

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΟΣ FREE SPACE OPTICS
ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΗ”**

ΡΥΣΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Επιβλέπων καθηγητής
Λιοδάκης Γεώργιος, Καθηγητής Εφαρμογών

ΜΑΙΟΣ 2012

Implementation of a Free Space Optics transceiver

Υλοποίηση ενός Free Space Optics πομποδέκτη

ABSTRACT

Free-Space Optical (FSO) communication is an optical communication technology that uses light propagating in free space to transmit data for telecommunications or computer networking. The rationale for this thesis was to exploit FSO technology for 100Mbps Ethernet networking of two computers through an appropriate network media converter.

In particular, all the design and implementation issues and components used for the FSO transceiver and the media converter are presented in detail (VCSEL laser, GaAs PIN photodiode, VCSEL driver circuit, limiting receiver amplifier and media converter).

Furthermore, various aspects of FSO communication engineering (air transmission of light signals, security concerns, custom design aspects, performance issues, etc.) are exposed and discussed.

Τεχνολογία Free Space Optics

Περιεχόμενα:

Κεφάλαιο 1. Free Space Optics: Γενικά χαρακτηριστικά και επιδόσεις

- 1.1. Είδη “Last Mile” και “Backbone” ζεύξεων
- 1.2. Προέλευση, ορισμός και περιοχή ενδιαφέροντος των FSO
- 1.3. Χαρακτηριστικά
- 1.4. Αδειοδότηση

Κεφάλαιο 2. Μετάδοση στον αέρα:

- 2.1. Ο ρόλος της ατμόσφαιρας στις Ασύρματες ζεύξεις
- 2.2. Καιρικές συνθήκες και συνέπειες
- 2.3. Φαινόμενα διάθλασης του φωτός, συνέπειες και λύσεις
- 2.4. Ζώνες συχνότητων ιδανικές για μετάδοση στον αέρα
- 2.5. Απαιτήσεις ισχύος

Κεφάλαιο 3. Ασφάλεια

- 3.1. Φυσική ασφάλεια και κανονισμοί
- 3.2. Ασφάλεια συστήματος

Κεφάλαιο 4. Υλοποιήσεις Ζεύξεων FSO

- 4.1. Εμπορικά συστήματα
- 4.2. Αυτοσχέδια συστήματα και το Twibright – Ronja Project στην Τσεχία
- 4.3. Είδη Διασύνδεσης

Κεφάλαιο 5. Σύστημα FSO στα 100Mbps

- 5.1. Βασικά χαρακτηριστικά
- 5.2. Optical Interface
- 5.3. Ethernet Interface
- 5.4. Media Converter
- 5.5. Υλικό της κατασκευής - Κοστολόγιο

Παράρτημα

Αναφορές - References

Κεφάλαιο 1: Γενικά χαρακτηριστικά και επιδόσεις

1.1. Είδη Last Mile και Backbone ζεύξεων

Το Internet ένα πολύ μεγάλο δίκτυο που αποτελείται από μικρότερα κ.ο.κ. Μέσα σε αυτό το σύνολο από δίκτυα, μικρά και μεγάλα, εμφανίζεται πληθώρα ορολογίας για το κάθε επιμέρους κομμάτι και λειτουργίας του. Οι όροι “Last Mile” και “Backbone” εμφανίζονται και αυτοί για την περιγραφή δύο διαφορετικών ειδών ζεύξεων στο μεγάλο αυτό δίκτυο.

Ο όρος “**Last Mile**” σημαίνει τη σύνδεση μεταξύ ενός τοπικού δικτύου (από έναν και πάνω χρήστες) και ενός μεγαλύτερου δικτύου π.χ. μητροπολιτικό δίκτυο. Αυτή η σύνδεση μπορεί να είναι μεταξύ του τοπικού παροχέα Internet και ενός δομημένου δικτύου σε ένα μεγάλο κτήριο ή κτιριακό συγκρότημα, αλλά και στο σπίτι ή στο γραφείο του καθένα.

Ο όρος “**Backbone**” σημαίνει τη ραχοκοκαλιά ενός μεγαλύτερου εύρους δικτύου, δηλαδή ένα κανάλι που συνδέει δυο δίκτυα μεταξύ τους.

Οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, ασφάλεια, ευελιξία και κόστος, και στα δύο είδη ζεύξεων κυμαίνονται από μια κοινή, απλή σύνδεση PSTN μέσω του τηλεφωνικού δικτύου, έως τη σύνδεση μεταξύ ολόκληρων Πόλεων ή ακόμα και Χωρών μέσω ενός διαύλου πολλαπλών φυσικών συνδέσεων οπτικών ινών που καλύπτει ένα τεράστιο εύρος ζώνης.

Η υλοποίηση της καθεμίας από τις πολλές αυτές φυσικές συνδέσεις μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, όπως:

- Μέσω χάλκινων καλωδίων
- Μέσω οπτικών ινών
- Ασύρματα μέσω επίγειων μικροκυματικών ζεύξεων με κεραιές
- Ασύρματα μέσω δορυφόρου(-δορυφόρων)
- Μέσω Ασύρματων Οπτικών Ζεύξεων (Free Space Optics)

Η ζεύξη μέσω χάλκινων καλωδίων είναι ιδανική για χαμηλού κόστους συνδέσεις, που απευθύνεται στον περισσότερο κόσμο σαν σύνδεση PSDN, ISDN, xDSL και μισθωμένων γραμμών, μέσω του υπάρχοντος τηλεφωνικού δικτύου, αλλά και σαν cable connection μέσω ομοαξονικών καλωδίων, όπου οι απαιτήσεις είναι σχετικά χαμηλές. Χρησιμοποιούνται κατά κόρον για τις Last Mile ζεύξεις απο το εκάστοτε κέντρο στον τελικό χρήστη.

Παλαιότερα εμφανιζόταν και σαν Backbone ζεύξεις μεταξύ κέντρων, αλλά πλέον έχουν αντικατασταθεί απο ζεύξεις οπτικών ινών.

Η ζεύξη Οπτικών Ινών είναι η μεγαλύτερη σε εύρος ζώνης, ασφάλεια, και ποιότητα σύνδεσης (QoS). Επίσης είναι η ακριβότερη, δυσκολότερα υλοποιήσιμη, και καθόλου ευέλικτη αφού η διαδικασία τοποθέτησης και συντήρησης της οπτικής ίνας, περιλαμβάνεται στο κόστος, επιδρά απόλυτα στο χρόνο υλοποίησης της σύνδεσης, και άπαξ και η φυσική σύνδεση υλοποιηθεί, είναι αδύνατη η αλλαγή της τοπολογίας της. Η βασική υλοποίηση μιας ζεύξης οπτικών ινών βρίσκεται σε Backbone ζεύξεις να

συνδέει μέχρι και δίκτυα ολόκληρων ηπείρων, διαμέσου υποθαλάσσιων πολύκλωνων καλωδίων οπτικών ινών μεταφέροντας δεδομένα σε ρυθμούς πολλαπλών Terrabits ανά δευτερόλεπτο. Υλοποιείται όμως και σαν Last Mile ονομαζόμενη Fiber to the Curb και Fiber to the Home/Office.

Η Ασύρματη μικροκυματική ζεύξη (σε συχνότητες από τα «Μεσαία» μέχρι δεκάδες GHz) καλύπτοντας ένα μεγάλο εύρος ζώνης από μερικά Mbps έως και 2,5 Gbps (Σύστημα Airfiber). Τέτοιες συνδέσεις συναντώνται παντού, από τα κινητά τηλέφωνα μέχρι Backbone μεταξύ βουνών για τη σύνδεση κεραιών κινητής τηλεφωνίας, και μεταξύ κτιριακών συγκροτημάτων με γραφεία και ανάγκες για εύρος ζώνης.

Ο μεγαλύτερος περιορισμός αυτών των συνδέσεων βρίσκονται στο γεγονός ότι η εκπεμπόμενη ακτινοβολία τείνει να καταλαμβάνει περισσότερο χώρο απ' όσο χρειάζεται. Οι κεραιές χαρακτηρίζονται από ένα λοβό εκπομπής, που στην καλύτερη περίπτωση έχει ένα άνοιγμα μερικών μοιρών. Επίσης η αντανάκλαση της ακτινοβολίας σε πολλές επιφάνειες, προκαλεί τη διάχυσή της στο χώρο. Έτσι ξεκινά το γενικότερο πρόβλημα του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου.

Στις ασύρματες ζεύξεις που υλοποιούν συνδέσεις «ραχοκοκαλιάς» δικτύων ανήκουν και οι δορυφορικές ζεύξεις οι οποίες υλοποιούνται σε μόνιμη βάση με κάποιες εξαιρέσεις σε απόμακρα μέρη όπου δεν υπάρχει άλλος τρόπος επικοινωνίας, όπως βουνά και μικρά νησιά που δεν αξίζει η σύνδεση με οπτικές ίνες ή η μικροκυματική επίγεια ζεύξη δεν είναι εφικτή.

Το εύρος ζώνης των συνδέσεων αυτών είναι μεγάλο, αλλά και η καθυστέρηση μεγάλη, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές και υπηρεσίες όπου η καθυστέρηση δεν έχει σημαντικό ρόλο.

Στην κατηγορία των ασύρματων μικροκυματικών ζεύξεων ανήκει και τεχνολογία εκπομπής σε μήκη κύματος της τάξης των χιλιοστών (millimeter wave radio) ή 71-76GHz και 81-86GHz. Η τεχνολογία αυτή φέρει την εμπορική ονομασία WiFiber της Gigabeam η οποία παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα απέναντι στις μικροκυματικές ζεύξεις και πολλές ομοιότητες με την τεχνολογία των Free Space Optics ειδικότερα σε θέματα ρυθμών μετάδοσης και QoS.

Τα συστήματα Ασύρματων Οπτικών Επικοινωνιών ή Free Space Optics, ή Wireless Optics, έχουν αντίστοιχο εύρος ζώνης και καθυστέρηση με αυτά μιας σύνδεσης με μία οπτική ίνα, αφού το σύστημα αυτό είναι πρακτικά μια φυσική Οπτική σύνδεση, όπου για κανάλι, αντί για οπτική ίνα, έχουμε το χώρο, που για επίγειες συνδέσεις το κανάλι είναι η ατμόσφαιρα. Η τεχνολογία Free Space Optics, μπορεί να περιγραφεί σαν μια ασύρματη ζεύξη μεταφοράς δεδομένων χρησιμοποιώντας σαν μέσο την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κοντά, αλλά και εντός του οπτικού φάσματος συχνοτήτων.

1.2. Προέλευση, ορισμός και περιοχή ενδιαφέροντος των FSO

Ιστορικά, η πρώτη οπτική ζεύξη μεταφοράς δεδομένων υλοποιήθηκε τον προηγούμενο αιώνα, από τον Alexander Graham Bell, μάλιστα πριν παρουσιάσει το τηλέφωνο, στη μορφή του φωτοφώνου.

Ήταν μια συσκευή όπου μετέτρεπε τη φωνή σε ηλεκτρικό σήμα που διαμόρφωνε μια δέσμη φωτός, μεταφέροντας τη φωνή γύρω στα 200 μέτρα μακριά. Δεν βγήκε ποτέ στην παραγωγή, αλλά είναι η βάση όλων των ασύρματων οπτικών ζεύξεων. Μετέπειτα, τα τελευταία 50 περίπου

χρόνια υλοποιούνται τέτοιες ζεύξεις, ξεκινώντας από στρατιωτικές εφαρμογές και σταδιακά με την εξέλιξη της τεχνολογίας αυτής, εμφανίστηκε και σε εμπορικές εφαρμογές.

Η αρχή λειτουργίας ενός συστήματος Free Space Optics, ορίζεται από την εκπομπή και λήψη διαμορφωμένου φωτός, μέσω της ατμόσφαιρας μεταξύ δυο σημείων (point to point επικοινωνία). Αναλυτικότερα, αποτελείται από ένα ζεύγος συστημάτων A και B που αναλαμβάνουν την υλοποίηση ενός οπτικού φυσικού καναλιού διαμέσου της ατμόσφαιρας, μέσω του οποίου διασυνδέουν δυο εκ των προτέρων διαφορετικά δίκτυα. Τα δεδομένα από το δίκτυο του συστήματος A, εφόσον απαιτείται, αποδιαμορφώνονται από το ένα υποσύστημα του, και διαμορφώνονται ξανά από ένα δεύτερο υποσύστημα, συνήθως σε διαμόρφωση Έντασης (IM - Intensity Modulation), για τη μετάδοσή τους στο σύστημα B, όπου αυτό αναλαμβάνει την αντίστροφη διαδικασία για τη μετάδοση των δεδομένων στο δίκτυο που είναι αυτό συνδεδεμένο.

Οι ζεύξεις τεχνολογίας Free Space Optics είναι ιδανικές για τη διασύνδεση δυο δικτύων όπου απαιτείται μεγάλο εύρος ζώνης, μηδενικές παρεμβολές από και προς άλλα συστήματα ασύρματων τηλεπικοινωνιών, αυξημένη ασφάλεια μετάδοσης των δεδομένων, χαμηλή έως μηδενική καθυστέρηση, και η εγκατάσταση οπτικών ινών για τη ζεύξη αυτή είναι ανέφικτη λόγω κόστους, χρόνου, ή ιδιομορφίας του τόπου. Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή ενδιαφέροντος καλύπτει εφαρμογές όπως:

- Last Mile ζεύξεις από μερικά μέτρα έως λίγα χιλιόμετρα και ρυθμούς από 1Mbps έως 2.5Gbps, ενώ αναμένεται στο μέλλον να εμφανιστούν συστήματα FSO με ρυθμούς της τάξης των 10Gbps και 40/46Gbps με χρήση πολύπλοκων τεχνικών διαμόρφωσης.
- Εφεδρικές ζεύξεις υποστήριξης μόνιμων ζεύξεων οπτικών ινών σε περίπτωση βλάβης ή περιορισμένης διαθεσιμότητας.
- Backbone ζεύξεις μεταξύ σταθμών κινητής τηλεφωνίας ειδικότερα όπου υλοποιείται επικοινωνία 3G/4G λόγω των μεγάλων ρυθμών μεταφοράς δεδομένων.
- Προσωρινές ζεύξεις σε περίπτωση βλάβης ή αιφνίδιας απαίτησης ευρυζωνικής ζεύξης, λόγω του μικρού χρόνου εγκατάστασης.
- Διασύνδεση πολλαπλών μικρότερων τοπικών δικτύων (campus networks).
- Δύσκολα υλοποιήσιμες ζεύξεις όπως πάνω από κεντρικούς δρόμους συχνής κυκλοφορίας, γραμμές τρένου, ποτάμια, και γενικότερα δύσβατες και απομακρυσμένες περιοχές.
- Ζεύξεις σε περιοχές που απαγορεύεται η εκπομπή RF και μικροκυματικής ακτινοβολίας.

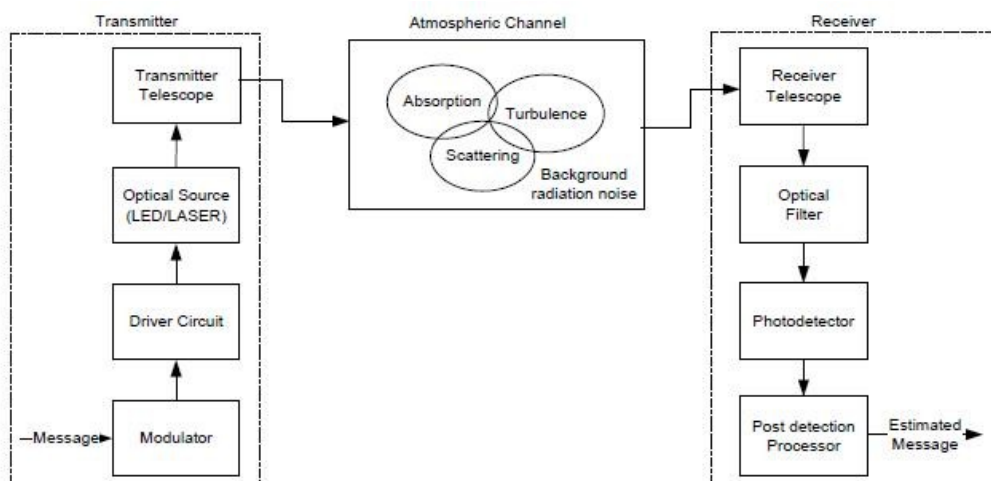
Συχνές υλοποιήσεις συναντώνται σε ζεύξεις μεταξύ καταστημάτων τραπεζών, μεταξύ συμπλεγμάτων γραφείων, σε αεροδρόμια όπου απαγορεύεται η εκπομπή μεγάλου φάσματος συχνοτήτων, σε ζεύξεις μεταξύ αναμεταδοτών για την αποφυγή παρεμβολών, και σε στρατιωτικές εφαρμογές. Επίσης χρησιμοποιείται και για την επικοινωνία μεταξύ δορυφόρων.

Το κόστος μιας ασύρματης οπτικής ζεύξης είναι κατά πολλές φορές χαμηλότερο από αυτό της υλοποίησης μιας ζεύξης οπτικών ινών, αλλά και πολλές φορές μεγαλύτερο από μια μικροκυματική ζεύξη αντίστοιχων επιδόσεων εύρους ζώνης. Το πραγματικό κόστος σε ολοκληρωμένες μελέτες προϋποθέτει και τον υπολογισμό συντήρησης, την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service, QoS) το κόστος στη περίπτωση απώλειας της ζεύξης, και άλλων παραγόντων που κρίνουν τελικά εάν μια τέτοια ζεύξη είναι εντός του προϋπολογισμού κόστους ή όχι. Αντικειμενικά το κόστος του εξοπλισμού κυμαίνεται σε μερικές χιλιάδες ευρώ, ανάλογα των χαρακτηριστικών.

Υπάρχουν αρκετές διαφοροποιήσεις σε τέτοια συστήματα, παρότι η αρχή είναι ίδια, όπως στο αν το ζεύγος συστημάτων είναι ενεργό ή παθητικό, αν και σε ποιο στάδιο του φυσικού επιπέδου στο εκάστοτε δίκτυο επεμβαίνει, το μήκος κύματος και την ισχύ του φωτός που μεταδίδει, τη διαμόρφωση αυτού, αλλά ακόμη και διαφορές στον τρόπο εκπομπής στο επίπεδο μορφοποίησης του κάθε παλμού που μεταδίδεται. Κάθε τέτοια διαφοροποίηση εκμεταλλεύεται και διαφορετικές παραμέτρους ανάλογα της συνθήκης της ατμόσφαιρας και του περιβάλλοντος στο εκάστοτε σημείο που υλοποιείται η ζεύξη. Σήμερα, εμπορικές και μη εφαρμογές Free Space Optics ζεύξεων φέρουν κάποια χαρακτηριστικά, αποτέλεσμα έρευνας και σταδιακής βελτίωσης, σύγχρονα της τεχνολογίας, ειδικότερα στον τομέα της οπτοηλεκτρονικής, και αποτελούν βάση σε όλα τα συστήματα Free Space Optics.

1.3. Χαρακτηριστικά

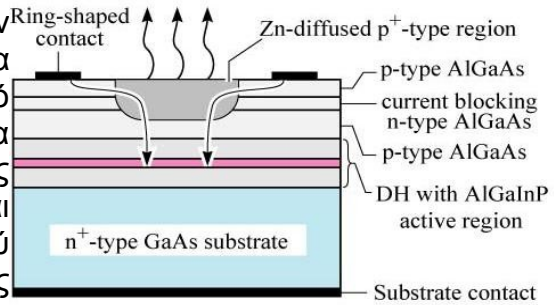
Γενικότερα, όλα τα συστήματα Free Space Optics χαρακτηρίζονται από πραγματική αμφίδρομη επικοινωνία, φέροντας για πομπό ένα ή περισσότερα οπτοηλεκτρονικά εξαρτήματα, τεχνολογίας LED ή LASER, και για δέκτη μια φωτοδίοδο συνήθως τύπου PIN ή APD, αντίστοιχα συνοδευόμενα με συστήματα οδήγησης και ενίσχυσης. Βασικό διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος αποτυπώνεται στην εικόνα 1.



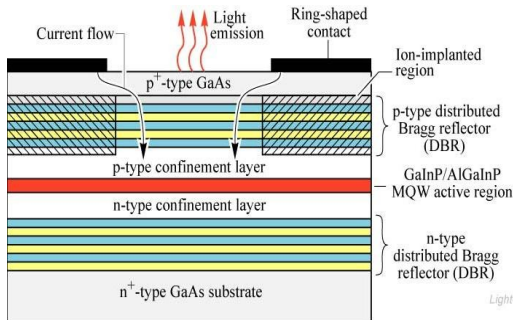
Εικόνα 1: Βασικό διάγραμμα συστήματος Free Space Optics

Όσον αφορά τον πομπό, η επιλογή ανάμεσα σε LED και LASER είναι αποτέλεσμα μελέτης της ζεύξης προς υλοποίησης, και ανάλογα τις απαιτήσεις και ιδιότητες της περιοχής υλοποίησης λαμβάνονται με ανάλογο βάρος και τα προτερήματα του πομπού LED και LASER.

Ξεκινώντας με την κατηγορία των LED – Light Emitting Diode (εικόνα 2), βασικό τους χαρακτηριστικό είναι η εκπομπή φωτός από μια ευρεία επιφάνεια, σχεδόν προς όλες τις κατευθύνσεις και εκπέμποντας σε ένα σχετικά ευρύ φάσμα μήκους κύματος, της τάξης των μερικών δεκάδων νανομέτρων. Επομένως η ακτινοβολία που εκπέμπει το LED είναι μη συνεκτική ή ασύμφωνη και μη μονοχρωματική. Επίσης η απόδοση του LED στη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε ακτινοβολία είναι περίπου 10%.



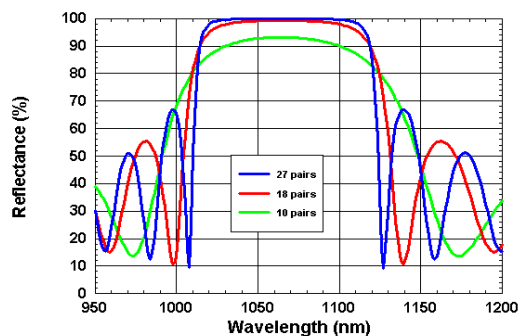
Εικόνα 2: Δομή ενός ημιαγωγού AlGaInP/GaAs LED



Εικόνα 3: Δομή ενός GaInP/AlGaInP/GaAs MQW (Multiple Quantum Well) Resonant Cavity LED όπου η κατεύθυνση του ρεύματος περιορίζεται στο κέντρο της ενεργού περιοχής.

Στην οικογένεια των LED ανήκουν και τα RCLED – Resonant Cavity LED (εικόνα 3), τα οποία διαφέρουν από τα συμβατικά LED στην αρχιτεκτονική τους, ενσωματώνοντας μια κάθετη στην επιφάνεια εκπομπής μια κοιλότητα που περικλείεται από δυο ανακλαστικές επιφάνειες κατανομής Bragg η μία πλήρως ανακλαστική και η δεύτερη που βρίσκεται στην επιφάνεια εκπομπής, μερικώς ανακλαστική, διαμορφώνοντας ένα χώρο ταλάντωσης της ακτινοβολίας, θυμίζοντας τη λειτουργία των LASER, και ανάμεσά τους η ενεργός περιοχή του ημιαγωγού LED.

Οι ανακλαστικές επιφάνειες τύπου κατανομής Bragg, αποτελούνται από αλληπάλληλες περιοχές υλικών διαφορετικού δείκτη διάθλασης, όπου η ανακλαστικότητα τους μεγιστοποιείται σε ένα μήκος κύματος, κοντά σε τέσσερις φορές το πάχος του κάθε στρώματος ($\lambda/4$), και φθίνει με την απόκλιση από το κεντρικό μήκος κύματος. Οι αλληπάλληλες αυτές εναλλαγές υλικών δημιουργούν όχι μόνο μια εξαιρετικά ανακλαστική επιφάνεια, αλλά ένα οπτικό ανακλαστικό φίλτρο, τα χαρακτηριστικά του οποίου μεταβάλλονται από τον αριθμό των



Εικόνα 4: Απόκριση οπτικού ανακλαστικού φίλτρου τύπου κατανομής Bragg

μεταβάλλονται από τον αριθμό των

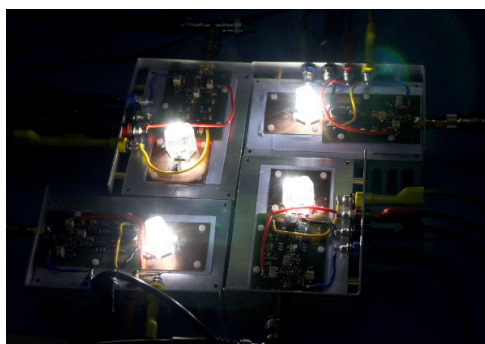
ζευγών των στρωμάτων και το πάχος αυτών όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4. Με το σχεδιασμό αυτό επιτυγχάνονται επιδόσεις που πλησιάζουν αυτές των LASER, όπως υψηλή κατευθυντικότητα, περισσότερο συνεκτική ακτινοβολία στο χώρο, και περισσότερο “μονοχρωματική” ακτινοβολία συγκριτικά με απλά LED.

Σημειώτέο ότι η ακτινοβολία από το RCLED δεν είναι συμφασική όπως στα LASER, και είναι αποτέλεσμα αυθόρμητης εκπομπής φωτονίων. [1],[3]

Απέναντι στα LASER, παρουσιάζει μεγαλύτερη ανοχή σε θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, και έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Αλλά ακόμη τα και τα RCLED, έχουν περιορισμένο εύρος ζώνης μεταφοράς δεδομένων σε σχέση με τα LASER, λιγότερο από 1Gbps.

Σημειώτέο, ότι με ειδικά συστήματα οδήγησης, πειραματικά, έχει επιτευχθεί μετάδοση μέσω πλαστικής οπτικής ίνας μήκους 50m με ρυθμό 1,25Gbps, και αρκετά ανοιχτό διάγραμμα οφθαλμού.

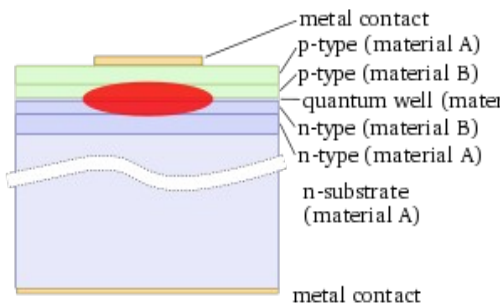
Αναφορικά, τα LED έχουν σημαντικό ρόλο σε μία σχετικά νέα τεχνολογία, VLC – Visible Light Communication που ανήκει και αυτή στα συστήματα Free Space Optics, και όχι τόσο διαδεδομένη, τα συστήματα Li-Fi, όπου πολλαπλά LED εκπέμπουν διάχυτη ακτινοβολία σχεδόν όλου του ορατού φάσματος σε ένα χώρο και για τη μετάδοση πληροφοριών εκμεταλλεύονται και όλες τις πιθανές ανακλάσεις της στο χώρο, και φυσικά την πολυπλεξία μήκους κύματος, αφού ο δέκτης αποτελείται από συστοιχία φωτοδιόδων



Εικόνα 5: Σύστημα Ασύρματης Οπτικής επικοινωνίας Optical WLAN με ρυθμούς έως 800Mbps από ερευνητές του Heinrich Hertz Institute στο Βερολίνο [4]

ευαίσθητες σε διαφορετικά μήκη κύματος, ανιχνεύοντας η κάθε μία τις διακυμάνσεις στο μήκος κύματος που εστιάζει. Επειδή η εκπομπή είναι σε όλο σχεδόν το οπτικό φάσμα και με σχετικά μεγάλους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, το ανθρώπινο μάτι αναγνωρίζει την ακτινοβολία αυτή σαν λευκό φως, και ιδανικά στο μέλλον επιζητούν αντίστοιχη ευελιξία με το γνωστό Wi-Fi, απλά αντικαθιστώντας τον κοινό φωτισμό με συστήματα VLC, όπως το πειραματικό μοντέλο που απεικονίζεται στην εικόνα 5. [4],[5] Από την οικογένεια των LASER, στα συστήματα Free Space Optics χρησιμοποιούνται τα συμβατικά ημιαγωγά Edge-Emitting LASERs (εικόνα 6), και τα VCSEL – Vertical Cavity Surface Emitting Lasers (εικόνα 7). Η αρχή λειτουργίας των ημιαγωγών laser διαφέρει από τα LED στο γεγονός ότι περνώντας ένα συγκεκριμένο κατώφλι (lasing threshold) ρεύματος τα παραγόμενα φωτόνια που ταλαντώνουν στην εσωτερική κοιλότητα του laser συνεισφέρουν σε επιπλέον διέγερση του ενεργού μέσου στο εσωτερικό του με αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων φωτονίων όμοιων και σε φάση με αυτά που τα δημιούργησαν. Έτσι περνώντας το κατώφλι αυτό ξεκινά η διαδικασία οπτικής ενίσχυσης, στην οποία βασίζεται η λειτουργία του laser, η ονομασία των οποίων ουσιαστικά είναι τα ακρώνυμα της διαδικασίας αυτής – Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation. Το αποτέλεσμα είναι μονοχρωματική συνεκτική και

συμφασική ακτινοβολία. Τα Edge-Emitting LASERs έχουν μια δομή όπου η κοιλότητα ταλάντωσης και ενίσχυσης της ακτινοβολίας βρίσκεται ανάμεσα σε ημιαγωγά p και n επίπεδα, και η ακτινοβολία εξέρχεται από τη μία πλευρά του ημιαγωγού. Τα p και n επίπεδα τοποθετούνται σε ζεύγη διαφορετικού δείκτη διάθλασης ώστε να περιορίζουν την ακτινοβολία στο εσωτερικό της κοιλότητας αποδοτικότερα. Το πάχος της περιοχής ανάμεσα στα p και n ημιαγωγά υλικά καθώς και το μήκος της κοιλότητας καθορίζουν το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. λόγω του ότι η ακτινοβολία περιορίζεται σε μια πολύ λεπτή περιοχή αλλά μεγάλου πλάτους, στην έξοδο της έχει ελλειπτική μορφή με μεγάλη



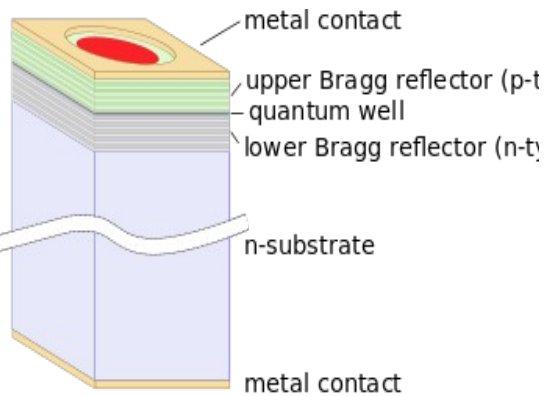
Εικόνα 6: SCH - Separate Confinement Heterostructure laser

διασπορά στον x άξονα και χαμηλή στον y άξονα, που γενικότερα δεν προτείνεται ή απαιτεί μορφοποίηση σε κυκλική με διορθωτικά οπτικά μέσα. Τα περισσότερα ημιαγωγά Edge-Emitting LASERs σήμερα είναι σχεδιασμένα καθ' αυτό τον τρόπο και ονομάζονται SCH - Separate confinement heterostructure LASERs.

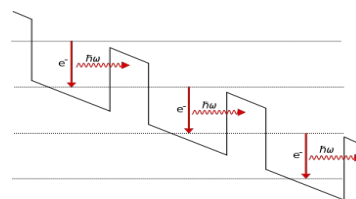
Τα ημιαγωγά LASER τύπου VCSEL σχεδιάζονται έτσι ώστε η κοιλότητα ταλάντωσης της ακτινοβολίας να βρίσκεται ανάμεσα σε ανακλαστήρες τύπου κατανομής Bragg και κάθετα στα επίπεδα των ημιαγωγών υλικών όπου η ακτινοβολία εξέρχεται από την επιφάνεια του τελευταίου επιπέδου του ολοκληρωμένου.

Αποτέλεσμα της αρχιτεκτονικής αυτής, η μορφή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας να κυκλική και μικρής διασποράς, αλλά η εκπεμπόμενη ισχύς μικρότερη από αυτή των Edge-Emitting LASERs.

Τα γενικά πλεονεκτήματά τους είναι η κυκλική μορφή της εκπεμπόμενης δέσμης, το χαμηλό κατώφλι ρεύματος που απαιτείται για την κανονική λειτουργία του, χαμηλότερη ευαισθησία σε θερμοκρασιακές μεταβολές, και μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Κατασκευαστικά, επίσης η αρχιτεκτονική τους επιτρέπει την ενσωμάτωση πολλαπλών VCSEL σε διαστάσιμες συστοιχίες, και μικρότερο κόστος παραγωγής, αφού η υλοποίησή και ο έλεγχός τους γίνεται σε επίπεδο Wafer.



Εικόνα 7: VCSEL - Vertical Cavity Surface Emitting Laser



Εικόνα 8: απλοποιημένο διάγραμμα πολλαπλών ενεργειακών στάθμων σε Quantum Cascade Laser

Τα λιγότερο διαδεδομένα Quantum Cascade Lasers (QCL), διαφέρουν στη δομή του ενεργού μέσου, το οποίο δεν αποτελείται από ένα ενιαίο ημιαγωγό υλικό, αλλά πολλά λεπτά σε σειρά στρώματα διαφορετικής σύνθεσης ημιαγωγού υλικού και συγκεκριμένου πάχους, απαρτίζοντας μια κρυσταλλική δομή πολλαπλών φρεάτων (superlattice). Η δομή αυτή εμφανίζει ανά το μήκος του ενεργού μέσου διαφορετική διαφορά δυναμικού, με αποτέλεσμα περισσότερες πιθανές θέσεις που μπορούν να καταληφθούν από ηλεκτρόνια ανά το μήκος του μέσου διαμορφώνοντας μονοδιάστατο περιορισμό σε πολλαπλά πηγάδια δυναμικού (one-dimensional multiple quantum well confinement) όπου χωρίζει τη ζώνη επιτρεπτών ενεργειακών στάθμεων σε διακριτές ηλεκτρονιακές υποζώνες (sub-bands), όπως φαίνεται στο απλοποιημένο διάγραμμα της εικόνας 8. Υπολογίζοντας το πάχος των φρεάτων κατάλληλα μπορεί να ρυθμιστεί η θέση των ενεργειακών στάθμεων με αποτέλεσμα τη δυνατότητα επιλογής του εκπεμπόμενου μήκους κύματος με εξαιρετική ακρίβεια. Παράλληλα, στα ημιαγωγά Laser, τα ηλεκτρόνια με τις σπές εξουδετερώνονται στην επανένωσή τους περνώντας το ενεργειακό χάσμα, όπου σταματά η συνεισφορά τους στην παραγωγή φωτονίων. Στα QCL, ένα ηλεκτρόνιο περνώντας μέσα από τα πολλαπλά φρέατα, θα παράγει περισσότερα από ένα φωτόνια αυξάνοντας την κβαντική απόδοση πάνω από τη μονάδα. Τα QCL μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να εκπέμπουν ακτινοβολία έως και της τάξης των 10μm και σε πολύ υψηλούς ρυθμούς. Η ακτινοβολία σε αυτό το μήκος κύματος έχει πολύ καλή διατρητικότητα σε συνθήκες ελαφριάς ομίχλης αλλά δεν μπορεί να περάσει το γυαλί. Επίσης, όντας σχετικά νέα τεχνολογία, το κόστος είναι πολύ υψηλό και δεν βρίσκονται εύκολα πέρα από ειδικές παραγγελίες.

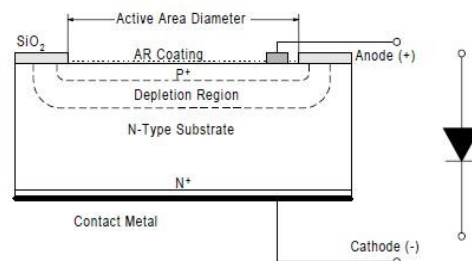
Στον πίνακα 1 στη συνέχεια αναγράφονται οι τεχνολογίες των Laser και LED με τα κύρια χαρακτηριστικά τους και το εύρος της ακτινοβολίας που εκπέμπουν.

Wavelength (nm)	Type	Remark
~850	Vertical cavity surface emitting laser	Cheap and readily available (CD lasers) No active cooling Lower power density Reliable up to ~10Gbps Typical power: 6 mW
~1300/~1550	Fabry-Perot lasers Distributed-feedback lasers	Long life Lower eye safety criteria 50 times higher power density (100 mW/cm ²) Typical power: 28 mW Compatible with Erbium doped fibre amplifier High speed, up to 40 Gbps A slope efficiency of 0.03-0.2 W/A Typical power can reach 1 - 2 W when combined with Erbium doped fibre amplifier [31]
~10,000	Quantum cascade laser	Expensive and relative new Very fast and highly sensitive Better thin fog transmission characteristics [74]. Components not readily available No penetration through glass Output power up to 100 mW
Near Infrared	LED	Cheaper Non coherent Lower power density, hence safer [75] Simpler driver circuit Lower data rates: < 200 Mbps [76, 77] Typically low power: < 10 mW

Πίνακας 1: Είδη διαφορετικών τεχνολογιών Laser

Εστιάζοντας στο δέκτη, ανάλογα τις απαιτήσεις επιλέγεται η ανάλογη φωτοδίοδος.

Η λειτουργία μιας φωτοδίοδου, βασίζεται στη διέγερση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στην περιοχή απογύμνωσης από φωτόνια. Για παράδειγμα η φωτοδίοδος πυριτίου (Si photodiode) της εικόνας 9 χρειάζεται ενέργεια μεγαλύτερη από 1.12eV έτσι ώστε ένα ηλεκτρόνιο να περάσει στη ζώνη αγωγιμότητας και να υπάρχει στοιχειώδης ροή ρεύματος.



Εικόνα 9: Δομή φωτοδίοδου πυριτίου

Η ενέργεια των 1.12eV αντιστοιχεί σε φωτόνια με μήκος κύματος μικρότερο από 1100nm. Όπως φαίνεται και θα αναλυθεί αργότερα, οι φωτοδιόδοι που εστιάζουν σε μήκη κύματος κοντά στα 1550nm χρειάζονται τη μισή ενέργεια ακτινοβολίας απ' ότι οι φωτοδιόδοι που εστιάζουν στα 850nm, για να δώσουν το ίδιο ρεύμα. Το ρεύμα που παράγεται είναι ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Επίσης, η ακτινοβολία απορροφάται εκθετικά στο εσωτερικό της φωτοδίοδου, και ανάλογα του συντελεστή απορρόφησης του υλικού, ο

οποίος είναι πολύ μεγάλος για μικρά μήκη κύματος, και πολύ μικρός για μεγάλα. Αποτέλεσμα αυτού, για μία φωτοδιόδο πυριτίου, μικρά μήκη κύματος όπως UV να απορροφούνται στην επιφάνεια, ενώ για μήκη κύματος μεγαλύτερα από 1200nm να είναι διαυγές. Παράλληλα, φωτόνια με ενέργεια μικρότερη της ζώνης σθένους, δεν απορροφούνται καθόλου.

Αναλύοντας περισσότερο τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μιας φωτοδιόδου δύο άλλοι σημαντικοί παράγοντες είναι η αντίσταση και η χωρητικότητα. Η αντίσταση που παρουσιάζει μια φωτοδιόδος εξαρτάται από την αντίσταση των επαφών στα άκρα της, και στην περιοχή του ημιαγωγού όπου υπάρχουν ακόμη ελεύθεροι φορείς. Η αντίσταση αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$R_s = \frac{(W_s - W_d)\rho}{A} + R_c \quad (1.1)$$

όπου W_s το πάχος του ημιαγωγού υποστρώματος, W_d το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης, A η επιφάνεια της επαφής, ρ η αντίσταση του ημιαγωγού υποστρώματος και R_c η αντίσταση των επαφών στα άκρα της φωτοδιόδου.

Η περιοχή απογύμνωσης της φωτοδιόδου δρα ως διηλεκτρικό ανάμεσα σε δυο επιφάνειες με ελεύθερα φορτία, τα όρια της περιοχής απογύμνωσης, σχηματίζοντας ένα πυκνωτή. Η χωρητικότητα της επαφής είναι ανάλογη με την επιφάνεια της επαφής, και αντιστρόφως ανάλογη με το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης. Επίσης, όσο η αντίσταση του ημιαγωγού υλικού αυξάνει η χωρητικότητα της επαφής μειώνεται. Τέλος, εφόσον η χωρητικότητα της επαφής ουσιαστικά εξαρτάται από την περιοχή απογύμνωσης, μπορεί να μεταβληθεί με την εφαρμογή ανάστροφης πόλωσης της φωτοδιόδου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$C_j = \frac{\epsilon_{si}\epsilon_0 A}{\sqrt{2\epsilon_{si}\epsilon_0 \mu \rho (V_A + V_{bi})}} \quad (1.2)$$

όπου ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού, ϵ_{si} η διηλεκτρική σταθερά του πυριτίου, $\mu = m^2/Vs$ η ευκινησία των ηλεκτρονίων στους 300°K, ρ η αντίσταση του πυριτίου, V_{bi} η τάση λόγω περιοχής απογύμνωσης της επαφής, και V_A η τάση ανάστροφης πόλωσης.

Ο συνδυασμός των δύο αυτών RC χαρακτηριστικών ορίζουν την απόκριση συχνότητας της φωτοδιόδου, και τους ρυθμούς ανόδου t_r καθόδου t_f και συχνότητα γονάτου t_{3dB} , εξαιρετικά σημαντικές παράμετροι ειδικά στον τομέα των τηλεπικοινωνιών.

Σχετικά με την απόκριση μιας φωτοδιόδου, οι χρόνοι ανόδου και καθόδου ορίζονται ως το χρόνο που χρειάζεται η στάθμη ρεύματος εξόδου να αυξηθεί ή να μειωθεί αντίστοιχα στο 10% και 90%. Οι χρόνοι αυτοί μπορούν να εκφραστούν και σαν συχνότητα όπου η έξοδος μειώνεται κατά 3dB. Η απόκριση συχνότητας της φωτοδιόδου εξαρτάται από τρεις παράγοντες:

- t_{drift} : Ο χρόνος απορρόφησης φορέων στην περιοχή απογύμνωσης
- $t_{diffused}$: Ο χρόνος απορρόφησης φορέων στην περιοχή αγωγιμότητας
- t_{RC} : Η σταθερά χρόνου από το RC δίκτυωμα που δημιουργείται στην επαφή

Η σταθερά t_{RC} ορίζεται από τη σχέση $t_{RC}=2.2RC$, όπου η εσωτερική αντίσταση σειράς της φωτοδιόδου σε σειρά με την αντίσταση φορτίου ($R_s + R_L$), και όπου C το άθροισμα της χωρητικότητας της επαφής φωτοδιόδου με τις παρασιτικές χωρητικότητες (stray capacitance) ($C_J + C_S$).

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι οι χρόνοι ανόδου και καθόδου εξαρτώνται από τα φυσικά χαρακτηριστικά της φωτοδιόδου, όπως η επιφάνεια και το πάχος, αλλά μεταβάλλεται από την τάση ανάστροφης πόλωσης. Φωτοδιόδοι μεγάλης επιφάνειας χαρακτηρίζονται από χαμηλούς ρυθμούς απόκρισης, ενώ υψηλή τάση ανάστροφης πόλωσης βελτιώνει τη χρονική απόκριση. Παράλληλα, άλλος ένας τρόπος βελτιστοποίησης της χρονικής απόκρισης, είναι η ελαχιστοποίηση των παρασιτικών χωρητικοτήτων χρησιμοποιώντας όσο το δυνατό κοντύτερους ακροδέκτες, και προσεκτικό σχεδιασμό της διάταξης και διασύνδεσης των επιμέρους εξαρτημάτων. Ο συνολικός χρόνος ανόδου δίνεται από τη σχέση:

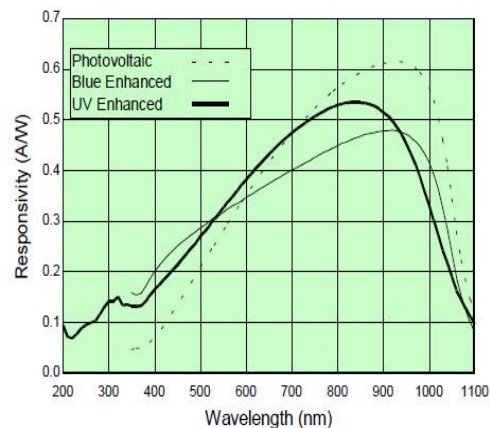
$$t_R = \sqrt{t_{DRIFT}^2 + t_{DIFFUSED}^2 + t_{RC}^2} \quad (1.3)$$

Επίσης, ανάλογα τη συνδεσμολογία της φωτοδιόδου, σε λειτουργία φωτοβολταϊκού κελιού όπου η πόλωση είναι ορθή, σημαντικότερο ρόλο έχει ο χρόνος απορρόφησης της περιοχής αγωγιμότητας, μιας και καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της επαφής και αντίστοιχα με ανάστροφη πόλωση και λειτουργία φωτοαγωγής σημαντικότερο ρόλο έχει ο χρόνος απορρόφησης της περιοχής απογύμνωσης. Οι δυο συνδεσμολογίες αυτές αναλύονται παρακάτω.

Αναλύοντας τα οπτικά χαρακτηριστικά μιας φωτοδιόδου, διακρίνονται οι παράμετροι της αποκρισιμότητας R (Responsivity), της Κβαντικής απόδοσης (Quantum Efficiency Q.E.), της Ανομοιομορφίας (Non-Uniformity), και της Μη-γραμμικότητας (Non-Linearity).

Αποκρισιμότητα είναι η ευαισθησία της φωτοδιόδου ως προς την ακτινοβολία, και ορίζεται ως ο λόγος παραγόμενου φωτορεύματος, ρεύματος εξ αιτίας της απορροφούμενης ακτινοβολίας (Photocurrent I_p) προς την οπτική ισχύς της προσπίπτουσας ακτινοβολίας συγκεκριμένου μήκους κύματος, και ουσιαστικά εκφράζει το κατά πόσο αποδοτικά γίνεται η μετατροπή από φως σε ρεύμα και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R = \frac{I_p}{P} \quad (1.4)$$



Εικόνα 10: Τυπική Φασματική Αποκρισιμότητα φωτοφιδίου

Στα φύλλα των κατασκευαστών παρουσιάζεται ως φασματική αποκρισιμότητα στη μορφή γραφικής παράστασης ως προς το μήκος κύματος, και σαν A/W για το μήκος κύματος με τη μέγιστη αποκρισιμότητα, όπως φαίνεται στην εικόνα 10.

Κβαντική απόδοση είναι το ποσοστό των προσπίπτον φωτονίων που συνεισφέρουν στο φωτορεύμα, και συνδέεται με την αποκρισιμότητα μέσω της σχέσης:

$$Q.E. = \frac{R_{Observed}}{R_{Ideal} (100\%)} \quad (1.5)$$

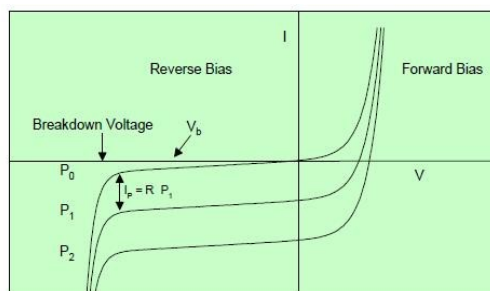
Ανομοιομορφία σε μία φωτοδίοδο ορίζεται ως η διαφοροποίηση της αποκρισιμότητας ανά την επιφάνεια της ενεργού περιοχής της φωτοδίοδου, όταν πάνω σε μικρή περιοχή αυτής εστιάζεται ακτινοβολία.

Τέλος, ως μη-γραμμικότητα ορίζεται η απόκλιση από την ιδανική γραμμική συμπεριφορά μετατροπής της προσπίπτουσας οπτικής ισχύος σε φωτορεύμα. Στην πραγματικότητα, η φωτοδίοδος ξεκινά να είναι αισθητά μη-γραμμική πάνω και κάτω από κάποια όρια απορροφούμενης ακτινοβολίας. Το κάτω όριο, ορίζεται από το ρεύμα θορύβου, ενώ όσο η ισχύς της ακτινοβολίας αυξάνει και οδηγεί τη φωτοδίοδο στον κόρο, οριοθετεί το πάνω όριο, όπου ενώ αυξάνει η ισχύς της ακτινοβολίας, το φωτορεύμα μένει σταθερό.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μια φωτοδίοδος συμπεριφέρεται διαφορετικά ως προς το φωτορεύμα όταν πολωθεί και εμφανίζονται κάποιες ιδιαιτερότητες στην κάθε συνδεσμολογία πόλωσης.

Κατα την ορθή πόλωση, η φωτοδίοδος λειτουργεί σαν φωτοβολταϊκό κελί (photovoltaic mode), όπου το φωτορεύμα αυξάνει εκθετικά με την αύξηση της ισχύς του φωτός, ενώ σε λειτουργία φωτοαγωγής (photoconductive mode) η πόλωση είναι ανάστροφη, και το φωτορεύμα ακολουθεί μια

χαρακτηριστική βάσει της τάσης πόλωσης όπου η ισχύς της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μετακινεί τη χαρακτηριστική όπως φαίνεται στην εικόνα 8 η τυπική I-V χαρακτηριστική μιας φωτοδίοδου. Επίσης, όσο η ανάστροφη τάση αυξάνει πάνω από ένα όριο, το ανάστροφο ρεύμα αυξάνει σχεδόν ακαριαία, και ορίζεται ως τάση τάση διάσπασης. Το όριο αυτό είναι και η



Εικόνα 11: τυπική χαρακτηριστική I-V μιας φωτοδίοδου

μέγιστη τάση στη συνδεσμολογία ανάστροφης πόλωσης η οποία σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να ξεπεραστεί, αφού στην περίπτωση αυτή, καταστρέφεται η φωτοδίοδος. Επίσης, κατά την ανάστροφη πόλωση, εμφανίζεται ένα μικρό ρεύμα ακόμη και όταν η φωτοδίοδος δεν δέχεται καθόλου ρεύμα, είναι αποτέλεσμα θερμικής διέγερσης, και ονομάζεται ρεύμα σκότους (dark current). Το ρεύμα αυτό έχει σημαντικό ρόλο διότι οριοθετεί την τάση διάσπασης όταν φτάσει τα 10μΑ. Εφόσον η τιμή του ρεύματος σκότους εξαρτάται από τη θερμοκρασία, άμεσα εξαρτάται και η τάση διάσπασης. Συνεπώς με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται το κατώφλι της τάσης διάσπασης, με κίνδυνο την καταστροφή της φωτοδίοδου.

Γενικότερα, θερμοκρασιακές αλλαγές έχουν διαφορετικές επιπτώσεις ανά την πόλωση. Αύξηση της θερμοκρασίας σε συνδεσμολογία φωτοαγωγίμης λειτουργίας αυξάνει το ρεύμα σκότους, τυπικά διπλασιάζοντάς το κάθε 10°C, ενώ σε λειτουργία φωτοβολταϊκού κελιού, η εσωτερική αντίσταση της επαφής διπλασιάζεται κάθε 6°C.

Η κάθε μία από τις δύο συνδεσμολογίες πόλωσης ευνοεί και διαφορετικές εφαρμογές.

Σε λειτουργία φυτοβολταϊκού κελιού, η φωτοδίοδος είναι ορθά συνδεδεμένη και χωρίς πόλωση. Η συνδεσμολογία αυτή χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά υψηλή ευαισθησία και μικρές μεταβολές της αποκρισημότητας λόγω θερμοκρασίας, αλλά μικρό εύρος ζώνης. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ανίχνευσης χαμηλής ισχύος ακτινοβολίας, και ρυθμούς μέχρι 350Mhz. Η συνδεσμολογία ανάστροφης πόλωσης για λειτουργία φωτοαγωγιμότητας, η περιοχή απογύμνωσης μεγαλώνει μειώνοντας τη χωρητικότητα και την εσωτερική αντίσταση από την περιοχή εμπλουτισμού αντίστοιχα μειώνοντας το χρόνο ανόδου/καθόδου, και το θόρυβο ρεύματος σκότους. Γενικότερα χαρακτηρίζεται από σχετικά μικρή ευαισθησία και υψηλούς ρυθμούς χρονικής απόκρισης. Η συνδεσμολογία αυτή χρησιμοποιείται στα συστήματα οπτικών επικοινωνιών σε συνδυασμό με έναν ενισχυτή διαντίστασης για τη μετατροπή του φωτορεύματος σε τάση, και στην έξοδο αυτού ενισχυτής τάσης πολλαπλών σταδίων, συνήθως limiting Amplifiers πολύ μεγάλου κέρδους και υψηλού ρυθμού χρονικής απόκρισης.

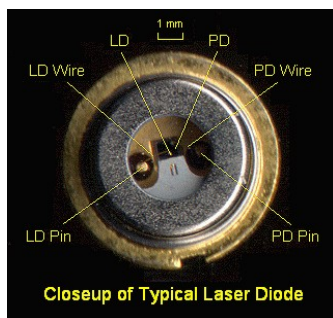
Τέτοιες διατάξεις συναντώνται και στα συστήματα Free Space Optics, με τη διαφορά ότι δεν χρησιμοποιούνται απλές φωτοδιόδοι, αλλά PIN φωτοδιόδοι και φωτοδιόδοι χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiodes APD).

Η φωτοδίοδος PIN είναι μια βελτίωση της απλής φωτοδίοδου, τοποθετώντας στο εσωτερικό της επαφής ένα παχύ στρώμα καθαρού ημιαγωγού (Intrinsic) το οποίο αυξάνει την περιοχή απογύμνωσης της επαφής, προσφέροντας κάποια πλεονεκτήματα απέναντι στην απλή pn φωτοδίοδο, όπως μεγαλύτερη περιοχή εγκλωβισμού του φωτός, ταχύτερη απόκριση λόγω μείωσης της χωρητικότητας της επαφής, και η συμπεριφορά της εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από το χρόνο $t_{diffusion}$.

Οι φωτοδιόδοι τύπου Avalanche χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλή ευαισθησία της τάξης των 100A/W υψηλούς ρυθμούς χρονικής απόκρισης της τάξης των εκατοντάδων picoseconds αλλά έχει υψηλότερη στάθμη θορύβου από την PIN. Το θέμα του θορύβου όμως εξαλείφεται λόγω της οπτικής ενίσχυσης που προσφέρει η ίδια η φωτοδίοδος, περιορίζοντας τις απαιτήσεις ενίσχυσης από τις βαθμίδες ενίσχυσης, άρα μειώνοντας το θόρυβο που προέρχεται από αυτές. Στα μειονεκτήματα της χρήσης αυτής είναι το υψηλό κόστος αφενός της ίδιας αλλά και λόγω της πολύπλοκης διάταξης που απαιτεί η πόλωσή της. Χρησιμοποιείται σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών υψηλών προδιαγραφών, και γενικότερα σε εφαρμογές όπου απαιτείται ανίχνευση φωτός χαμηλής ισχύος σε μεγάλους ρυθμούς. Άλλη μία εφικτή διάταξη είναι η λειτουργία Geiger (Geiger Mode) όπου η ανάστροφη τάση ξεπερνά την τάση διάσπασης, και η APD έχει τη δυνατότητα εντοπισμού μεμονωμένου αριθμού φωτονίων.

Συστήματα Free Space Optics επωφελούνται ιδιαίτερα από τις APD μιας και το μέσο διάδοσης δεν είναι ελεγχόμενο, και οι διακυμάνσεις της απόσβεσης που προκαλεί η ατμόσφαιρα αυξάνει τις απαιτήσεις της ελάχιστης δυνατής ανιχνεύσιμης στάθμης οπτικής ισχύος.

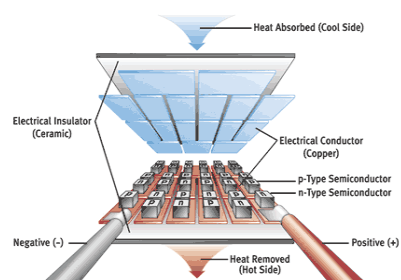
Η διάταξη του πομπού δεν αρκείται μόνο στην επιλογή του LED ή LASER, αλλά και των κυκλωμάτων οδήγησης και διαμόρφωσης. Για τη σωστή λειτουργία του LED και του LASER απαιτείται πόλωση. Το ρεύμα πόλωσης διαφέρει από LED σε LASER αλλά εξυπηρετεί τον ίδιο σκοπό, τη λειτουργία του εκάστοτε πομπού στη γραμμική περιοχή λειτουργίας. Επίσης, σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων, δεν είναι αποτελεσματικό να μηδενίζει το ρεύμα που ρέει το LED ή το LASER λόγω του ότι χρειάζεται επιπλέον χρόνος για την αύξηση του ρεύματος που διαρρέει τη δίοδο στο κατώφλι φωτοβολίας της διόδου πέρα της ηλεκτρικής και θερμικής καταπόνησης της διόδου που προκαλεί παραμόρφωση μετόπισης συχνότητας (chirp) και κωδωνισμού (ringing) αλλά και μειώνει το χρόνο ζωής της. Παράλληλα, στα φύλλα των κατασκευαστών αναγράφεται η απόλυτη μέγιστη (Absolute maximum) τιμή του ρεύματος που αν ξεπεραστεί επάγεται σε βλάβη ή καταστροφή του LED ή του LASER. Επίσης, αναγράφεται το μέγιστο ρεύμα (προτεινόμενο), χαμηλότερο από την απόλυτη μέγιστη τιμή ρεύματος. Η αύξηση του ρεύματος πέρα από αυτή την τιμή δε σημαίνει την καταστροφή του LED ή του LASER, αλλά την πιθανή υπερθέρμανσή του, η οποία συνδέεται με την αύξηση του κατωφλίου ρεύματος πόλωσης, μειώνοντας την απόδοση.



Εικόνα 12: Τυπικό ημιαγωγό LASER από κοντά

στην εικόνα 12. Έτσι ανά πάσα στιγμή η απαιτούμενο ρεύμα για σταθερή οπτική ισχύ εξόδου και ανάλογη ως προς το σήμα εισόδου στην περίπτωση της διαμόρφωσης. Αυτό εξαλείφει την παραμόρφωση στην οπτική έξοδο λόγω θερμοκρασίας, αλλά δεν εξαλείφει τον κίνδυνο βλάβης του LASER από αυτήν. Για την ολοκληρωμένη διάταξη προστασίας και απροβλημάτιστα σταθερής λειτουργίας του LASER ενσωματώνεται σύστημα ενεργής ψύξης, βασισμένο σε ειδική τεχνολογία θερμοηλεκτρικών στοιχείων μεταφοράς θερμότητας γνωστή ως peltier effect, ειδικά σε υψηλής ισχύος LASER. Η αρχή λειτουργίας των θερμοηλεκτρικών στοιχείων βασίζεται στην άντληση της θερμικής ενέργειας μέσω της ροής των ηλεκτρονίων που περνούν από τη θερμή επιφάνεια, στην ψυχρή. Η θερμική ενέργεια μεταφέρεται στα ηλεκτρόνια και τα διεγείρει, και με τη σειρά τους αυτά τη διαχέουν στην ψυχρή επιφάνεια. Με τη χρήση της τελευταίας, η θερμοκρασία του ημιαγωγού LASER μπορεί να διατηρηθεί σταθερή ανεξάρτητα των συνθηκών του περιβάλλοντος και της ισχύος του LASER, δεδομένης της ικανότητας άντλησης των θερμοηλεκτρικών στοιχείων. Η εσωτερική δομή ενός τέτοιου

Ειδικά στα LASER, η σωστή πόλωση είναι σημαντική, και για αυτό το λόγω τα περισσότερα αν όχι όλα τα ολοκληρωμένα κυκλώματα οδήγησης LASER περιλαμβάνουν μια είσοδο ανατροφοδότησης που παρακολουθεί την ισχύ εκπομπής του LASER. Αυτό είναι εφικτό όταν το LASER περιλαμβάνει μια εσωτερική φωτοδίοδο συνήθως στο πίσω μέρος η οποία απορροφά μικρό μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, όπως διακρίνεται



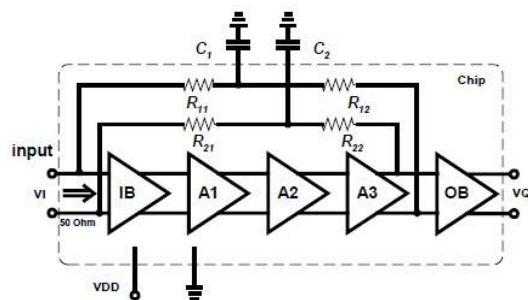
Εικόνα 13: Δομή συστοιχίας θερμοηλεκτρικών στοιχείων

Η εσωτερική δομή ενός τέτοιου

στοιχείου φαίνεται στην εικόνα 13.

Αναλύοντας περισσότερο τη διαμόρφωση που χρησιμοποιείται στις οπτικές επικοινωνίες υπάρχουν αρκετές διαφοροποιήσεις αλλά όλες έχουν σαν βάση τη διαμόρφωση οπτικής έντασης (Intensity Modulation). Στην απλούστερη μορφή διαμόρφωσης χρησιμοποιείται η OOK (On Off Keying) όπου ψηφιακές στάθμες λογικού 0 και 1 οδηγούν ένα LED για μεταφορά ψηφιακών δεδομένων σε χαμηλούς ρυθμούς. Ομοίως μεταφορά αναλογικών δεδομένων επιτυγχάνεται με AM διαμόρφωση πλάτους. Σε συνδυασμό με τη σωστή οδήγηση ενός LED χρησιμοποιείται μια μέθοδος αύξησης της εκπεμπόμενης έντασης δημιουργώντας στενούς παλμούς μεγάλου ρεύματος και ονομάζεται current peaking. Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές με τη διαμόρφωση θέσης παλμού PPM (Pulse Position Modulation), όπου ένας στενός παλμός στέλλεται ανά συγκεκριμένο χρονικό διάστημα όπου τα δεδομένα είναι η καθυστέρηση που εμφανίζεται ο παλμός. Ο χρόνος μέχρι την επόμενη εκπομπή παλμού επιτρέπει στο LED να ψυχθεί. Η διαμόρφωση αυτή ωφελεί σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή εκπεμπόμενη ισχύς σε χαμηλούς ρυθμούς. Γνωστή εφαρμογή είναι τα τηλεκοντρόλ συσκευών. Άλλη διαμόρφωση που χρησιμοποιείται σε συστήματα Free Space Optics είναι η κατηγορία διαμορφώσεων SIM (Subcarrier Intensity Modulation), όπου η πόλωση γίνεται στο μέσο μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης στάθμης ισχύος εκπεμπόμενου φωτός, κι ακολουθεί διαμόρφωση όπως QAM M-PSK M-FSK και M-ASK αλλά και των αναλογικών και ψηφιακών διαμορφώσεων σε RF συστήματα, με τη διαφορά ότι το φέρον κύμα είναι το φως.

Στην πλευρά του δέκτη τα συστήματα είναι πιο περίπλοκα, αφού η διαδικασία ενίσχυσης και βελτιστοποίησης του λαμβανόμενου σήματος έχει οπτική και ηλεκτρονική φύση. Το πρώτο στάδιο ενίσχυσης είναι μια μορφή τηλεσκοπίου, ώστε η φωτοδίοδος να δέχεται όσο γίνεται περισσότερο απομονωμένα το φως που προέρχεται από τον πομπό, και όχι από το περιβάλλον, και να εστιάζεται πάνω στη φωτοδίοδο. Μεγαλύτερη διάμετρος τηλεσκοπίου σημαίνει περισσότερη ακτινοβολία εστιασμένη στο δέκτη, αλλά και περισσότερος θόρυβος από την ακτινοβολία του περιβάλλοντος. Για να μειωθεί ο θόρυβος αυτός, προστίθενται οπτικά ζωνοπερατά φίλτρα για το μήκος κύματος του ενδιαφέροντος αποσβένοντας σε μεγάλο βαθμό την ανεπιθύμητη ακτινοβολία και σε ελάχιστο την επιθυμητή. Στο επόμενο στάδιο βρίσκεται η φωτοδίοδος όπου όπως περιγράφηκε προηγουμένως, μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό, ο ενισχυτής διαγωγημότητας για τη μετατροπή του φωτορεύματος σε τάση, και η βαθμίδα επεξεργασίας και ενίσχυσης του σήματος. Στις ψηφιακές οπτικές επικοινωνίες χρησιμοποιούνται Limiting amplifiers (LA) για την ενίσχυση, μη-γραμμικοί ενισχυτές πολλαπλών σταδίων ενίσχυσης υψηλού κέρδους και απόκρισης, που όμως ψαλιδίζουν την έξοδο σε συγκεκριμένη στάθμη, συνήθως προκαθορισμένη βάση προτύπων σημάτων επικοινωνίας και διασύνδεσης υποσυστημάτων όπως CMOS και LVCMOS, ECL



Εικόνα 14: Διάγραμμα block ενός Limiting Amplifier

και LVECL, PECL και LVPECL, και LVDS παρόλο που μόνο η LVDS είναι τυποποιημένη (TIA/EIA-644A). Το block διάγραμμα ενός Limiting Amplifier φαίνεται στην εικόνα 14.

1.4. Αδειοδότηση

Όπως ειπώθηκε νωρίτερα, στις RF και μικροκυματικές ασύρματες τηλεπικοινωνίες το εύρος ζώνης είναι περιορισμένο, και η πιθανότητα παρεμβολών μεγάλη. Για αυτό το λόγο το μικρό εύρος ζώνης των HF VHF και UHF να έχει κορεστεί, και για να αποφεύγονται παρεμβολές αναμεταξύ των πομποδοκτών έχουν οριστεί συχνότητες για αποκλειστική χρήση σε ορισμένες εφαρμογές από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union ITU), και ανάλογα την περιοχή δίνονται και αντίστοιχες αδειοδοτήσεις. Παράλληλα, οι χαμηλές συχνότητες δεν μπορούν να μεταφέρουν αρκετό όγκο πληροφορίας και οι κεραίες που απαιτούνται για τη μετάδοσή τους είναι μεγάλες σε όγκο, καθιστώντας τις αναποτελεσματικές για point-to-point επικοινωνίες. Με τη συχνότητα λειτουργίας να πλησιάζει τη ζώνη των gigahertz χρησιμοποιούνται γύρω από το φάσμα των 900Mhz αποκλειστικά οι αναμεταδόσεις κινητών τηλεπικοινωνιών, και όσο αυξάνει η συχνότητα χρησιμοποιούνται pagers, αεροναυπηγικοί αναμεταδότες, στρατιωτικές εφαρμογές, ερασιτεχνικοί ασύρματοι, η δεύτερη ζώνη των κινητών τηλεπικοινωνιών στα 1800MHz και 1900MHz, φτάνοντας στα 2,4GHz που είναι η ελεύθερη ζώνη που χρησιμοποιούν τα ασύρματα δίκτυα WiFi 802.11b/g/n, Bluetooth, Zigbee, ασύρματες κάμερες παρακολούθησης και άλλες εφαρμογές. Περνώντας στη ζώνη των SHF των 3-30GHz βρίσκονται να χρησιμοποιούνται κατά κόρο από τα περισσότερα ραντάρ, δορυφορικά συστήματα και στη ζώνη των 5GHz το WiFi 802.11a. Τα πρότυπα 802.11g/n χρησιμοποιούνται ευρύτερα είτε για point-to-point είτε για point-to-multipoint ζεύξεις. Το 802.11b είναι πλέον ξεπερασμένο λόγω του χαμηλού εύρους ζώνης. Το 802.11a χρησιμοποιείται περισσότερο σε ζεύξεις ραχοκοκαλιάς ανάμεσα σε υποδίκτυα 802.11b/g/n λόγω της διαφορετικής συχνότητας φέροντος. Το μειονέκτημά του είναι ο περιορισμός στην απόσταση ζεύξης λόγω της μεγαλύτερης απορρόφησης της συχνότητας αυτής από την ατμόσφαιρα. Επίσης, υπάρχουν περιοχές όπου απαγορεύεται να χρησιμοποιούνται RF και μικροκυματικές τηλεπικοινωνίες, όπως στα αεροδρόμια και σε κρίσιμες εφαρμογές. Όλοι οι παραπάνω περιορισμοί αδειοδότησης και χρήσης δεν ισχύουν για τα συστήματα Free Space Optics, όπου ολόκληρο το ορατό και υπέρυθρο φάσμα είναι ελεύθερο προς χρήση. Η ακτινοβολία σε αυτό το φάσμα έχει εξαιρετική κατευθυντικότητα και δεν προκαλεί ή επηρεάζεται από παρεμβολές RF ή μικροκυματικής ακτινοβολίας και συνεπώς δεν υπάρχει λόγος ένταξης των συστημάτων αυτών σε κατηγορίες τηλεπικοινωνιών αποκλειστικής χρήσης ή περιοχές απαγόρευσης τηλεπικοινωνιών για τους προαναφερθέντες λόγους. Ο μόνος περιορισμός που έχει δοθεί, συνδέεται με θέματα ασφάλειας της υγείας, και είναι η μέγιστη ένταση φωτός, ανά μήκος κύματος.

Κεφάλαιο 2: Μετάδοση στον αέρα

2.1. Ο ρόλος της ατμόσφαιρας στις ασύρματες ζεύξεις

Σε γενικές γραμμές, η ατμόσφαιρα αποτελεί ένα ασταθές και χαοτικό κανάλι για τη μετάδοση πληροφοριών λόγω των μεταβαλλόμενων χαρακτηριστικών του. Όλοι οι περιβαλλοντολογικοί παράγοντες επηρεάζουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, και ανάλογα το μήκος κύματος αυτής, άλλοι επηρεάζουν περισσότερο και άλλοι λιγότερο. Για τις RF και μικροκυματικές ζεύξεις σημαντικός παράγοντας είναι η φυσική διαμόρφωση του χώρου λόγω της ζώνης Fresnel. Επίσης τα δέντρα αποτελούν σημαντικό παράγοντα απορρόφησης λόγω του ότι τα κλαδιά τους περιέχουν νερό και δρουν ως κεραίες. Γενικότερα, το κάθε εμπόδιο μεγιστοποιεί την απόσβεση που προκαλεί στην ακτινοβολία που το διαπερνά όταν το μέγεθός του είναι κοντά στο μήκος κύματος αυτής.

Επίσης η ατμόσφαιρα αποτελείται από συγκεντρώσεις αέριων στοιχείων και αερολυμάτων (aerosols) και από μικρά σωματίδια σκόνης και καυσαερίων (molecules), συμπεριλαμβάνοντας και τα σωματίδια νερού εμφανιζόμενα σαν υγρασία, ομίχλη, βροχή, χιόνι και χαλάζι. Το ποσοστό και η μορφή της υγρασίας αλλάζει ανά την φυσιολογία της περιοχής, το υψόμετρο, την εποχή και το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της περιοχής, με την περιεκτικότητα να μεγιστοποιείται στο επίπεδο της θάλασσας και να αραιώνει όσο αυξάνει το υψόμετρο, ως την ιονόσφαιρα. Το μέγεθος των σωματιδίων κυμαίνεται από της τάξης των νανομέτρων έως και εκατοστών. Όσο αυξάνει η συχνότητα μικρότερα σωματίδια επηρεάζουν περισσότερο την ακτινοβολία, ώστε οι σταγόνες της βροχής να εξασθενούν σε μεγάλο βαθμό τη μικροκυματική ακτινοβολία, και η ομίχλη να εξασθενεί σημαντικά την ακτινοβολία του οπτικού φάσματος. Η ακτινοβολία γύρω από το οπτικό φάσμα διανύοντας την ατμόσφαιρα υπόκειται σε απορρόφηση από τα μικρότερα σωματίδια όπως υδρατμοί, CO₂, ομίχλη, Όζον και άλλα, όπου η ενέργεια των απορροφώμενων φωτονίων μετατρέπεται σε θερμότητα (absorption), αλλά και στην περίπτωση διέλευσης μέσω μεγαλύτερων σωματιδίων που δεν απορροφάται, διαθλάται αλλάζοντας διεύθυνση (σκέδαση scattering) με αποτέλεσμα το άνοιγμα της δέσμης να είναι μεγαλύτερο απ' όσο αναμένεται στο δέκτη. Και στις δύο περιπτώσεις το αποτέλεσμα είναι απώλεια ισχύος στο δέκτη.

Η διάδοση της ακτινοβολίας του οπτικού φάσματος μέσω της ατμόσφαιρας περιγράφεται από το νόμο Beer – Lambert:

$$\tau(\lambda, L) = \frac{P_R}{P_T} = \exp[-\gamma_T(\lambda)L] \quad (2.1)$$

όπου

$\tau(\lambda, L)$ η διαπερατότητα της ατμόσφαιρας δεδομένου μήκους κύματος λ ,

P_T η οπτική εκπεμπόμενη ισχύς,

P_R η λαμβανόμενη οπτική ισχύς στο δέκτη, για απόσταση L και

$\gamma_T(\lambda)$ η σταθερά συνολικής εξασθένησης.

λόγω του ότι η εξασθένηση που προκαλεί η ατμόσφαιρα οφείλεται στα αέρια και στα σωματίδια, η σταθερά συνολικής εξασθένησης αναλύεται ως εξής:

$$\gamma_T(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (2.2)$$

όπου οι όροι $\alpha_m(\lambda)$ και $\alpha_a(\lambda)$ αποτελούν την εξασθένηση που οφείλεται στην απορρόφηση από σωματίδια και αέρια αντίστοιχα ενώ οι όροι $\beta_m(\lambda)$ και $\beta_a(\lambda)$ αποτελούν την εξασθένηση που οφείλεται στη σκέδαση από σωματίδια και αέρια αντίστοιχα, η περιεκτικότητα των οποίων στην ατμόσφαιρα αναγράφεται στον πίνακα 2 παρακάτω.

Constituent	Volume Ratio (%)	Parts Per Million (ppm)
Nitrogen (N ₂)	78.09	
Oxygen (O ₂)	20.95	
Argon (Ar)	0.93	
Carbon dioxide (CO ₂)	0.03	
Water vapour (H ₂ O)		40 – 40,000
Neon (Ne)		20
Helium (He)		5.2
Methane (CH ₄)		1.5
Krypton (Kr)		1.1
Hydrogen (H ₂)		1
Nitrous oxide (N ₂ O)		0.6
Carbon monoxide (CO)		0.2
Ozone (O ₃)		0.05
Xenon (Xe)		0.09

Πίνακας 2: Διάφορα σωματίδια στην ατμόσφαιρα και η περιεκτικότητά τους

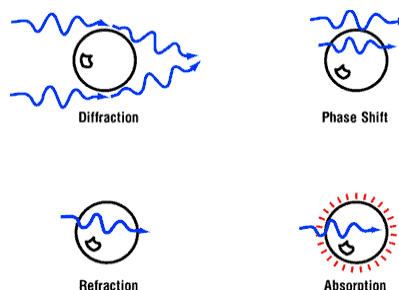
Όσον αφορά την απορρόφηση (Absorption), όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι η διαδικασία όπου ένα φωτόνιο συγκρούεται με ένα σωματίδιο εμπριεχόμενο στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα τη μετατροπή της ενέργειας του φωτονίου σε θερμική ενέργεια πάνω στο σωματίδιο. Το σωματίδιο αυτό μπορεί να είναι και ένα μόριο ενός αερίου στην ατμόσφαιρα. Η σταθερά απορρόφησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος των μορίων των αερίων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα και την κατανομή τους. λόγω αυτού η σταθερά απορρόφησης εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτονίου καθιστώντας την επιλεκτική.

Η φύση αυτή αποκαλύπτει ορισμένες διαυγείς ζώνες για συγκεκριμένα μήκη κύματος, όπου λόγω είτε μοριακού μεγέθους είτε περιεκτικότητας κάποιων στοιχείων στην ατμόσφαιρα, οι πιθανότητες τα φωτόνια συγκεκριμένου μήκους κύματος να απορροφηθούν από τα μόρια αυτών είναι πολύ μικρές, με αποτέλεσμα περιοχές ελάχιστης απορρόφησης, λεγόμενα και παράθυρα διάδοσης (transmission windows), και θα αναλυθούν παρακάτω.

λόγω του ότι η φυσιολογία της ατμόσφαιρας δεν μπορεί να αλλάξει, το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται στα συστήματα FSO αντιστοιχεί με αυτό των παραθύρων διάδοσης. Βάσει των παραπάνω ο κυρίαρχος παράγοντας της εξασθένησης από την ατμόσφαιρα είναι η σκέδαση λόγω συγκεντρώσεων αερίων, όπου:

$$\gamma_T(\lambda) \approx \beta_a(\lambda) \quad (2.3)$$

Η Σκέδαση (Scattering) μιας δέσμης οπτικής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα τη γωνιακή ανακατανομή της με ή χωρίς αλλαγή του μήκους κύματός της. Το φαινόμενο της σκέδασης εξαρτάται από την ακτίνα r των σωματιδίων που βρίσκονται εντός της διαδρομής της διάδοσης της ακτινοβολίας. Θεωρώντας τα σωματίδια σφαιρικά, η επιφάνεια που συναντά η ακτινοβολία για το κάθε σωματίδιο είναι η προβολή της σφαίρας με εμβαδόν $2\pi r$. Η επιφάνεια αυτή προς το μήκος κύματος λ είναι ο παράγοντας μεγέθους x_0 που διευκρινίζει τον τύπο της σκέδασης που λαμβάνει χώρα (εκόνα 15 και 16).



Εικόνα 15: Διάδραση ενός φωτονίου με ένα σωματίδιο

$$x_0 = 2\pi r / \lambda \quad (2.4)$$

Για $x_0 \gg 1$, η σκέδαση κατηγοριοποιείται στον τύπο Reyleigh, για $x_0 \approx 1$, είναι τύπου Mie, και για $x_0 \ll 1$, η σκέδαση μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας τη θεωρία γεωμετρίας για τη σκέδαση.

Type	Radius (μm)	Size Parameter x_0	Scattering Process
Air molecules	0.0001	0.00074	Rayleigh
Haze particle	0.01 – 1	0.074 – 7.4	Rayleigh – Mie
Fog droplet	1 – 20	7.4 – 147.8	Mie – Geometrical
Rain	100 – 10000	740 – 74000	Geometrical
Snow	1000 – 5000	7400 – 37000	Geometrical
Hail	5000–50000	37000 – 370000	Geometrical

Εικόνα 16: Σωματίδια στην ατμόσφαιρα που προκαλούν σκέδαση, η ακτίνα τους και ο τύπος σκέδασης που προκαλούν, σε ακτινοβολία μήκους κύματος $\lambda = 850\text{nm}$

Αναλυτικότερα, για τη σκέδαση τύπου Reyleigh, μια απλοποιημένη έκφραση που την περιγράφει είναι η εξής:

$$\beta_{\text{Reyleigh}}(\lambda) = 0,827N_p A_p^3 \lambda^{-4} \quad (2.5)$$

όπου N_p ο αριθμός των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου, και A_p η επιφάνεια της προβολής του σωματιδίου. Ο παράγοντας λ^{-4} υποδηλώνει η σκέδαση τύπου Reyleigh αυξάνει σε μικρά μήκη κύματος. Αποτέλεσμα της σκέδασης αυτής είναι και το χρώμα του ουρανού αφού το μπλε φως είναι μικρότερου μήκους κύματος από το κόκκινο.

Αναλύοντας τη σκέδαση τύπου Mie, συμβαίνει όταν το μέγεθος του σωματιδίου είναι πολύ κοντά στο μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Για τα συστήματα των FSO όπου χρησιμοποιείται ακτινοβολία στο φάσμα των 0,5μm-2μm, η σκέδαση τύπου Mie μεγιστοποιείται στα σωματίδια της ομίχλης. Με βάση την υπόθεση όπου η σκεδαζόμενη ακτινοβολία έχει το ίδιο μήκος κύματος με την προσπίπτουσα, η σκέδαση που λαμβάνει χώρα είναι απλή (single scattering) ενώ τα αποτελέσματα από πολλαπλή σκέδαση (multiple scattering) αγνοούνται, και όπου τα σωματίδια είναι σφαιρικά και δρουν ανεξάρτητα με ένα σύνθετο δείκτη διάθλασης στο χώρο, η σκέδαση τύπου Mie εκφράζεται ως:

$$\gamma_T(\lambda) \cong \beta_a(\lambda) = 10^5 \int_0^{\infty} Q_d \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n \right) \pi r^2 n(r) dr \quad (2.6)$$

όπου r η ακτίνα του σωματιδίου σε εκατοστά, Q_d είναι η απόδοση της σκέδασης τύπου Mie, ή είναι ο πραγματικός αριθμός στο σύνθετο δείκτη διάθλασης, και $n(r)$ η περιεκτικότητα όπου μετριέται σε σωματίδια ανά μονάδα όγκου, με τη μοναδιαία αύξηση της ακτίνας του σωματιδίου. Στην προκειμένη περίπτωση, η ειδική εξασθένηση $\beta_a(\lambda)$ μετριέται σε dB/km και υπολογίζεται αθροίζοντας την εξασθένηση που προκαλούν όλα τα επιμέρους σωματίδια ανά μονάδα όγκου με τη μοναδιαία αύξηση σε όγκο. λόγω του ότι τα σωματίδια έχουν ακαθόριστα και πολύπλοκα σχήματα η εφαρμογή της θεωρίας για τη σκέδαση τύπου Mie γίνεται υπερβολικά πολύπλοκη. Για το λόγο αυτό για τον υπολογισμό της εξασθένησης λόγω σκέδασης τύπου Mie χρησιμοποιούνται εμπειρικοί τύποι βασισμένοι σε αναφορές, και πολλές φορές εκφράζονται με την ορατότητα (Visibility range) σε χιλιόμετρα. Η ορατότητα είναι η απόσταση που διανύει μια δέσμη φωτός ώσπου να μειωθεί η έντασή της στο 2% της αρχικής έντασης. Η τελευταία μετριέται με ένα όργανο μέτρησης που ονομάζεται transmissiometer και ένα εμπειρικό μοντέλο υπολογισμού της σκέδασης τύπου Mie δίνεται από:

$$\beta_a(\lambda) = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-\delta} \quad (2.7)$$

όπου δ μία μεταβλητή που δίνεται συναρτήσει της ορατότητας από τα μοντέλα Kim και Kruse στον παρακάτω πίνακα:

	Kim model		Kruse model
$\delta =$	$\begin{cases} 1.6 & V > 50 \\ 1.3 & 6 < V < 50 \\ 0.16V + 0.34 & 1 < V < 6 \\ V - 0.5 & 0.5 < V < 1 \\ 0 & V < 0.5 \end{cases}$	$=$	$\begin{cases} 1.6 & V > 50 \\ 1.3 & 6 < V < 50 \\ 0.585V^{1/3} & V < 6 \end{cases}$

Πίνακας 3: Μοντέλα Kim και Kruse για τη μεταβλητή δ συναρτήσει της ορατότητας όπου V η ορατότητα σε χιλιόμετρα

Επίσης, για την ορατότητα V , χρησιμοποιείται ο πίνακας 4 – Πίνακας Διεθνής Κώδικας Ορατότητας (International Visibility Code – IVC).

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

Πίνακας 4: Διεθνής Κώδικας Ορατότητας - IVC

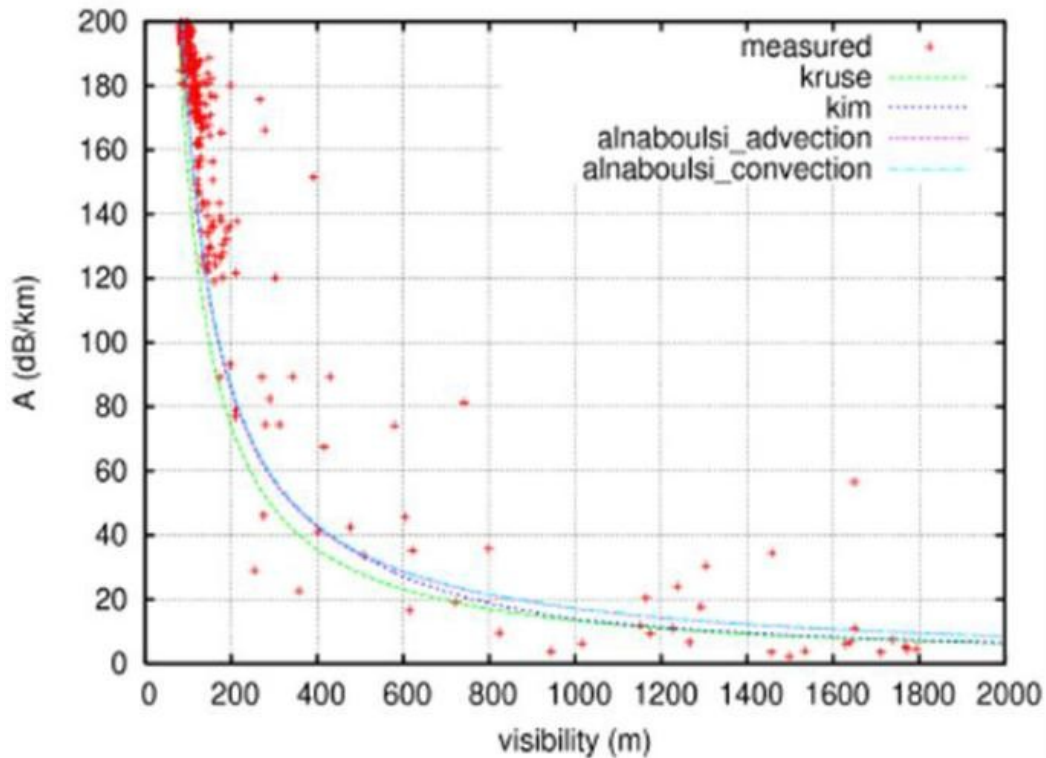
Επίσης, δύο εξισώσεις από τον Al Naboulsi σχηματίζουν μια απλή σχέση για τον υπολογισμό της εξασθένησης λόγω ομίχλης ακτινοβολίας (Radiation ή Convection fog) και ομίχλης οριζόντιας μεταφοράς (Advection fog) για το φάσμα των 690-1550nm και για ορατότητα απόστασης 50-1000 μέτρων:

$$\alpha_{Advection}(\lambda) = \frac{0.11478\lambda + 3.8367}{V} \quad (2.8)$$

$$\alpha_{Radiation}(\lambda) = \frac{0.18126\lambda^2 + 0.13709\lambda + 3.7502}{V} \quad (2.9)$$

όπου λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, και V η απόσταση ορατότητας σε μέτρα.

Βάσει μετρήσεων (εικόνα 17) που έγιναν στην Πράγα της Τσεχίας στις αρχές του έτους 2008, η μετρούμενη εξασθένηση συγκρίθηκε με αυτήν που προέκυψε από τους εμπειρικούς τύπους. Ως αποτέλεσμα για ομίχλη με ορατότητα 200m η μετρούμενη εξασθένηση ήταν περίπου 200 dB και βάσει του εμπειρικού τύπου η διαφορά ήταν μόνο ± 5 dB.



Εικόνα 17: Εξασθένηση ως προς την ορατότητα για ακτινοβολία μήκους κύματος $\lambda=830\text{nm}$, αποτελέσματα πρακτικών μετρήσεων και χρήσης εμπειρικών τύπων και μοντέλων Kim και Kruse , Πράγα 2008

2.2. Καιρικές συνθήκες και συνέπειες

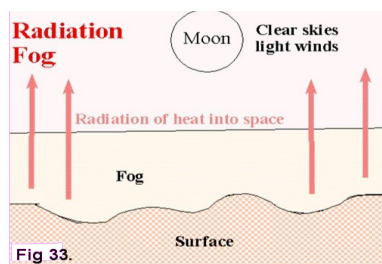
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, και φαίνεται καθαρά στον πίνακα IVC, η μεγαλύτερη αιτία εξασθένησης είναι λόγω σκέδασης αυτή τύπου Mie, που για το οπτικό φάσμα οφείλεται στην ομίχλη. Σε ακραίες περιπτώσεις πυκνής ομίχλης με την ορατότητα να πέφτει κάτω από τα 200m η εξασθένηση αυξάνει σε σημείο να φτάνει τα 315 dB / Km, ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις, ακόμη και στην περίπτωση ισχυρής καταιγίδας και χιονοθύελλας, η εξασθένηση μεγιστοποιείται περίπου στα 25 dB.

λόγω του κρίσιμου παράγοντα εξασθένησης που προκαλεί η ομίχλη, είναι σημαντική η μελέτη της περιοχής της ζεύξης FSO, ώστε να μπορεί να προσεγγιστεί η πιθανότητα εμφάνισης ομίχλης, του τύπου της, και κατόπιν να καθοριστούν οι συνθήκες στη χειρότερη περίπτωση (worst case scenario).

Στις δύο προαναφερόμενες εξισώσεις του Al Nabulsi, διακρίνονται δύο διαφορετικοί τύποι ομίχλης, αυτή της ακτινοβολίας, και η ομίχλη οριζόντιας μεταφοράς. Οι δύο αυτές περιπτώσεις είναι και οι σημαντικότερες λόγω συχνότητας εμφάνισης και πυκνότητας, αλλά συναντώνται και οι τύποι της ομίχλης εξάτμισης (Steam fog) και μετωπικής ομίχλης (frontal fog), και ομίχλης πλαγιάς όπου αναλύονται παρακάτω:

α) Ομίχλη ακτινοβολίας (radiation fog)

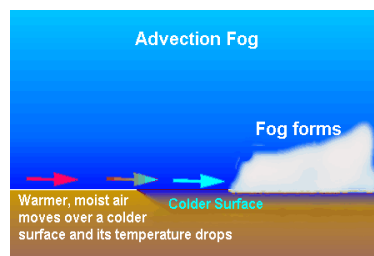
Τις ανέφελες νύχτες, η γη ακτινοβολεί έντονα τη θερμότητα που είχε πάρει κατά τη διάρκεια της μέρας και ψύχεται. Αν η θερμοκρασία πέσει κάτω από το σημείο δρόσου, τότε αρχίζει η συμπύκνωση των υδρατμών και η δημιουργία ομίχλης. Ευνοϊκές συνθήκες για τη δημιουργία της ομίχλης αυτής είναι να υπάρχει ένας πολύ ελαφρός άνεμος, ο οποίος να προκαλεί καλή ανάμιξη του επιφανειακού στρώματος αέρα και επίσης να υπάρχει μεγάλη υγρασία. Αυτού του είδους η ομίχλη εμφανίζεται σε χαμηλά ύψη (μέχρι 800 πόδια) όταν η ψύξη της γης και συνεπώς των παρεδάφιων τμημάτων του αέρα έχει φτάσει στο μέγιστο, δηλαδή τις πρώτες πρωινές ώρες.



Εικόνα 18: Δημιουργία ομίχλης ακτινοβολίας

β) Ομίχλη οριζόντιας μεταφοράς (advection fog)

Η ομίχλη αυτή σχηματίζεται όταν θερμές και υγρές αέριες μάζες μεταφερθούν πάνω από ψυχρότερη επιφάνεια. Οι μάζες αυτές ψύχονται, οπότε ένα μέρος των υδρατμών που περιέχουν συμπυκνώνεται. Ομίχλες μεταφοράς σχηματίζονται πάνω από την ξηρά, συχνά, κατά την ψυχρή περίοδο, όταν θαλάσσιες αέριες μάζες μεταφέρονται πάνω από ψυχρές ηπειρωτικές επιφάνειες. Στις ομίχλες του τύπου αυτού ανήκουν και εκείνες που δημιουργούνται πάνω από χιονοσκεπείς και παγωμένες εκτάσεις. Για τη δημιουργία αυτού του είδους ομίχλης απαιτείται προφανώς η ύπαρξη ελαφρού ανέμου, ο οποίος θα μεταφέρει την υγρή και θερμή αέρια μάζα.



Εικόνα 19: Δημιουργία ομίχλης οριζόντιας μετατόπισης

γ) Ομίχλη εξάτμισης (steam fog)

Σχηματίζεται στην επιφάνεια θαλασσών ή μεγάλων λιμνών, όταν πάνω από αυτές ο ατμοσφαιρικός αέρας έχει χαμηλή θερμοκρασία σε σχέση με εκείνη της υδάτινης επιφάνειας. Στην περίπτωση αυτή οι υδρατμοί που εξατμίζονται από τη θερμή υδάτινη επιφάνεια, συμπυκνώνονται μέσα στην ψυχρή μάζα αέρα. Συνήθως περιορίζεται στο μέγιστο ύψος των 10m από την επιφάνεια.



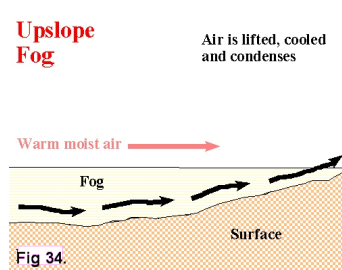
Εικόνα 20: Τοπίο με ομίχλη εξάτμισης (steam fog)

δ) Μετωπική ομίχλη (frontal fog)

Σχηματίζεται όταν βροχή ή ψεκάδες βρεθούν στη θερμή αέρια μάζα ενός μετώπου, οπότε οι σταγόνες εξατμίζονται μερικώς και προκύπτουν υδροσταγονίδια μικρού βάρους που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα.

ε) Ομίχλη πλαγιάς (up-slope fog)

Εμφανίζεται κυρίως στους νότιους πρόποδες βουνών και σε πλαγιές όπου θερμός και υγρός αέρας κατευθύνεται προς το βουνό ή λόφο. Εκεί η διεύθυνση του ανέμου αλλάζει και σταδιακά η κινούμενη μάζα του αέρα ανεβαίνει σε υψόμετρο εξαναγκασμένα. Η διαφορά στη θερμοκρασία λόγω υψομέτρου προκαλεί την υγροποίηση της υγρασίας που μεταφέρει ο άνεμος με αποτέλεσμα το σχηματισμό ομίχλης που φαίνεται να ανεβαίνει την πλαγιά. Εκτός από ομίχλη, το φαινόμενο αυτό μπορεί να προξενήσει βροχή, χιόνι και χαλάζι, ανάλογα την εποχή και περιοχή. Αναμφισβήτητα, το φαινόμενο αυτό προδιαθέτει άσχημα καιρικά φαινόμενα.



Εικόνα 21: Δημιουργία ομίχλης πλαγιάς (up-slope fog)

Μία παρόμοια περίπτωση μειωμένης ορατότητας και υψηλής εξασθένησης λόγω σκέδασης είναι το νέφος. Σε περιοχές υψηλής βιομηχανικής δραστηριότητας ή κυκλοφορίας αυτοκινήτων, όπως σε μεγαλουπόλεις, σχηματίζεται νέφος με παραπλήσιες συνέπειες με αυτές της ομίχλης. Η εξασθένηση οφείλεται σε διάφορους τύπους σωματιδίων και ρύπων, και το σημαντικότερο είναι ότι η κατάσταση του φαινομένου αυτού να είναι μόνιμη, και όχι περιστασιακή όπως η ομίχλη, και υπάρχει και όταν ο καιρός είναι καλός, ειδικότερα σε μέρες άπνοιας όπου ο άνεμος δεν είναι αρκετός για να διαλύσει ή να αραιώσει το νέφος. Η βροχή σε πολλές περιπτώσεις ελαττώνει το νέφος αφού τα σωματίδια των ρύπων προσκολλούνται στις σταγόνες της βροχής.

2.3. Φαινόμενα διάθλασης του φωτός, συνέπειες και λύσεις

Ειδικότερα, για τα συστήματα των Free Space Optics, το κανάλι της ατμόσφαιρας δεν κρύβει μόνο σωματίδια διαφόρων μεγεθών που απορροφούν την ακτινοβολία. Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας τείνει να ψυχραίνει με την αύξηση του υψομέτρου, και όντας ο αέρας θερμότερος κοντά στο επίπεδο του εδάφους ανεβαίνει προς τα πάνω. Στην πορεία ο θερμότερος αέρας αναμειγνύεται με τον ψυχρότερο δημιουργώντας αναταραχές. Η θερμοκρασία μπορεί να έχει μικρή διαφορά ανάμεσα στα θερμότερα και ψυχρότερα ρεύματα της τάξης των 0,01 έως 0,1 βαθμούς Κελσίου, αλλά αρκετή ώστε να προκαλέσει διαφοροποιήσεις στην πυκνότητα της ατμόσφαιρας (atmospheric turbulence). Οι διαφοροποιήσεις αυτές εμφανίζονται σαν ρεύματα και “φουσαλίδες” μεγέθους από 0,1cm έως 10m με διαφορετικό δείκτη διάθλασης με αποτέλεσμα τη δημιουργία πρισμάτων και φακών, κατά κάποιο τρόπο.

Ως αποτέλεσμα η ακτινοβολία να υπόκειται σε μερική εκτροπή όταν το μέτωπο της δέσμης είναι μεγαλύτερο από το εκάστοτε πακέτο ή ρεύμα, και ολική εκτροπή όταν είναι μικρότερο, σε βαθμό που εξαρτάται από το μέγεθος και τη διαφορά θερμοκρασίας αναμεταξύ των διαφορετικών μέσων. Κατά τη διέλευση μέσω της ατμόσφαιρας, ένας παλμός φωτός εκτρέπεται, διαθλάται και καθυστερεί σε πολλαπλά στάδια με αποτέλεσμα ο δέκτης να “βλέπει” χαστικούς σπινθηρισμούς ανομοιόμορφης έντασης (scintillation), και αλλοιωμένη φάση.

Οι αναταραχές στο κανάλι της ατμόσφαιρας (atmospheric turbulences) ευθύνονται για γνωστά φαινόμενα, όπως ο ιριδισμός των αστεριών, την κυμάτωση που παρατηρείται στον ορίζοντα σε ζεστές μέρες, αλλά και τη θόλωση ενός ενός τοπίου. Οι αναταραχές αυτές εξαρτώνται από το υψόμετρο και την ατμοσφαιρική πίεση, την ταχύτητα του ανέμου, και τις διαφοροποιήσεις του δείκτη διάθλασης λόγω της ανομοιογένειας της θερμοκρασίας.

Συνοπτικά, οι γνωστές επιδράσεις των ατμοσφαιρικών αναταραχών στην οπτική ακτινοβολία περιλαμβάνουν:

α) Γωνιακή Απόκλιση (Beam Steering) της δέσμης από την αρχική νοητή γραμμή μεταξύ πομπού και δέκτη. Η περίπτωση αυτή αντιμετωπίζεται με συστήματα αυτόματης παρακολούθησης και εστίασης (auto-tracking και auto-focus) όπου ανιχνεύουν τη διεύθυνση της εισερχόμενης δέσμης φωτός και ευθυγραμμίζουν αυτόματα τα συστήματα με τη χρήση servo ακριβείας.



Εικόνα 22: Γωνιακή απόκλιση εικόνας μέσα από τριγωνικό πρίσμα

β) Μετακίνηση του σημείου εστίασης (Image Dancing) πάνω στο δέκτη, λόγω της διαφορετικής γωνίας λήψης της δέσμης. Ομοίως, ένα σύστημα αυτόματης παρακολούθησης και εστίασης βελτιώνει το πρόβλημα σε συνδυασμό με διευρυντή δέσμης (beam spreader) στο δέκτη. Ο τελευταίος διευρύνει τη δέσμη αλλά κρατώντας το άνοιγμά της σταθερό.

γ) Διεύρυνση της δέσμης (Beam Spreading), αυξάνοντας την αρχική απόκλιση λόγω διάχυσης της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα τη μείωση της λαμβανόμενης ισχύς στο δέκτη. Αντιμετωπίζεται με χρήση δέκτη με επιφάνεια συλλογής μεγαλύτερου ανοίγματος (aperture). Για μικρές αποστάσεις, η ακτίνα της δέσμης μπορεί να είναι μικρότερη από την ακτίνα της επιφάνειας συλλογής του δέκτη, στην οποία περίπτωση η απόσβεση λόγω διέυρυνσης είναι προφανώς μηδέν καθώς όλη η ενέργεια της δέσμης συλλέγεται. Για μεγάλες αποστάσεις, η απόσβεση αυτή ονομάζεται γεωμετρική A_{geo} και μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$A_{geo} (dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{S_d}{S_{capture}} \right) \quad (2.10)$$

όπου:

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

S_d : περιοχή επιφανείας της μεταδιδόμενης δέσμης σε μήκος d . η οποία προσεγγίζεται από:

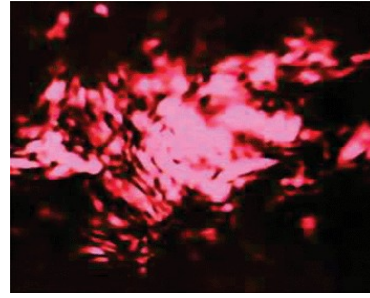
$$S_d = \frac{\pi}{4} (d \cdot \theta)^2 \quad (2.11)$$

όπου:

θ : η απόκλιση της δέσμης (mrad)

και d : η απόσταση ανάμεσα σε πομπό και δέκτη (Km).

δ) Σπινθηρισμούς (Scintillation) ανομοιόμορφης έντασης ακτινοβολίας στο δέκτη λόγω παραμόρφωσης από πολλαπλές αλληλεπιδράσεις εξουδετέρωσης μικρής κλίμακας στο εσωτερικό της δέσμης (small scale destructive interference). Αποτέλεσμα των σπινθηρισμών είναι η παραμόρφωση της μορφής που φαίνεται στην εικόνα 23.



Εικόνα 23: Παλμός Laser στο δέκτη μετά τη διέλευση μέσω ατμοσφαιρικών αναταραχών (σπινθηρισμός)

Όντας το πιο περίπλοκο πρόβλημα λόγω αναταραχών της ατμόσφαιρας, αναλύεται παρακάτω.

ε) Αποδόμηση χωρικής συνεκτικότητας (spacial coherence degradation) αλλάζοντας τη φάση των κυμάτων ως προς το μέτωπο της δέσμης, ιδιαίτερα καταστροφικό φαινόμενο στη μίξη φωτός των συμφασικών δεκτών (coherent receivers). Για το λόγο αυτό αποφεύγονται οι συμφασικοί δέκτες.

στ) Διακυμάνσεις στην Πόλωση (Polarization Fluctuations) του δέκτη λόγω των μεταβολών του οπτικού του πεδίου διαμέσου των ατμοσφαιρικών αναταράξεων. Βελτιώνεται με υποσυστήματα παρακολούθησης της μέσης λαμβανόμενης οπτικής ισχύος και ανάλογης τοποθέτησης του κατωφλίου.

Τα αποτελέσματα των σπινθηρισμών μελετούνται γενικά από τον λογάριθμο του πλάτους χ (dB) του παρατηρούμενου σήματος ("log-amplitude"), που ορίζεται ως η σχέση σε dB μεταξύ του στιγμιαίου πλάτους και της μέσης τιμής του πλάτους του σήματος. Η ένταση και ο ρυθμός των διακυμάνσεων (η συχνότητα των σπινθηρισμών) αυξάνουν με το μήκος κύματος.

Για επίπεδο κύμα και ασθενείς διακυμάνσεις, η διασπορά των σπινθηρισμών σ_χ^2 (dB²) μπορεί να εκφραστεί από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_\chi^2 = 0.124 \cdot k^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot L^{11/6} \quad (2.12)$$

όπου:

$k = 2\pi / \lambda$: το μήκος κύματος (m⁻¹)

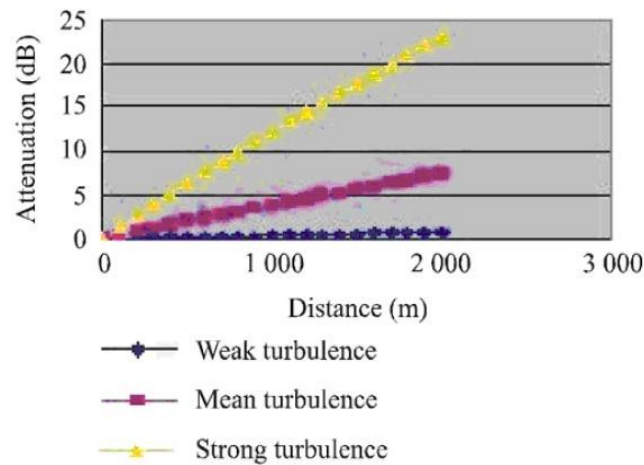
L το μήκος της ζεύξης (m)

και C_n^2 δομική παράμετρος του συντελεστή διάθλασης (m^{-2/3})

Οι σπινθηρισμοί έχουν μέγιστη τιμή τα $4\sigma_\chi$ και η απόσβεση λόγω σπινθηρισμών είναι $2\sigma_\chi$. Για έντονες αναταραχές (turbulence), παρατηρείται ο κόρος της διασποράς που δίνεται από την παραπάνω σχέση. Η παράμετρος C_n^2 έχει διαφορετική τιμή στα οπτικά μήκη κύματος παρά στα μήκη κύματος της τάξης των mm. Οι σπινθηρισμοί στα τελευταία οφείλονται πρώτιστα στις διακυμάνσεις λόγω υγρασίας ενώ στα οπτικά μήκη κύματος είναι κυρίως συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Στα χιλιοστομετρικά μήκη κύματος, το C_n^2 είναι προσεγγιστικά ίσο με 10^{-13} m^{-2/3} (γενικά στα χιλιοστομετρικά μήκη κύματος το C_n^2 είναι μεταξύ των 10^{-14} και 10^{-12} m^{-2/3}) και στα οπτικά μήκη κύματος η τιμή του C_n^2 είναι προσεγγιστικά ίση με 2×10^{-15} m^{-2/3} για ασθενείς διαταραχές (γενικά στα οπτικά μήκη κύματος το C_n^2 είναι μεταξύ 10^{-16} και 10^{-13} m^{-2/3}).

Το παρακάτω σχήμα της εικόνας 24 παριστάνει τη μεταβολή της απόσβεσης μιας οπτικής δέσμης μήκους κύματος 1550 nm για ασθενείς, μέσες και έντονες διαταραχές σε απόσταση μέχρι τα 2000m. Σαφέστατα, η απόσβεση αυξάνει καθώς οι διαταραχές αυξάνουν.



Εικόνα 24: Μεταβολή της απόσβεσης μιας οπτικής δέσμης μήκους κύματος 1550 nm για ασθενείς, μέσες και έντονες διαταραχές σε απόσταση μέχρι τα 2000m.

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

Επιπλέον για τη λεπτομερέστερη ανάλυση των επιπτώσεων των διαταραχών στο κανάλι της ατμόσφαιρας, γίνεται μοντελοποίηση του καναλιού βάσει της έντασης των διαταραχών η οποία αναλύεται παρακάτω.

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

$$l = \frac{A_{TX} A_{RX}}{(\lambda d)^2} e^{-\sigma d} \quad (2.13)$$

όπου:

σ ο συντελεστής απόσβεσης που εξαρτάται από την ορατότητα, A_{TX} , A_{RX} και λ είναι το άνοιγμα του πομπού, A_{TX} και A_{RX} το άνοιγμα του δέκτη και το οπτικό μήκος κύματος αντίστοιχα.

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

α) Λογαριθμοκανονικό Μοντέλο (Log-Normal)

Κάτω από συνθήκες ασθενών διακυμάνσεων της ισχύος, είναι γενικά αποδεκτό ότι οι διαλείψεις λόγω αναταραχών και στροβιλισμών (turbulence) ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή. Ειδικότερα μετρήσεις των ροπών κατώτερης τάξης της κανονικοποιημένης ισχύος κάτω από συνθήκες ασθενών ατμοσφαιρικών αναταραχών συμφωνούν με τις αντίστοιχες τιμές που προβλέπονται από το λογαριθμοκανονικό μοντέλο. Επίσης, σύμφωνα με την θεωρία του Kolmogorov (Andreev και Philips, 1998), αν οι ατμοσφαιρικές αναταραχές είναι ομοιογενείς και ιστροπικές, στην περιοχή των ασθενών διακυμάνσεων, τότε η pdf του λαμβανόμενου σήματος είναι λογαριθμοκανονική.

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

$$f(\chi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\chi^2}} \exp\left\{-\frac{(\chi - E[\chi])^2}{2\sigma_\chi^2}\right\} \quad (2.14)$$

όπου:

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

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

$$f(a) = \frac{1}{a\sqrt{2\pi\sigma_\chi^2}} \exp\left\{-\frac{(\ln(a) - \mu_\chi)^2}{2\sigma_\chi^2}\right\} \quad (2.15)$$

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

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

Από τις παραπάνω προκύπτει ότι η μέση ένταση του φωτός είναι:

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

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

$$f(I) = \frac{1}{2I} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\chi^2}} \exp\left\{-\frac{[\ln(I) - \ln(I_0)]^2}{8\sigma_\chi^2}\right\} \quad (2.16)$$

Το πλάτος διαλείψεων α , κανονικοποιείται έτσι ώστε

$$E[\alpha^2] = 1 \Rightarrow \exp(2\mu_\alpha + 4\sigma_\alpha^2 / 2) = 1 \Rightarrow 2\mu_\alpha + 4\sigma_\alpha^2 / 2 = 0 \Rightarrow \mu_\alpha = -\sigma_\alpha^2 \quad (2.17)$$

Αυτό εξασφαλίζει ότι η διάλειψη δεν αποσβένει ούτε ενισχύει την μέση ισχύ. Για την περιοχή των ασθενών ατμοσφαιρικών αναταραχών η διασπορά του λογαριθμικού πλάτους εξαρτάται, εκτός από το μήκος d της ζεύξης που αναφέραμε προηγουμένως, από τον κυματικό αριθμό (k) και την δομική παράμετρο του δείκτη διάθλασης (C_n^2) και δίνεται από:

$$\sigma_\chi(d) = 0,124k^{7/6}C_n^2d^{11/6} \quad (2.18)$$

β) Μοντέλο Gamma-Gamma

Για ισχυρές συνθήκες ατμοσφαιρικών αναταραχών ή διαταραχές που οφείλονται στις κινήσεις συνεχούς μεταβολής και ακανόνιστες κινήσεις του αέρα ή στροβιλισμούς (turbulence conditions) προτείνεται η Gamma-Gamma Κατανομή, η οποία είναι μια πολλαπλασιαστική τυχαία διαδικασία (ή διαδικασία διαμόρφωσης) που χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει τόσο μικρής όσο και μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικές διακυμάνσεις (fluctuations). Για τον υπολογισμό των παραμέτρων αυτής της κατανομής χρησιμοποιούνται μόνο μετρήσιμες τιμές των C_n^2 (refractive index structure parameter ή Rytov variance) και inner scale l_0 . Χρησιμοποιείται η ευρηστική θεωρία για τους σπινθηρισμούς (heuristic theory of scintillation) που εφαρμόζεται για διάδοση οπτικών σημάτων για όλες τις συνθήκες διακύμανσης της έντασης φωτός. Ένα οπτικό σήμα διαδιδόμενο μέσα από ατμοσφαιρικές αναταραχές θα υπόκειται σε διακυμάνσεις φωτεινής ισχύος (σπινθηρισμούς), λόγω των μικρών διακυμάνσεων του δείκτη διάθλασης που συχνά αποκαλείται οπτική διαταραχή (optical turbulence). Θεωρητικές και πειραματικές μελέτες της διακύμανσης της φωτεινής έντασης παρουσιάζουν το δείκτη σπινθηρισμών:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (2.19)$$

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

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

$$\sigma_I^2(d) = 0,123k^{7/6}C_n^2d^{11/6} \quad (2.20)$$

όπου $k=2\pi/\lambda$ ο οπτικός κυματαριθμός, λ το μήκος κύματος και d το μήκος της διαδρομής διάδοσης μεταξύ πομπού και δέκτη.

Για τιμές μικρότερες της μονάδας η διασπορά Rytov είναι ο δείκτης σπινθηρισμών ενός επίπεδου κύματος χωρίς την παρουσία φαινομένων εσωτερικής κλίμακας (inner scale effects) ενώ για τιμές μεγαλύτερες της μονάδας θεωρείται ως μέτρο ισχύος (ή έντασης) των οπτικών διακυμάνσεων. Κάτω από ασθενείς συνθήκες διακυμάνσεων ο δείκτης σπινθηρισμών, αυξάνει με την αύξηση της διασποράς Rytov. Ο δείκτης σπινθηρισμών συνεχίζει να αυξάνει κάτω από συνθήκες ασθενών διακυμάνσεων και φτάνει σε μια μέγιστη τιμή μεγαλύτερη της μονάδας (μερικές φορές ίση με 5 ή 6) σε συνθήκες τυχαίας εστίασης (random focusing).

Με τη αύξηση του μήκους της διαδρομής ή την ισχυροποίηση της ανομοιογένειας, το φαινόμενο εστίασης ή εστιακό φαινόμενο (focusing effect) εξασθενεί από πολλαπλές αυτό-παρεμβολές (self-interference) και σιγά-σιγά οι διακυμάνσεις αρχίζουν να μειώνονται και φτάνουν στον κορεσμό, με την τιμή του δείκτη σπινθηρισμών να προσεγγίζει τη μονάδα από πάνω. Η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας του λαμβανόμενου οπτικού σήματος μοντελοποιείται ως γινόμενο $I=xy$, όπου το x προκύπτει από τις μεγάλης κλίμακας και το y από τις μικρής κλίμακας αναταραχές. Υποθέτουμε ότι τα x και y είναι στατιστικά ανεξάρτητες τυχαίες διαδικασίες για τις οποίες η ροπή δεύτερης τάξης της φωτεινής έντασης είναι:

$$\langle I^2 \rangle = \langle x^2 \rangle \langle y^2 \rangle = (1 + \sigma_x^2)(1 + \sigma_y^2) \quad (2.21)$$

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

Υπό συνθήκες ισχυρών διακυμάνσεων, τα χωρικά κελιά το μέγεθος των οποίων είναι μεταξύ της ακτίνας συνοχής (ρ_0) και του δίσκου διασποράς ($L/k\rho_0$), συνεισφέρουν λίγο στους σπινθηρισμούς. Αυτό συμβαίνει γιατί, ένεκα της απώλειας της χωρικής συνοχής, μόνο τα πολύ μεγάλα κελιά κοντά στον πομπό έχουν κάποιο εστιακό αποτέλεσμα στον φωτισμό των μικρών περιθλαστικών κυττάρων πλησίον του δέκτη και τελικά ακόμα και αυτά τα μεγάλα κελιά αδυνατούν να προκαλέσουν εστίαση ή απόκλιση της δέσμης. Όταν συμβεί αυτή η απώλεια της συνοχής, ο φωτισμός των μικρών κυττάρων είναι στατιστικά άρτια κατανεμημένος και οι διακυμάνσεις του διαδιδόμενου κύματος προκαλούνται λόγω της τυχαίας παρεμβολής ενός μεγάλου αριθμού σκεδαστών περίθλασης των μικρών κυττάρων. Προκειμένου να αναπτυχθεί ένα μοντέλο συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας συνεπές με την παραπάνω θεωρία, γίνεται η υπόθεση ότι τόσο οι μεγάλης κλίμακας, όσο και οι μικρής κλίμακας διακυμάνσεις της φωτεινής έντασης ακολουθούν Gamma κατανομή, δηλαδή

$$p_x(x) = \frac{\alpha(\alpha x)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-\alpha x), x > 0, \alpha > 0 \quad (2.22)$$

$$p_y(y) = \frac{\beta(\beta y)^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \exp(-\beta y), y > 0, \beta > 0 \quad (2.23)$$

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

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

$$p_y(I/x) = \frac{\beta(\beta I/x)^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \exp(-\beta I/x), I > 0 \quad (2.24)$$

όπου x είναι η υπό συνθήκη μέση τιμή του I .

Για να παράξουμε την άνευ συνθήκης κατανομή της φωτεινής έντασης ακτινοβολίας υπολογίζουμε το

$$p(I) = \int_0^{\infty} p_y(I/x)p_x(x)dx = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}[2(\alpha\beta I)^{1/2}], I > 0 \quad (2.25)$$

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

Ορίζεται ως η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της Gamma-Gamma κατανομής.

Η παράμετρος α αντιπροσωπεύει τον ενεργό αριθμό των μεγάλης κλίμακας κελιών της διαδικασίας σκέδασης και η παράμετρος β όμοια, τον ενεργό αριθμό των μικρής κλίμακας κελιών. Τα α και β δίνονται από τις σχέσεις:

$$\alpha = \left[\exp \left(\frac{0.49\beta_0^2}{(1+0.18d^2+0.56\beta_0^{12/5})^{7/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (2.26)$$

$$\beta = \left[\exp \left(\frac{0.51\beta_0^2}{(1+0.9d^2+0.62d^2\beta_0^{12/5})^{5/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (2.27)$$

όπου $\beta_0^2 = 0,5C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ είναι η διασπορά Rytov για επίπεδο κύμα στη θεωρία ασθενών σπινθηρισμών και $d=(kD^2/4L)^{1/2}$ η παράμετρος που χαρακτηρίζει τη διάμετρο του ανοίγματος του δέκτη.

Και πάλι εδώ το $k = 2\pi/\lambda$ είναι ο οπτικός κυματικός αριθμός,

λ το μήκος κύματος,

C_n^2 η δομική παράμετρος του δείκτη διάθλασης και

D η διάμετρος του ανοίγματος του δέκτη.

Η πιθανότητα ο στιγμιαίος σηματοθορυβικός λόγος γ να βρίσκεται κάτω από ένα ορισμένο κατώφλι γ_{th} (δηλαδή η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της Gamma-Gamma κατανομής) δίνεται από:

$$F_\gamma(\gamma_{th}) = \frac{(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \sqrt[4]{\left(\frac{\gamma_{th}}{\gamma}\right)^{\alpha+\beta}} \times G_{1,3}^{2,1} \left[\alpha\beta \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{\gamma}} \left| \begin{matrix} 1 - \frac{\alpha+\beta}{2} \\ \alpha - \beta, \beta - \alpha, -\frac{\alpha+\beta}{2} \end{matrix} \right. \right] \quad (2.28)$$

Όταν οι οπτικές διαταραχές είναι ασθενείς, ο ενεργός αριθμός των κελιών με μέγεθος μικρότερο και μεγαλύτερο από την πρώτη ζώνη Fresnel είναι

μεγάλος, με αποτέλεσμα $\alpha \gg 1$ και $\beta \gg 1$.

Όσον οι διακυμάνσεις της φωτεινής ισχύος αυξάνονται και προσεγγίζεται η περιοχή εστίασης (ή η συνθήκη εστίασης - focusing regime) και οι δύο παράμετροι της 3.17 μειώνονται σημαντικά.

Πέρα από την περιοχή εστίασης και προσεγγίζοντας την περιοχή του κορεσμού, βρίσκουμε ότι $\beta \rightarrow 1$, υποδηλώνοντας ότι ο ενεργός αριθμός των μικρής κλίμακας κελιών τελικά μειώνεται στη μονάδα, υπολογισμένος από την εγκάρσια χωρική συνοχή της ακτίνας του οπτικού κύματος. Από την άλλη, ο ενεργός αριθμός των διακριτών σκεδαστών περίθλασης α αυξάνεται ξανά με την αύξηση της ισχύος των διαταραχών και τελικά γίνεται απεριόριστος στην περιοχή του κορεσμού.

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

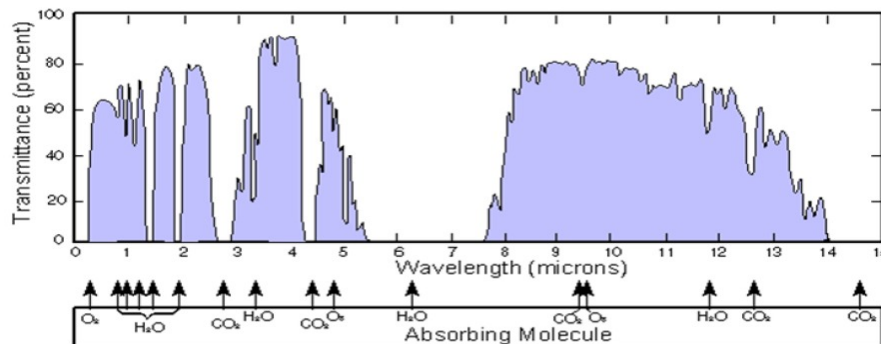
$$\alpha = \frac{1}{\sigma_x^2}, \quad \beta = \frac{1}{\sigma_y^2} \quad (2.29)$$

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

$$\sigma_I^2 = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha\beta} \quad (2.30)$$

2.4. Ζώνες συχνότητας ιδανικές για μετάδοση στον αέρα

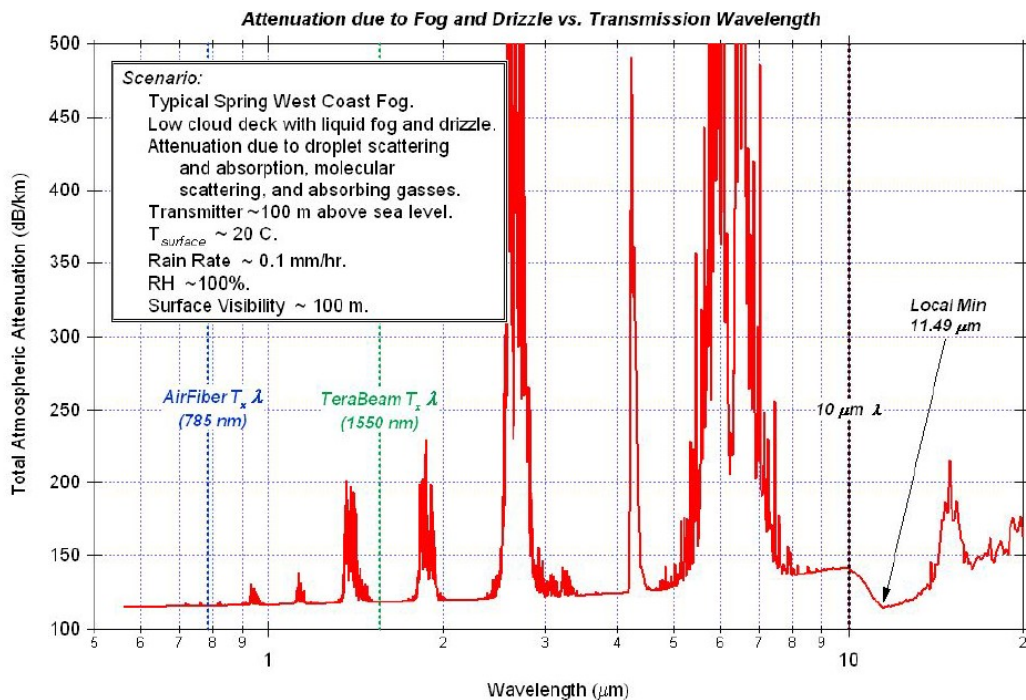
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, λόγω της επιλεκτικής απορρόφησης της ατμόσφαιρας, στα FSO χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα μήκη κύματος.



Εικόνα 25: Ενρύ διάγραμμα απορρόφησης από μόρια στην ατμόσφαιρα ανά μήκος κύματος και παράθυρα διάδοσης

Από τα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 25 και 26 μπορούν να διακριθούν τα παράθυρα διάδοσης, τα οποία και χρησιμοποιούνται, αλλά και τα μοριακά στοιχεία που ευθύνονται για την απορρόφηση. Στο ευρύτερο φάσμα του υπέρυθρου, παράθυρα διάδοσης διακρίνονται στις ζώνες 2.0-2.5 μm , 3.2-4.2 μm , 4.5-5.2 μm , και 8.0-13.5 μm , ενώ διακρίνονται οξείες βυθίσεις στη διάδοση για τις οποίες ευθύνονται τα μόρια του νερού με μέγιστη απορρόφηση βρίσκεται στο μήκος κύματος των 0.93 μm , 1.13 μm , 1.4 μm , 1.87 μm , και 2,74 μm ενώ οι μέγιστες βυθίσεις στα 2.7 μm και 4.26 μm οφείλονται στα μόρια διοξειδίου του άνθρακα, και στα 9.5 μm το όζον.

Τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα μήκη κύματος στα FSO είναι τα 780nm, 850nm, 1060nm, 1250nm και 1550nm, από τα οποία ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα 850nm λόγω του χαμηλού κόστους ως προς την απόδοση άμεση διάθεση, τα 1550nm λόγω της μεγάλης επιτρεπτής εκπεμπόμενης ισχύος (50 φορές παραπάνω περίπου) λόγω απορρόφησης του κερατοειδή του ματιού και μικρότερη απαιτούμενη ισχύ στο δέκτη λόγω ενέργειας των φωτονίων αυτού του μήκους κύματος.



Εικόνα 26: Διάγραμμα ατμοσφαιρικής απορρόφησης σε περιβάλλον με ομίχλης ορατότητας 100m και ψιλή βροχή, αποτέλεσμα μελέτης MODTRAN από τον Eric Woodbridge, AirFiber Inc

Τα μήκη κύματος των 1060 και 1250 δεν χρησιμοποιούνται εκτεταμένα για το λόγο ότι παρόλο που βρίσκονται σε παράθυρα διάδοσης στην ατμόσφαιρα, δεν αντιστοιχούν σε αυτά τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται στον ευρύτερο τομέα των οπτικών ζεύξεων οπτικών ινών, οπότε ο αντίστοιχος εξοπλισμός δυσεύρετος και ασύμφορος. Στα παραπλήσια μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται στις ζεύξεις οπτικών ινών είναι τα 980nm που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση σήματος παρέχοντας ενέργεια στις οπτικές εμπλουτισμένες με erbium, όπου δεν παράγεται με προδιαγραφές υψηλών ρυθμών διαμόρφωσης. Αντίστοιχα κοντά στα 1250nm βρίσκεται εξοπλισμός στα 1310nm που όμως δεν αντιστοιχεί σε παράθυρο διάδοσης στην ατμόσφαιρα.

Η τοπική ελάχιστη απορρόφηση στο $\lambda=11.49\mu\text{m}$ αλλά και το εύρος των $3.5\mu\text{m}-4.2\mu\text{m}$ περίπου, ενδέχεται να έχουν σημαντικό ρόλο στα μελλοντικά συστήματα των Free Space Optics, ομοίως λόγω αυξημένης επιτρεπόμενης εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, και επιδόσεων λόγω ενέργειας φωτονίων. Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, οι μόνες πηγές που έχουν τη δυνατότητα να εκπέμπουν αυτή την ακτινοβολία και ταυτόχρονα σε υψηλούς ρυθμούς διαμόρφωσης είναι τα Quantum Cascade Lasers, τα οποία αποτελούν προς το παρόν ακριβή και δύσκολα προσβάσιμη τεχνολογία αλλά με μεγάλες προσδοκίες.

2.5. Απαιτήσεις ισχύος

Στο κανάλι της ατμόσφαιρας όπως περιγράφηκε σε αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνει σωρεία παραγόντων απόσβεσης. Στη μελέτη μιας ζεύξης FSO μια παράμετρος κλειδί στην σχεδίαση των FSO ζεύξεων είναι η εκτίμηση του ισολογισμού ισχύος (Link Budget). Το περιθώριο διαλείψεων της ζεύξης, M_{link} (dB), το οποίο είναι η διαθέσιμη ισχύς πάνω από την ευαισθησία του δέκτη, και μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{geo} - A_{atmo} - A_{scintillation} - A_{system} \quad (2.31)$$

όπου:

P_e (dBm): η συνολική ισχύς του πομπού

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

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

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

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

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

Η διαθεσιμότητα της ζεύξης (Link Availability) συνδέεται με τον ισολογισμό ισχύος (Link Budget) μέσω του λειτουργικού περιθωρίου του συστήματος (System Operating Margin SOM), όπου:

$$SOM = M_{link} - S_r \quad (2.32)$$

Η παραπάνω έκφραση περιγράφει τη διαφορά της ελάχιστης λαμβανόμενης ισχύος με την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ ώστε ο δέκτης να ανιχνεύει σωστά την πληροφορία, και η διαθεσιμότητα της ζεύξης σε ποσοστό διαθεσιμότητας (availability %) και χρόνο αδιαθεσίας της ζεύξης (downtime t) ανά έτος, δίνεται από τον παρακάτω πίνακα.

SOM (dBm)	Availability %	Downtime (per year)
8	90	876 ώρες
18	99	88 ώρες
28	99,9	8,8 ώρες
38	99,99	53 λεπτά
48	99,999	5,3 λεπτά
58	99,9999	32 δευτερόλεπτα

Κεφάλαιο 3: Ασφάλεια

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί αφενός η ασφάλεια του συστήματος ως προς τη υγεία, αλλά και αφετέρου ως προς την ιδιωτικότητα των δεδομένων μετάδοσης σε ένα σύστημα Free Space Optics.

3.1. Φυσική Ασφάλεια και Κανονισμοί

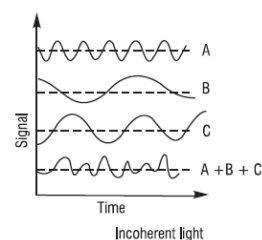
Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο περιορισμός ισχύος του εκπεμπόμενης ακτινοβολίας στα FSO σχετίζεται άμεσα και αποκλειστικά με την επικινδυνότητα της ακτινοβολίας για τον άνθρωπο, και συγκεκριμένα με τις επιβλαβείς επιπτώσεις στην όραση. Η ένταση της ακτινοβολίας κατηγοριοποιείται βάσει επικινδυνότητας από δύο παράγοντες. Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και την ένταση φωτός ανά επιφάνεια (W/m^2). Το μάτι είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στο ορατό και στο κοντινό υπέρυθρο (IR-A) συνολικά από τα 400nm έως τα 1400nm, όπου η περισσότερη ακτινοβολία απορροφάται από τον αμφιβληστροειδή, ενώ το φάσμα των 315nm – 390 και 1400nm - 3000nm απορροφούνται από το φακό και το φάσμα των 180nm – 315nm και 3000nm - 1mm απορροφούνται από τον κερατοειδή. Η κατηγοριοποίηση του οπτικού εύρους φαίνεται στην εικόνα 27.

Laser Wavelength Regions	
IR-C	= 1 mm to 3000 nm
IR-B	= 3000 nm to 1400 nm
IR-A	= 1400 nm to 700 nm
Visible light	= 700 nm to 400 nm
UV-A	= 400 nm to 315 nm
UV-B	= 315 nm to 280 nm
UV-C	= 280 nm to 100 nm

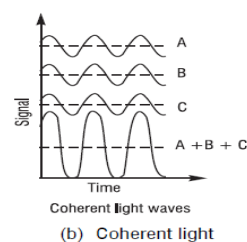
Εικόνα 27: Περιοχές μήκους κύματος και κωδικοποίηση

Επίσης, λόγω του ότι το μάτι εστιάζει την εικόνα σε ένα πολύ μικρό σημείο στο πίσω μέρος του, λειτουργεί ως ένας φυσικός οπτικός ενισχυτής όπου η οπτική ισχύς που εμφανίζεται στον αμφιβληστροειδή είναι $10^5 - 10^6$ φορές μεγαλύτερη απ' ό,τι μπροστά από αυτό.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα Laser, σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από τα Led για το λόγο ότι στα laser τα φωτόνια είναι συμφασικά και παράλληλα. Ο παράγοντας της παραλληλίας τους έχει ως αποτέλεσμα την εστίαση της ακτινοβολίας σε μικρότερο σημείο απ' ό,τι της διάχυτης, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη ισχύ ανά επιφάνεια, και ο παράγοντας της συμφασικής φύσης της ακτινοβολίας των laser, την οπτική ισχύ του κάθε κύματος να προστίθεται, σε στιγμιαία ισχύ πολλές φορές μεγαλύτερη, συγκριτικά με την ακτινοβολία από ένα Led που κατά μέσο όρο η μέγιστη τιμή είναι αυτή του μεγαλύτερου κύματος (εικόνες 28 και 29). λόγω αυτών των ιδιοτήτων, τα laser έχουν κατηγοριοποιηθεί σε κατηγορίες επικινδυνότητας ώστε να περιορίζεται η χρήση τους σε ελεγχόμενο περιβάλλον ή να απαιτείται η χρήση ειδικού προστατευτικού εξοπλισμού. Οι κατηγορίες αυτές των laser αναλύονται παρακάτω.



Εικόνα 28: Ασύμφωνη ακτινοβολία



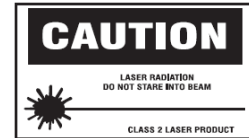
Εικόνα 29: Συμφασική ακτινοβολία

Class 1:

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι πηγές ακτινοβολίας που δεν προκαλούν κανένα πρόβλημα, ή πηγές laser των οποίων η δέσμη δεν μπορεί να έρθει σε οπτική επαφή λόγω κάλυψης. Οριοθετεί το Μέγιστο Επιτρεπτό Όριο Εκπομπής (Maximum Permissible Exposure MPE), τυπικά $2\text{mW}/\text{cm}^2$.

Class 2: (βλ. Εικόνα δεξιά)

Περιλαμβάνει πηγές laser των οποίων η ισχύς είναι της τάξης του 1mW , αρκετά μικρή ώστε να μη μπορεί να προξενήσει προβλήματα εφόσον έρθει σε οπτική επαφή για πολύ μικρό χρόνο, ενώ μπορεί να προξενήσει πρόβλημα αν η επαφή γίνει εκτεταμένα. Επιβάλλεται χρήση ενδεικτικού προσοχής (CAUTION).



Εικόνα 30: Ενδεικτικό Class 2 Laser

Class 3a: (βλ. Εικόνα δεξιά)

Laser ισχύος $1\text{mW} - 5\text{mW}$, με ακτινοβολία αβλαβή στο γυμνό μάτι, αλλά επιβλαβή εάν έρθει σε επαφή μέσω εξοπλισμού οπτικής ενίσχυσης, όπως κιάλια. Επιβάλλεται χρήση ενδεικτικού, ανάλογα της ισχύος, προσοχής ή κινδύνου (DANGER).



Εικόνα 31: Ενδεικτικό Class 3a Laser

Class 3b: (βλ. Εικόνα δεξιά)

Laser ισχύος $5\text{mW} - 500\text{mW}$, με ακτινοβολία αρκετά ισχυρή ώστε να μπορούν να προκαλέσουν τραυματισμό στον αμφιβληστροειδή, στην περίπτωση οπτικής επαφής χωρίς προστατευτικό εξοπλισμό όρασης. Επίσης προκαλεί επιβλαβείς ανακλάσεις. Επιβάλλεται ενδεικτικό κινδύνου, και προστατευτικός εξοπλισμός όρασης.



Εικόνα 32: Ενδεικτικό Class 3b Laser

Class 4: (βλ. Εικόνα δεξιά)

Laser ισχύος πάνω από 500mW , με ακτινοβολία αρκετά ισχυρή ώστε να προκαλεί τραυματισμό στην όραση και το δέρμα σε περίπτωση απευθείας επαφής, αντανάκλασης, και διάχυσης. Επίσης μπορεί να προκαλέσει ανάφλεξη με κίνδυνο φωτιάς. Επιβάλλεται ενδεικτικό κινδύνου, και προστατευτικός εξοπλισμός όρασης και δέρματος.



Εικόνα 33: Ενδεικτικό Class 4

Τα Laser με ακτινοβολία στο υπέρυθρο φάσμα είναι σαφώς πιο επικίνδυνα, λόγω της έλλειψης της αντανάκλαστικής αυτοάμυνας του ανθρώπου, να αλλάξει οπτικό πεδίο ή να κλείσει τα μάτια. Η αντίδραση αυτή ουσιαστικά ελαττώνει το χρόνο έκθεσης στην ακτινοβολία, πράγμα που δεν συμβαίνει στην υπέρυθρη. Επίσης, είναι πιθανό να προκληθεί τραυματισμός και από ακτινοβολία του υπόλοιπου οπτικού φάσματος, αλλά με έκθεση μεγαλύτερης διάρκειας και τον τραυματισμό να επικεντρώνεται στην περιοχή απορρόφησης.

Στα συστήματα των Free Space Optics η εκπεμπόμενη ισχύς είναι μεγάλης σημασίας, αλλά περιορίζεται στο όριο MPE. λόγω του ότι το όριο αυτό μετράται σε ισχύ ανά επιφάνεια, υπάρχουν τεχνικές χρήσης μεγαλύτερης ισχύος ακτινοβολίας, τηρώντας παράλληλα και τις προδιαγραφές ασφαλείας όρασης κατηγορίας Class 1. Δύο απλοί τρόποι να πραγματοποιηθεί αυτό είναι η διεύρυνση της δέσμης ώστε η ισχύ να κατανέμεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια μέσω beam expanders, και η χρήση πολλαπλών laser ώστε η συνολική ισχύ να μοιράζεται σε πολλές διαφορετικές δέσμες, αλλά και ο συνδυασμός των δύο συναντάται σε πολλά συστήματα. Υποθετικά ένα Class 3b laser εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία ισχύος 6mW με επιφάνεια δέσμης 10mm² και πυκνότητα ισχύος 60mW/cm². Εάν η δέσμη διευρυνθεί σε δέσμη διαμέτρου 96mm και επιφάνειας 300mm² περίπου, η σχετική οπτική ισχύς ανά επιφάνεια είναι 33 φορές μικρότερη, και η πυκνότητα οπτικής ισχύος 1,8mW/cm², πράγμα που κατηγοριοποιεί την πηγή laser με beam spreader ως Class 1. Άλλος ένας τρόπος χρήσης μεγαλύτερης ισχύος με ασφάλεια, είναι η χρήση laser ακτινοβολίας στα 1550nm όπου λόγω απορρόφησης του φακού του ματιού, το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο είναι τα 100mW/cm², δηλαδή 50 φορές μεγαλύτερο απ' ότι αυτό της ορατής ακτινοβολίας laser.

3.2. Ασφάλεια συστήματος

Όσον αφορά την ασφάλεια του συστήματος ως προς την ιδιωτικότητα, δηλαδή την προστασία από υποκλοπές, και μη-εγκεκριμένη πρόσβαση στο δίκτυο, οι ασύρματες ζεύξεις είναι το ευκολότερο σημείο πρόσβασης, και απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό ειδικό όταν πρόκειται για ζεύξη με υψηλές απαιτήσεις στην ασφάλεια των δεδομένων.

Σε μικροκυματικές ζεύξεις, ο κεντρικός λοβός εκπομπής και λήψης των κεραιών είναι δύσκολο να περιοριστεί σε λιγότερο από μερικές μοίρες, και παράλληλα η ύπαρξη των πλευρικών και οπίσθιων λοβών καθιστά τα συστήματα αυτά σχετικά εύκολα σε πρόσβαση. Για το λόγο αυτό, και ειδικά σε point to multipoint ζεύξεις όπου η πρόσβαση είναι εύκολη όπως στα WiFi, χρησιμοποιούνται πολύπλοκοι αλγόριθμοι κρυπτογράφησης, όπως WEP, WPA και WPA2, αλλά και δικλείδες ασφαλείας στο επίπεδο πρωτοκόλλου Layer 3 όπως hardware ή software Firewalls, και πληθώρα βοηθητικών συστημάτων για την εξασφάλιση της ιδιωτικότητας ενάντια στη συνεχώς εξελισσόμενη δυνατότητα παράκαμψης αυτών των συστημάτων. Η πληθώρα των επιπλέον συστημάτων καταλαμβάνει πόρους, μειώνοντας την απόδοση του συστήματος και αυξάνοντας το κόστος συντήρησης του δικτύου, με το βέλτιστο αποτέλεσμα σε ορισμένες περιπτώσεις να μην είναι αρκετό. Τα συστήματα Free Space Optics παρέχουν αξεπέραστες επιδόσεις ασφαλείας του συστήματος στην κατηγορία των ασύρματων τηλεπικοινωνιών για το λόγο ότι η ασφάλεια της ζεύξης παρέχεται στο φυσικό επίπεδο. Με την ακτινοβολία στη μορφή μιας εξαιρετικά στενής δέσμης, η υποκλοπή θα μπορούσε να γίνει μόνο στην περίπτωση παρεμβολής όμοιου συστήματος μεταξύ των δυο συστημάτων πομποδεκτών, και αυτό υπό την προϋπόθεση ότι είναι εφικτό, γιατί στις περισσότερες περιπτώσεις, οι ζεύξεις υλοποιούνται σε γωνίες κτηρίων. Στην περίπτωση που η ζεύξη συνδέει δυο αυτόνομα δίκτυα, χωρίς άλλη πρόσβαση, η απαίτηση επιπλέον συστημάτων ασφαλείας είναι περιττή.

Κεφάλαιο 4: Υλοποιήσεις Ζεύξεων FSO

4.1. Υλοποιήσεις Εμπορικών συστημάτων

Τα εμπορικά συστήματα ασύρματων τηλεπικοινωνιών διατίθενται από αρκετούς κατασκευαστές, με παραλλαγές στο σχεδιασμό, αλλά κάποια βασικά χαρακτηριστικά που κατανέμονται ανά την κατηγορία ζεύξης που προδιαγράφονται.

Ξεκινώντας από συστήματα χαμηλών προδιαγραφών εύρους ζώνης και ισχύος, διακρίνονται συστήματα φέροντας για πομπό πολλαπλά Led ή ένα Laser, και δέκτη μια PIN φωτοδίοδο, χωρίς συστήματα auto-tracking και ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 100Mbps με διασύνδεση δικτύου Ethernet, και μέγιστη εμβέλεια κάτω από 500m. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και τα παθητικά Free Space Optics, όπου παρέχουν υποδοχές τοποθέτησης οπτικών ινών και στην ουσία επεκτείνουν το υπάρχων οπτικό δίκτυο μέσω του αέρα για μερικά μέτρα.

Καθώς η σειρά των διαθέσιμων μοντέλων αυξάνει σε προδιαγραφές, συνήθως ανταποκρίνεται η ποιότητα και ποσότητα των επιμέρους υποσυστημάτων. Ο αριθμός και η ισχύς των πομπών Laser αυξάνει για περιθώριο ισχύος εκπομπής και καλύτερη διαθεσιμότητα της ζεύξης, ενσωματώνουν δέκτη APD αυξάνει, το εύρος ζώνης στα 1,250Gbps και 2,5Gbps, και η εμβέλεια να ξεπερνά τα 1000m.



Εικόνα 35: Εμπορικό σύστημα FSO στα 10Gbps



Εικόνα 34: Εμπορικό σύστημα Free Space Optics, όπου διακρίνονται οι τρεις από τους τέσσερις εκπομπούς

Στα πλέον αποδοτικά συστήματα συναντώνται πομποδέκτες κατά κανόνα στα 1550nm, με πολλαπλά laser ισχύος μεγαλύτερη των 100mW, άνοιγμα στο δέκτη μεγάλης διατομής και κατά κανόνα φωτοδίοδο APD, και σε κάποιες περιπτώσεις πολλαπλούς δέκτες σε διάταξη για ποικιλότητα και σύγκριση του λαμβανόμενου σήματος με αυξημένη ανοσία σε σπινθηρισμούς και ευαίσθητα και πολύπλοκα συστήματα αυτόματης παρακολούθησης και εστίασης, σε εύρος ζώνης μέχρι και 10Gbps όπως το σύστημα της εικόνας 35. Το κόστος διαφοροποιείται, όπως αναμένεται, ανά κατηγορία και χαρακτηριστικών, από μερικές χιλιάδες ευρώ σε δεκάδες χιλιάδες.

4.2. Αυτοσχέδια συστήματα και το Twibright – Ronja Project στην Τσεχία

Είναι σημαντικό να αναφερθούν και τα μη εμπορικά συστήματα ασύρματων οπτικών επικοινωνιών που έχουν υλοποιηθεί και μερικά διατίθενται ελεύθερα προς υλοποίηση για εκπαιδευτικούς σκοπούς, αλλά και διεύρυνσης της περιοχής ενδιαφέροντος και περαιτέρω ανάπτυξης της τεχνολογίας αυτής.

Μια τέτοια υλοποίηση είναι το Twibright Ronja (Reasonable Optical Near Joint Access) [14] στην Τσεχία. Πρόκειται για ένα σύστημα αμφίδρομης επικοινωνίας Full-Duplex στα 10Mbps και εμβέλειας 1,4km με BER 10^{-9} , καταχωρημένο ως (Τεχνολογία Ελεγχόμενη από τον Χρήστη (User Controlled Technology)).



Εικόνα 36: Σύστημα Ασύρματου οπτικού δικτύου Ronja

Τεχνικά χαρακτηριστικά και αρχείο σχεδίασης και κατασκευής είναι διαθέσιμα δωρεάν από την κοινότητα Twibright Labs καταχωρημένα προς διάθεση βάσει GNU Free Documentation License, και το συνολικό κόστος εκτιμάται στα 100\$ με προσωπική εργασία.

Υπάρχουν διαθέσιμα τρία ολοκληρωμένα συστήματα που φέρουν τις ονομασίες Metropolis, Tetrapolis και Inferno, με το Metropolis να είναι το αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιεί διασύνδεση ομοαξονικού καλωδίου AUI μεταξύ interface και ηλεκτρονικού υπολογιστή, ενώ τα Tetrapolis και Inferno χρησιμοποιούν RJ45 για τη διασύνδεση με το δίκτυο μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή ή managed switch.

Το σύστημα χωρίζεται σε τρία μέρη, τον πομπό, το δέκτη, και το σύστημα διασύνδεσης. Ο πομπός φέρει ένα Ultrabright Led τύπου piranha εκπομπής ακτινοβολίας στα 635nm ισχύος 130mW HPWT-BD00-F4000 με μορφοποίηση της δέσμης μέσω αυτοσχέδιου beam expander και collimator κατασκευασμένου από μεταλλικούς και PVC σωλήνες διαμετρήματος 130mm και 90mm αντίστοιχα,



Εικόνα 37: Εγκατάσταση συστήματος Ronja

και μεγεθυντικούς φακούς, ενώ και ο δέκτης μια φωτοδίοδο πυριτίου PIN BPW43 και αντίστοιχη κατασκευή εστίασης. Το σύστημα διασύνδεσης το ονομάζουν twister και αναλαμβάνει την οδήγηση των σημάτων της κωδικοποίησης Manchester του δικτύου, και συγχρονισμό πομπού και δέκτη. Το σύστημα δεν είναι απόλυτα συμβατό με το 802.3 και δεν υποστηρίζει auto negotiation. Η όλη κατασκευή καταναλώνει 10w περίπου συμπεριλαμβανομένης και της κατανάλωσης της αντιθαμπωτικής αντίστασης, που διακρίνεται στην εικόνα 36. Το συνολικό βάρος της κατασκευής είναι περίπου 15kg, και απαιτεί στιβαρή εγκατάσταση, όπως στην εικόνα 37.

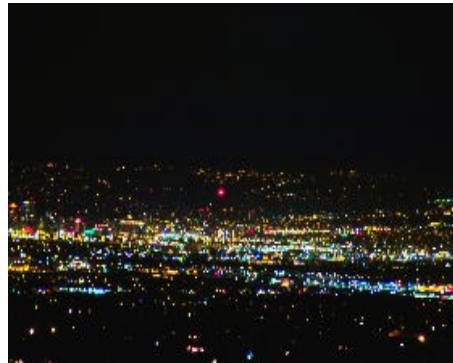


Εικόνα 38:

Τηλεπικοινωνιακός πύργος σε κορυφή κτηρίου. Η κόκκινη λάμψη είναι ένα σύστημα Ronja σε λειτουργία

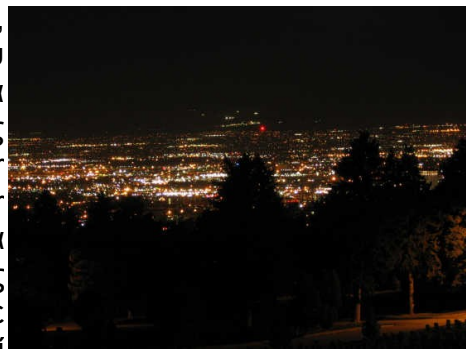
Άλλο αξιοσημείωτο σύστημα οπτικής επικοινωνίας είναι το ζεύγος αναλογικών πομποδεκτών για μετάδοση φωνής με διαμόρφωση πλάτους που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη των επιδράσεων των σπινθηρισμών σε ζεύξη μεγάλης απόστασης, αλλά και τη συμπεριφορά των δύο άκρων όπου ο ένας πομπός χρησιμοποιούσε LED και ο άλλος Laser.

Η ζεύξη πραγματοποιήθηκε την 25/4/2007 πάνω από την πόλη Salt Lake City, από τη δυτική στην βόρειο-Ανατολική πλευρά και αντίστροφα, μήκους 23,85Km. Η μορφολογία της πυκνοκατοικημένης περιοχής πάνω από την οποία έγινε η ζεύξη που απεικονίζεται στις εικόνες 39 και 40, είναι κοίλη, και με υδροφόρα περιοχή στα βόρεια. Ως αποτέλεσμα πολύ να εμφανίζονται πολύ συχνά αναταραχές στην ατμόσφαιρα. Το πείραμα έγινε



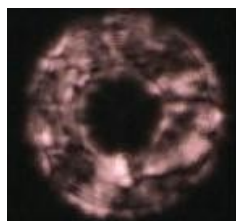
Εικόνα 39: Η οπτική της βόρειο-δυτικής πλευράς. Το κόκκινο σημείο στο βάθος είναι ο εκάστοτε πομπός

απογευματινή ώρα, με 13°C θερμοκρασία. λόγω της άμεσης σχέσης των σπινθηρισμών με τη διάμετρο της δέσμης, χρησιμοποιήθηκαν ακριβώς ίδιου ανοίγματος δέσμες, και ανοίγματα συλλογής της ακτινοβολίας στους δέκτες. Συγκεκριμένα, ως πηγή laser χρησιμοποιήθηκε διοδικό laser προδιαγραφών laser pointer, και για τη μορφοποίηση της δέσμης laser, ως beam expander χρησιμοποιήθηκε τηλεσκόπιο 20mm Celestron C8, μαζί με τροποποίηση του laser collimator για να ανοίξει αρκετά η δέσμη. Για τον πομπό LED, χρησιμοποιήθηκε LED 10mm με οπτική ένταση 5000mcd και άνοιγμα 30° στα 660nm.



Εικόνα 40: Η οπτική της νοτιοανατολικής πλευράς.

Τα πειράματα ήταν η μετάδοση ακουστικών κομματιών μουσικής μικρής διάρκειας τα οποία ηχογραφήθηκαν και συγκρίθηκαν, σε διάφορες συνθήκες. Τα αποτελέσματα έδειξαν εντονότερη παραμόρφωση της δέσμης laser από την άποψη ότι ο ήχος είχε υποστεί σύντομες και απότομες αυξομειώσεις έντασης και διαλείψεις, αντίστοιχες με ομηλία από ασύρματο με πολλά παράσιτα, ενώ ο η δέσμη από το LED είχε υποστεί μεν παραμόρφωση, αλλά εμφανιζόταν ως άμβλυση, όπου ο ήχος ακουγόταν μουντός, αλλά αρκετά καθαρός. Επίσης βίντεο της εικόνας που λάμβανε ο δέκτης δείχνει καθαρά τις διαφορετικές επιπτώσεις του σπινθηρισμού ανάμεσα στη συμφασική ακτινοβολία του laser και τη διάχυτη του LED, όπου και εικονίζονται παρακάτω.



Εικόνα 41: Επιδράσεις σπινθηρισμών στη δέσμη laser



Εικόνα 42: Επιδράσεις σπινθηρισμών στη δέσμη από το LED

4.3. Είδη Διασύνδεσης

Ένα βασικό σύστημα επικοινωνίας αναλαμβάνει τη διασύνδεση δυο γραμμών μεταφοράς δεδομένων. Τα δεδομένα ενδέχεται να πρέπει να έχουν διαφορετική μορφή για τη μετάδοση στην εκάστοτε γραμμή. Στις οπτικές επικοινωνίες η μετατροπή είναι από ηλεκτρική μορφή σε οπτική και αντίστροφα. Στο ηλεκτρική φύσης μέρος, γίνονται όλες οι μετατροπές πριν τα δεδομένα ακολουθήσουν το οπτικό κανάλι, και το υποσύστημα διασύνδεσης αναλαμβάνει αυτό το έργο.

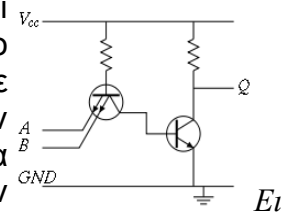
Στις αναλογικές τηλεπικοινωνίες το σήμα είναι αναλογικό, και σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται αναλογική διαμόρφωση έντασης ακτινοβολίας σε χαμηλών προδιαγραφών συστήματα FSO. Αφενός οι ψηφιακές διαμορφώσεις ανταπεξέρχονται καλύτερα στο ασταθές κανάλι της ατμόσφαιρας, και αφετέρου υπάρχει η δυνατότητα πολύ μεγαλύτερων ρυθμών μεταφοράς δεδομένων μέσω του ψηφιακού καναλιού. Τα αναλογικά σήματα, ψηφιοποιούνται με μικρές απώλειες, και πολυπλέκονται στο ίδιο κανάλι. Ένας τρόπος πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται γενικότερα στις οπτικές επικοινωνίες είναι η χρήση Ser/Des (serializers/Deserializers).

Τα δεδομένα από το οπτικό κανάλι αποπλέκονται και συνήθως καταλήγουν σε κάποιο Interface, το οποίο μορφοποιεί τις λογικές στάθμες τάσης των bits ώστε να είναι συμβατά με τυποποιήσεις που χρησιμοποιούν τα περισσότερα ολοκληρωμένα κυκλώματα κωδικοποίησης και μετάφρασης των δεδομένων αναμεταξύ των πρωτοκόλλων επικοινωνίας.

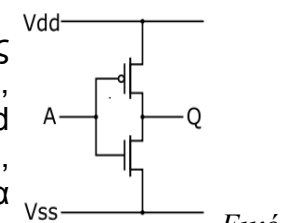
Οι διαφορετικές στάθμες τάσης αντιστοιχούν σε τεχνολογίες μικροηλεκτρονικής, όπως CMOS, TTL, ECL, PECL, LVPECL, LVDS, CML.

Οι γνωστές παλαιάς πλέον τεχνολογίας και απλές CMOS, TTL από MOSFET και τρανζίστορ αντίστοιχα, και οι ECL, PECL και LVPECL από Emitter Coupled Logic, Positive ECL, Low Voltage PECL, χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε συστήματα ψηφιακών τηλεπικοινωνιών, ιδιαίτερα το LVPECL. Τα ακρώνυμα LVDS αντιστοιχούν σε Low Voltage Differential Logic και χρησιμοποιούνται σε υψηλής ταχύτητας μνήμες αλλά και σε συστήματα τηλεπικοινωνιών.

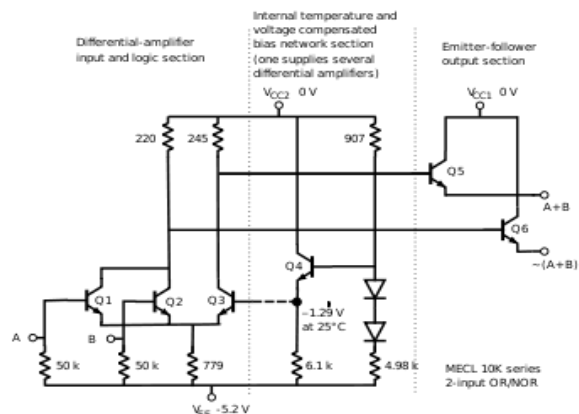
Τέλος, τα CML ή SCL (Current Mode Logic ή Source-Coupled Logic) στα HDMI και DVI, αλλά και σε συστήματα από 312.5MHz έως 3.125GHz συμπεριλαμβανομένων και συστημάτων υψηλόρυθμων τηλεπικοινωνιών. Οι είσοδοι και έξοδοι που λειτουργούν με αυτές τις λογικές στάθμες απαιτούν και συγκεκριμένο τερματισμό.



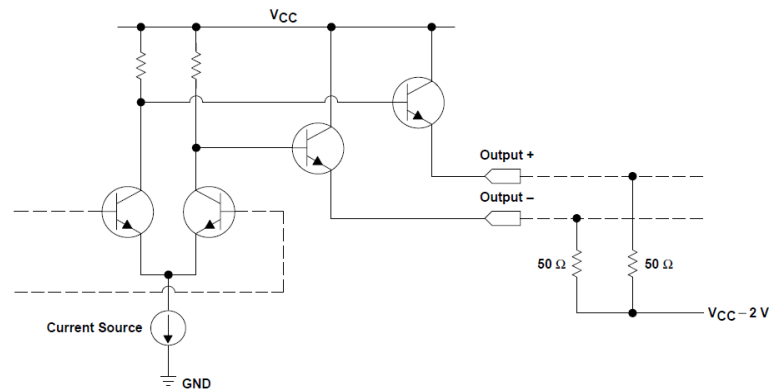
κόνα 43: TTL Logic



Εικόνα 44: CMOS Logic



Εικόνα 45: ECL Logic



Εικόνα 46: Τυπικό μπλόκ διάγραμμα και τερματισμός βαθμίδας εξόδου LVPECL

Τη λύση για τη διασύνδεση μεταξύ συστημάτων που χρησιμοποιούν διαφορετικές λογικές στάθμες I/O χρησιμοποιούνται μεταφραστές. Ολοκληρωμένα κυκλώματα buffer με εισόδους A τύπου λογικής σε B τύπου λογικής, για παράδειγμα TTL σε LVPECL και αντίστροφα.

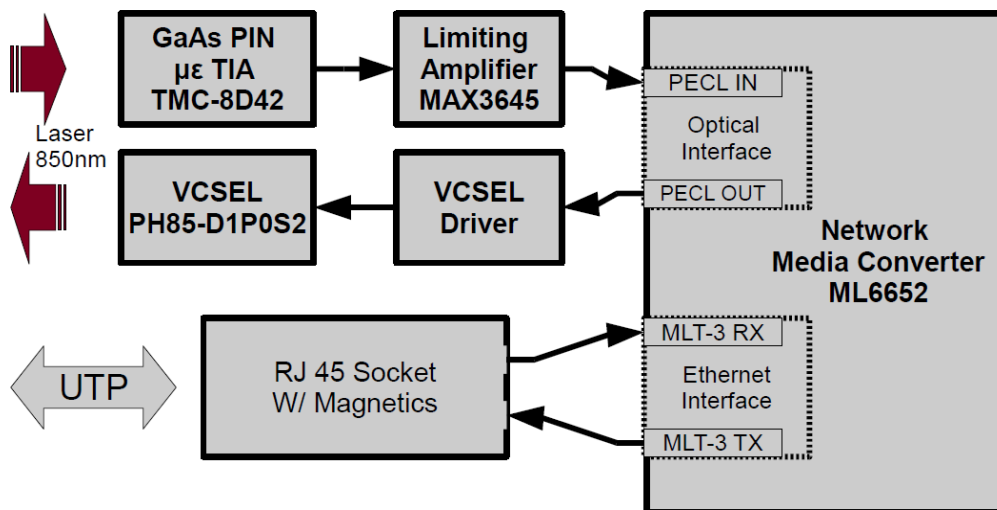
Στο επίπεδο κωδικοποίησης / αποκωδικοποίησης πολλές φορές βρίσκεται ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα που αναλαμβάνει το έργο μετατροπής των σημάτων του φυσικού επιπέδου του δικτύου και συναντάται ως PHY σαν συντομογραφία. Τα chips αυτά βρίσκονται σε switch, routers, NICs και γενικότερα δικτυακό εξοπλισμό και συσκευές, αλλά και στα δικτυακά Media Converters.

Τα τελευταία, αναλαμβάνουν τη μετατροπή του σήματος από το ένα μέσο στο άλλο. Στην προκειμένη περίπτωση, πολύ συχνά στα FSO ταχυτήτων έως 1.25Gbps ενσωματώνεται ένας τέτοιου τύπου PHY για τη μετατροπή του 1000Base-FX στο 1000Base-T, αλλά και σαν αναμεταδότης του οπτικού σήματος από το FSO στο δίκτυο οπτικών ινών της εγκατάστασης. Τα περισσότερα Network Media Converters έχουν τη δυνατότητα επιλογής εάν θα είναι ορατή από το υπόλοιπο δίκτυο ή θα είναι σε αόρατη λειτουργία Transparent Mode, όπως τα Switch, κάνοντας τη μετατροπή σαν φυσική προέκταση του δικτύου. Επίσης, πολλά FSO έχουν τη δυνατότητα παρακολούθησης της κατάστασης της ζεύξης σε λαμβανόμενο σήμα, περιθώρια ισχύος, φόρτο και διαθέσιμο bandwidth, τυχόν downtime και γενικότερα διαχείριση σε περιβάλλον κονσόλας ή ιστοσελίδας.

Κεφάλαιο 5: Σύστημα FSO στα 100Mbps

5.1. Βασικά χαρακτηριστικά

Το σύστημα Free Space Optics που υλοποιείται σε αυτή την εργασία πληρεί τις προδιαγραφές για λειτουργία στα 125Mbps του 100Base-FX με Link Budget περίπου 30dB και θεωρητική διαθεσιμότητα της ζεύξης 99,9% και χαμηλό κόστος υλοποίησης. Ο πομπός χρησιμοποιεί ένα Class3b VCSEL εκπομπής ακτινοβολίας ισχύος 10mW στα 850nm με προδιαγραφές λειτουργίας για Gigabit Ethernet με απευθείας διαμόρφωση έντασης (IM) παλμών NRZI, και ο δέκτης φωτοδίοδο GaAs PIN με κεντρικό μήκος κύματος ανίχνευσης τα 850nm και ευαισθησία 1,4mV/μW οπτικής ισχύος που λαμβάνει, επίσης προδιαγραφών Gigabit Ethernet και άνοιγμα συλλογής της ακτινοβολίας έχει διατομή 90mm. Τη διασύνδεση των Interface αναλαμβάνει δικτυακός Media Converter από 100Base-FX σε 1000Base-T. Τα επιμέρους υποσυστήματα αναλύονται παρακάτω και ακολουθεί διάγραμμα Block των υποσυστημάτων της εικόνας 47.



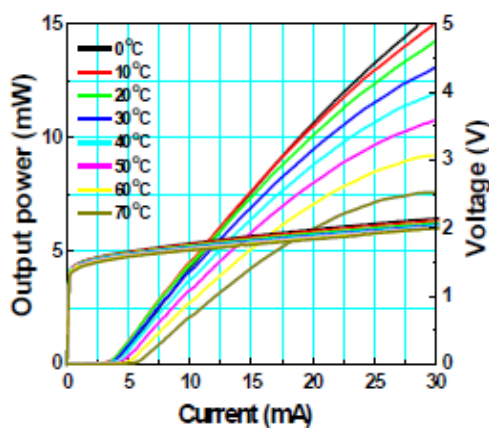
Εικόνα 47: Διάγραμμα Block του συστήματος Free Space Optics

5.2. Optical Interface

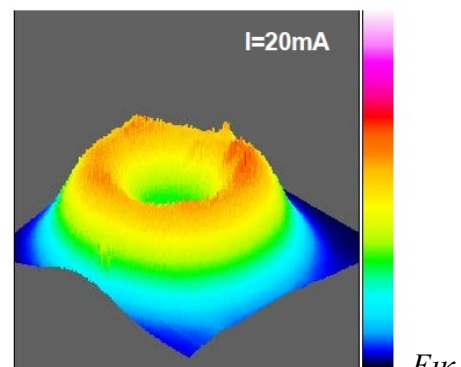
Το οπτικό υποσύστημα περιλαμβάνει όπως αναφέρθηκε ένα VCSEL από τον κατασκευαστή Roithner-laser με κωδικό PH85-D1P0S2 με το PH85 τον κωδικό σειράς με εκπεμπόμενη ακτινοβολία στα 850nm, το D1 υποδεικνύει την ύπαρξη σφαιρικού φακού μορφοποίησης της δέσμης με 2mrad απόκλιση, το P0 υποδεικνύει την έλλειψη εσωτερικής φωτοδιόδου, και το S2 τις προδιαγραφές εύρους ζώνης 1.25Gbps. Αναλυτικότερα, λόγω ότι τα VCSEL έχουν μικρότερο κατώφλι ρεύματος γραμμικής λειτουργίας, το PH85-D1P0S2 έχει εύρος ρεύματος γραμμικής λειτουργίας από τα 5mA έως τα 20mA όπου και εκπέμπει 10mW οπτικής ισχύος.

Η απόλυτη μέγιστη τιμή του ρεύματος που δεν πρέπει να ξεπεραστεί είναι τα 30mA. Η συμπεριφορά του στη θερμοκρασία είναι πολύ καλή, και σε συνδυασμό με τη χαμηλή στάθμη ρεύματος λειτουργίας η χρήση ενεργής ψύξης δεν είναι απαραίτητη. λόγω των διακυμάνσεων θερμοκρασίας, το κατώφλι γραμμικής λειτουργίας αυξάνει, συνεπώς αν η πόλωση αυξηθεί στα περίπου 6-7mA, περιορίζεται η ανάγκη παρακολούθησης και αυτόματης διόρθωσης του κατωφλίου ρεύματος.

Οι εικονιζόμενες οι χαρακτηριστικές LIV βάση θερμοκρασίας, περιγράφουν τη συμπεριφορά του VCSEL ανά τη θερμοκρασία και το κατώφλι πόλωσης. Η εικονιζόμενη τρισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της έντασης της ακτινοβολίας εκ πρώτης όψης φαίνεται αναποτελεσματική. Όμως το δακτυλιοειδές μοτίβο του μετώπου της δέσμης που σχηματίζεται είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό όταν ο συλλέκτης φωτός του δέκτη είναι τηλεσκόπιο ανακλαστικού τύπου, όπου δεν λαμβάνει ακτινοβολία από το κέντρο του ανοίγματος, αλλά περιμετρικά αυτού. Οι εικόνες 41 και 42 του κεφαλαίου 4.2 έχουν ληφθεί μέσω τηλεσκοπίου τέτοιου τύπου. Σε συνδυασμό με ίδιου διαμετρήματος Beam Expander και βέλτιστης ευθυγράμμισης της δέσμης, η απόδοση είναι βέλτιστη.



Εικόνα 48: Χαρακτηριστικές καμπύλες LIV ανά θερμοκρασία



Εικόνα 49: Τρισδιάστατη απεικόνιση έντασης εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του VCSEL από την επιφάνεια του chip

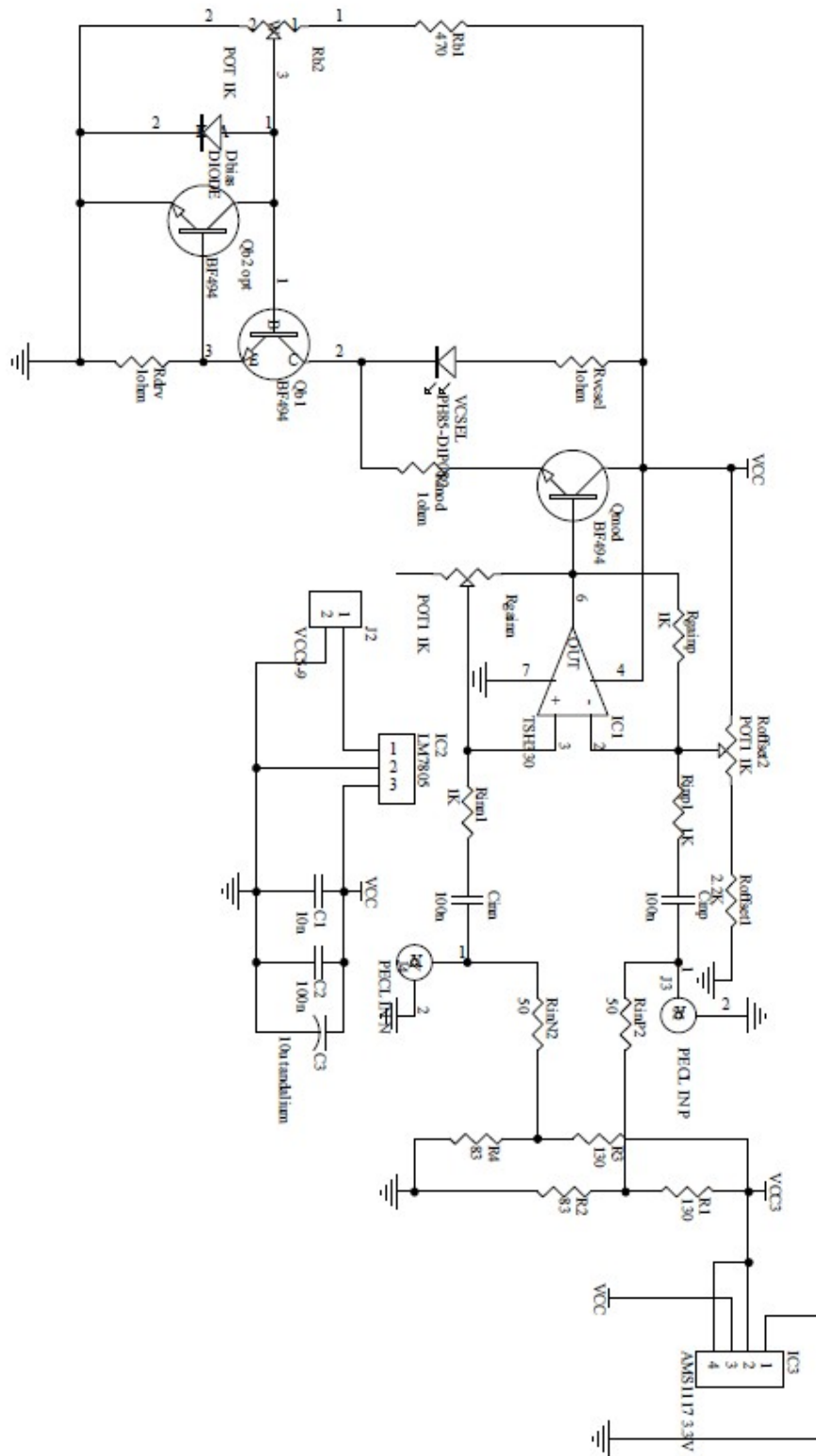
Ακολουθούν τεχνικά χαρακτηριστικά από το φύλο κατασκευαστή.

Electro-Optics Characteristics ($T_a=25^{\circ}\text{C}$ unless otherwise stated)

Parameters	Symbol	Specified			Unit	Test Conditions
		Min.	Typ.	Max.		
Threshold Current	I_{th}		5		mA	CW
I_{th} Temperature Variation	ΔI_{th}		2.5		mA	$T_a=0$ to 70°C
Slope Efficiency	η	0.2	0.4		W/A	$I_f = 20\text{mA}$
η Temperature Coefficient	$\Delta\eta / \Delta T$		-0.5		%/ $^{\circ}\text{C}$	$T_a=0$ to 70°C at 20mA
Optical Output Power	P_o		10		mW	$I_f = 20\text{mA}$
Peak Wavelength	λ	840	850	860	nm	$I_f = 20\text{mA}$
λ_P Temperature Coefficient	$\Delta\lambda / \Delta T$		0.08			$T_a=0$ to 70°C at 20mA
Spectral Bandwidth (RMS)	$\Delta\lambda$			0.85	nm	$I_f = 20\text{mA}$
Beam Divergence	Θ		2		$^{\circ}$	$P_o=10\text{mW}$, (FWHM)
Forward Voltage	V_f	1.6	1.9	2.2	V	$I_f = 20\text{mA}$
Breakdown Voltage	V_b		-10		V	
Dynamic Resistance	R_d		25	40	Ohm	$I_f = 20\text{mA}$

Πίνακας 5: Απόσπασμα από το φύλλο του κατασκευαστή για το PH85-DIP0S2

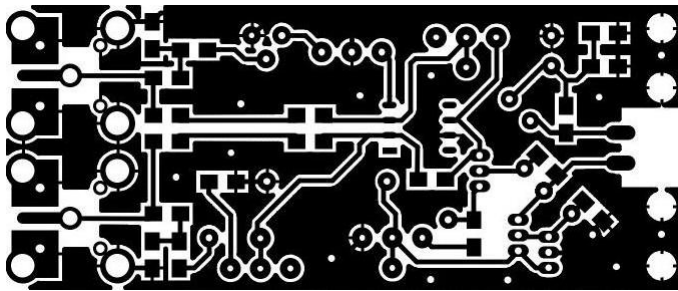
Το κύκλωμα οδήγησης αποτελείται από ένα τρανζίστορ (Q_{b1}) σαν περιοριστής ρεύματος απ' όπου ρυθμίζεται το μέγιστο ρεύμα $I_{MOD} + I_{BIAS}$ που μπορεί να διαρρέει το VCSEL. Η διόδος μεταξύ βάσης και γης εμποδίζει το τρανζίστορ να λειτουργήσει στην περιοχή κόρου, και δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια στη ρύθμιση του ρεύματος. Ένα δεύτερο MF τρανζίστορ (Q_{Mod}) που παρακάμπτει το VCSEL τραβώντας τόσο ρεύμα όσο το ρεύμα διαμόρφωσης I_{MOD} διάμεσο του. Το Medium Frequency τρανζίστορ είναι το BF494 της Philips με μέγιστη συχνότητα λειτουργίας τα 220MHz, το οποίο πολώνεται από διαφορικό τελεστικό ενισχυτή (IC1) TSH350 της ST, διαθέσιμο κατόπιν παραγγελίας ως δείγμα, με προδιαγραφές συχνότητας γραμμικής λειτουργίας στα 500MHz όταν το κέρδος είναι 2. Ο τελευταίος ρυθμίζεται για να δέχεται λογικές στάθμες LVPECL. Το κύκλωμα τροφοδοτείται από σταθεροποιητή τάσης LM7805 με πυκνωτές απόζευξης, και ως αναφορά τάσης για τα σωστά ρεύματα των σημάτων LVPECL χρησιμοποιείται ένας σταθεροποιητής τάσης AMS1117 3.3v και δίκτυωμα αντιστάσεων τερματισμού. Όλες οι αντιστάσεις και τα περισσότερα εξαρτήματα είναι τεχνολογίας SMD. Η διασύνδεση γίνεται μέσω ομοαξονικών καλωδίων 50Ω RG316 και SMA connectors. Ακολουθούν σχηματικό διάγραμμα, λίστα BOM, και PCB layouts διπλής όψης. Σημείωση, ότι για κάποια εξαρτήματα χρησιμοποιήθηκαν μη τυποποιημένα footprints για λόγους εργονομίας και ευκολίας.



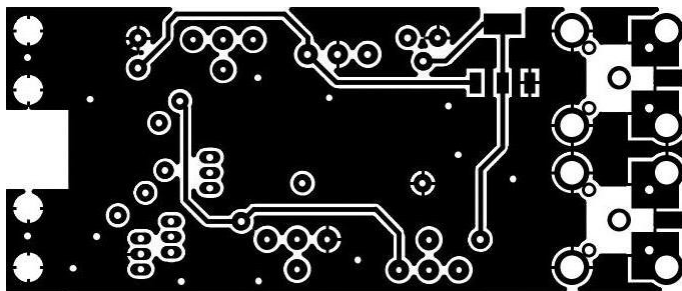
Εικόνα 50: Σχηματικό Οδηγού VCSEL

Part Type	Designator	Footprint	
1K	Rinp1	805	
1K	Rinn1	805	
1K	Rgainp	805	
1ohm	Rmod	805	
1ohm	Rvcsel	805	
1ohm	Rdrv	805	
2.2K	Roffset1	805	
10n	C1	805	
10u tantalium	C3	RAD0.1	
	50 RinP2	805	
	50 RinN2	805	
	83 R2	805	
	83 R4	805	
100n	Cinn	805	
100n	C2	805	
100n	Cinp	805	
	130 R1	805	
	130 R3	805	
	470 Rb1	805	
AMS1117 3.3V	IC3	SOT223	
BF494	Qb2 opt	TO92A-2	
BF494	Qb1	TO92A-2	
BF494	Qmod	TO92A-2	
DIODE	Dbias	DIODE0.4	
LM7805	IC2	SIL3	
PECL IN N	J4	SMA_F	
PECL IN P	J3	SMA_F	
PH85-D1P0S2	VCSEL	LD-SIDE	
POT 1K	Rb2	TRIM	
POT1 1K	Roffset2	TRIM	
POT1 1K	Rgainn	TRIM	
TSH330	IC1	SO-8	
VCC5-9	J2	SIL2	

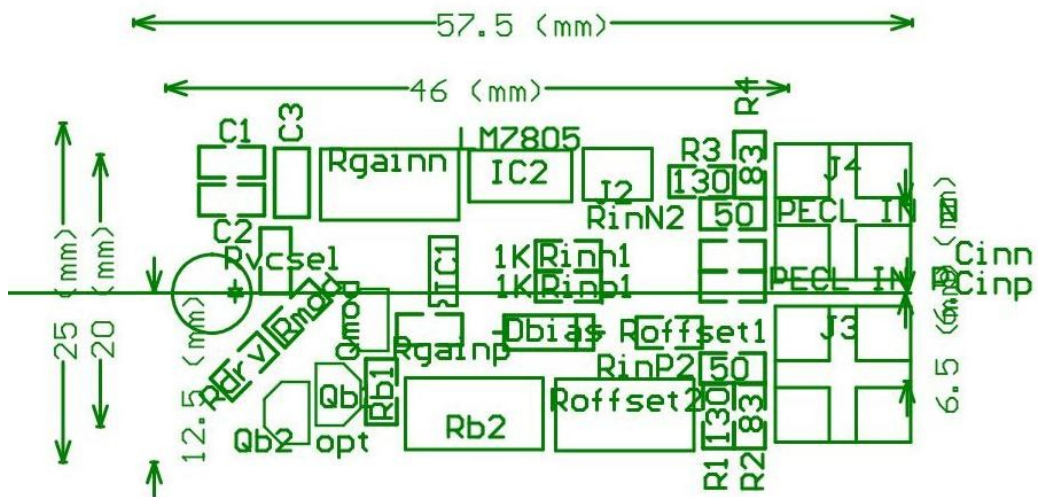
Πίνακας 6: Λίστα Bill Of Materials Οδηγού VCSEL



Εικόνα 51: Αντεστραμμένη εκτύπωση πλακέτας PCB πάνω πλευράς οδηγού VCSEL



Εικόνα 52: Εκτύπωση πλακέτας PCB κάτω πλευράς οδηγού VCSEL



Εικόνα 53: Διάγραμμα τοποθέτης εξαρτημάτων πάνω όψης πλακέτας

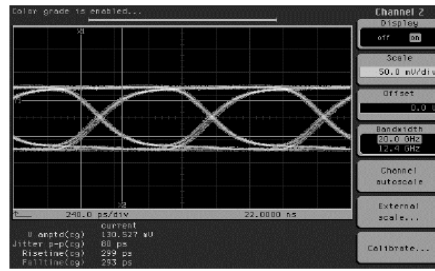
Σημείωση ότι στο παραπάνω διάγραμμα δεν απεικονίζεται ο σταθεροποιητής τάσης AMS1117 3.3v επειδή είναι το μόνο εξάρτημα που βρίσκεται στην πίσω πλευρά. Επίσης μπορούν να τοποθετηθούν στην πίσω πλευρά και τα ποτενσιόμετρα ακριβείας. Επίσης, οι εικονιζόμενες εκτυπώσεις πλακετών PCB δεν έχουν τις πραγματικές διαστάσεις, αλλά οι πραγματικές συμπεριλαμβάνονται στο παράρτημα.

Το υποσύστημα του οπτικού δέκτη συμπληρώνει το οπτικό Interface της κατασκευής με επίκεντρο τη φωτοδίοδο PIN με κωδικό TMC-8D42 επίσης από την κατασκευαστή Roithner-Laser τα χαρακτηριστικά της οποίας όπως προαναφέρθηκαν εν συντομία. Αναλυτικότερα, όπου TMC-8Dxx ο κωδικός σειράς, ενώ ο κωδικός 4 υποδεικνύει την ύπαρξη ενσωματωμένου προενισχυτή και το 2 αντιστοιχεί στο εύρος ζώνης του δέκτη, όπου 1 για τα 125MHz, 2 για 1.25GHz και 3 για 2.5GHz. Ο προενισχυτής που ενσωματώνεται στο TMC-8D42 είναι ένας ενισχυτής διαντίστασης. Με την ενσωμάτωση του τελευταίου στη συσκευασία της ίδιας της φωτοδίοδου ελαχιστοποιείται ο θόρυβος στη βαθμίδα αυτή, που είναι και η πλέον ευπαθής λόγω των μικρών στάθμεων σήματος. Η έξοδος του δέκτη είναι διαφορική, με χαμηλό-απορριπτικό φίλτρο ελάχιστης συχνότητας διέλευσης τα 44KHz. Οι τυπικοί χρόνοι ανόδου και καθόδου από 20% σε 80% είναι 300ps με μέγιστη τα 400ps. Ενώ η ευαισθησία χρήση διαφορικής συνδεσμολογίας είναι τα 1,4mV/μW και 0,7mV/μW για συνδεσμολογία ενός άκρου, στο φασματικό εύρος των 770nm – 890nm με μέγιστη απόκριση στα 850nm. Η τυπική διαφορική τάση εξόδου είναι τα 250mV ενώ η μέγιστη τα 400mV για λαμβανόμενη οπτική ισχύ τα 0dB, αλλά οι τιμές κυμαίνονται ανά παρτίδα. Η μέγιστη RMS ισχύς θορύβου εισόδου είναι τα 520nW, και λόγω απόρριψης θορύβου τροφοδοσίας PSRR τα 50dB. Η περιοχή θερμοκρασιακής λειτουργίας είναι βιομηχανικών προτύπων από -20°C – 80°C. Ακολουθεί απόσπασμα από το φύλλο κατασκευαστή για το TMC-8D42 στην εικόνα 54 και το διάγραμμα οφθαλμού στην εικόνα 55.

ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS:

PARAMETERS	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNIT	TEST CONDITIONS
Power Supply	V _{CC}	3.0		5.5	V	
Supply Current	I _{CC}		26	50	mA	no loads
Differential Responsivity	R _d	1.1	1.4	1.7	mV/μW	R _{load} = 100 ohm, P = -15 dBm @ 50 MHz, 850 nm
Single Ended Responsivity	R _s	0.5	0.7	0.8	mV/μW	R _{load} = 50 ohm, P = -15 dBm @ 50 MHz, 850 nm
Small-Signal Bandwidth	BW	750	920	1100	MHz	
Low-Frequency Cut off	LF		44		kHz	
Rise Time/Fall Time	tr/ta		300	400	ps	20% ~ 80%
Single Ended Output Impedance	R _o	48	50	52	ohm	
RMS Input Referred Noise			390	520	nW	
Maximum Differential Output Voltage		185	250	415	mV p-p	P = 0 dBm
RMS Output Referred Noise	V _n			1.6	mV	P = 0 dBm
Power Supply Rejection Ratio	PSRR		50		dB	
Wavelength	λ	770		860	nm	

Εικόνα 54: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του TMC-8D42, απόσπασμα από το φύλλο κατασκευαστή



Εικόνα 55: Διάγραμμα οφθαλμού του TMC-8D42 με οπτικό σήμα εισόδου στα 850nm ισχύος -10dBm στα 1,25GHz

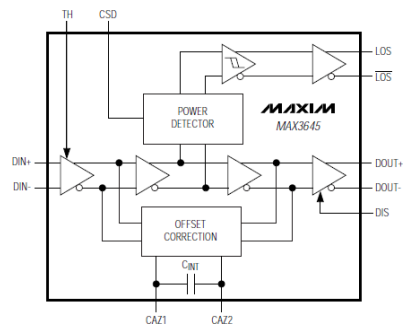
να 55: Διάγραμμα οφθαλμού του TMC-8D42 με οπτικό σήμα εισόδου στα 850nm ισχύος -10dBm στα 1,25GHz

Μετά τη βαθμίδα του ενισχυτή διαντίστασης ακολουθεί η βαθμίδα του περιοριστικού ενισχυτή LA (Limiting Amplifier) ο οποίος είναι προϊόν της Maxim με part number MAX3645, προμήθεια της Maxim ως δείγμα. Το συγκεκριμένο προϊόν είναι σχετικά παλαιάς τεχνολογίας σε συσκευασία SOIC μιας και πλέον οι περισσότεροι Limiting Amplifiers προοριζόμενοι για οπτικές επικοινωνίες έχουν προδιαγραφές λειτουργίας πάνω από 1Gbps, και σε συσκευασία ελάχιστων διαστάσεων τύπου QFN για την ελαχιστοποίηση των αποστάσεων των διαδρομών των αγωγών στο PCB και την ελαχιστοποίηση του ηλεκτρικού θορύβου.

Αναλυτικότερα, ο Limiting Amplifier MAX3645 χαρακτηρίζεται από ευαισθησία διαφορικής εισόδου το $1mV_{p-p}$ για $BER=10^{-12}$, και χρόνους ανόδου και καθόδου 20%-80% t_r , t_f τυπικά 0,7ns με μέγιστο τα 1,4ns. Πληρεί τις προδιαγραφές για χρήση σε πομποδέκτες Fast Ethernet 125Mbps και SONET 155Mbps, και είναι συμβατός με την κωδικοποίηση 4B/5B που χρησιμοποιείται στο 100Base-Fx. Ακολουθεί το εσωτερικό block διάγραμμα του LA, και σύντομη ανάλυση της λειτουργίας του.

Εσωτερικά όπως φαίνεται στο διπλανό block διάγραμμα, ο LA αποτελείται

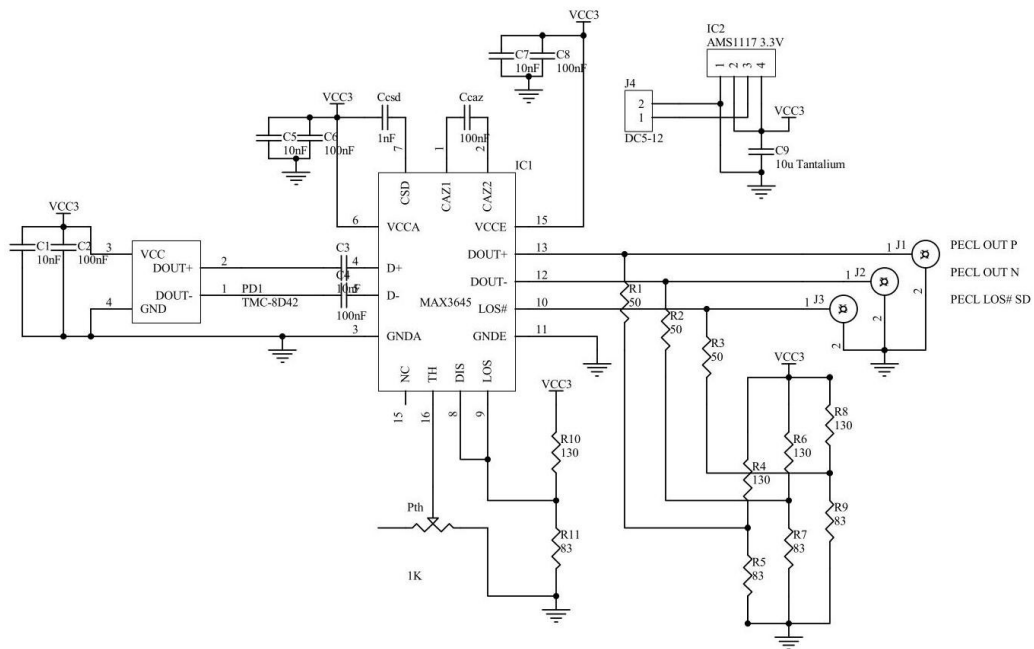
από τρεις βαθμίδες ενίσχυσης και το buffer εξόδου, όπως φαίνεται στην εικόνα 56. Το συνολικό κέρδος ενίσχυσης φτάνει τα 74dB περίπου. λόγω του περιορισμού χώρου στο εσωτερικό του chip, και του σχετικά μεγάλου μεγέθους των πυκνωτών οι τελευταίοι δεν μπορούν να ενσωματωθούν στο ολοκληρωμένο κύκλωμα, και η σύζευξη μεταξύ των βαθμίδων γίνεται απευθείας. λόγω της μεγάλης ενίσχυσης ενισχύεται και το dc σήμα, το οποίο πρέπει να κρατηθεί σε συγκεκριμένη στάθμη για τη σωστή έξοδο PECL. Αυτό επιτυγχάνεται με την επέμβαση ,ενδιάμεσα της βαθμίδας προενίσχυσης και της τρίτης βαθμίδας ενίσχυσης, της βαθμίδας διόρθωσης του offset. Για τη λειτουργία αυτής της βαθμίδας χρειάζεται η προσθήκη ενός πυκνωτή C_{CAZ} εκτός ολοκληρωμένου. Επίσης, μεταξύ των βαθμίδων ενίσχυσης, υπάρχει η βαθμίδα παρακολούθησης της ισχύος εισόδου. Η τελευταία συγκρίνει τη στάθμη ισχύος στις εισόδους της, και τη συγκρίνει με μια προκαθορισμένη στάθμη που προκύπτει από εσωτερικό δίκτυωμα και μια εξωτερική αντίσταση R_{TH} . Η τυπική τιμή της αντίστασης αυτής είναι τα 100Ω για κατώφλι σήματος εισόδου το $1mV_{p-p}$ περίπου. Ως έξοδο παρέχει σήμα PECL, LOS (Loss Of Signal) και το συμπληρωματικό του. Αυτό χρησιμοποιείται από τον ελεγκτή PHY ώστε να κρίνει εάν τα



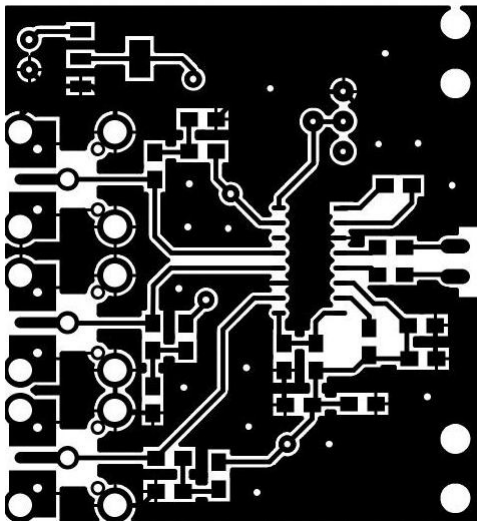
Εικόνα 56: Εσωτερικό Block διάγραμμα του MAX3645

λαμβανόμενα δεδομένα είναι αξιόπιστα. Συνήθως, όταν το LOS είναι σε λογικό 1 ή αληθές, ο ελεγκτής ενημερώνεται και διακόπτει την επικοινωνία. Το περιθώριο της επιλογής της στάθμης αυτής επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της χρήσης της φωτοδιόδου και του ενισχυτή διαντίστασης, ορίζοντας το όριο όπου το λαμβανόμενο σήμα είναι αξιόπιστο. Ο λόγος ύπαρξης της συμπληρωματικής εξόδου /LOS, είναι ότι πολλοί ελεγκτές έχουν είσοδο SD (Signal Detect) το οποίο είναι το αντίστροφο του LOS. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται η συμπληρωματική έξοδος /LOS.

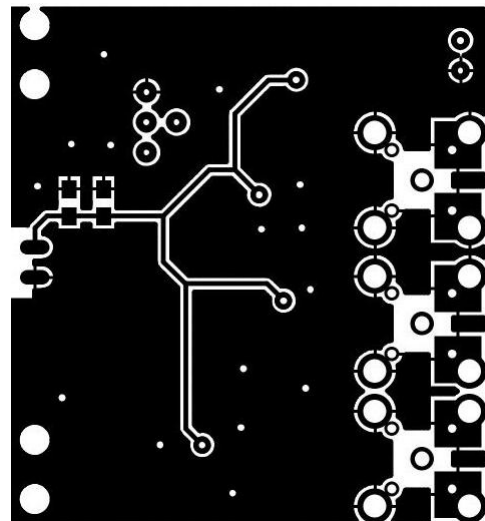
Η έξοδος είναι διαφορικό σήμα PECL ή LVPECL ανάλογα την τάση τροφοδοσίας ($V_{cc} - 2V$). Στην προκειμένη περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί τροφοδοσία τάσης 3,3v. Ακολουθούν σχηματικό διάγραμμα και PCB.



Εικόνα 57: Σχηματικό διάγραμμα υποσυστήματος Οπτικού Δέκτη

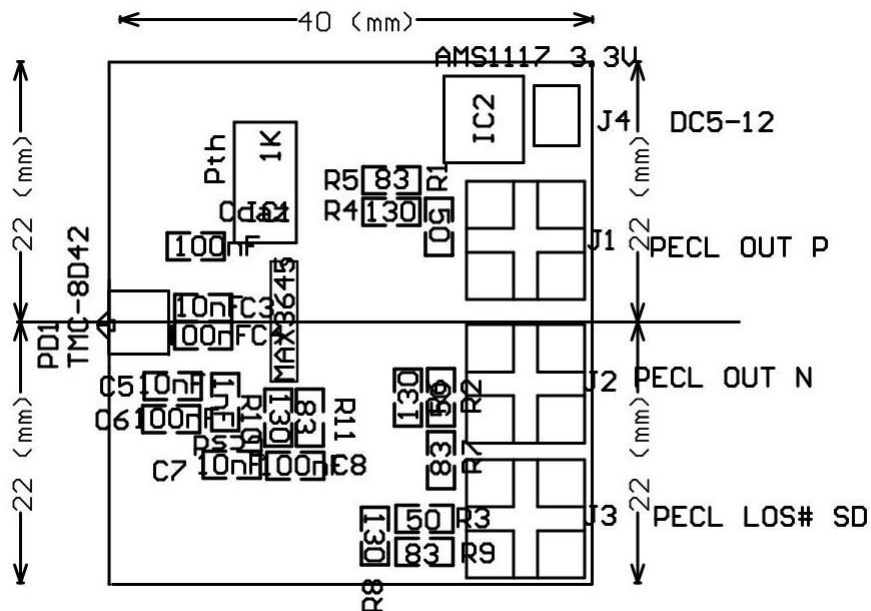


Εικόνα 58: Ανεστραμμένη εκτόπωση πλακέτας PCB πάνω όψης



Εικόνα 59: Εκτόπωση πλακέτας PCB κάτω όψης

Σημείωση ότι ομοίως οι παραπάνω εκτυπώσεις των πλακετών PCB δεν έχουν τις πραγματικές διαστάσεις, και οι πραγματικές εκτυπώσεις συμπεριλαμβάνονται στο παράρτημα.



Εικόνα

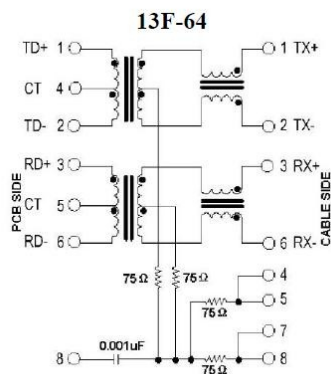
να 60: Διάγραμμα τοποθέτησης εξαρτημάτων πάνω όψης του υποσυστήματος Οπτικού δέκτη

5.3. Ethernet Interface

Το Ethernet Interface του συστήματος ενσωματώνεται στον Network Media Converter που περιγράφεται παρακάτω. Το Interface αυτό παρέχει τις στάθμες σήματος με κωδικοποίηση MLT-3 (Multi Level Transmit) που χρησιμοποιούνται στο 100Base-TX του πρωτοκόλλου 802.3u.

Στα σήματα με κωδικοποίηση MLT-3 οι στάθμες εναλλάσσονται με τη σειρά -1, 0, 1, 0 όπου η μετάδοση ενός bit λογικού 1 μεταφράζεται στη μετάβαση στην επόμενη στάθμη, ενώ το λογικό 0 μεταφράζεται στην παραμονή στην ίδια στάθμη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μιας μορφής εναλλασσόμενου σήματος του οποίου η συχνότητα μεγιστοποιείται στη μετάδοση διαδοχικών "1" και είναι το 1/4 του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Για το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 125Mbps, η μέγιστη συχνότητα στο κανάλι είναι τα 34,5 Mhz με αποτέλεσμα λιγότερες παρεμβολές και μικρότερες απαιτήσεις bandwidth του καναλιού.

λόγω του ότι το σήμα είναι εναλλασσόμενο τριών στάθμων, η σύνταξή του από ολοκληρωμένο μονής τροφοδοσίας θα απαιτούσε dc συνιστώσα, και επειδή η τελευταία μεταφράζεται σε απώλεια ισχύος, επιβάλλεται η χρήση τηλεπικοινωνιακών μετασχηματιστών σύζευξης 1:1 της εικόνας 61, οδηγούμενοι από τις διαφορικές εξόδους του Ethernet Interface.



Εικόνα 61: Σχηματικό διάγραμμα μετασχηματιστών σύζευξης Ethernet Interface (Magnetics)

Οι τελευταίοι πολλές φορές, όπως και στην προκειμένη περίπτωση ενσωματώνονται στο εσωτερικό της θύρας RJ-45 που χρησιμοποιούνται ως connectors στα UTP και FTP καλώδια που χρησιμοποιούνται στο Ethernet συνεστραμμένων ζευγών.

Τυπικά για το 100Base-TX, στο RJ45 socket χρησιμοποιούνται οι ακροδέκτες 1 και 2 για την εκπομπή, και τα 3 και 6 για τη λήψη. Επίσης, στα καλώδια UTP και FTP, χρησιμοποιούνται τυπικά τα ζεύγη με πορτοκαλί-άσπρο και πορτοκαλί χρώμα για τα TX+ και TX- αντίστοιχα, και τα ζεύγη πράσινο-άσπρο και πράσινο για τα RX+ και RX- αντίστοιχα. Ο λόγος που συνηθίζονται να χρησιμοποιούνται οι συνδυασμοί αυτοί είναι η αποφυγή περιπλέξεων όταν διαφορετικό προσωπικό επεμβαίνει στο ίδιο καλωδιακό δίκτυο. Ως αποτέλεσμα όλων των παραπάνω, το σήμα αυτό να μπορεί να μεταδοθεί σε απόσταση έως και 100m μέσω των χαμηλού κόστους UTP καλωδίων.

5.4. Media Converter

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η λειτουργία του Network Media Converter είναι η μετατροπή του οπτικού καναλιού σε ηλεκτρικό ενσύρματο γεφυρώνοντας το οπτικό Interface με το Ethernet Interface. Σε αυτή την εφαρμογή θα χρησιμοποιηθεί το ολοκληρωμένο ML6652 της Micro Linear, το οποίο προμηθεύτηκε ως δείγμα από τον κατασκευαστή.

Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο υποστηρίζει λειτουργία 10/100Mbps Ethernet και χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του 10Base-T σε 10Base-LX, 100Base-TX σε 100Base-FX/SX, 100Base-FX σε 100Base-SX, αλλά και τη μετατροπή των FLP Bursts σε FLNP Bursts. Οι τελευταίοι είναι παλμοί παλμοί συγχρονισμού που χρησιμοποιούνται στο Auto-Negotiation στο οπτικό Ethernet. Για την κατάλληλη λειτουργία του ML6652 στην εφαρμογή πρέπει να οριστούν κάποιες αρχικές ρυθμίσεις λειτουργίας. Αυτό επιτυγχάνεται αλλάζοντας τις παραμέτρους κάποιων εσωτερικών καταχωρητών (registers) με δύο τρόπους. Για τη βασική ρύθμιση αρκεί να ρυθμιστεί ανάλογα η στάθμη τάσης σε ορισμένους ακροδέκτες του ML6652 οι οποίες διαβάζονται από τη μονάδα ελέγχου του Media Converter λίγα μικρο δευτερόλεπτα μετά την τροφοδοσία (boot), και μεταφράζονται σε εγγραφές "0" ή "1" σε συγκεκριμένα bits των τριών καταχωρητών. Οι ακροδέκτες αυτοί είναι οι PECLQU (8), PECLTP (7), DUPLEX (25) και SPEED (27) οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω. Ο δεύτερος τρόπος αρχικοποίησης του ML6652 είναι με τη χρήση ενός μικροελεγκτή ο οποίος επεμβαίνει στους εσωτερικούς καταχωρητές του ML6652, και πέρα από τη βασική ρύθμιση έχει πρόσβαση και σε άλλες ρουτίνες ελέγχου και παρακολούθηση των καταχωρητών. Η επικοινωνία του ML6652 με τον μικροελεγκτή γίνεται από τους ακροδέκτες MDIO (16) και MDCK (17) (Management Data I/O και Clock αντίστοιχα), και η διευθυνσιοδότηση από τις τέσσερις στάθμες τάσης τους ακροδέκτες AD4LIW (4), AD32 (5), και AD10 (6) οι οποίοι συντάσσουν τον 5ψήφιο δυαδικό αριθμό της διεύθυνσης του bit στο οποίο επεμβαίνει ο μικροελεγκτής.

Pin Name	AD4LIW		AD32		AD10	
	LIW Function	PHYAD4 Bit	PHYAD3 Bit	PHYAD2 Bit	PHYAD1 Bit	PHYAD0 Bit
0	Disabled	0	0	0	0	0
1/3 of VCC	Enabled	0	1	0	1	0
2/3 of VCC	Enabled	1	1	1	1	1
VCC	Disabled	1	0	1	0	1

Πίνακας 7: Διευθυνσιοδότηση των εσωτερικών καταχωρητών του ML6652 με τις αντίστοιχες στάθμες τάσης στους ακροδέκτες AD4LIW, AD32 και AD10

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, η αρχικοποίηση θα γίνει χωρίς τη χρήση μικροελεγκτή για λόγους απλότητας.

Το ML6652 έχει τη δυνατότητα ρύθμισης της λειτουργίας του κάθε Interface. Το κάθε Interface έχει δύο καταστάσεις λειτουργίας, λειτουργία σε PECL (PECL/LVPECL Mode) όπου το εκάστοτε Interface στέλνει και δέχεται δεδομένα στη μορφή σημάτων PECL όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.3. Αυτή η κατάσταση λειτουργίας έχει σκοπό την ενσωμάτωση του Media Converter σε δικτυακό εξοπλισμό πολλές φορές σε switch και router είτε ενσωματωμένος, είτε σε SFP modules (Small Form-Factor Pluggable modules) όπου η επικοινωνία μεταξύ ολοκληρωμένων και modules γίνεται συνήθως με σήματα PECL και LVPECL. Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο είναι συμβατό με PECL και LVPECL αλλάζοντας μονάχα το δικτύωμα τερματισμού ώστε να ισχύει η μέση στάθμη τάσης $V_{CC} - 2V$. Η δεύτερη κατάσταση λειτουργίας των Interfaces είναι η λειτουργία ως Fiber Optic Interface και Twisted Pair Interface για τα δύο Interface αντίστοιχα και αναλύονται παρακάτω.

Η επιλογή της κατάστασης λειτουργίας του οπτικού Interface του Media Converter καθορίζεται από την τάση στον ακροδέκτη PECLQU, με τέσσερις δυνατές επιλογές, τρεις από τις οποίες καθορίζουν τη συμπεριφορά του Interface σε λειτουργία Fiber Optic Interface Mode. Οι στάθμες τάσης αντιστοιχούν σε V_{CC} , $2V_{CC}/3$, $V_{CC}/3$ και 0 Volts. Οι καταστάσεις λειτουργίας και τα bits των καταχωρητών που αντιστοιχούν στις στάθμες τάσης του ακροδέκτη PECLQU φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

PECLQU Voltage	Interfaces at FOINP/FOINN and IOU1/IOU#	PECLQU <30.7> Default	Fiber Optic Link Length 10BASE/100BASE	SHORTFO <30.5> Default	Wavelength	LONGWL <30.6> Default
0	Quantizer and LED Driver	0	2Km/300m	0	850nm	0
1/3 of VCC	PECL/LVPECL	1	PCB Traces	0	NA	0
2/3 of VCC	Quantizer and LED Driver	0	2Km/2Km	0	1300nm	1
VCC	Quantizer and LED Driver	0	300m/300m	1	850/1300nm	0

Πίνακας 8: Καταστάσεις λειτουργίας οπτικού Interface του ML6652 και οι καταχωρητές που επηρεάζονται από τις στάθμες τάσης του ακροδέκτη PECLQU

Το Οπτικό Interface του Media Converter ενσωματώνει οδηγό LED του οποίου το ρεύμα ρυθμίζεται από την εξωτερική αντίσταση R_{TOP} και ενισχυτή και κβαντιστή του σήματος από τη φωτοδίοδο με τη στάθμη SD (Signal Detect) να ορίζεται βάση προκαθορισμένων τιμών που κατά προσέγγιση αντιστοιχούν στην απόσταση και τον τύπο της ζεύξης οπτικών ινών που χρησιμοποιείται. Στην κατάσταση λειτουργίας PECL η είσοδος SDTH (39) θα λαμβάνει σήμα LVPECL από την συμπληρωματική έξοδο /LOS του Limiting Amplifier MAX3645 του δέκτη του οπτικού

υποσυστήματος.

λόγω του ότι η κατάσταση λειτουργίας σε Fiber Optic Interface Mode αφενός είναι βασισμένη στη σταθερότητα του καναλιού της οπτικής ίνας, και λόγω του ότι ο ενσωματωμένος οδηγός LED δεν μπορεί να οδηγήσει σωστά το VCSEL που χρησιμοποιείται σε αυτό το σύστημα, η κατάσταση λειτουργίας θα ρυθμιστεί ως PECL Mode, με τον Media Converter να επικοινωνεί με τα υποσυστήματα του οπτικού Interface που χρησιμοποιούνται σε αυτό το σύστημα.

Το Interface συνεστραμμένων ζευγών επιτρέπει και αυτό τέσσερις καταστάσεις λειτουργίας εκ των οποίων οι τρεις είναι παραλλαγές της αντίστοιχης λειτουργίας σε Twisted Pair Interface Mode όπου επιλέγεται το ρεύμα σήματος εξόδου MLT-3 και το μήκος του καλωδίου UTP που χρησιμοποιείται. Η τέταρτη επιλογή κατάστασης λειτουργίας είναι η λειτουργία PECL, αντίστοιχα όπως στο Fiber Optic Interface. Η επιλογή γίνεται ομοίως με τη στάθμη τάσης στον ακροδέκτη PECLTP με στάθμες V_{CC} , $2V_{CC}/3$, $V_{CC}/3$ και $0V$. Οι καταστάσεις λειτουργίας του Twisted Pair Interface τα bits των καταχωρητών που αντιστοιχούν στις στάθμες τάσης του ακροδέκτη PECLTP φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

PECLTP Voltage	Interfaces at TPINP/TPINN and TPOUTP/TPOUTN	PECLTP <30.3> Default	Copper Length	SHORTTP <30.2> Default	Output Current	LOWITPOUT <30.4> Default
0	Twisted Pair	0	100BASE-TX Standard	0	Standard	0
1/3 of VCC	PECL/LVPECL	1	PCB Traces	0	NA	0
2/3 of VCC	Twisted Pair	0	PCB Traces	1	Low	1
VCC	Twisted Pair	0	10m	1	Standard	0

Πίνακας 9: Καταστάσεις λειτουργίας του Twisted Pair Interface του ML6652 και οι καταχωρητές που επηρεάζονται από τις στάθμες τάσης του ακροδέκτη PECLTP

Στην προκειμένη περίπτωση το Twisted Pair Interface θα ρυθμιστεί σε λειτουργία Twisted Pair και Standard ρεύμα εξόδου στο UTP και μήκος καλωδίου UTP το 100Base-TX Standard για τη μεγιστοποίηση της συμβατότητας με άλλες δικτυακές συσκευές.

Αφού ρυθμιστούν οι λειτουργικές καταστάσεις των Interface του ML6652 πρέπει να ρυθμιστεί ο τρόπος επικοινωνίας με το υπόλοιπο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή της ταχύτητας του δικτύου και την επιλογή ταυτόχρονης ή όχι αμφίδρομης επικοινωνίας. Αναλυτικότερα, ο ακροδέκτης DUPLEX (25), ορίζει εάν η επικοινωνία θα γίνεται Full-Duplex ή Half-Duplex, και αυτό ορίζεται θέτοντας την τάση σε μία από τις τρεις στάθμες, V_{CC} , $V_{CC}/2$ και $0V$. Ο ακροδέκτης είναι εσωτερικά δικτυωμένος με διαιρέτη τάσης για $V_{CC}/2$ όταν ο ακροδέκτης είναι στον αέρα. Συνεπώς δεν υπάρχει ανάγκη για εξωτερικό δικτύωμα και η ρύθμιση γίνεται συνδέοντας τον ακροδέκτη στην τροφοδοσία ή στη γη, ή αφήνοντάς τον αποσυνδεδεμένο. Οι στάθμες τάσης είναι τρεις λόγω των bit καταχωρητών που επηρεάζουν. Οι τελευταίοι είναι ο συμπληρωματικός TRANSPARENT(30.11) που ορίζει τη λειτουργία επικοινωνίας ως αόρατη, και στην περίπτωση που είναι "1" με το σύστημα σε ορατή λειτουργία, το ο ML6652 ενημερώνει το απέναντι σύστημα εάν χρησιμοποιεί Full-Duplex επικοινωνία ή όχι θέτοντας το συμπληρωματικό /ADVERTFD (30.10) bit καταχωρητή.

Οι στάθμες τάσης στον ακροδέκτη DUPLEX (25) σε συνδυασμό με τον SPEED (27) ορίζουν εάν το σύστημα είναι ορατό ή αόρατο στο δίκτυο.

DUPLEX Voltage	TRANSPARENT# <30.11> Default	ADVERTFD# <30.10> Default	ADVERTHD# <30.15> Default
0	1	1	0
VCC/2	0	0	0
VCC	1	0	0

Πίνακας 10: Καταστάσεις λειτουργίας Duplex και οι καταχωρητές που επηρεάζονται από τις στάθμες τάσης του ακροδέκτη DUPLEX (25)

Στη συνέχεια, ο ακροδέκτης SPEED (27) ορίζει την ταχύτητα λειτουργίας του συστήματος ανάμεσα σε 10Base και 100Base. Ομοίως με τις στάθμες στον ακροδέκτη DUPLEX, είναι τρεις με V_{CC}, V_{CC}/2 και 0V, και επίσης, στην περίπτωση που το σύστημα ρυθμιστεί σε ορατή λειτουργία, πρέπει να ενημερώνει το απέναντι σύστημα για την ταχύτητα που χρησιμοποιεί. Οι στάθμες και οι καταχωρητές που αντιστοιχούν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

SPEED Voltage	DSBLAN <30.14> Default	SINGLESPEED <30.9> Default	SEL10Mbps <30.8> Default
0	1	1	1
VCC/2	0	0	0
VCC	1	1	0

Πίνακας 11: Καταστάσεις ταχύτητας λειτουργίας και οι καταχωρητές που επηρεάζονται από τις στάθμες τάσης του ακροδέκτη SPEED (27)

Αναλυτικότερα, το bit καταχωρητή 30.14 DSBLAN (Disable Auto Negotiation) εφόσον είναι “1” απενεργοποιεί την ανίχνευση των παλμών LFNP και LFP. Το bit καταχωρητή 30.9 εφόσον είναι “1” θέτει το σύστημα σε λειτουργία μίας μόνο ταχύτητας χωρίς τη δυνατότητα αλλαγής, και το bit καταχωρητή 30.8 εφόσον είναι “1” η ταχύτητα λειτουργίας του συστήματος θα είναι τα 10Mbps, διαφορετικά θα είναι 100Mbps.

Βάσει των παραπάνω επιλογών στους ακροδέκτες DUPLEX και SPEED δίνεται ένας συμπληρωματικός πίνακας τις πιθανές λειτουργίες του συστήματος βάσει των στάθμεων τάσης στους ακροδέκτες DUPLEX και SPEED.

Mode	Operating Summary	SPEED Voltage	DUPLEX Voltage
Forced 10	10Mbps data rate only available. The Duplex mode is selected by the link partner.	0	N/A
Forced 100	100Mbps data rate only available. The Duplex mode is selected by the link partner.	VCC	N/A
Non-Transparent Half-Duplex	Only the HalfDuplex mode is advertised. Both 10 and 100Mbps data rates are available. Only the data rate equivalent to the technology present at the fiber optic input interface is advertised.	VCC/2	0
Non-Transparent	FLP Bursts are generated. Both HalfDuplex and Full-Duplex modes are advertised. Both 10 and 100Mbps data rates are available. Only the data rate equivalent to the technology present at the fiber optic input interface is advertised.	VCC/2	VCC
Transparent	Standard Auto-Negotiation sub-layer 10Mbps, 100Mbps and Auto-Negotiation far end link partner signaling available.	VCC/2	VCC/2

Πίνακας 12: Συμπληρωματικός πίνακας λειτουργίας του ML6652 βάση των τάσεων στους ακροδέκτες DUPLEX (25) και SPEED (27)

Σε αυτή την εφαρμογή, το σύστημα θα είναι σε αόρατη λειτουργία Full-Duplex στα 100Mbps.

Το ML6652 έχει επίσης τέσσερις εξόδους οδήγησης ενδεικτικών LED στους ακροδέκτες TPINSPD (41), FOINSPD (42), TPANDT (43), και FOANDT (44) παρέχοντας δυνατότητα οπτικής διάγνωσης για ορισμένες ενέργειες ή προβλήματα. Γενικότερα τα προθέματα TP και FO παραπέμπουν σε Fiber Optic και Twisted Pair αντίστοιχα, και τα επιθέματα INSPD και ANDT αντιστοιχούν σε In Speed και Auto Negotiation Data Transmit αντίστοιχα.

Αναλυτικότερα, οι ακροδέκτες TPINSPD και FOINSPD είναι tri-state, οδηγώντας από 2 LED ο καθένας. Δίνουν υψηλή στάθμη όταν ανιχνεύεται σήμα 100Mbps στην είσοδο του οπτικού και Καλωδιακού Interface αντίστοιχα, και χαμηλή στάθμη ομοίως όταν ανιχνεύεται σήμα 10Mbps. Το σήμα μπορεί να είναι Idle ή πακέτα. Στις άλλες περιπτώσεις ο ακροδέκτης έρχεται σε υψηλή αντίσταση και κανένα από τα δύο LED δεν άγει.

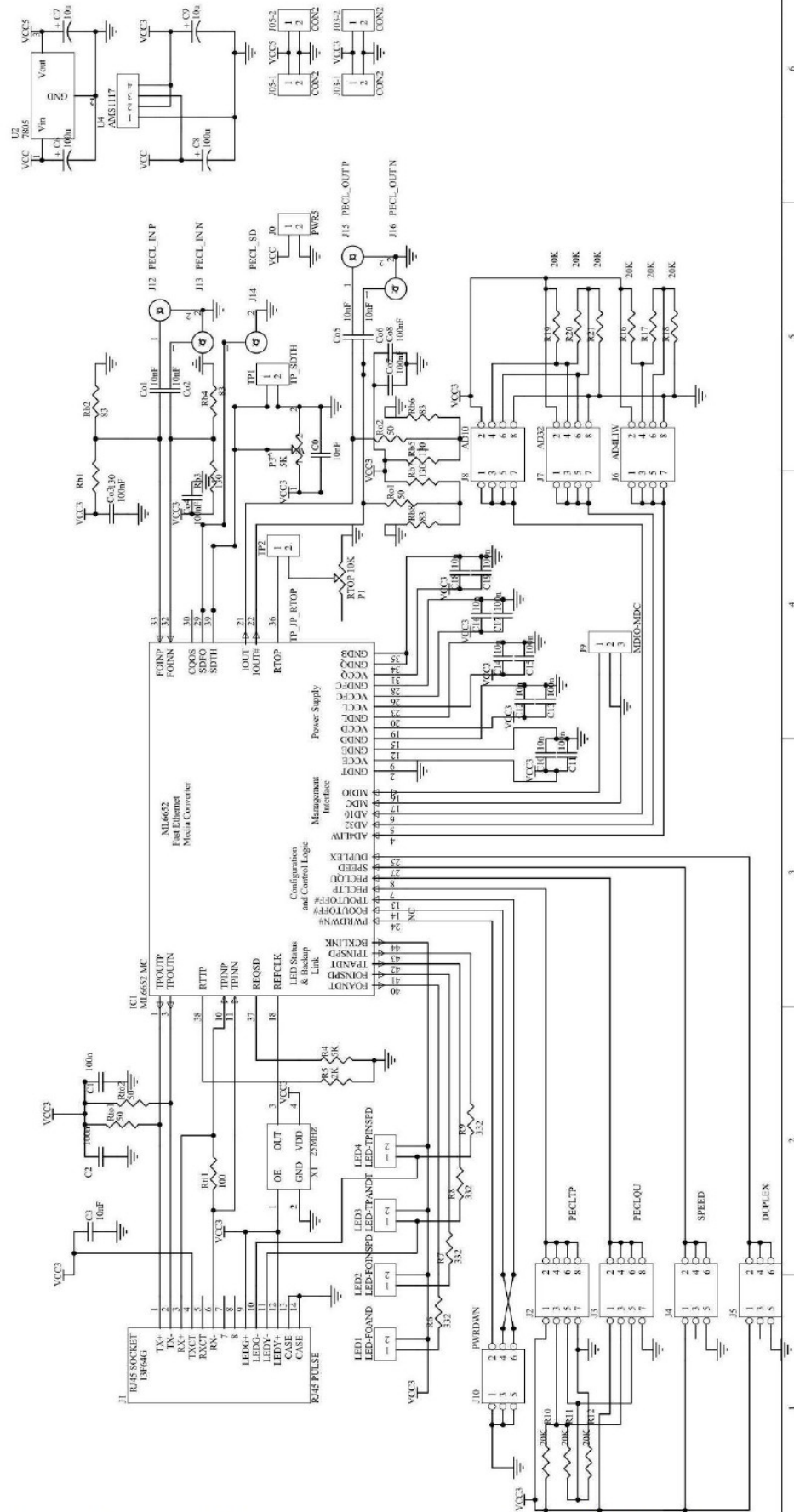
Οι ακροδέκτες TPANDT και FOANDT έχουν δύο μόνο καταστάσεις, υψηλής αντίστασης και χαμηλή στάθμη εξόδου. Όταν οι ακροδέκτες TPINSPD και FOINSPD είναι σε κατάσταση υψηλής αντίστασης, και οι αντίστοιχοι TPANDT και FOANDT είναι σε χαμηλή στάθμη εξόδου, τα αντίστοιχα Interface λαμβάνουν σήμα Auto-Negotiation. Όταν τα TPINSPD και FOINSPD δεν είναι σε κατάσταση υψηλής αντίστασης, τα αντίστοιχα TPANDT και FOANDT έρχονται σε κατάσταση χαμηλής στάθμης εξόδου όταν ανιχνεύεται ένα πακέτο πληροφορίας στο αντίστοιχο Interface. Οι παλμοί από τα TPANDT και FOANDT εξαπλώνονται στα 1,3ms έως και 2,7ms για να μπορούν να γίνουν αντιληπτά.

Ο Media Converter έχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης εφεδρικού συστήματος χρησιμοποιώντας τον ακροδέκτη BCKPLINK (40) ο οποίος έχει διπλή λειτουργία. Στην αρχικοποίηση λειτουργεί σαν είσοδος και αλλάζει την τιμή του bit του εσωτερικού καταχωρητή BCKPDIS (28.1) και ορίζει τη λειτουργία του συγκεκριμένου ML6652. Στην περίπτωση όπου στην αρχικοποίηση ο ακροδέκτης BCKPLINK (40) είναι σε υψηλή στάθμη, η λειτουργία εφεδρείας απενεργοποιείται. Στην περίπτωση που υλοποιείται η λειτουργία εφεδρικής ζεύξης, ο ακροδέκτης BCKPLINK (40) μετά την αρχικοποίηση λειτουργεί ως έξοδος και ενεργοποιεί το εφεδρικό σύστημα. Η λειτουργία αυτή χρησιμοποιείται μόνο όταν το σύστημα λειτουργεί σε μονή ταχύτητα των 100Mbps.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή δεν υλοποιείται δυνατότητα εφεδρείας, παρόλο που αποτελεί λύση στο πρόβλημα της ομίχλης με το εφεδρικό σύστημα να είναι μικροκυματικής ζεύξης.

Τελευταία σημείωση, το ML6652 έχει τη δυνατότητα απενεργοποίησης της λειτουργίας του κάθε Interface θέτοντας σε χαμηλή στάθμη τους συμπληρωματικούς ακροδέκτες /TROUTOFF (13) και /FOOUTOFF (14) για την απενεργοποίηση των Interface συνεστραμμένων ζευγών και οπτικού Interface αντίστοιχα. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή και τα δύο Interface είναι μόνιμα ενεργά, συνδέοντας τους παραπάνω ακροδέκτες στην τροφοδοσία V_{CC} .

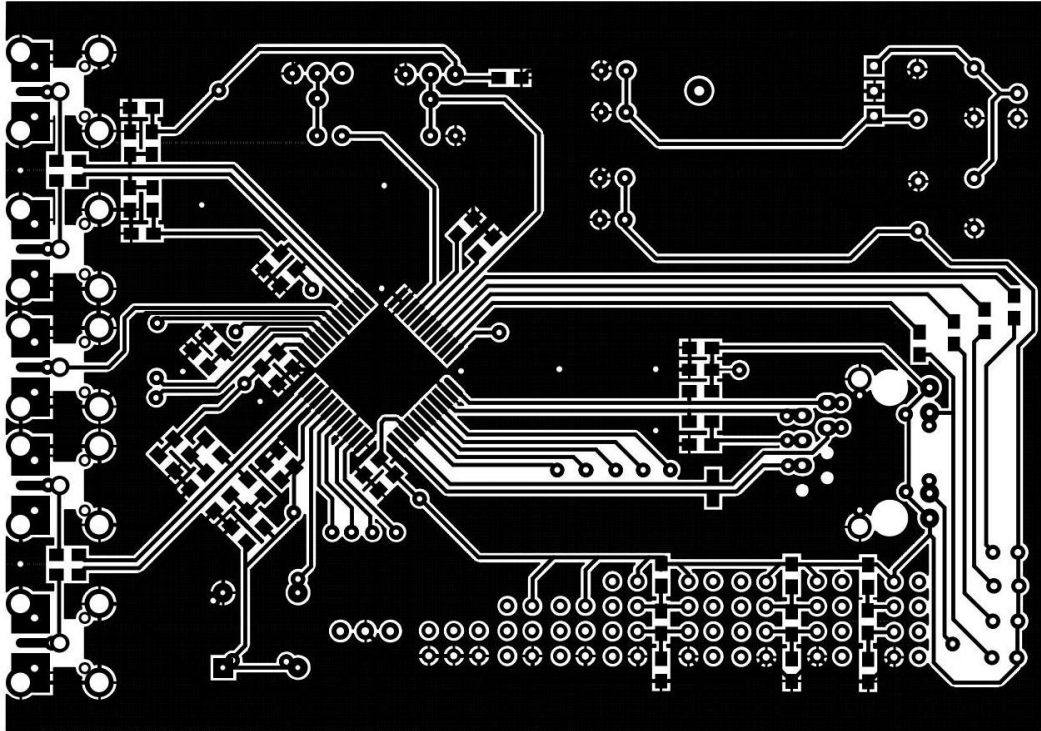
Ακολουθούν σχηματικό, εκτυπώσεις PCB, διάγραμμα τοποθέτησης εξαρτημάτων, και λίστα BOM για το υποσύστημα του Network Media Converter.



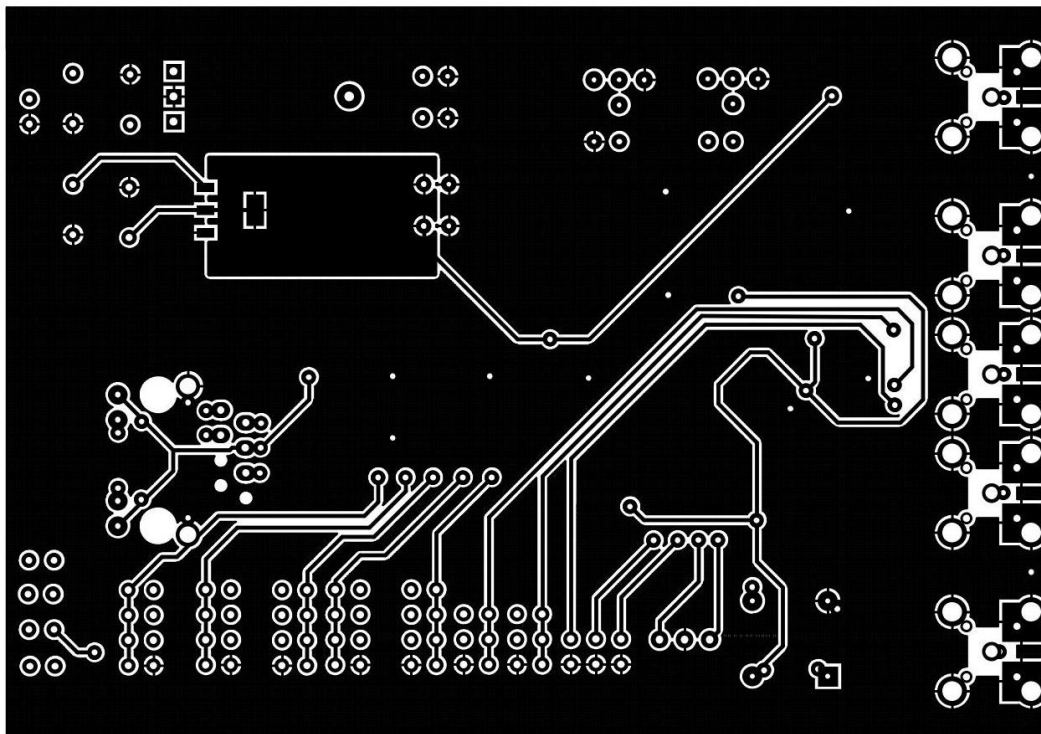
Εικόνα 62: Σχηματικό διάγραμμα υποσυστήματος Network Media Converter

Part Type	Designator	Footprint	
2K	R5	805	
5K	R4	805	
5K	P3	TRIM	
10n	C10	805	
10n	C16	805	
10n	C18	805	
10n	C12	805	
10n	C14	805	
10nF	C0	805	
10nF	Co5	805	
10nF	Co2	805	
10nF	Co6	805	
10nF	C3	805	
10nF	Co1	805	
10u	C9	rad0.2	
10u	C7	rad0.2	
20K	R11	805	
20K	R18	805	
20K	R21	805	
20K	R19	805	
20K	R17	805	
20K	R20	805	
20K	R16	805	
20K	R12	805	
20K	R10	805	
25MHz	X1	XTAL2	
	50 Rto2	805	
	50 Ro1	805	
	50 Ro2	805	
	50 Rto1	805	
	83 Rb4	805	
	83 Rb2	805	
	83 Rb6	805	
	83 Rb8	805	
	100 Rti1	805	
100n	C11	805	
100n	C13	805	
100n	C1	805	
100n	C2	805	
100n	C15	805	
100n	C19	805	
100n	C17	805	
100nF	Co3	805	
100nF	Co7	805	
100nF	Co8	805	
100nF	Co4	805	
100u	C6	rad0.2	
100u	C8	rad0.2	
	130 Rb3	805	
	130 Rb7	805	
	130 Rb1	805	
	130 Rb5	805	
	332 R7	805	
	332 R6	805	
	332 R9	805	
	332 R8	805	
	7805 U2	TO-220	
AD4LIW	J6	DIL4	
AD10	J8	DIL4	
AD32	J7	DIL4	
AMS1117	U4	SOT223	
CON2	J03-2	SIL2	
CON2	J03-1	SIL2	
CON2	J05-1	SIL2	
CON2	J05-2	SIL2	
DUPLEX	J5	DIL3	
LED-FOAND	LED1	RAD0.1	
LED-FOINSPD	LED2	RAD0.1	
LED-TPANDT	LED3	RAD0.1	
LED-TPINSPD	LED4	RAD0.1	
MDIO-MDC	J9	SIL3	
ML6652 MC	IC1	TQFP44	
P1	RTOP 10K	TRIM	
PECLQU	J3	DIL4	
PECLTP	J2	DIL4	
PECL_IN N	J13	SMA_F	
PECL_IN P	J12	SMA_F	
PECL_OUT N	J16	SMA_F	
PECL_OUT P	J15	SMA_F	
PECL_SD	J14	SMA_F	
PWR5	J0	RAD0.1	
PWRDWN	J10	DIL3	
RJ45 PULSE	J1	RJ45PULSE	
SPEED	J4	DIL3	
TP_JP_RTOP	TP2	SIL2	
TP_SDTH	TP1	SIL2	

Εικόνα 62: Λίστα Bill Of Materials του υποσυστήματος Network Media Converter

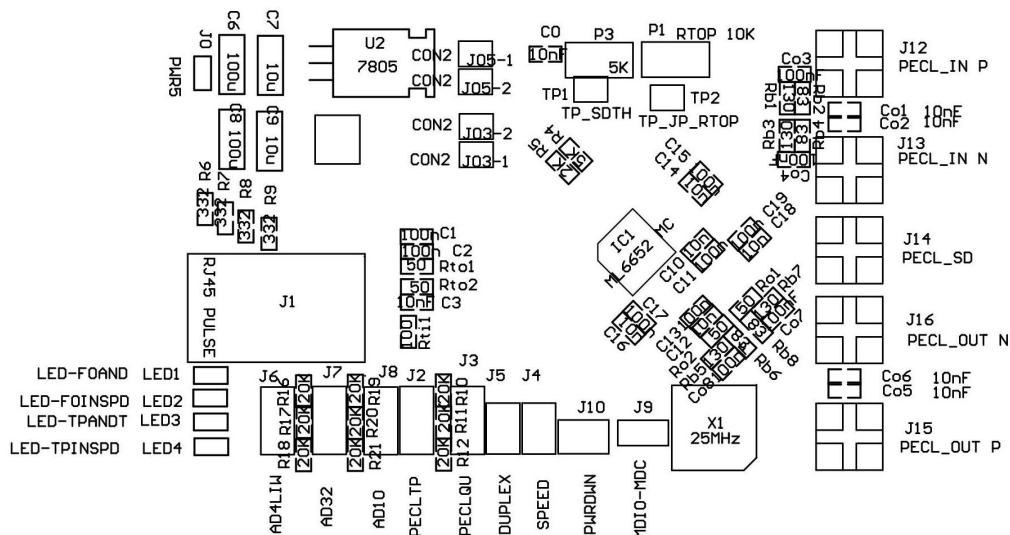


Εικόνα 63: Εκτύπωση πλακέτας PCB ανεστραμμένης πάνω όψης του υποσυστήματος Network Media Converter



Εικόνα 64: Εκτύπωση πλακέτας PCB κάτω όψης του υποσυστήματος Network Media Converter

Σημείωση, ομοίως με τις προηγούμενες εκτυπώσεις PCB, οι διαστάσεις δεν είναι οι πραγματικές, και οι κανονικές των διαφανειών συμπεριλαμβάνονται στο παράρτημα.



Εικόνα 65: Διάγραμμα τοποθέτησης εξαρτημάτων πάνω όψης της πλακέτας PCB του υποσυστήματος Network Media Converter

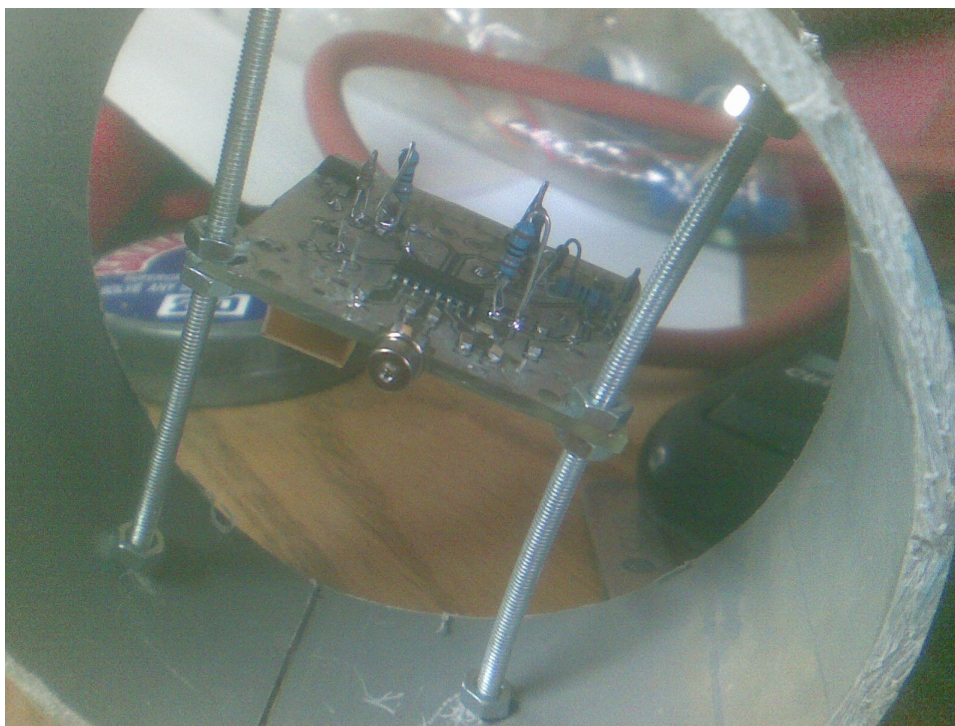
5.5. Υλικό της κατασκευής - Κοστολόγιο

Το εξωτερικό περίβλημα του δέκτη αποτελείται από PVC σωλήνα Φ100 στην οποία έχει προσαρμοστεί στεγανά με χρήση σιλικόνης, γυάλινος εστιακός φακός μεγέθυνσης x4 και διαμέτρου 90mm, προμηθευμένος από το κατάστημα χαρτικών.



Εικόνα 66: Η πλακέτα του δέκτη ευθυγραμμισμένη μέσα από το φακό μεγέθυνσης μπροστά από το δέκτη

Η πλακέτα του δέκτη στο εσωτερικό στερεώνεται συμμετρικά στο κέντρο της σωλήνας με τη χρήση δύο τμημάτων ντίζας 3mm όπως φαίνεται στην εικόνα 66. Οι ρυθμίσεις ακριβείας γίνονται από τέσσερα παξιμάδια 3mm που συγκρατούν την πλακέτα πάνω στις δύο ντίζες.



Εικόνα

67: Η εσωτερική βάση του δέκτη και οι ντίτζες στήριξης.

Το πίσω μέρος κλείνει στεγανά με καπάκι της $\Phi 100$ PVC σωλήνας. Στο καπάκι βρίσκεται συτυποθλίπτης (cable gland) PG7 προδιαγραφών IP67 για τη διέλευση σπιδράλ μέσω του οποίου και τα καλώδια.

Το εξωτερικό περίβλημα του πομπού αποτελείται από επίσης σωλήνα PVC διαμέτρου $\Phi 62$ για ευκολία ευθυγράμμισης με τον δέκτη, και αντίστοιχη στεγάνωση με γυαλί στο μπροστά μέρος και καπάκι $\Phi 62$ με συτυποθλίπτη πίσω.



Εικόνα 68: το εμπρός μέρος του πομπού



Εικόνα 69: Η πλακέτα του πομπού και η βάση στήριξης με τις ντίζες ευθυγράμμισης πριν κολληθούν οι SMA Connectors

Στο εσωτερικό του η πλακέτα του VCSEL Driver στερεώνεται επίσης σε δύο ντίζες 3mm με δυνατότητα ευθυγράμμισης ακριβείας της δέσμης Laser κατά τη συναρμολόγηση.



Εικόνα

70: Η βάση στήριξης της κατασκευής

Οι δύο σωλήνες στηρίζονται και ευθυγραμμίζονται με βίδες 4mm πάνω σε πλάκα από plexiglass 6mm λόγω της αντοχής και ακαμψίας που το χαρακτηρίζει.



Εικόνα 71: Ευθυγραμμισμένοι πομπός και δέκτης από το εμπρός μέρος
Πάνω στην πλάκα αυτή επίσης προσαρμόζονται και οι βάσεις στήριξης της κατασκευής, και μια μικρή βάση για το ηλεκτρολογικό κουτί προδιαγραφών IP56 [15] με αντίστοιχα glands που περικλείει την πλακέτα του Media Converter.

Το κοστολόγιο της κατασκευής είναι προσεγγιστικό λόγω της προμήθειας επιμέρους ολοκληρωμένων ως δείγματα, και τις αυξομειώσεις των τιμών των εξαρτημάτων και υλικών στην αγορά.

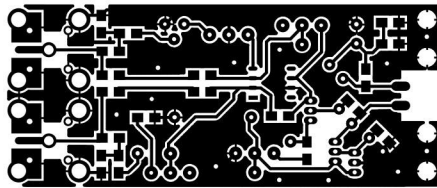
Εξάρτημα - υλικό	κόστος	Προμηθευτής
Κοστολόγιο δέκτη		
TMC8D42	37,2€	Roithner-laser
MAX3645	*3,60 €	Digi-key
AMS1117 3.3v	0,15€	Ebay
Trimmer var. resistor	0,20€	Ebay
Αντιστάσεις 0805 1% και πυκνωτές 0805	0,05€	Ebay
3x SMA-F Connectors	2,20€	Ebay
PCB 40x50	1,2€	Τοπικό κατάστημα ηλεκτρονικού υλικού
Μεγεθυντικός φακός x4 90mm γυάλινος	2,00 €	Τοπικό κατάστημα χαρτικών
Σωλήνα PVC Φ100 0,5m	1,00 €	Τοπικό κατάστημα υδραυλικών υλικών
Καπάκι στεγανοποίησης Φ100	1,50 €	Τοπικό κατάστημα υδραυλικών υλικών
gland PG16	2,50 €	Το κατάστημα ηλεκτρολογικού υλικού
Κοστολόγιο Πομπού	-	-
PH85-D1P0S2	18,50 €	Roithner-Laser
TSH330	*0,8€	Digi-Key
2x BF494	1€	Τοπικό κατάστημα ηλεκτρονικού υλικού
AMS1117 3.3v	0,15€	Ebay
Αντιστάσεις 0805 1%	0,05 €	Ebay
Πυκνωτές 0805	0,05 €	Ebay
Trimmer var. resistor	0,60€	Ebay
2x SMA-F Connectors	1,5€	Ebay
PCB 60x25	0,9€	Τοπικό κατάστημα ηλεκτρονικού υλικού
Σωλήνα PVC Φ62 0,15m	0,20€	Τοπικό κατάστημα υδραυλικών υλικών
Καπάκι στεγανοποίησης Φ62	1,00 €	Τοπικό κατάστημα υδραυλικών υλικών
gland PG16	2,5€	Τοπικό κατάστημα ηλεκτρολογικού υλικού

Κοστολόγιο Media Converter	-	-
ML6652	*15€	Ebay
LM7805	0,5€	Τοπικό κατάστημα ηλεκτρονικού υλικού
AMS1117 3.3v	0,15€	Ebay
Pulse RJ54 Socket	1,5€	Ebay
Αντιστάσεις 0805 1%	0,20 €	Ebay
Πυκνωτές 0805	0,20 €	Ebay
5x SMA-F Connectors	3,75 €	Ebay
pins 2x24	0,5€	Τοπικό κατάστημα ηλεκτρονικού υλικού
6x jumpers	0,3€	Τοπικό κατάστημα ηλεκτρονικού υλικού
PCB 110x80	5,2€	Τοπικό κατάστημα ηλεκτρονικού υλικού
Ηλεκτρολογικό κουτί IP56 120x80x50	4,00 €	Τοπικό κατάστημα ηλεκτρολογικού υλικού
2x Gland PG16	5€	Ebay
2x Gland PG7	1€	Ebay
5x pigtail RG316 SMA-M SMA-M 20cm	10€	Ebay
Σπιράλ 10mm 0,5m	0,25€	Τοπικό κατάστημα ηλεκτρολογικού υλικού
Τροφοδοτικό 12V 1A	2€	Ebay
Πλάκα στήριξης Plexiglass 6mm 100x120	0,60€	Τοπικό κατάστημα πινακίδων
Βίδες 4mm παξιμάδια 4mm και 3mm ντίζα 0,5m 3mm ροδέλες με φλάντζα ID 4mm	1€	Τοπικό κατάστημα σιδερίκων και
Συνολο	128,5€/σύστημα	

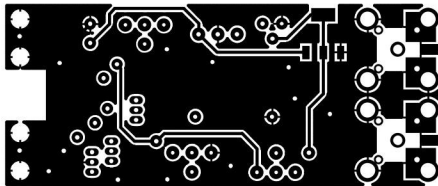
Το συνολικό κόστος και των δύο συστημάτων ανέρχεται στα 247€.

Παράρτημα

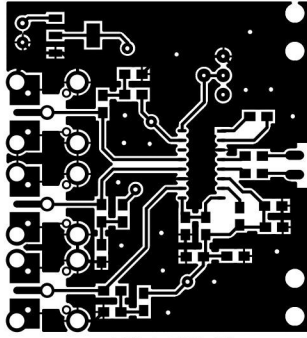
Παρακάτω συμπεριλαμβάνονται οι PCB εκτυπώσεις δέκτη, VCSEL Driver, και Media Converter σε πραγματικό μέγεθος.



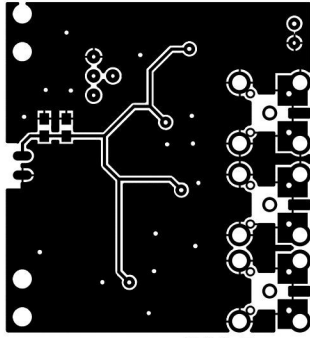
TX_Driver Top mirrored



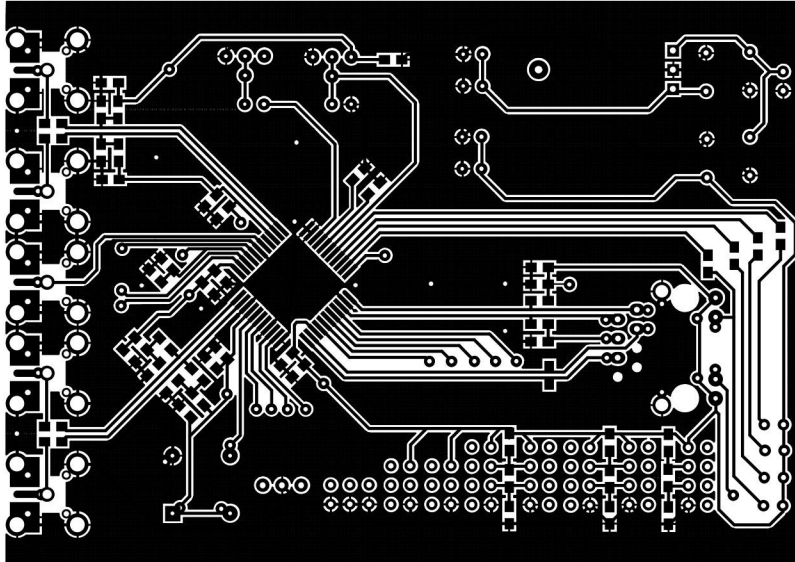
RX_Driver Bottom



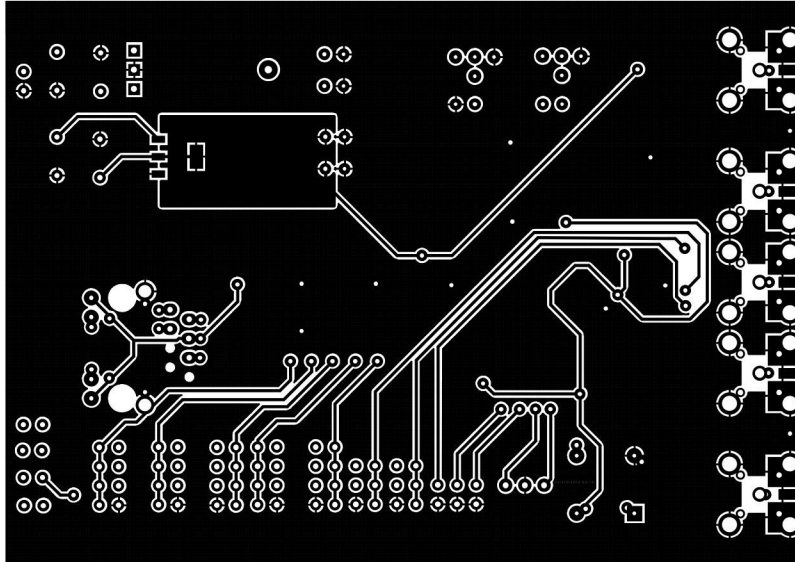
RXLA TOP Mirrored



RXLA Bottom



MC_Ethernet TOP_MIRRORED



MC_Ethernet BOTTOM

.GBL

References

- [1] www.wikipedia.com
- [2] <http://www.freespaceoptic.com/>
- [3] <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/>
- [4] http://www.pcworld.com/article/237236/flickering_leds_transmit_800mbps_wifi_speeds.html
- [5] <http://www.see.ed.ac.uk/wordpress/hxh/LiFi>
- [6] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/diod.html>
- [7] www.lasercomponents.com
- [8] <http://mtweb.mtsu.edu/nchong/PM-Atm3.htm>
- [9] <http://www.weatheronline.gr/reports/wxfacts/Fog-and-Mist.htm>
- [10] Experimental Study of Atmospheric Visibility and Optical Wave Attenuation for Free-Space Optics Communications [Martin Grabner¹ Vaclav Kvicera]
- [11] LASER INFORMATION TELECOMMUNICATIONS
- [12] <http://laseritc.com/id=124>
- [13] http://ka7oei.com/Coherent_versus_noncoherent_test.html
- [14] <http://ronja.twibright.com/>
- [15] http://en.wikipedia.org/wiki/IP_Code