ινών και από καλώδιο χαλκού. Ένα εξτρά καλώδιο τροφοδοτεί με ρεύμα τα διάφορα μηχανήματα όπως το σύστημα αυτόματης παρακολούθησης σταθεροποιητές θερμότητας και άλλα.

Ο κόμβος θα πρέπει να λειτουργεί με τις ελάχιστες ή και με τις μέγιστες του δυνατότητες απόδοσης ανάλογα τις συνθήκες. Πρέπει να είναι μία συμπαγής

κατασκευή η οποία θα είναι σχετικά ελαφριά θα είναι αδιάβροχη αντιδιαβρωτική και θα είναι εύκολα επισκευαστική, το σημαντικότερο η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Οι συνθήκες ξηρασίας καθώς και παγωνιάς αντιμετωπίζονται με συστήματα θέρμανσης τα όποια έχει το προστατευτικό του πομποδέκτη.

Οι συνθήκες υψηλής θερμότητας αντιμετωπίζονται με ένα επιπλέον εξωτερικό κάλυμμά όλου του προστατευτικού το οποίο επιτρέπει τον αερισμό μεταξύ του εαυτού του και του κυρίως προστατευτικού.

Η έκθεση στην ηλιακή αντανάκλαση μπορεί να περιοριστεί με σωστό σχεδιασμό, έτσι ώστε ο πομποδέκτης να μην είναι εκτεθειμένος κατά την ανατολή ή την δύση του ήλιου.

Η σχεδίαση του κόμβου πρέπει να γίνει με αεροδυναμικό σχέδιο τέτοια ώστε ο κόμβος να δέχεται τις λιγότερες τριβές από τον αέρα και να μην υπάρχουν αναταράξεις, αυτό το κομμάτι της σχεδίασης παίζει καθοριστικό ρόλο και στην κατανάλωση ολόκληρου του πομποδέκτη.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι πολύ ελαφριά στοχεύοντας το λιγότερο δυνατό βάρος για τον πομποδέκτη.

Η σκόνη και το νερό περιορίζονται με την κατάλληλη πιστοποίηση προκειμένου να μην επηρεάζουν τον πομποδέκτη.

Τέλος οι συνδέσεις θα πρέπει να είναι καλά προστατευμένες από τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα καθώς και το σύνολο του προστατευτικού του πομποδέκτη θα πρέπει να είναι εύκολα αναβαθμίσσιμο στο λογισμικό[6].

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Οι συνδέσεις ΟΕΕΧ μπορούν έχουν μήκος αποστάσεις μικρές της τάξης των λίγων δεκάδων μέτρων αλλά και τεράστιων αποστάσεων έως και εκατομμύρια μέτρα. Με τελευταία επιτυχία της NASA η οποία κατόρθωσε σε πείραμα Deep Space Optical Communication να μεταφέρει με επιτυχία ένα μήνυμα με ακτίνα λέιζερ στο διαστημικό σκάφος Psyche σε απόσταση 16 εκατομμυρίων χιλιομέτρων[28]. Σύμφωνα με το [10] οι παράμετροι σχεδιασμού των υποσυστημάτων που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο πρέπει να προσδιοριστούν έτσι ώστε να επιτευχθεί επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις. Το κάθε ένα από τα υποσυστήματα του προηγούμενου κεφαλαίου έχει ζωτικό ρόλο στην μεταφορά του σήματος και δεν μπορεί να αφαιρεθεί από το σύστημα αν δεν γίνει η ανάλογη σχεδίαση του συστήματος. Ο σχεδιασμός είναι αναγκαίος προκειμένου να υπολογιστούν οι απαιτήσεις σε βάρος όγκου και ανάγκη ηλεκτρικής ενέργειας.

Το βάρος που καταλαμβάνει στο σύστημα η οπτικής πηγής καθώς και το σύστημα PAT είναι μικρότερο σε σχέση με το πολύ βαρύ υποσύστημα των πομποδεκτών όπου περιέχουν πολύ βαριά τηλεσκόπια. Τα τηλεσκόπια αποτελούν ένα αναγκαίο υποσύστημα για την επίτευξη των συνδέσεων λέιζερ μεγάλων αποστάσεων. Επομένως τα τηλεσκόπια πρέπει να σχεδιάζονται με προσεκτική εξέταση των υλικών που δημιουργούνται προκειμένου να μειωθεί το βάρος αλλά και η κατανάλωση ενέργειας.

Το σύστημα ΡΑΤ καταναλώνει την μεγαλύτερη ποσότητα ισχύος. Συνεπώς πρέπει να γίνει σχεδιασμός του συστήματος τόσο με γνώμονα το βάρος και τον όγκο του δορυφόρου, όσο με γνώμονα να τηρεί της προδιαγραφές κατανάλωσης ενέργειας. Αν η σύνδεση λέιζερ είναι μικρής εμβέλειας, περίπου 1 χιλιόμετρο, τότε τα υποσυστήματα ΡΑΤ και τα τηλεσκόπια μπορούν να αφαιρεθούν από τον σχεδιασμό του συστήματος δεδομένου ότι ο πομπός και ο δέκτης είναι τέλεια ευθυγραμμισμένα μεταξύ τους και δεν υπάρχει ανάγκη για την απόκτηση επικοινωνίας, την στόχευση αλλά και την παρακολούθηση του δορυφόρου για την ύπαρξη μία σύνδεσης. Η ισχύς του λέιζερ πρέπει να είναι αρκετή προκειμένου να διασχίσει την απόσταση ζεύξης χωρίς να δεχθεί αλλοίωση από τους θορύβους του περιβάλλοντος. Στον δέκτη το διάφραγμα της φωτοδίοδου θα πρέπει να είναι περίπου 5 χιλιοστά προκειμένου να λάβει το εκπεμπόμενο σήμα.

4. ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου είναι μία τεχνολογία η οποία είναι κατάλληλη για μεταφορά δεδομένων σε αποστάσεις πολύ μεγάλες, οι αποστάσεις αυτές μπορεί να είναι από λίγα μέτρα, στις επίγειες, έως και πολλά χιλιόμετρα στις δορυφορικές επικοινωνίες βαθέως σύμπαντος. Η τεχνολογία υποστηρίζει κάποια στάνταρ πρωτόκολλα όπως το SONET/SDH και το Ethernet. Επειδή η απόσταση στις συνδέσεις μας δεν είναι πάντα ίδιες, η δύναμη εκπομπής του λέιζερ που χρησιμοποιείται δεν θα είναι και αυτή πάντα ίδια, οι πιο μικρές συνδέσεις χρειάζονται λιγότερη δύναμη για να μεταδώσουν το οπτικό σήμα στο μέσο. Ωστόσο μέσα στην ημέρα οι ατμοσφαιρικές συνθήκες μπορεί να αλλάξουν και να εμφανιστεί σκόνη, ομίχλη και άλλα, γι' αυτό θα πρέπει η οπτική δύναμη εξόδου του λέιζερ να αλλάζει δυναμικά και αυτόνομα για την διατήρηση της ποιότητας της σύνδεσης αλλά και για την διασφάλιση της αξιοπιστίας της σύνδεσης. Στα προηγούμενα κεφάλαια αναφερθήκαμε στις οπτικές και δορυφορικές επικοινωνίες και αναλύσαμε της αρχές των οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου, βασικό σημείο της μελέτης μας ήταν οι πομποδέκτες (transceivers) και τα εξαρτήματα και μηχανήματα που τον αποτελούν και πως αυτά συνδέονται(housing) μεταξύ του σε ένα προστατευόμενο μέρος node μαζί με μηχανισμούς για εντοπισμό, στόχευση και παρακολούθηση, καθώς και το μέσο μετάδοσης της οπτικής δέσμης, την ατμόσφαιρα[6].

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε τις βασικές τοπολογίες που μπορούμε να συναντήσουμε στις οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου, οι τοπολογίες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε επίγειες αλλά και διαδορυφορικές επικοινωνίες.

Σε ένα δίκτυο επικοινωνίας, η τοπολογία αναφέρεται στο σχηματικό διάγραμμα του γεωμετρικού σχήματος του δικτύου, το μοντέλο τοπολογίας που διαμορφώνει το δίκτυο είναι το φυσική βάση για την κατασκευή του δικτύου. Η φυσική τοπολογία ενός δικτύου είναι η γεωμετρική διάταξη των πραγματικών συνδέσεων μεταξύ κόμβων. Σε ένα δίκτυο διαδορυφορικών συνδέσεων δορυφόρων, οι κόμβοι είναι όλοι οι δορυφόροι που απαρτίζουν τον αστερισμό και οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων είναι διαδορυφορικές συνδέσεις[21].

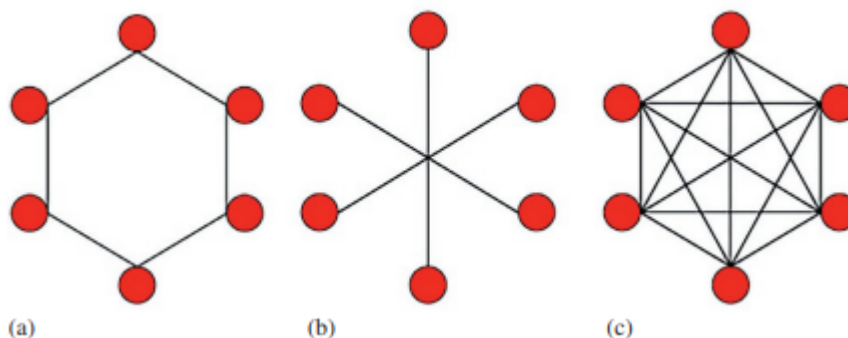
Οι τοπολογίες οι οποίες θα μελετήσουμε είναι οι:

- Point to point τοπολογία.
- Point to multi-point τοπολογία.
- Point to mobile τοπολογία.
- Rig τοπολογία
- Mesh τοπολογία

Για τις τοπολογίες αυτές χρειάζεται εκ νέου σχεδίαση του πομποδέκτη με την χρήση κόμβων τεχνολογίας Add, Drop[6].

Οι οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου έχουν χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα επιτυχημένων εφαρμογών, όπως επίγειες, εμπορικές διαστημικές και στρατιωτικές.

Οι point to point τοπολογία είναι εφαρμόσιμη και σε μικρές αποστάσεις (μερικά χιλιόμετρα) αλλά και σε μεγάλες αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων όπως οι αποστάσεις ενός επίγειου σταθμού και ενός δορυφόρου σε γεωσύγχρονη τροχιά και αποστάσεις μεταξύ δορυφόρων στο διάστημα, αποτελεί την βάση για τις υπόλοιπες τοπολογίες. Οι τοπολογίες rig και mesh δεν είναι καινούριες στην επιστήμη των οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου, οι μηχανισμοί αποτυχίας, οι μετρήσεις και η ασφάλεια των υπηρεσιών έχουν μελετηθεί στις οπτικές επικοινωνίες με χρήση οπτικής ίνας LAN, MAN.

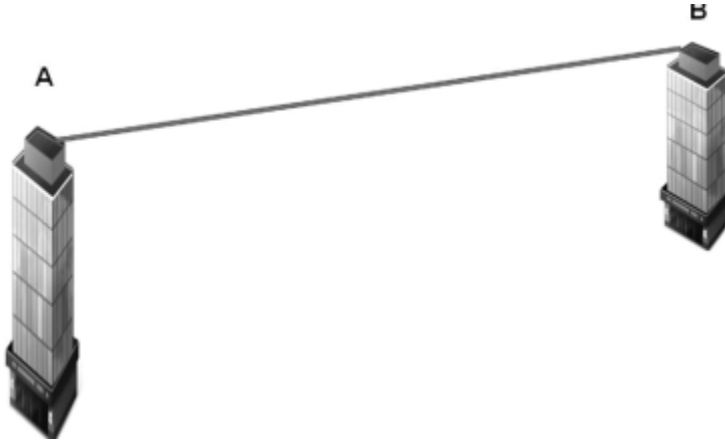


Εικόνα 4-1 Διαγράμματα δικτυακών τοπολογιών για διαδορυφορικές συνδέσεις Πηγή laser inter satellite link technology

Για την δημιουργία σύνδεσης είναι απαραίτητη η ύπαρξη τουλάχιστον δύο πομποδεκτών με ευθεία οπτική επαφή μεταξύ τους. Στις επίγειες οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου οι δύο πομποδέκτες δεν μπορεί η οπτική τους επαφή να είναι μεγαλύτερη από τον ορίζοντα όπως επίσης δεν πρέπει να παρεμβάλλεται κάποιο εμπόδιο μεταξύ των άκρων της σύνδεσης.

4.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ POINT TO POINT OEECH

Ένα σύστημα point to point θα μπορούσαμε να το μεταφράσουμε και ως επικοινωνία από ένα σημείο σε ένα άλλο σημείο, με βασική προϋπόθεση να υπάρχει ευθεία οπτική επικοινωνία μεταξύ τους (LoS).

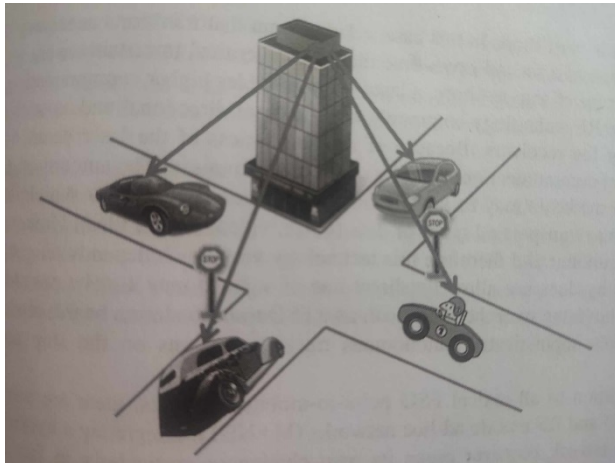


Εικόνα4-2. Point to point σύνδεσης. Πηγή: free space optical network for ultra broad band services

Ένας πομποδέκτης (transceiver) που χρησιμοποιείται για μία point to point επικοινωνία ακολουθεί τα πρότυπα του πομποδέκτη που αναλύσαμε στο προηγούμενο μας κεφάλαιο. Πρέπει να περιέχει τουλάχιστον μία οπτική πηγή και ένα φωτοδέκτη καθώς και διάφορους μηχανισμούς για την επίτευξη της σύνδεσης (PAT), ενισχυτές και κάποια ακόμα μηχανήματα, τα οποία όλα μαζί θα βρίσκονται μέσα σε ένα κουτί ειδικά διαμορφωμένο για την προστασία του κόμβου από διαφορά ατμοσφαιρικά φαινόμενα που θα συναντήσει στο ταξίδι του.

Ανάλογα με το μέρος το οποίο θα γίνει η σύνδεση θα πρέπει να δημιουργηθούν και ανάλογα προστατευτικά κουτιά. Είναι διαφορετικό να έχουμε μία σύνδεση επίγεια της οποίας οι πομποδέκτες είναι τοποθετημένοι μέσα σε κτήρια και πίσω από παράθυρα που τους προστατεύουν, από το να έχουμε μία επίγεια όπου οι πομποδέκτες βρίσκονται εκτός και ευθετημένοι στα καιρικά φαινόμενα. Όπως επίσης διαφορετικές ανάγκες έχει μία σύνδεση μεταξύ δορυφόρων ή μεταξύ δορυφόρου και σταθμού βάσης (point to multipoint). Θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μηχανισμοί για τον εντοπισμό, την στόχευση αλλά και την παρακολούθηση του κόμβου στόχου διότι και οι δύο κόμβοι κινούνται, όπως επίσης θα πρέπει η προστασία του κόμβου να σχεδιαστεί σύμφωνα με τις ατμοσφαιρικές αλλαγές που μπορεί να συναντήσει ο κόμβος στο μέσο διάδοσης. Η point to point τοπολογία είναι πολύ αποτελεσματική τοπολογία για την ταχεία δημιουργία σύνδεσης ανάμεσα σε δύο κόμβους της σύνδεσης με ευθεία οπτική επαφή, παρόλο αυτά η σύνδεση είναι περιορισμένη επειδή ένας κόμβος μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με έναν κόμβο, οι δύο κόμβοι δεν μπορούν να έχουν αυθαίρετη απόσταση μεταξύ τους. Η point to point τοπολογία είναι η πιο ασθενής τοπολογία και αυτή με την λιγότερη προστασία κίνησης των δεδομένων.

4.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ POINT TO MULTI- POINT ΟΕΕΧ



Εικόνα 4-3: point to multipoint παράδειγμα σύνδεσης. Πηγή: free space optical network for ultra broad band services

Ένα σύστημα point to multi-point αποτελείται από έναν κεντρικό πομποδέκτη ο οποίος έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει επικοινωνία με πολλούς διαφορετικούς πομποδέκτες οι οποίοι βρίσκονται σε ευθεία οπτική επαφή με αυτόν. Η τοπολογία αυτή είναι πιο δύσκολα υλοποιήσιμη στην κάτω ζεύξη της σύνδεσης παρά στην άνω ζεύξη . Ο λόγος είναι ότι ο πομποδέκτης ο οποίος επικοινωνεί με παραπάνω από δύο πομποδέκτες έχει να επεξεργαστεί δύο ή και περισσότερα οπτικά σήματα, ενώ στην πάνω ζεύξη ο πομποδέκτης που λαμβάνει το οπτικό σήμα έχει να αναλύσει μόνο μία οπτική δέσμη που φτάνει σε αυτόν τον κόμβο. Η τοπολογία αυτή μπορεί να δημιουργηθεί με δύο τρόπους. Στον πρώτο τρόπο χρησιμοποιείται μία δέσμη η οποία εκπέμπεται σε μία ευρεία γωνία προκειμένου να συνδεθεί με όλους τους τερματικούς κόμβους στόχους, στον δεύτερο τρόπο ο κεντρικός πομποδέκτης που θέλει να επικοινωνήσει με όλους τους υπολοίπους δημιουργεί πολλαπλές δέσμες φωτός, κάθε μία ξεχωριστή για τον κάθε κόμβο στόχο. Η πρώτη υλοποίηση της point to multi-point τοπολογίας είναι απλούστερη και πιο οικονομική από την δεύτερη.

Η τοπολογία point to multi-point είναι η βάση για την μετέπειτα υλοποίηση δικτυακών τοπολογιών στις δια διαστημικές επικοινωνίες.

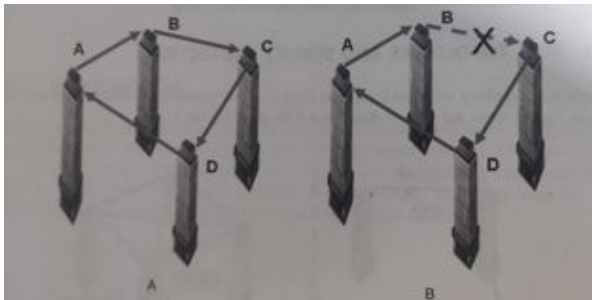
4.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ POINT TO MOBILE ΟΕΕΧ

Είναι κομμάτι της τοπολογίας point to point το οποίο περιέχει έναν κύριο κόμβο ο οποίος είναι σταθερός , δεν κινείται , και έναν ή και περισσότερους κόμβους οι οποίοι κινούνται. Η τοπολογία αυτή είναι κατάλληλη για εφαρμογές όπως επικοινωνία αεροσκάφους με τον πύργο ελέγχου λίγο πριν από την προσγείωση ή και κατά την διάρκεια της απογείωσης, εφαρμογές επικοινωνίας ενός πλοίου με οχήματα που βρίσκονται κατά μήκος της ακτογραμμής , εφαρμογές επικοινωνίας δορυφόρων

χαμηλών υψομέτρων LEO με σταθερούς επίγειους κόμβους - σταθμούς. Οι τοπολογίες αυτές εξαρτώνται άμεσα από το σύστημα παρακολούθησης και το πόσο καλά μπορεί να δουλέψει καθώς και από τον βασικό παράγοντα για την δημιουργία μίας σύνδεσης, την απευθείας οπτική επαφή του πομπού και του δέκτη. Στην περίπτωση όπου πρέπει να δημιουργηθεί επικοινωνία μεταξύ ενός επιβατικού αεροσκάφους που προσγειώνεται και του πύργου ελέγχου, πρέπει μέσα σε ένα πολύ μικρό διάστημα, το διάστημα της προσγείωσης, να μεταφερθεί μεγάλος όγκος πληροφοριών. Για παράδειγμα η ταχύτητα προσγείωσης ενός επιβατικού Boeing 747 είναι περίπου 290 χιλιόμετρα, αν το αεροπλάνο απέχει 10 χιλιόμετρα από την προσγείωση και πρέπει να γίνει ενημέρωση των στοιχείων όπως ταχύτητα, ύψος, γωνίες, ο διαθέσιμος χρόνος για την μεταφορά δεδομένων την απόκριση αλλά και την επαλήθευση τους είναι πολύ σύντομος. Στην περίπτωση όπου ένα πλοίο θέλει να επικοινωνήσει με ένα όχημα στην ακτογραμμή η χρήση οπτικής δέσμης σε αντίθεση με την χρήση RF επικοινωνιών είναι πιο ασφαλής, αυτό γίνεται επειδή το σήμα μπορεί να το υποκλέψει και κάποιος κόμβος ο οποίος δεν είναι ο κόμβος στόχος. Όσο πιο στενή είναι η οπτική δέσμη τόσο πιο ασφαλής είναι η μεταφορά δεδομένων από υποκλοπές. Τα αρχεία μεταφέρονται σε υψηλές ταχύτητες άλλες φορές των τάξεων των Gb/s και άλλες φορές λίγο πιο αργές Mb/s. Σημαντικό ρόλο έχει η οπτική επικοινωνία μεταξύ των δύο πομποδεκτών που θα δημιουργήσουν την σύνδεση, σε περίπτωση όπου η τοπολογία του εδάφους δεν επιτρέπει την LoS επικοινωνία των δύο πομποδεκτών δεν είναι δυνατή η μεταφορά των δεδομένων.

4.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ RING ΟΕΕΧ

Οι τρεις απλοί τύποι των ring τοπολογιών που έχουν μελετηθεί είναι : single ring, dual ring, quad ring. Μία τοπολογία μονού ring με συνδέσεις μόνο προς μία κατεύθυνση είναι πιο επιρρεπής από τις υπόλοιπες σε αστοχίες και λάθη επειδή όταν μία σύνδεση σπάσει η σταματήσει να υπάρχει τότε σταματά όλη η ροή δεδομένων γύρω από το ring. Στην παρακάτω φωτογραφία παρατηρούμε ότι ένα απλό λάθος ανάμεσα στους κόμβους Β και Γ σταματάει την ροή των πληροφοριών γύρω από το Ring, η πρώτη σκηνή είναι πριν το λάθος και το σπάσιμο της σύνδεσης και η δεύτερη σκηνή είναι η σύνδεση κατά την διάρκεια που γίνεται το λάθος.



Εικόνα 4-4: Απλή ring τοπολογία μίας κατεύθυνσης: Πηγή: free space optical network for ultra broad band services

Η τοπολογία ring με διπλή κατεύθυνση είναι και αυτή επιρρεπής στα λάθη αλλά κάνοντας χρήση του μηχανισμού που στέλνει πίσω τα δεδομένα και ξαναδημιουργείται η σύνδεση, έτσι το λάθος είναι βιώσιμο για το σύστημα. Οι κόμβοι μίας οπτικής σύνδεσης ελεύθερου χώρου πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να επιτρέπεται η επιστροφή δεδομένων πίσω στο κόμβο που έστειλε το πακέτο, επίσης πρέπει να μπορεί να ειδοποιήσει για τυχόν σφάλματα αλλά και που βρίσκονται αυτά. Η τετραπλή ring επικοινωνία είναι και αυτή όπως οι προηγούμενες επιρρεπείς στα λάθη, τα συστήματα είναι ίδια με τις απλές μονές συνδέσεις, είναι πιο ακριβές στην κατασκευή και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που χρειάζεται να υποστηρίξουν πολύ μεγάλες ταχύτητες με μεγάλη αξιοπιστία και διαθεσιμότητα. Οι ring τοπολογίες έχουν καλύτερη ταχύτητα δικτύου και προστασία κίνησης των δεδομένων από τις point to point τοπολογίες. Η απόσταση ανάμεσα από τους κόμβους πιθανό να μην είναι αρκετά μεγάλη αλλά η περίμετρος του ring καταλαμβάνει πολύ χώρο σαν σύνολο.

4.6 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ MESH ΟΕΕΧ

Στις προηγούμενες παραγράφους εξετάσαμε πως οι οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου μπορούν να χρησιμοποιήσουν τοπολογίες όπως οι point to point και η ring. Σε αυτή την παράγραφο θα δούμε την mesh τοπολογία η οποία χρησιμοποιείται και αυτή από τις οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου. Η mesh τοπολογία είναι αρκετά πιο πολύπλοκη από τις δύο προηγούμενες τοπολογίες που είδαμε καθώς μπορεί να ενώσει

αρκετούς κόμβους με διαφορετικές συνδέσεις. Η mesh τοπολογία είναι ικανή να συνδέσει έναν κόμβο με πολλές συνδέσεις σε διάφορους άλλους κόμβους στο δίκτυο, ανάλογα με την εφαρμογή η απόσταση μεταξύ των κόμβων μπορεί να είναι μικρή αλλά και μεγάλη(σε επικοινωνίες δορυφόρων μεταξύ τους), αποτελείται από σύντομες συνδέσεις πολλαπλών βημάτων μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Αυτή η τοπολογία παρέχει μικρότερες αποστάσεις ζεύξεις μεταξύ των κόμβων μία σύνδεσης ΟΕΕΧ και παρέχει ποικιλομορφία διαδρομής του οπτικού σήματος έτσι ώστε το σήμα να φτάσει στον κόμβο στόχο ακόμα και αν το κύριο μονοπάτι για οποιοδήποτε λόγο έχει πέσει, έτσι παρέχει έξτρα αξιοπιστία στην σύνδεση σε αντίξοες καιρικές συνθήκες και προσωρινά εμπόδια αυτό την καθιστά κατάλληλη για συνδέσεις ΟΕΕΧ.

Τα αρνητικά αυτής της τοπολογίας είναι η πολυπλοκότητα κατασκευής ενός τέτοιου συστήματος καθώς και η αύξηση του κόστους κατασκευής εκτοξεύεται. Από την άλλη μία mesh τοπολογία έχει μελετηθεί και έχουν αναπτυχθεί εφαρμογές όπου υπάρχουν πολλαπλοί κόμβοι στο δίκτυο, είναι κλιμακωτό αλλά και εύκολα επεκτάσιμο καθώς μπορεί ο κάθε κόμβος να προσθέσει κάποιον κόμβο στο δίκτυο. Οι ταχύτητες του δικτύου όταν χρησιμοποιείται αυτή η τοπολογία μπορεί να ξεπεράσουν τα 10 Gb/s η τοπολογία mesh παρέχει την καλύτερη λειτουργία δικτύου και ασφάλεια υπηρεσίας από τις δύο προηγούμενες τοπολογίες.

Όσο αυξάνονται οι διαστημικές συνδέσεις σε κάθε κόμβο(ο κάθε κόμβος μπορεί να συνδεθεί με παραπάνω από μία σύνδεση σε πολλούς διαφορετικούς κόμβους) τόσο αυξάνεται και η πολυπλοκότητα υλοποίησης του κάθε κόμβου. Στο διάστημα οι κόμβοι μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικές τροχιές και σε διαφορετικά σημεία του ορίζοντα. Έτσι η κάθε διαστημική σύνδεση βρίσκεται σε διαφορετική κατεύθυνση από τις υπόλοιπες συνδέσεις του ίδιου κόμβου.

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

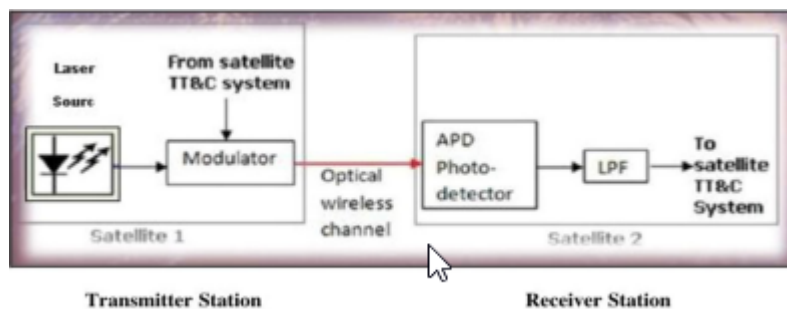
5.1 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΩΝ ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΕ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΣΤΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ (ΔΙΑΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΖΕΥΞΕΩΝ).

Η ΟΑΕ προσφέρουν ελπιδοφόρα πλεονεκτήματα συμπεριλαμβανομένων υψηλών ρυθμών μεταφοράς δεδομένων και οπτικών δέσμεων που παράγονται από τα λέιζερ VCSEL. Στο πλαίσιο των ΟΑΕ η δορυφορική σύνδεση αποτελείται από το μέσο διάδοσης, ανάλογα σε πιο ύψος κινείται ο δορυφόρος, καθώς επίσης και δύο πομποδέκτες όπου ο ένας έχει την αρμοδιότητα του πομπού δηλαδή να στέλνει δεδομένα και ο άλλος θα πρέπει να μπορεί να κάνει λήψη των δεδομένων αυτών, ο δέκτης αποτελείται από μία APD φωτοδίοδο και ένα LPF χαμηλοπερατό φίλτρο ,ενισχύοντας έτσι την απόδοση του σήματος. Συνολικά αυτό το κεφάλαιο θα δημιουργήσουμε μια σφαιρική αξιολόγηση των IS-OWC, μελετώντας την σύγκριση πηγών φωτός VCSEL και CW λέιζερ και

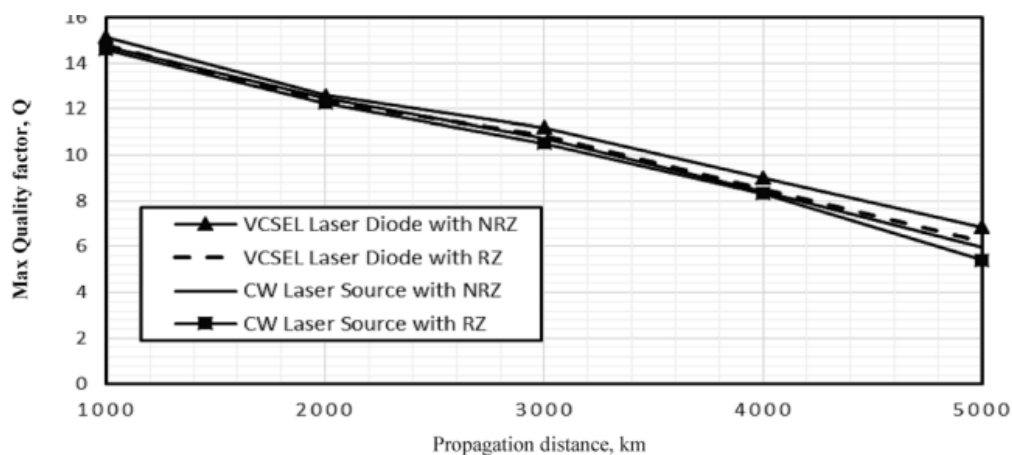
εξερευνώντας τις μορφές κωδικοποίησης NRZ και RZ στα 10Gb/s ταχύτητα μετάδοσης . Στην δουλειά που γίνεται στο [30] αναδεικνύεται ο αντίκτυπος της απόστασης διάδοσης στο BER καθώς και στο Q-factor, επιδεικνύοντας τα πλεονεκτήματα των πηγών φωτός VCSEL λέιζερ στην ενίσχυση της απόδοσης των οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου.

5.1.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

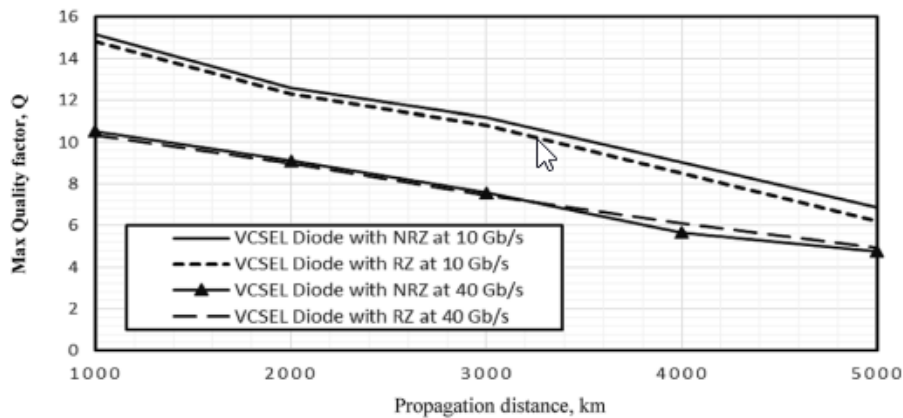
Η ισχύς εισόδου του σήματος είναι 10 Dbm. Η συχνότητα του λέιζερ CW είναι 193,1 THz. Από την άλλη το VCSEL δημιουργεί μία κατευθυνόμενη στενή δέσμη φωτός σε σύγκριση με τις άλλες πηγές λέιζερ και η συχνότητα του είναι στα 900 nm , το ρεύμα πόλωσης στα 5 mA. Οι αποστάσεις όπου πραγματοποιήθηκαν αυτές οι αξιολογήσεις είναι αποστάσεις από 0 έως και 5000 χιλιόμετρα.



Σχήμα 5-1: Το μοντέλο σχεδίασης του συστήματος IS-OWC. Πηγή: Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances.

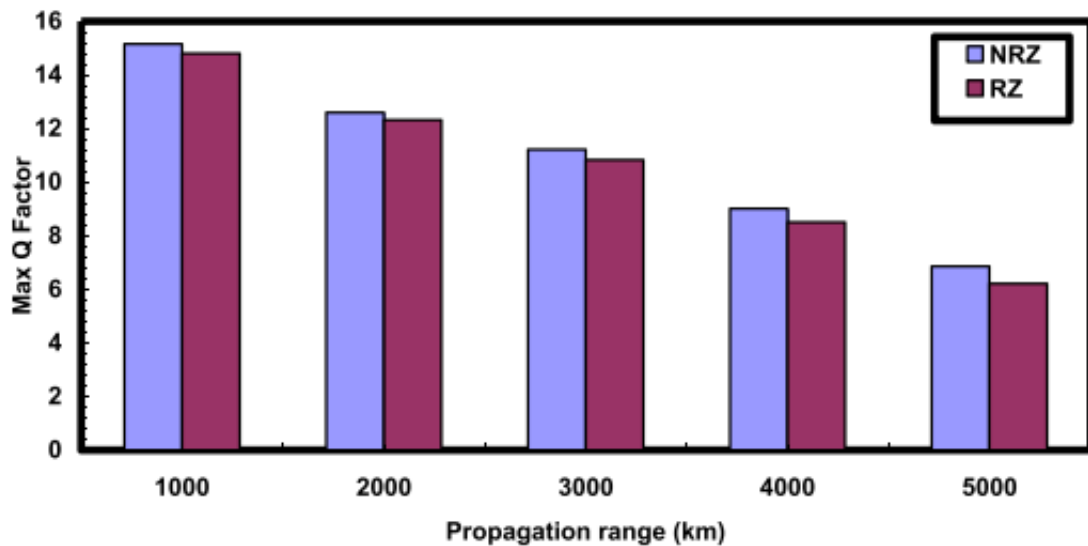


Σχήμα 5-2: Q-factor για IS-OWC με χρήση για πηγής φωτός VCSEL και CW λέιζερ χρησιμοποιώντας σχήματα NRZ και RZ με ρυθμό μετάδοσης 10Gb/s για διαφορετικές αποστάσεις. Πηγή: Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances.

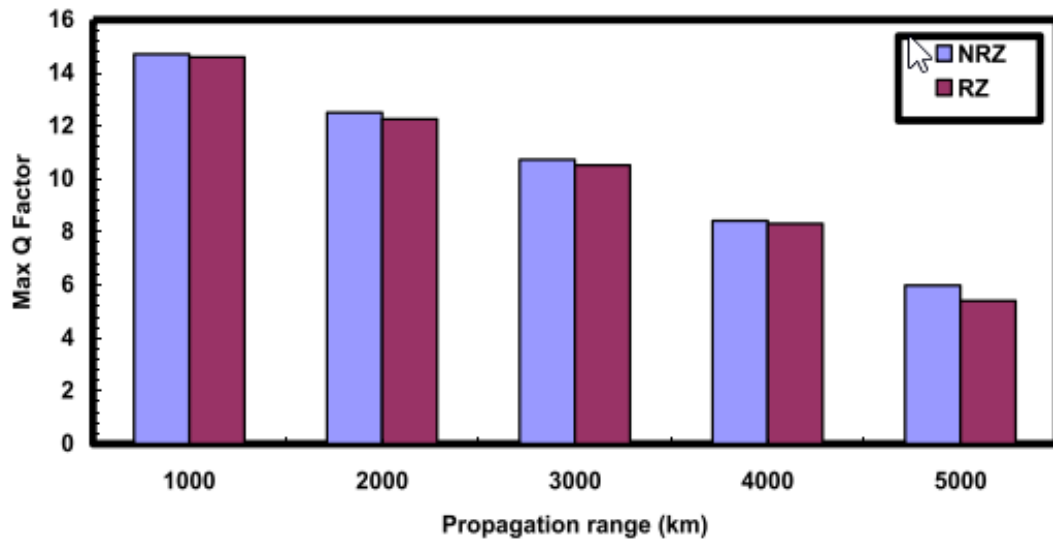


Σχήμα 5-3: Μέγιστο Q -factor έναντι των διακυμάνσεων εύρους διάδοσης για διάφορες οπτικές πηγές VCSEL βασισμένες σε κωδικοποίηση γραμμής. Πηγή: Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances.

Ο παράγοντας Q μειώνεται και για τις δύο διαμορφώσεις με την αύξηση της απόστασης των δορυφόρων.

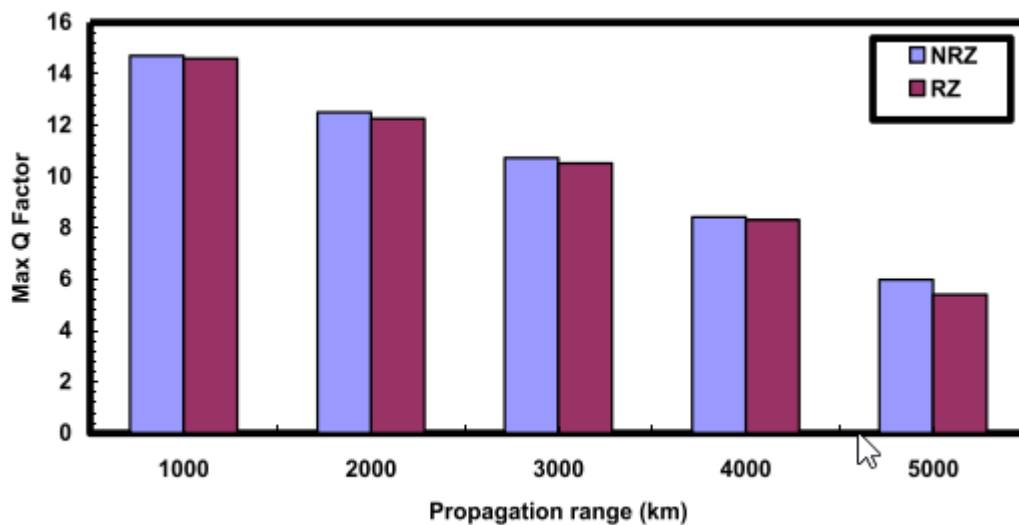


Σχήμα 5-4: Μέγιστο Q -factor έναντι διακυμάνσεων εύρους διάδοσης για διάφορες οπτικές πηγές CW βασισμένες σε κωδικοποίηση γραμμής. Πηγή: Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances.

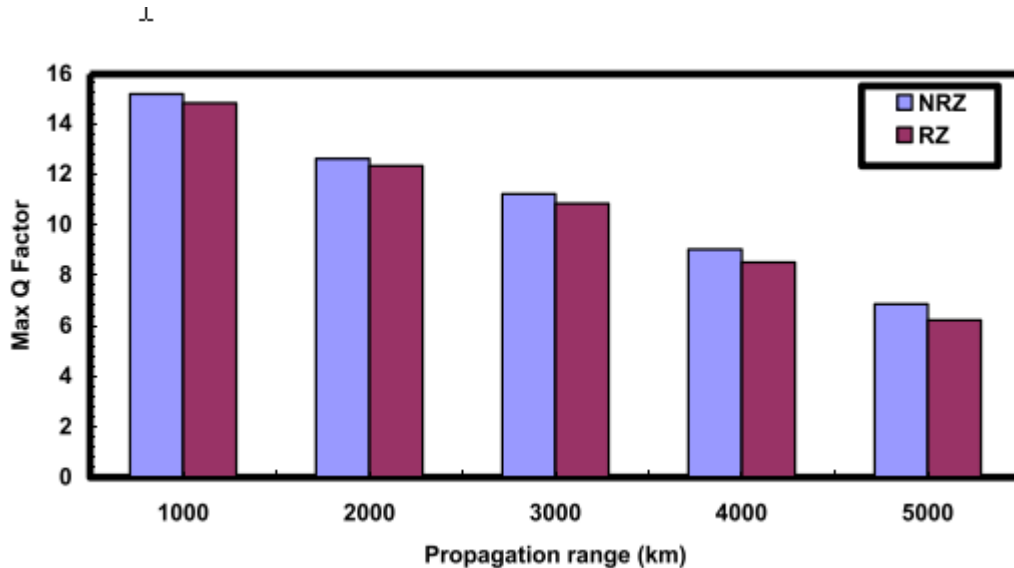


Σχήμα 5-5: Μέγιστο Q -factor έναντι διακυμάνσεων εύρους διάδοσης για Διάφορη οπτική πηγή VCSEL βασισμένη σε κωδικοποίηση γραμμής με 10 Gbps. Πηγή: Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances.

Η NRZ είναι καλύτερη από την RZ και στις δύο περιπτώσεις των δύο διαφορετικών πηγών.



Σχήμα 5-6: Μέγιστο Q -factor έναντι διακυμάνσεων εύρους διάδοσης για Διάφορη οπτική πηγή VCSEL βασισμένη σε κωδικοποίηση γραμμής με 40 Gbps. Πηγή: Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances.



Σχήμα 5-7: Q-factor για σύνδεση IS-OWC που χρησιμοποιεί διόδο λέιζερ VCSEL για NRZ και σχήματα RZ σε διάφορους ρυθμούς bit σε διαφορετικές αποστάσεις. Πηγή: Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances.

Καταλήγουμε ότι και για τις δύο διαμορφώσεις το BER αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης διάδοσης μεταξύ των δορυφόρων. Άρα όσο μεγαλύτερη απόσταση διάδοσης μεταξύ δορυφόρων τόσο χειρότερη η απόδοση του συστήματος. Ο παράγοντας Q μειώνεται τόσο με την αύξηση του ρυθμού δεδομένων όσο και με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των δορυφόρων. Όσο μεγαλύτεροι ρυθμοί δεδομένων τόσο περισσότερα σφάλματα εμφανίζονται. Το σύστημα παρουσιάζει καλύτερη απόδοση με την χρήση λέιζερ VCSEL αφού ο παράγοντας Q είναι μεγαλύτερος και ταυτόχρονα το BER είναι χαμηλότερο.

Για 10 Gb/s

Laser source	VCSEL laser diode				CW laser source			
	NRZ		RZ		NRZ		RZ	
Modulation scheme								
Performance parameter	Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER
1000 km	15.15	10^{-52}	14.8	10^{-50}	14.71	10^{-50}	14.6	10^{-48}
2000 km	12.6	10^{-37}	12.32	10^{-36}	12.5	10^{-36}	12.25	10^{-35}
3000 km	11.21	10^{-30}	10.83	10^{-28}	10.72	10^{-28}	10.52	10^{-26}
4000 km	9.01	10^{-20}	8.5	10^{-18}	8.42	10^{-18}	8.31	10^{-17}
5000 km	6.85	10^{-12}	6.21	10^{-10}	5.98	10^{-10}	5.4	10^{-8}

Πίνακας 5-1: Ο παράγοντας Q και το BER της σύνδεσης IS-OWC χρησιμοποιώντας πηγές λέιζερ VCSEL και CW για μορφές NRZ και RZ σε 10 Gb/s σε διαφορετικές αποστάσεις. Πηγή: Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances.

Data rate	10 Gb/s				40 Gb/s			
Modulation scheme	NRZ		RZ		NRZ		RZ	
Performance parameter	Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER
1000 km	15.15	10^{-52}	14.8	10^{-50}	10.53	10^{-26}	10.35	10^{-25}
2000 km	12.6	10^{-37}	12.32	10^{-35}	9.12	10^{-20}	8.98	10^{-19}
3000 km	11.21	10^{-30}	10.83	10^{-28}	7.58	10^{-14}	7.44	10^{-14}
4000 km	9.01	10^{-20}	8.5	10^{-18}	5.65	10^{-9}	6.12	10^{-10}
5000 km	6.85	10^{-12}	6.21	10^{-10}	4.76	10^{-5}	4.93	10^{-6}

Πίνακας 5-2: Ο παράγοντας Q και το BER της σύνδεσης IS-OWC χρησιμοποιώντας δίοδο VCSEL για σχήματα NRZ και RZ σε ρυθμούς δεδομένων 10 και 40 Gb/s σε διαφορετικές αποστάσεις. Πηγή: Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το Q-factor παρουσιάζει υψηλότερες τιμές όταν χρησιμοποιούνται πηγές λέιζερ VCSEL αντί με λέιζερ CW, χρησιμοποιώντας και τις δύο μορφές κωδικοποίησης NRZ, RZ. Το αποτέλεσμα αυτό τονίζει το δυναμικό των VCSEL λέιζερ στην ενίσχυση της απόδοσης των οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου. Παρατηρούμε ότι το BER αυξάνεται και για τις δύο διαμορφώσεις όσο γίνεται αύξηση της απόστασης μεταξύ των δορυφόρων. Συνεπώς το σύστημα έχει χειρότερη απόδοση με μεγαλύτερη απόσταση μετάδοσης. Τα ευρήματα του πειράματος αυτού αποκαλύπτουν ότι η κωδικοποίηση NRZ υπερτερεί έναντι της RZ λόγω των μειωμένων απαιτήσεων φάσματος της. Η χρήση πηγών φωτός VCSEL παρέχει καλύτερη απόδοση στις οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου δορυφόρων, χαρακτηριζόμενά από μεγαλύτερα Q-factor και χαμηλότερα BER/ Ειδικότερα, το Q-factor αγγίζει τις τιμές 6,85 για μορφή κωδικοποίησης NRZ και 6,21 για μορφή κωδικοποίησης RZ χρησιμοποιώντας πηγές φωτός VCSEL λέιζερ, ενώ 5,98 είναι η τιμή του Q-factor για NRZ μορφή κωδικοποίησης και 5,4 για RZ μορφή κωδικοποίησης όταν χρησιμοποιείται πηγή φωτός CW λέιζερ.

5.2 ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΠΤΙΚΗΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΝΤΑΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ.

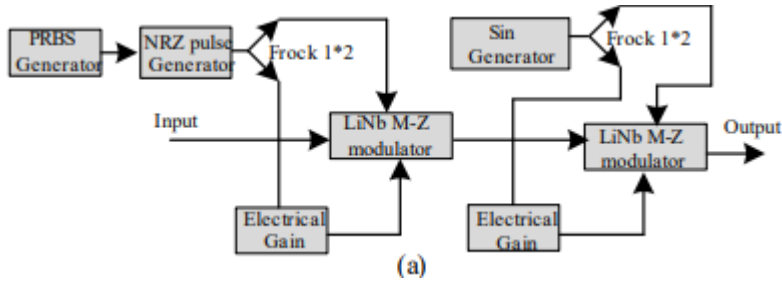
Ο κόσμος των συστημάτων επικοινωνίας εξελίσσεται διαρκώς, η ενσωμάτωση του πυκνού διαμοιρασμού κύματος φωτός με τα συστήματα οπτικής ασύρματης επικοινωνίας έχει αναδειχθεί ως ένας ελπιδοφόρος δρόμος. Αυτή η συνένωση υπόσχεται υψηλή ταχύτητα, υψηλό εύρος ζώνης και μετάδοση δεδομένων σε αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων. Ένα οπτικό σύστημα επικοινωνίας αποτελείται όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια από τρεις βασικούς πυλώνες: τον πομπό, το κανάλι μετάδοσης και τον δέκτη. Κρίσιμο είναι να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα bit. Τα Bits

του ληφθέντος σήματος επηρεάζονται από θόρυβο, παρεμβολές και παραμόρφωση, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να μεγιστοποιηθεί το Bitrate, το οποίο αντιπροσωπεύει τον αριθμό των bits που μεταφέρονται ανά μονάδα χρόνου. Οι OWC αποτελούν ένα πεδίο της οπτικής επικοινωνίας όπου χρησιμοποιούνται ορατά, υπέρυθρα (IR) ή υπεριώδη (UV) κύματα για την μεταφορά ενός οπτικού σήματος. η δουλειά που γίνεται στο [31] εξετάζει ένα διαστημικό ΟΑΕ σύστημα μεγάλης χωρητικότητας, χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, με ειδική επικέντρωση στην επίδραση της ατμόσφαιρας και της ατμοσφαιρικής διαταραχής στην διάδοση του οπτικού σήματος.

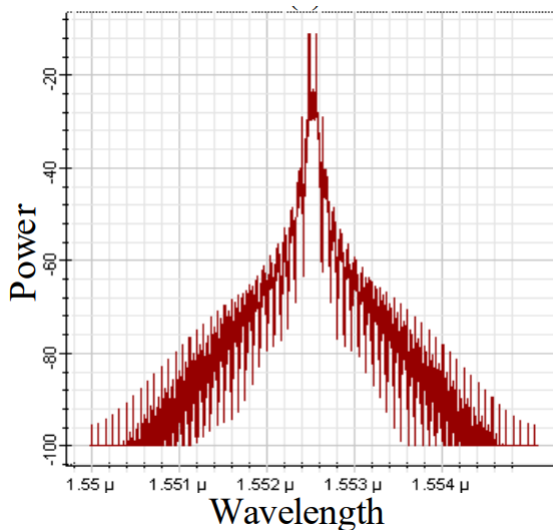
5.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο οι ατμοσφαιρικές συνθήκες παίζουν σημαντικό ρόλο στην διάδοση των οπτικών σημάτων σε ένα σύστημα ΟΑΕ. Ανάμεσα στους παράγοντες που επηρεάζουν την μετάδοση του οπτικού σήματος, ξεχωρίζει η ατμοσφαιρική διαταραχή. Χαρακτηρίζεται από άτακτη και τυχαία κίνηση στην ατμόσφαιρα. Η δομή του δείκτη διάθλασης ως συνάρτηση της απόστασης στο οπτικό ασύρματο κανάλι περιγράφεται από την εξίσωση $C_n(h)=0.00549v$. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σύμφωνα με αυτή την εξίσωση, η επίδραση της ατμοσφαιρικής διαταραχής στον ελεύθερο χώρο είναι μικρότερη όταν το ύψος στο οποίο βρίσκεται ο δορυφόρος είναι μεγαλύτερο των 2000 μέτρων. Η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε από τους επιστήμονες είναι για καθαρές ατμοσφαιρικές συνθήκες, ορισμένες με ορατότητα πάνω από 23 χιλιόμετρα και απώλειες περίπου 0,14dB/km. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τιμές bit-rate και τεχνικές κωδικοποίησης συμπεριλαμβανομένου των CSRZ, DRZ, και MDRZ.

Η κωδικοποίηση CSRZ είναι μία από τις πιο προηγμένες μορφές κωδικοποίησης των οπτικών σημάτων επικοινωνίας. Χαρακτηρίζεται από την αντιστροφή του πρόσημου του οπτικού πεδίου σε κάθε bit μετάβασης. Η κωδικοποίηση CSRZ έχει καλύτερη ανοχή στη μη γραμμικότητα των ινών καθώς και στην υπολειμματική χρωματική διασπορά. Σε αυτή την διαμόρφωση το οπτικό σήμα return to zero (RZ) περνά από διαμορφωτή φάσης μετά τον διαμορφωτή Mach-Zender, του οποίου η λειτουργία είναι να μεταβάλλει την ένταση της πηγής ανάλογα με την έξοδο της γεννήτριας παλμών. Η μετατόπιση της φάσης στην κωδικοποίηση CSRZ είναι η κύρια διαφορά μεταξύ αυτής και της κωδικοποίησης RZ και είναι της τάξης των 180 μοιρών μεταξύ των γειτονικών bit.

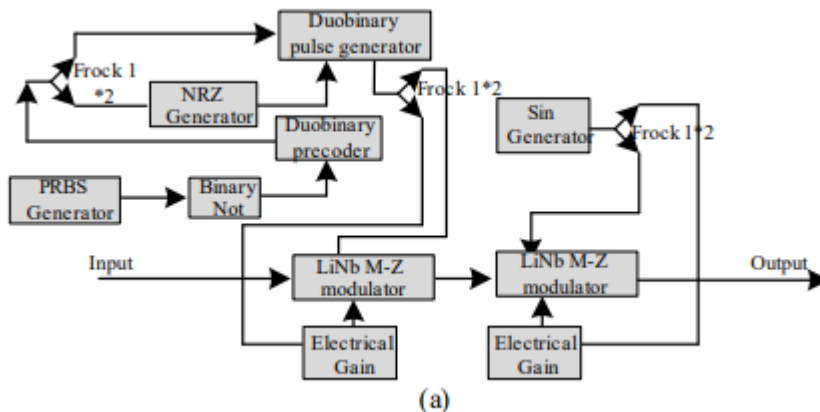


Σχήμα 5-8: Σχέδιο της CSRZ Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats

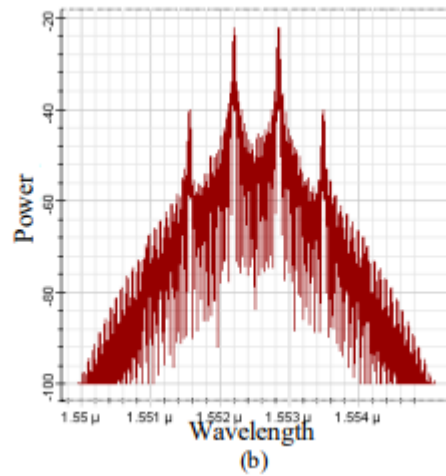


Εικόνα 5-1: Το οπτικό φάσμα της CSRZ διαμόρφωσης με ένα laser CW (continuous wave) στα 193,1 THZ. Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats

Η κωδικοποίηση DRZ είναι ένας τύπος διαμόρφωσης που μεταδίδει Rbits/s χρησιμοποιώντας λιγότερο από $R/2$ Hz του εύρους ζώνης. Αυτό το είδος κωδικοποίησης μπορεί να αυξήσει την ανοχή στα αποτελέσματα της χρωματική διασποράς καθώς και να βελτιώσει το οπτικό φιλτράρισμα στενής ζώνης. Σε αυτή την κωδικοποίηση το πρώτο σήμα NRZ duo-binary δημιουργείτε από μία αντίστοιχη γεννήτρια παλμών. Η γεννήτρια αυτή οδηγεί το πρώτο LiNb MZM και στην συνέχεια συνδέεται στο δεύτερο LiNb MZM που δημιουργείτε από μία γεννήτρια ημιτονοειδούς φάσης 90 μοιρών.

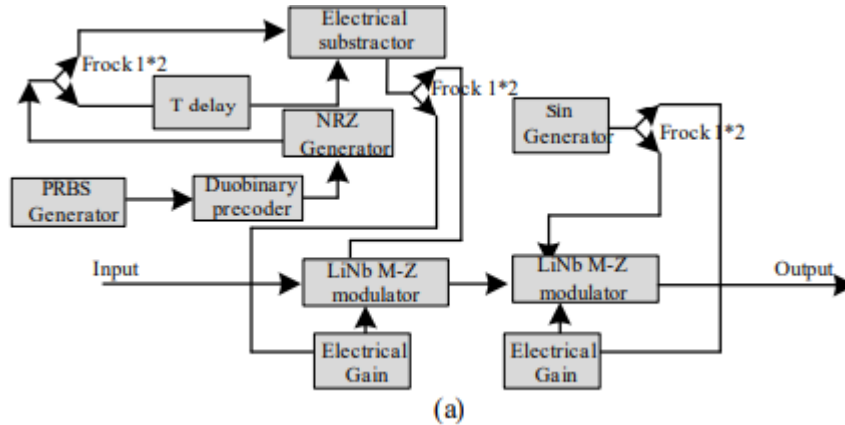


Σχήμα 5-9: Το σχέδιο της DRZ. Πηγή: *Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats*

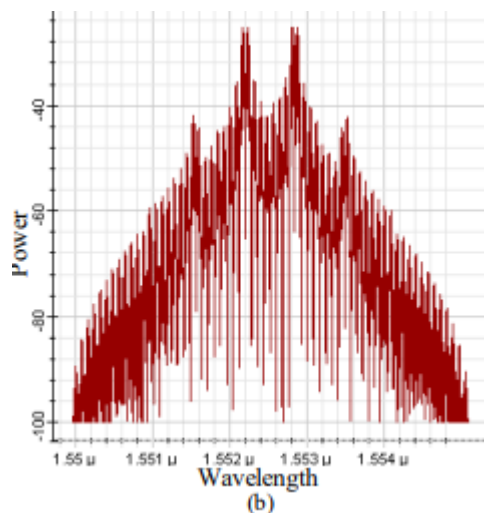


Εικόνα 5-2: Το οπτικό φάσμα της DRZ διαμόρφωσης στα 193,1 THz. Πηγή: *Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats*

Η διαμόρφωση MDRZ είναι ένας τύπος διαμόρφωσης όπου πρώτα δημιουργείται ένα NRZ διπλό δυαδικό σήμα με κύκλωμα καθυστέρησης και αφαίρεσης το οποίο οδηγεί στο πρώτο LiNb MZM και εν συνεχεία συνδέεται στο δεύτερο LiNb MZM που οδηγείται από μία γεννήτρια ημιτονοειδούς κύματος με φάση 90 μοίρες. Η διαμόρφωση MDRZ μειώνει τη διαμόρφωση αυτό-φάσης(self-phase) σε μονό κανάλι καθώς και στις διφασική διαμόρφωση και στην μίξη τεσσάρων κυμάτων στο σύστημα μετάδοσης WDM .



Σχήμα 5-10: Σχέδιο MDRZ Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats



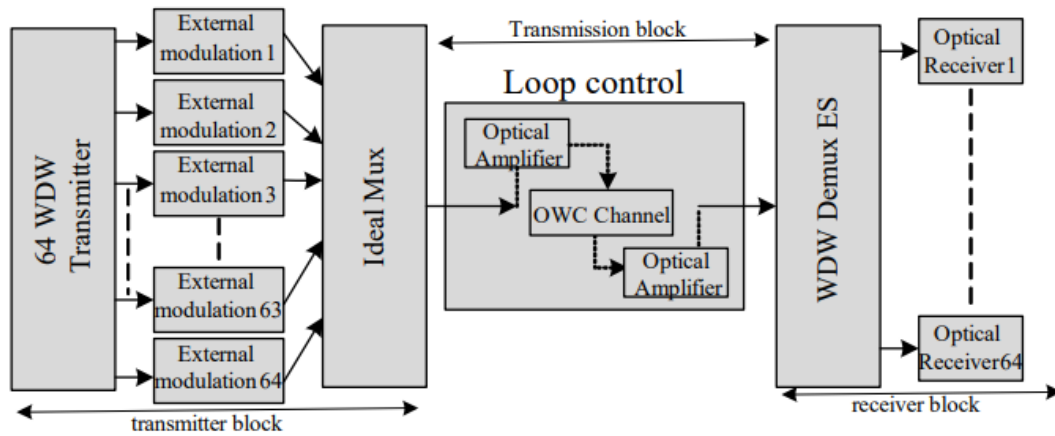
Εικόνα 5-3: το οπτικό φάσμα της MDRZ διαμόρφωσης στα 193,1 THz. Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats

5.2.2 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΗΛΘΑΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

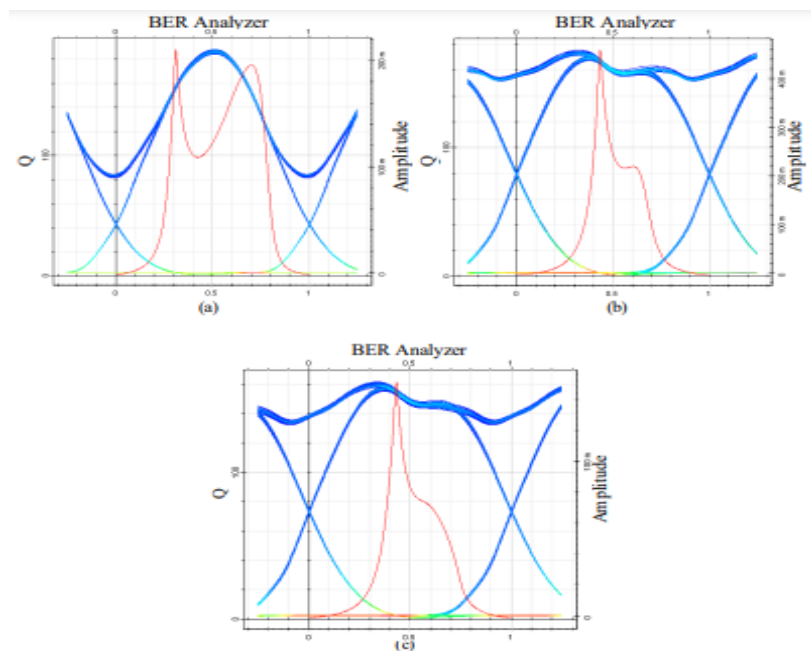
Έγινε προσαρμογή του συστήματος αυτού σε διαφορετικούς ρυθμούς bit με τρία είδη διαμόρφωσης, CSRZ, DRZ, MDRZ. Το σύστημα αποτελείται από τρία κύρια μπλοκ, το καθένα από αυτά τα μπλοκ αποτελείται από έναν πομπό, μία ασύρματη μετάδοση καθώς και έναν δέκτη. Στο πρώτο μπλοκ έχουμε έναν 64-WDM πομπό, κάποια διαφορετικά είδη διαμορφώσεων καθώς και έναν οπτικό πολυπλέκτη.

Το μπλοκ της μετάδοσης του σήματος αποτελείται από ένα κανάλι OWC και δύο οπτικούς ενισχυτές. Ο πρώτος από τους δύο ενισχυτές αποτελείται από ένα κανάλι προ-OAE και ο δεύτερος εξ αυτών αποτελείται από ένα κανάλι μετά-OAE. Ο οπτικός δέκτης αποτελείται από μία φωτοδίοδο για την ανίχνευση του οπτικού σήματος και του μήκους

κύματός του. Η μέτρηση του BER γίνεται μετά τον οπτικό δέκτη. Η προσομοίωση γίνεται σε συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας, όπου η ορατότητα είναι μεγαλύτερη από 23 χιλιόμετρα και η εξασθένηση του σήματος είναι περίπου 0,14 dB/χιλιόμετρο.

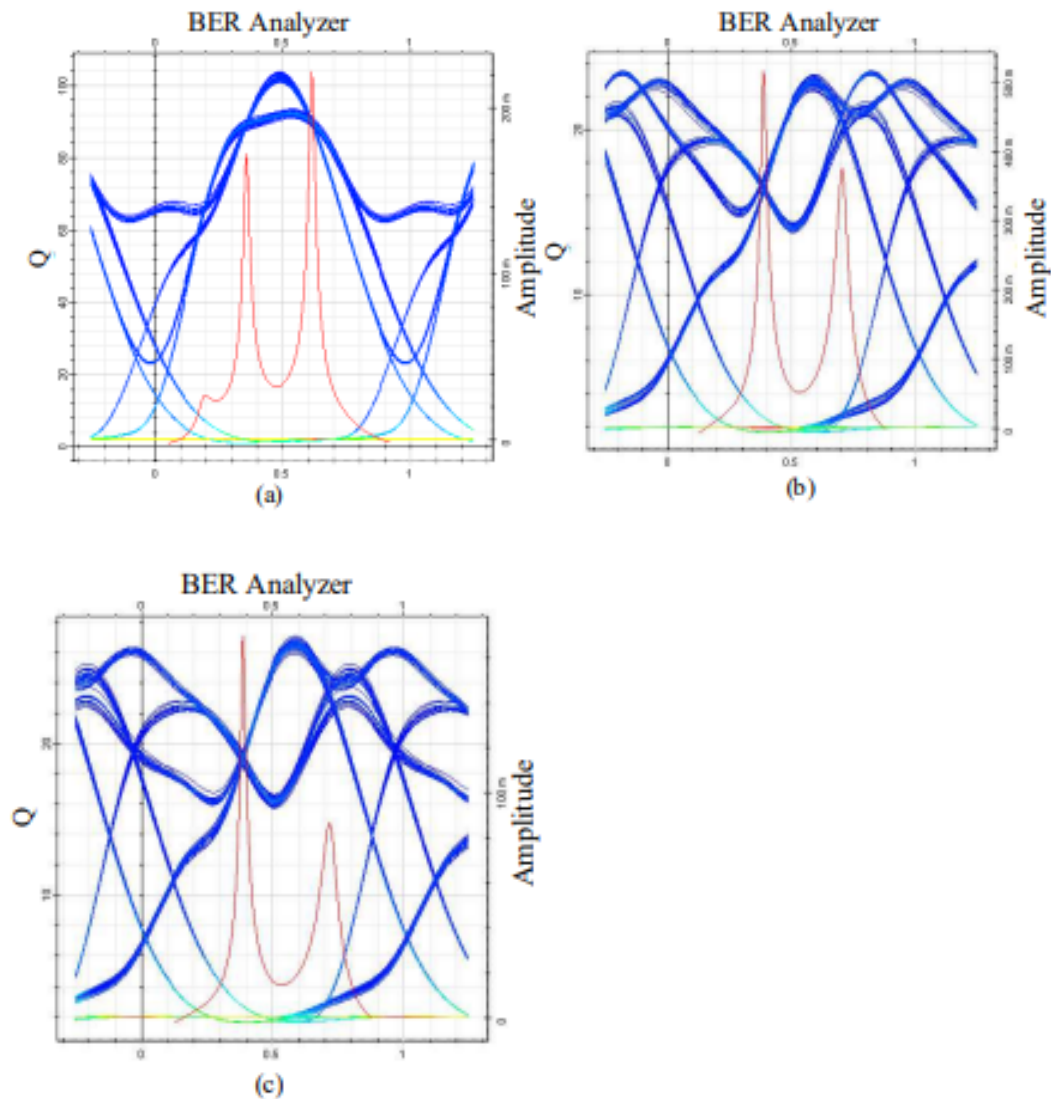


Σχήμα 5-11: Το διάγραμμα του προτεινόμενου συστήματος DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing 64 καναλιών για OWC με καθορισμένη απόσταση 1250 χιλιόμετρα. Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats



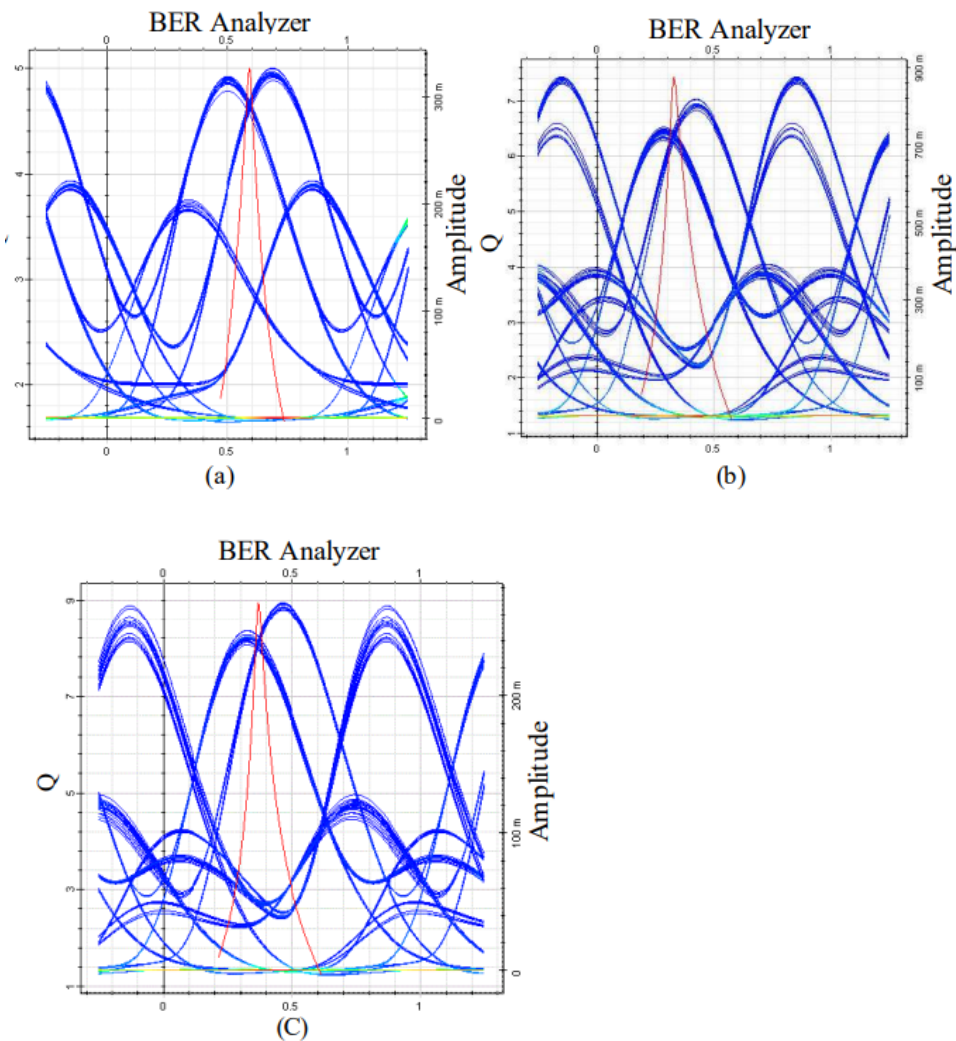
Εικόνα 5-4: Τα Eye diagram και ο παράγοντας Q των (α) CSRZ, (β) DRZ και (γ) μορφή διαμόρφωσης MDRZ στα 10 Gbps. Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats

Για bitrate 10 Gbps σε απόσταση 1250 χιλιομέτρων με διάφορες τεχνικές κωδικοποίησης : CSRZ, DRZ και MDRZ αντίστοιχα . Οι υψηλότεροι παράγοντες ποιότητας Q που επιτεύχθηκαν ήταν 188.23, 175.64 και 161.1 για τις τεχνικές κωδικοποίησης CSRZ, DRZ και MDRZ αντίστοιχα σε αυτό το bit rate. Το ελάχιστο BER και για τις τρεις διαμορφώσεις είναι περίπου ίσο με το μηδέν.



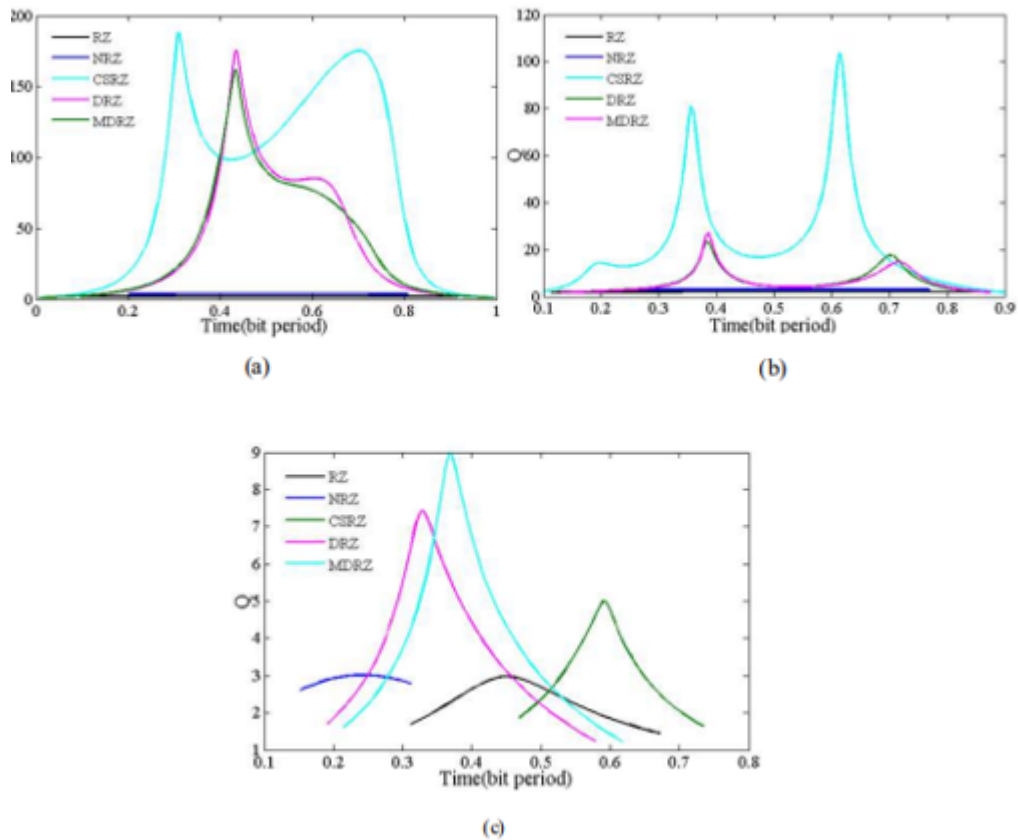
Εικόνα 5-5: Τα Eye diagram και ο παράγοντας Q των (α) CSRZ, (β) DRZ και (γ) μορφή διαμόρφωσης MDRZ στα 20 Gbps .Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats

Για bitrate 20 Gbps σε απόσταση 1250 χιλιομέτρων με διάφορες τεχνικές κωδικοποίησης : CSRZ, DRZ και MDRZ αντίστοιχα . Οι υψηλότεροι παράγοντες ποιότητας Q που επιτεύχθηκαν ήταν: 103.81 , 23.55 και 27.06 αντίστοιχα. Με το Bit Error Rate (BER) να παραμένει κάτω από 10^{-50} για όλες τις τεχνικές κωδικοποίησης.. Το ελάχιστο BER παρατηρούμε ότι το έχει η διαμόρφωση CSRZ στα 20 Gbps για αυτό το σύστημα.

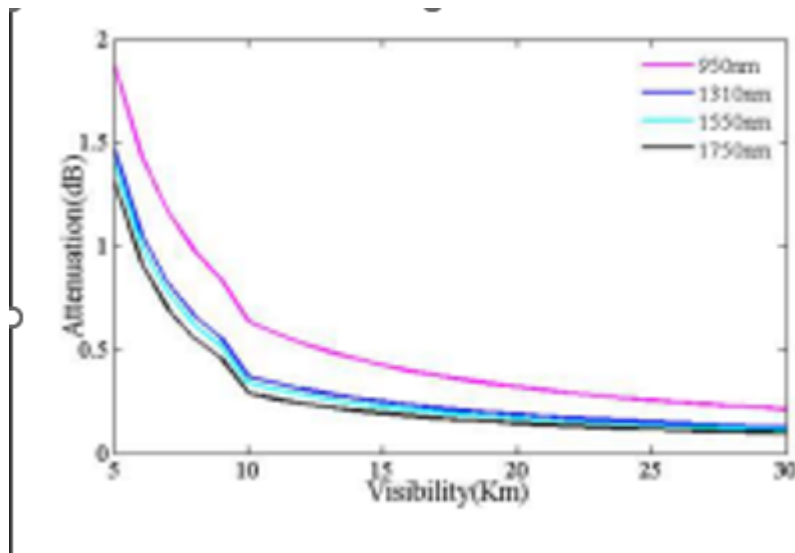


Εικόνα 5-6: Τα Eye diagram και ο παράγοντας Q των (α) CSRZ, (β) DRZ και (γ) μορφή διαμόρφωσης MDRZ στα 40 Gbps Πηγή : Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats.

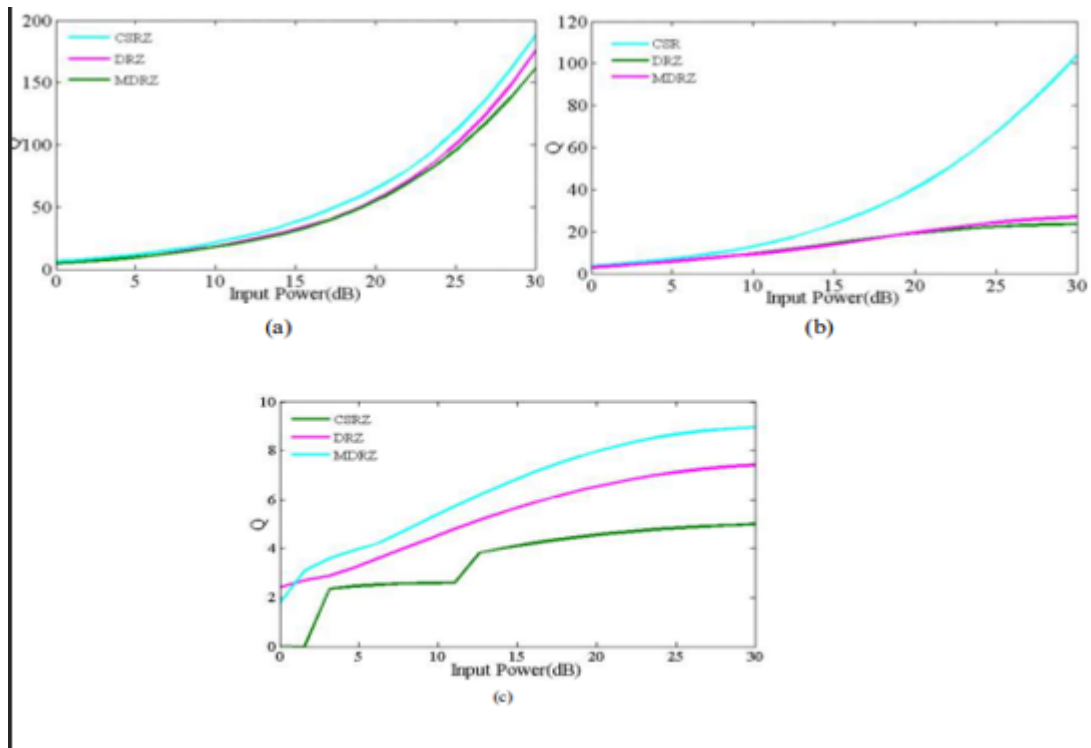
Σε bit rate 40 Gbps, τα υψηλότερα χαρακτηριστικά που επιτεύχθηκαν ήταν: 5.001(CSRZ), 7.42(DRZ) και 8.95(MDRZ), με ελάχιστες τιμές BER των 2.43×10^{-7} , 5.3×10^{-14} , και 1.55×10^{-19} , αντίστοιχα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτά τα αποτελέσματα επισημαίνουν την ανωτερότητα της τεχνικής κωδικοποίησης MDRZ ως προς τον παράγοντα Q σε σύγκριση με τις άλλες δύο τεχνικές κωδικοποίησης.



Εικόνα 5-7: Μέγιστος παράγοντας Q έναντι του χρόνου (περίοδος bit) σε διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης bit: (α) 10 Gbps, (β) 20 Gbps και (γ) 40 Gbps. Πηγή : Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats



Εικόνα 5-8: Εξασθένηση έναντι της ορατότητας για διαφορετικά μήκη κύματος. Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats



Εικόνα 5-9: Μέγιστος συντελεστής Q σε σχέση με την ισχύ εισόδου για διαφορετικές μορφές διαμόρφωσης: (α) Ρυθμοί bit 10 Gbps, (β) Ρυθμοί bit 20 Gbps, (γ) Ρυθμοί bit 40 Gbps.: Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats.

Bit Rate (Gbps)	Analyzed Parameters	CSRZ	DRZ	MDRZ
10	Q-Factor	188.23	175.64	161.1
	BER	0	0	0
20	Q-Factor	103.81	23.55	27.06
	BER	0	5.8×10^{-123}	1.37×10^{-161}
40	Q-Factor	5.001	7.42	8.95
	BER	2.43×10^{-7}	5.3×10^{-14}	1.55×10^{-19}

Πίνακας 3

Σύγκριση των αποτελεσμάτων για διαφορετικά bit rate.: Πηγή: Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats.

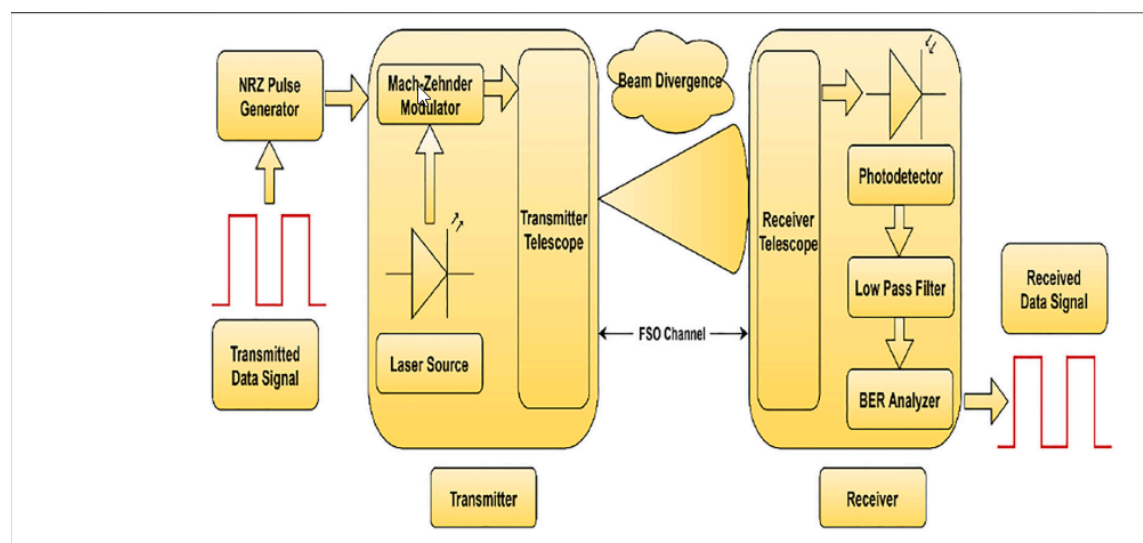
Αυτό το κεφάλαιο έχει αναλύσει την ανάπτυξη και την προσομοίωση ενός πολύ υψηλής χωρητικότητας διαστημικού καναλιού ενός συστήματος οπτικής ασύρματης επικοινωνίας. Το σύστημα εξετάστηκε λεπτομερώς σε διάφορα bitrates (10, 20 και 40 Gbps) χρησιμοποιώντας τις τεχνικές κωδικοποίησης CSRZ, DRZ και MDRZ, λαμβάνοντας υπόψη την ατμόσφαιρα και την επίδραση της στο οπτικό σήμα που μεταφέρεται σε αυτήν. Η συγκριτική ανάλυση αποκαλύπτει ότι στα 10, το προτεινόμενο σύστημα εμφάνισε υψηλό παράγοντα ποιότητας Q και το χαμηλό Bit Error Rate BER σε όλες τις τεχνικές κωδικοποίησης με καλύτερη να αναδεικνύεται η CSRZ, στα 20 Gbps παρατηρούμε ανωτερότητα της CSRZ διαμόρφωσης. Ωστόσο στα 40 Gbps, η τεχνική κωδικοποίησης MDRZ εμφάνισε ανώτερη απόδοση σε σύγκριση με τις τεχνικές κωδικοποίησης CSRZ και DRZ. Υπογραμμίζεται η ανωτερότητα της MDRZ στα 40 Gbps,

προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες στον τομέα των συστημάτων οπτικής ασύρματης επικοινωνίας.

5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΟΠΤΙΚΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΔΙΑΧΥΣΗ ΔΕΣΜΗΣ[3]

Οι ΟΕΕΧ ξεχωρίζουν λόγω των εξαιρετικών ταχυτήτων μετάδοσης, της ανθεκτικότητας του σήματος δεδομένων, των μικρών διαστάσεων εξοπλισμού (περίπου 1/10 της διαμέτρου των κεραιών βασισμένων σε ραδιοσυχνότητες), της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, της άδειας μετάδοσης, της εύκολης εγκατάστασης και το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Η τεχνολογία λειτουργεί στο ορατό και το υπέρυθρο φάσμα. Η δουλειά που γίνεται στο [29] εξετάζει την επίδραση της διάχυσης της οπτικής δέσμης στα συστήματα ΟΕΕΧ, επικεντρώνοντας στον τρόπο με τον οποίο ο έλεγχος γωνίας διάχυσης μπορεί να βελτιώσει την απόδοση τους. εκτός από τις ατμοσφαιρικές απώλειες ενός συστήματος ΟΕΕΧ λόγω απορρόφησης, διάχυσης και άλλων δυναμικών συνθηκών της ατμόσφαιρας, η οπτική δέσμη αντιμετωπίζει προκλήσεις σχετικές με τη διάχυση της δέσμης καθώς αυτή διαδίδεται προς τον δέκτη. Ο προσεκτικός έλεγχος της γωνίας διάχυσης κατά την εγκατάσταση είναι κρίσιμος για να αποφευχθεί η δραστηκή μείωση της ισχύος του σήματος του συστήματος ΟΕΕΧ κατά τη μετάδοση λόγω της διάχυσης του σήματος. Το σύστημα που θα αναλυθεί είναι ιδανικό για σύνδεση του τελευταίου μιλίου.

5.3.1 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ



Εικόνα 5-10: Ο Προτεινόμενος σχεδιασμός συστήματος επικοινωνιακού συστήματος FSO που βασίζεται σε εμπορικές εφαρμογές. Πηγή: *Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles*.

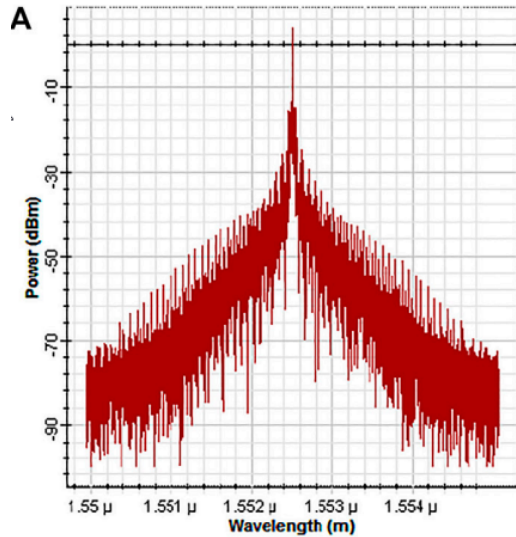
Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται το σχέδιο του προτεινόμενου συστήματος ΟΕΕΧ το οποίο λειτουργεί σε μήκος κύματος 1552,5 nm , έχοντας ισχύ μετάδοσης ίση με 10 dBm . Το οπτικό σήμα που λαμβάνει ο δέκτης το μαζεύει ο φωτοανιχνευτής , ο οποίος είναι υπεύθυνος για την μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό σήμα. Μία γεννήτρια bit ακολουθίας χρησιμοποιείται γνωστή και ως γεννήτρια ψευδό τυχαίας δυαδικής ακολουθίας περιλαμβάνεται στον οπτικό πομπό για τη δημιουργία τυχαίων ακολουθιών bit. το σύστημα επικοινωνίας που εξετάζουμε χρησιμοποιεί μία οπτική πηγή , η οποία δημιουργεί ένα σήμα στην υπέρυθρη περιοχή και λειτουργεί ως φορέας του οπτικού σήματος για την οπτική επικοινωνία ελεύθερου χώρου. Ο Mach-Zehnder διαμορφωτής είναι υπεύθυνος για την διαμόρφωση του οπτικού ηλεκτρικού σήματος από την γεννήτρια παλμών NRZ με ένα υψηλής συχνότητας οπτικό φορέα που παράγεται από την πηγή λέιζερ. Το οπτικό σήμα που λαμβάνεται από τον δέκτη επικεντρώνεται σε έναν φωτοανιχνευτή , ο οποίος είναι υπεύθυνος για την μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό.

Parameter	Value
Laser power	10 dBm
Wavelength	1552.5 nm
Data rate	10 Gbps
Transmitter aperture diameter	5 cm
Beam divergence	2–6 mrad
Receiver aperture diameter	20 cm
Photodetector type	APD
Responsivity of APD	1 A/W
Dark current	10 nA

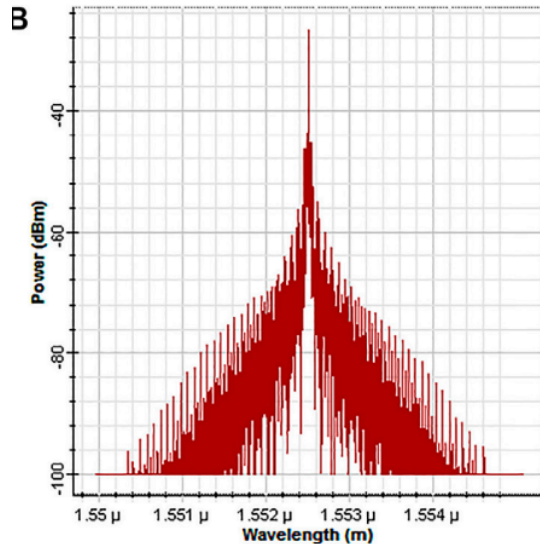
Πίνακας 5-4: Παράμετροι σύνδεσης του προτεινόμενου συστήματος FSO .Πηγή: *Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles* .

Ο παραπάνω πίνακας μας δείχνει την υλοποίηση του προτεινόμενου συστήματός σύμφωνα με τις παραμέτρους ενός τυπικού οπτικού ασύρματου δικτύου ελεύθερου χώρου. Η ταχύτητα μετάδοσης τους συστήματος τέθηκε στα 10 Gbps, το μήκος κύματος στα 1552,5 nm.

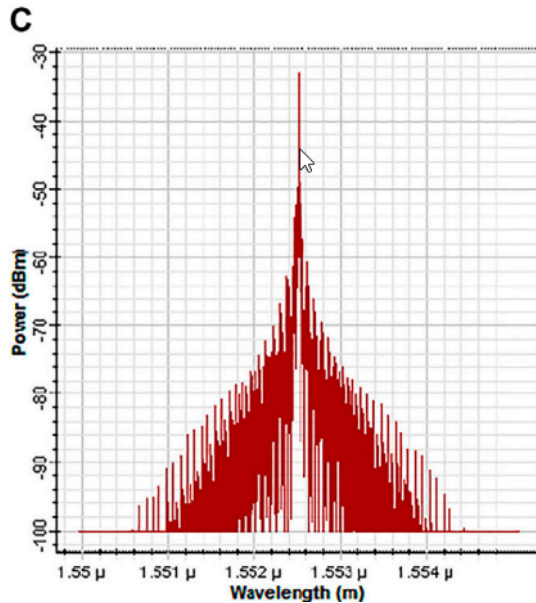
5.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



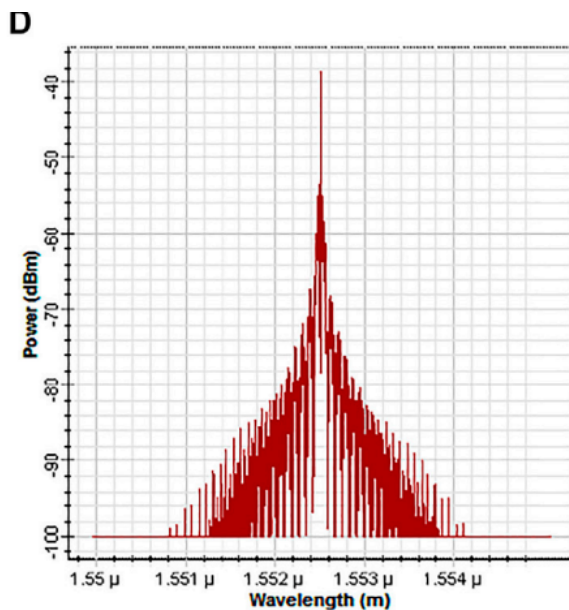
Εικόνα 5-11: Οπτικό φάσμα σχεδιασμένου συστήματος FSO: στον πομπό. Πηγή: *Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles*.



Εικόνα 5-12: Οπτικό φάσμα σχεδιασμένου συστήματος FSO: στον δέκτη (απόκλιση δέσμης 2 mrad) . ΠΗΓΗ *Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles*.



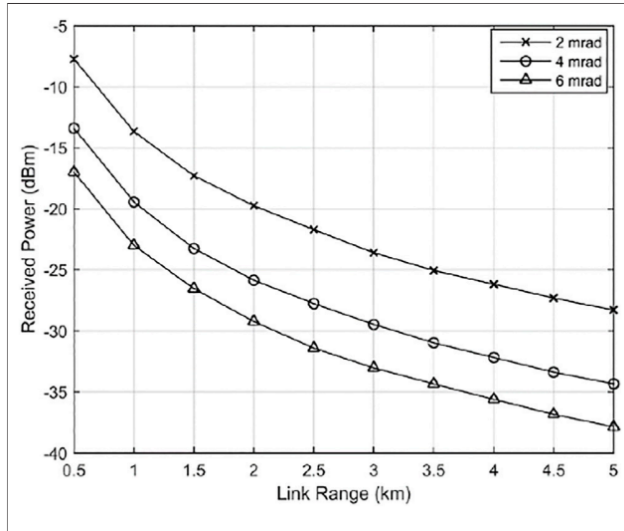
Εικόνα 5-13: Οπτικό φάσμα σχεδιασμένου συστήματος FSO: στον δέκτη (απόκλιση δέσμης από 4 mrad). Πηγή: *Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles*.



Εικόνα 5-14: Οπτικό φάσμα σχεδιασμένου συστήματος FSO: στον δέκτη (απόκλιση δέσμης 6 mrad). Πηγή: *Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles*.

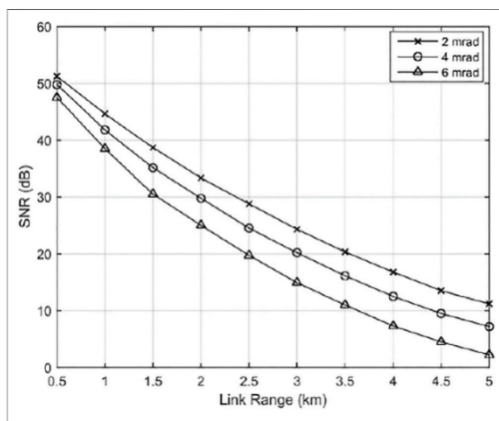
Τα τέσσερα παραπάνω διαγράμματα δείχνουν το φάσμα του σήματος σε διαφορετικά στάδια της μετάδοσης του σήματος. η δύναμη διάδοσης του συστήματος μετά την διαμόρφωση και πριν το μέσο διάδοσης είναι 10 dBm. Στο Α διάγραμμα όπου μας δείχνει το Οπτικό φάσμα σχεδιασμένου συστήματος FSO: στον πομπό, παρατηρούμε ότι το μέγιστο φάσμα της οπτικής δύναμης της δέσμης είναι περίπου 5,75 dBm. Στον δέκτη με απόκλιση δέσμης 2 mrad το μέγιστο του οπτικού φάσματος παρατηρείται όταν ότι η οπτική δύναμη της δέσμης είναι περίπου στα -24.6dBm. Το οπτικό φάσμα δείχνει μια περαιτέρω μείωση ισχύς σήματος καθώς η απόκλιση της οπτικής δέσμης μεγαλώνει από 2 σε 4 και 6 mrad.

Σε απόκλιση 4 mrad το μέγιστο φάσμα της οπτικής δέσμης είναι περίπου -33 dBm και σε απόκλιση 6 mrad το μέγιστο φάσμα της οπτικής δέσμης είναι περίπου ίσο με -38 dBm.σ



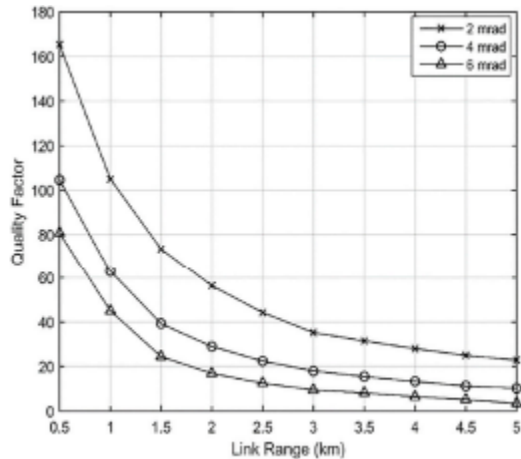
Εικόνα 5-15: Διάγραμμα ισχύς λήψης σήματος έναντι απόστασης για διαφορετικά σενάρια απόκλισης δέσμης. ΠΗΓΗ Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles .

Η λαμβανόμενη δύναμη έχει μία σημαντική μείωση καθώς η απόσταση γίνεται μεγαλύτερη από 0.5 χιλιόμετρα μέχρι τα 5 χιλιόμετρα. Αν παρατηρήσουμε στα 4 χιλιόμετρα παρατηρείται ότι η λαμβανόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη όταν υπάρχει απόκλιση 2 mrad από όταν η απόκλιση είναι 4 ή και 6 mrad. Οι τιμές για σύνδεση τεσσάρων χιλιομέτρων είναι -26,2 για 2 mrad, -32,2 για 4mrad και -35,6 για 6mrad. Αυξάνοντας την απόκλιση της οπτικής δέσμης ο δέκτης δεν είναι ικανός να συλλέξει αρκετό σήμα και έτσι η τιμή της ισχύς λήψης σήματος μειώνεται. Η απόκλιση της δέσμης θα πρέπει να είναι ελεγχόμενη έτσι ώστε ο δέκτης να μπορεί να πάρει την κατάλληλη ισχύ λήψης για να γίνει η μεταφορά των δεδομένων.



Εικόνα 5-16: Διάγραμμα SNR έναντι απόστασης για διαφορετικά σενάρια απόκλισης δέσμης. Πηγή: *Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles*.

Η παραπάνω εικόνα μας δείχνει ότι όσο η απόκλιση της δέσμης είναι πιο μικρή τόσο μεγαλύτερες τιμές SNR παρατηρούμε. Οι τιμές του SNR για το προτεινόμενο σύστημα στα τέσσερα χιλιόμετρα είναι 16.78dB όταν η απόκλιση της δέσμης είναι 2 mrad, 12.5dB όταν η απόκλιση της δέσμης είναι 4 mrad και 7.3 dB όταν η απόκλιση της δέσμης είναι 6 mrad.



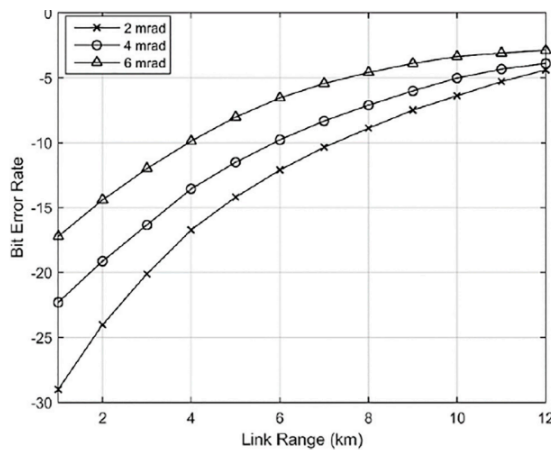
Εικόνα 5-17: Διάγραμμα ποιοτικού παράγοντα Q έναντι απόστασης για διαφορετικά σενάρια απόκλισης δέσμης. Πηγή: *Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles*.

Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε τον παράγοντα Q σε συνάρτηση με το μήκος της σύνδεσης, ο παράγοντας Q είναι μία μονάδα μέτρησης της απόδοσης των οπτικών σημάτων στον δέκτη. Παρατηρούμε από το διάγραμμα ότι ο παράγοντας Q στην περίπτωση που η απόκλιση της οπτικής δέσμης είναι 2 mrad είναι αρκετά ανεβασμένος και καλός σε σύγκριση με τις άλλες δύο περιπτώσεις. Στα 4 χιλιόμετρα σύνδεσης οι τιμές του παράγοντα Q παρουσιάζουν τις εξής τιμές, για 2 mrad είναι 28, για 4 mrad είναι 13,3 και για 6 mrad είναι 6,45. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η ανάλυση της απόδοσης του προτεινόμενου συστήματος για 3 διαφορετικές περιπτώσεις απόκλισης της οπτικής δέσμης. Βλέπουμε την απόδοση (δύναμη λήψης, SNR και παράγοντα Q) για 3 διαφορετικές περιπτώσεις μήκους του καναλιού επικοινωνίας, σε κάθε περίπτωση αναφέρονται οι τιμές για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις απόκλισης της οπτικής δέσμης.

Beam divergence (mrad)	Range of FSO link = 1 km			Range of FSO link = 2 km			Range of FSO link = 3 km		
	Received power (dBm)	Signal to noise ratio (dB)	Quality factor	Received power (dBm)	Signal to noise ratio (dB)	Quality factor	Received power (dBm)	Signal to noise ratio (dB)	Quality factor
2	-13.67	44.63	105	-19.74	33.34	56.36	-23.60	24.3	35.23
4	-19.44	41.80	63	-25.85	29.78	29	-29.45	20.2	18
6	-22.99	38.50	45	-29.21	25	16.89	-33.03	14.9	9.5

Πίνακας 5-5: Ανάλυση χαρακτηριστικών απόδοσης σχεδιασμένου συστήματος FSO για διαφορετικά σενάρια απόκλισης δέσμης. Πηγή: *Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles*.

Η επόμενη εικόνα μας δείχνει ένα διάγραμμα του BER σε συνάρτηση του μήκους της σύνδεσης για τα 3 διαφορετικά σενάρια απόκλισης της οπτικής δέσμης. Από το διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η απόδοση σύμφωνα με το BER υποβαθμίζεται όσο η απόσταση της σύνδεσης αυξάνεται. Επίσης η απόδοση σύμφωνα με την τιμή του BER χειροτερεύει καθώς η απόκλιση της οπτικής δέσμης μεγαλώνει από 2 mrad σε 4 mrad και 6 mrad. Για τιμή BER 10^{-9} η μέγιστη απόσταση που μπορεί να δημιουργηθεί σύνδεση είναι 8 χιλιόμετρα. Όταν το BER έχει αυτή την τιμή αν το σύστημα έχει μεγαλύτερη απόκλιση οπτικής δέσμης με τιμή 4 mrad τότε το μέγιστο μήκος της σύνδεσης είναι 6,6 χιλιόμετρα, και για απόκλιση 6 mrad η απόσταση που μπορεί να γίνει σύνδεση είναι 4,5 χιλιόμετρα.



Εικόνα 5-18: Διάγραμμα BER έναντι απόστασης για διαφορετικά σενάρια απόκλισης δέσμης. Πηγή: *Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles*.

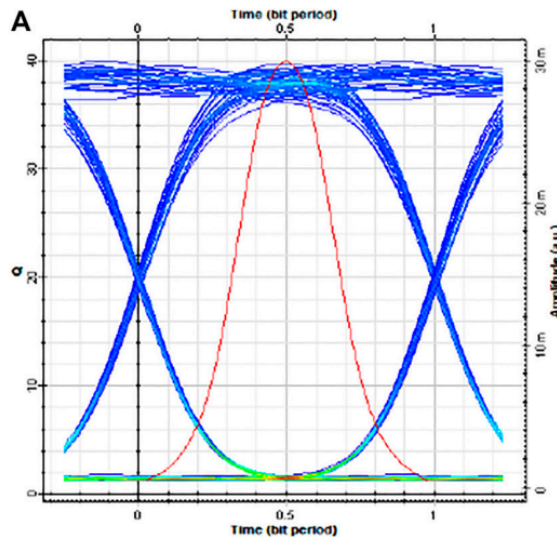
Στον πίνακα που ακολουθεί μπορούμε να δούμε την μέγιστη δυνατή απόσταση που μπορεί να δημιουργηθεί σύνδεση για 3 διαφορετικές περιπτώσεις απόκλισης της οπτικής δέσμης 2,4,6 mrad για τιμή BER 10^{-9} .

Beam divergence angle (mrad)	Maximum achievable link range (km)	Bit error rate
2	8	10^{-9}
4	6.6	10^{-9}
6	4.5	10^{-9}

Πίνακας 5-6: Μέγιστα επιτεύξιμα εύρη σύνδεσης του σχεδιασμένου συστήματος FSO για διαφορετικά σενάρια απόκλισης δέσμης. Πηγή: *Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles*.

Παρακάτω δίνονται τα 3 διαγράμματα eye για το προτεινόμενο σύστημα όταν το μήκος της σύνδεσης είναι 3 χιλιόμετρα, για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις απόκλισης

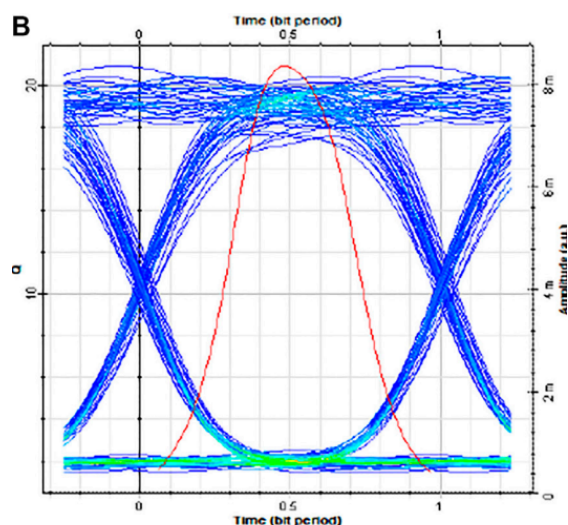
της οπτικής δέσμης. Ένα οφθαλμικό(eye) διάγραμμα είναι ένα μέτρο σύγκρισης της διασυμβολικής παρεμβολής μεταξύ των Bit του οπτικού σήματος. το σχήμα του οφθαλμικού διαγράμματος στην ιδανική περίπτωση είναι καθαρά ορθογώνιο και έχει μέγιστο άνοιγμα, από την άλλη το σχήμα παραμορφώνεται λόγω βλαβών καναλιών και οδηγεί σε εσφαλμένη ερμηνεία των πληροφοριών.



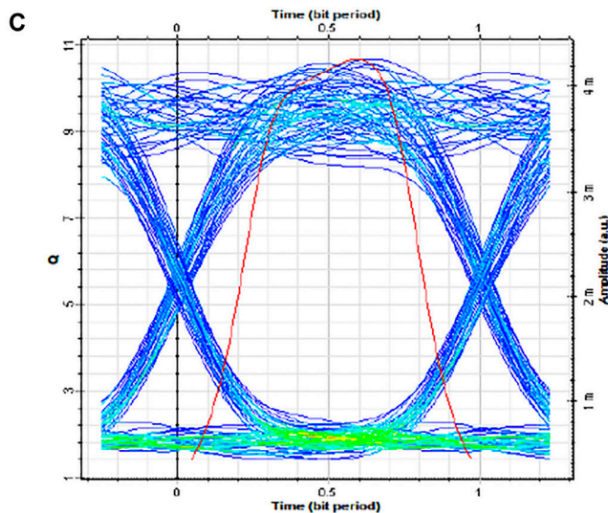
Εικόνα 5-19: Διάγραμμα eye σχεδιασμένου συστήματος FSO σε εμβέλεια ζεύξης 3 km για απόκλιση δέσμης 2 mrad. Πηγή: *Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles*.

Στην πρώτη εικόνα A βλέπουμε το οφθαλμικό διάγραμμα του συστήματος για εμβέλεια ζεύξης 3 χιλιόμετρα με απόκλιση οπτικής δέσμης 2 mrad. Σε αυτή την περίπτωση το διάγραμμα έχει ένδειξη μέγιστου ανοίγματος με λιγότερη επιδείνωση του συστήματος λόγω της μικρής απόκλισης της οπτικής δέσμης.

Παρατηρώντας τα άλλα 2 διαγράμματα τόσο για απόκλιση 4 mrad όσο και για απόκλιση 6 mrad, έχουμε και στις δύο περιπτώσεις υποβάθμισης



Εικόνα 5-20: Διάγραμμα eye σχεδιασμένου συστήματος FSO σε εμβέλεια ζεύξης 3 km για απόκλιση δέσμης 4 mrad. Πηγή: Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profile .



Εικόνα 5-21: Διάγραμμα eye σχεδιασμένου συστήματος FSO σε εμβέλεια ζεύξης 3 km για απόκλιση δέσμης 6 mrad. Πηγή: *Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles*.

Το παρόν σύστημα οπτικής επικοινωνίας έχει δύναμη 10 dbm τιμή που γενικά είναι ασφαλή για τους ανθρώπους οι οποίοι μπορεί να βρίσκονται ή και να εργάζονται κοντά σε αυτό το σύστημα. Το διαθέσιμο υλικό για την υλοποίηση τέτοιων συστημάτων πρέπει να χρησιμοποιεί κατάλληλα και με αναλογία την οπτική δύναμη καθώς και το εύρος ζώνης, αυτές οι δύο τιμές είναι άμεσα συνδεδεμένες μεταξύ τους και πολύτιμες για την μέτρηση της απόδοσης τέτοιων συστημάτων. Ωστόσο η υψηλή δύναμη μετάδοσης μπορεί να βοηθήσει στις απώλειες λόγω απόκλισης της οπτικής δέσμης, αλλά η δύναμη αυτή είναι περιορισμένη από την χωρητικότητα του καναλιού της σύνδεσης. Η απόκλιση η οποία εξετάζουμε σε αυτό το κεφάλαιο των 6mradείναι μία τυπική απόκλιση ενός τυπικού συστήματος οπτικής επικοινωνίας ελεύθερου χώρου.

Σε αυτό το κεφάλαιο σχεδιάστηκε ένα σύστημα οπτικής επικοινωνίας ελεύθερου χώρου το οποίο είναι πρακτικό σε σενάρια πραγματικής ζωής. Εξετάστηκαν τα χαρακτηριστικά του συστήματός και μετρήσαμε την απόδοση του σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις απόκλισης της οπτικής δέσμης. Η δύναμη μετάδοσης του συστήματος ορίστηκε στα 10 Dbm σε μήκος κύματος 1552,5 nm. Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η απόδοση μειώνεται όσο αποκλίνει περισσότερο από τον δέκτη η οπτική δέσμη η οποία κουβαλάει το σήμα που πρέπει να μεταδοθεί. Το δυνατό μήκος της σύνδεσης μπορεί να επηρεαστεί και αυτό από την αύξηση της απόκλισης της οπτικής δέσμης. Το μέγιστο μήκος της σύνδεσης όταν η τιμή του BER είναι 10^{-9} μπορεί να είναι από 8 έως 4.5 χιλιόμετρα ανάλογα την απόκλιση της δέσμης. Το σύστημα έχει καλή απόδοση για μικρή απόκλιση της οπτικής δέσμης, η απόδοση του συστήματος μπορεί να χειροτερέψει όταν παρουσιαστούν προβλήματα ευθυγράμμισης των δύο δορυφόρων. Το σύστημα θα πρέπει να εφοπλιστεί με ένα αυτόματο σύστημα στόχευσης, ευθυγράμμισης και παρακολούθησης προκειμένου να μειωθούν τα σφάλματα. Η απόκλιση της οπτικής δέσμης θα πρέπει να ελέγχεται ώστε να μεταφερθεί το σήμα με

αξιοπιστία. Τα ευρήματα της ανάλυσης αυτής μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συστάσεις για την εγκατάσταση οπτικών καναλιών ελεύθερου χώρου καθώς μπορεί να βοηθήσουν στην πρόβλεψη της απόδοσης του συστήματος και την εκτίμησή της για συνδέσεις ΟΕΕΧ με διαφορετικές τιμές απόκλισης της οπτικής δέσμης .

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια στον τομέα των επικοινωνιών. Θεωρείται μία από τις πιο γρήγορες επικοινωνίες με πολλά θετικά. Το μεγάλο εύρος ζώνης, η λεπτή οπτική δέσμη καθώς και το λιγοστό βάρος των εξαρτημάτων είναι κάποια από τα προτερήματα της τεχνολογίας. Ωστόσο η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει κάποια βασικά προβλήματα τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν για την επιτυχή σύναψη της δέσμης μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου. Αυτά τα προβλήματα είναι τα εξής η γωνιά στόχευσης, όπου στόχος είναι να χτυπήσει επαρκώς τον δέκτη με μία κατάλληλη τοποθεσία γνωστή ως χωροχρονική τοποθεσία, το φαινόμενο dopler αλλά και προβλήματα ευθυγράμμισης στόχευσης και παρακολούθησης καθώς και η δόνηση η οποία απομακρύνει την οπτική δέσμη από το σημείο του πομπού που πρέπει να χτυπήσει, τέλος οι θόρυβοι είναι βασική αιτία της εξασθένησης του σήματος, οι θόρυβοι μπορεί να υπάρχουν από διαφορετικές πηγές θορύβου. Σημαντικό ρόλο στην διασπορά του σήματος και στην εξασθένηση του παίζει το μέσο μετάδοσης όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι η ατμόσφαιρα και τα στρώματα τα οποία αποτελείται, αυτά τα στρώματα επηρεάζουν διαφορετικά την οπτική δέσμη που μεταφέρει την πληροφορία. Σε περίπτωση καθαρής ατμοσφαιρας το σήμα μπορεί να ταξιδέψει ευκολά χωρίς προβλήματα, όταν όμως τα καιρικά φαινόμενα και οι ατμοσφαιρικές διατάξεις αυξάνονται παρατηρείται μείωση της δύναμης λήψης του σήματος στον πομπό. Η ατμοσφαιρικές απώλειες και η απόκλιση της οπτικής δέσμης λόγω των τεράστιων αποστάσεων που διανύουν είναι δύο πολύ μεγάλες προκλήσεις για την επικοινωνία. Οι πομποδέκτες που χρησιμοποιούνται σε τέτοια συστήματα είναι εφοδιασμένοι με δυνατές οπτικές πηγές φωτός προκειμένου να μπορεί η οπτική δέσμη να ταξιδέψει το μεγάλο της ταξίδι, είναι εξοπλισμένοι με διάφορους διαμορφωτές που διαμορφώνουν το σήμα με διάφορα σχήματα και τεχνικές διαμόρφωσης. Επειδή ο πομποδέκτης κάνει την δουλειά και του πομπού και του δέκτη είναι εξοπλισμένος και με ειδικούς Φωτοανιχνευτές με φωτοδίοδους APD είτε φωτοδίοδους PIN ανάλογα τις απαιτήσεις του συστήματος καθώς και ειδικά συστήματα στόχευσης ευθυγράμμισης και παρακολούθησης. Βασικό ρόλο παίζουν οι οπτικοί ενισχυτές στο σύστημα καθώς βοηθάνε την οπτική δέσμη ενισχύοντας την να φτάσει στον κόμβο στόχο της. Γνωρίσαμε τις βασικές τοπολογίες της τεχνολογίας.

Στο πειραματικό μέρος της εργασίας μελετήσαμε μερικές οπτικές συνδέσεις ελεύθερου χώρου μεταξύ δορυφόρων συγκρίνοντας δύο είδη πηγών φωτός τις VCSEL και CW η χρήση πηγών φωτός VCSEL παρέχει καλύτερη απόδοση στις οπτικές

επικοινωνίες ελεύθερου χώρου δορυφόρων, χαρακτηριζόμενά από μεγαλύτερα Q-factor και χαμηλότερα BER και εξερευνήσαμε μορφές κωδικοποίησης NRZ και RZ σε ταχύτητες 10Gb/s. Παρατηρήσαμε ότι η απόδοση του συστήματος πέφτει καθώς η απόστασεις γίνονται μεγαλύτερες. Επίσης είδαμε ότι η NRZ τεχνική διαμόρφωσης είναι καλύτερη και πιο αποδοτική από την RZ. Επίσης σημαντική παρατήρηση η μείωση της απόδοσης με την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων.

Μελετήσαμε την σύγκριση τριών εξειδικευμένων προηγμένων τεχνικών διαμόρφωσης των CSRZ, DRZ, και MDRZ για ταχύτητες μετάδοσης πληροφορία 10 Gbps , 20 Gbps και 40 Gbps. Σημαντική η παρατήρηση της ανωτερότητα της MDRZ στα 40 Gbps, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες στην τεχνολογία οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου.

Στην συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση της διάχυσης της οπτικής δέσμης στην απόδοση των συστημάτων OEEX, επικεντρωθήκαμε στον τρόπο με τον οποίο ο έλεγχος της γωνίας διάχυσης μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος. Ο προσεκτικός έλεγχος της γωνίας διάχυσης κατά την εγκατάσταση είναι κρίσιμος για να αποφευχθεί η δραστική μείωση της ισχύος του σήματος του συστήματος OEEX κατά τη μετάδοση λόγω της διάχυσης του σήματος. Παρατηρήσαμε ότι η απόδοση μειώνεται όσο η οπτική δέσμη αποκλίνει περισσότερο από τον δέκτη. Παρατηρήσαμε επίσης ότι το μήκος της σύνδεσης για συγκεκριμένο BER μπορεί να είναι διαφορετικό ανάλογα την απόκλιση της δέσμης από τον δέκτη. Καταλήγουμε ότι ένα σύστημα OEEX έχει καλή απόδοση για μικρή απόκλιση της οπτικής δέσμης, η απόδοση του συστήματος μπορεί να χειροτερέψει όταν παρουσιαστούν προβλήματα ευθυγράμμισης των δύο δορυφόρων, για την μείωση των σφαλμάτων προτείνουμε εφοδιασμό των συστημάτων με αυτόματα συστήματα στόχευσης, ευθυγράμμισης και παρακολούθησης προκειμένου να μειωθούν τα σφάλματα. Για μελλοντική εργασία και έρευνα θα μπορούσε να σχεδιαστεί ένα πρωτόκολλο επιπέδου σύνδεσης το οποίο κρίνεται απαραίτητο διότι οι κινητές συνδέσεις παρουσιάζουν ένα εξαιρετικά διακοπτόμενο μοτίβο συνδεσιμότητας επίσης κάποιες προχωρημένες μέθοδοι για την καθοδήγηση του λέιζερ καθώς και σχεδιασμό βελτιωμένων αλγόριθμων δρομολόγησης[32] .

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Satellite Communications System: Applications, Vyacheslav Tuzlukov , Won-Sik Yoon and Yong Deak Kim
2. <https://www.satellitetoday.com/content-collection/ses-hub-geo-meo-and-leo/>
3. Συστήματα επικοινωνιών με οπτικές ίνες, Govind P.Agrawal
4. Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques, H. Kaushal and G. Kaddoum.
5. Free Space Optics for Next-Generation Satellite Networks ,Aizaz U. Chaudhry and Halim Yanikomeroglu.
6. Free Space Optical networks for Ultra Broadband Services , Stamatios V. Kartalopoulos.
7. Simulative Performance Evaluation of a Free Space Optical Communication Link Operating at 1550 nm using Different Modulation Formats, Salwinder Singh, Karamdeep Singh, Shivinder Devra

8. Free Space Optics: Current Applications and Future Challenges Aditi Malik and Preeti Singh.
9. A Review on Inter-Satellite Links Free Space Optical Communication Gayatri Tiwari and Ram Chandra Singh Chauhan.
10. A SYSTEM DESIGN OF AN OPTICAL WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM FOR CUBESATS By SESHUPRIYA REDDY ALLURU
11. Basic Concept of Free Space Optics Communication (FSO): An Overview Piyush Singhal, Priyanka Gupta, Prashant Rana.
12. The Atmosphere, F.K.Lutgens , E.J. Tarbuck.
13. Analysis of Free Space Optics Optics Development J. Mikolajczyk.
14. A Survey of Opportunities for Free Space Optics in Next Generation Cellular Networks, Frédéric Demers, Halim Yanikomeroglu and Marc St-Hilaire.
15. Introduction to DWDM technology:Data in rainbow , S.V.Kartalopoulos
16. Laser Beam Pathway Design and Evaluation for Dielectric Laser Acceleration ,Karwan Rasouli.
17. Gaussian , , Hermite -Gaussian , and Laguerre-Gaussian beams : A primer , F.Pampaloni , J.Enderlein
18. A tutorial on Gaussian beam optics , Newport
19. Understanding Optical Communications, Harry J. R. Dutton.
20. Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective Mohammad Ali Khalighi, Senior Member, IEEE, and Murat Uysal
21. Laser Inter-Satellite Links technology Jianjun zhang ,jing li.
22. Review of Modulation and Performance Analysis Methods for FSO Communication Systems, Jeremiah Oluwatosin Bandele.
23. A Review on Inter-Satellite Optical Wireless Communication, Abhishek Sharma, Vishal Kumar, Vipin Gupta

24. Analysis of inter-satellite free-space optical link performance considering different system parameters S. Kaur.

25. Performance of satellite to ground communications link between Artemis and the Optical Ground Station, A.Alonso , M.Reyes, Z.Sodnik.komple

26. Acquisition,Tracking and Pointing, Hemani Kaushal, Subrat Kar, Vk jain

27. Acquisition and Pointing Control for Inter-Satellite Laser Communications M. GUELMAN A. KOGAN A. KAZARIAN A. LIVNE M. ORENSTEIN

28. <https://techmaniacs.gr/lipsi-minymatos-me-leizer-sti-gi-apo-apostasi-16-000-000-chiliometron/?fbclid=IwAR3PWLmsscOTTMKFi0xXL6siTY0-KHUvy5HFrIsq8NKYBZCjZlhR1G-Lle8&mibextid=xfxF2i>
29. Design and Analysis of Commercially Viable Free-Space Optical Communication Link for Diverse Beam Divergence Profiles. Harjeevan Singh, Rajan Miglani, Nitin Mittal, Gurjot Singh Gaba, Mehedi Masud and Sultan Aljahdali.
30. Performance enhancement of transceiver system based inter satellite optical wireless channel (IS-OWC) for ultra long distances Mahmoud M. A. Eid, Fatma Mohammed Aref Mahmoud Houssien, Ahmed Nabih Zaki Rashed and Abd El-Naser A. Mohammed.
31. Ultra High Capacity Inter-Satellite Optical Wireless Communication System Using Different Optimized Modulation Formats A. Alipour A. Mir A. Sheikhi.
32. Free Space Optical Communication for InterSatellite Link: Architecture, Potentials and Trends Guanhua Wang, Fang Yang, Jian Song and Zhu Han, Fellow,