

**Τμήμα  
Μηχανικών  
Πληροφορικής τ.ε.**  
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα  
Δυτικής Ελλάδας

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΟΡΑΤΟΥ ΦΩΤΟΣ»**

**ΖΑΝΙΔΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΣΑΡΙΔΗΣ ΗΛΙΑΣ**

**Αντίρριο, 2018**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Αντίρριο, Ημερομηνία/2018

#### ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Ονοματεπώνυμο, Υπογραφή

2. Ονοματεπώνυμο, Υπογραφή

3. Ονοματεπώνυμο, Υπογραφή

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εγγράφηκε από τον φοιτητή Ζανίδα Εμμανουήλ στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του τμήματός μου, οι οποίοι με καθοδήγησαν και συνέβαλαν τα μέγιστα στην απόκτηση γνώσεων, την δημιουργία κριτικής σκέψης και κατ' επέκταση την επιστημονική μου κατάρτιση.

Ειδικότερα και θερμά ευχαριστώ τον κύριο Ασαρίδη Ηλία, ο οποίος είναι και ο εισηγητής του θέματος μου. Τέλος ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου, διότι χωρίς αυτούς δεν θα μπορούσα να τακαταφέρω!

*Ζανίδης Εμμανουήλ*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το θέμα της πτυχιακής εργασίας είναι «Επικοινωνίες ορατού φωτός» και για την επιστημονική τεκμηρίωσή του παρουσιάζονται τα παρακάτω κεφάλαια:

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο: «Τηλεπικοινωνίες», καταγράφονται γενικά στοιχεία, η ιστορική αναδρομή, οι βασικές τηλεπικοινωνιακές έννοιες (βασικά στοιχεία, αναλογικές και ψηφιακές επικοινωνίες, τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, κανάλια επικοινωνίας, διαμόρφωση) και οι οπτικές ζεύξεις ως επικοινωνιακό μέσο (πλεονεκτήματα της οπτικής ίνας σε σχέση με την καλωδίωση χαλκού).

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο η: «Επικοινωνία με Ορατό Φως» παρατίθενται γενικά στοιχεία, η ιστορική αναδρομή του θέματος, τα συστήματα τηλεπικοινωνιών, η λειτουργία του VLC (πομπός με λάμπες LED, πλεονεκτήματα LED, Διαμόρφωση), ο Οπτικός Ανιχνευτής-Φωτοδίοδος (εφαρμογές οπτικής ζεύξης LED-φωτοανιχνευτή), και οι εφαρμογές Visible Light Communication (γενικές εφαρμογές, Indoor Visible Light Communication).

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο οι: «Οπτικές Επικοινωνίες Ελευθέρου Χώρου» παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για τις Οπτικές Επικοινωνίες Ελευθέρου Χώρου, η Li-Fi τεχνολογία Ασύρματης Επικοινωνίας Ορατού Φωτός (βασική αρχή λειτουργίας, τεχνολογικά πρότυπα τεχνολογίας Li-Fi), οι εφαρμογές των Οπτικών Επικοινωνιών Ελευθέρου Χώρου (ασφάλεια, υποβρύχιες εφαρμογές, νοσοκομειακές εφαρμογές, εφαρμογές σε οχήματα, βιομηχανικοί αυτοματισμοί), και τέλος η χρήση και τεχνολογίες των Οπτικών Επικοινωνιών Ελευθέρου Χώρου (LEDs).

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο η: «Οπτική Επικοινωνία μέσω Οπτικών Ινών» αναλύονται γενικά και ιστορικά στοιχεία, οι εφαρμογές Οπτικής Επικοινωνίας μέσω Οπτικών Ινών, η τεχνολογία λειτουργίας (μεταδότες, δέκτες, ψηφιακή προδιάταξη, τύποι καλωδίων ινών, ενίσχυση, πολλαπλασιασμός με διαίρεση μήκους κύματος), η Οπτική Ασύρματη Επικοινωνία (τρέχουσα κατάσταση, εφαρμογές, πρόσφατες τάσεις), η Οπτική Επικοινωνία Ελευθέρου Χώρου «RONJA» (Μοντέλα, Περιορισμοί, Τεχνολογία), η τεχνολογία Ένωσης Υπέρυθρων Δεδομένων, η τεχνολογία διαμόρφωσης Color shift keying (CSK) και οι τρόποι ασφάλειας με λέιζερ.

Στο 5<sup>ο</sup> και τελευταίο κεφάλαιο τα: «Συμπεράσματα» παρατίθενται, εν συντομία, τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής έρευνας για την πρόοδο και την τεχνολογική εξέλιξη των Επικοινωνιών Ορατού Φωτός.

## ABSTRACT

The topic of the thesis is «Visible Light Communications» and for its scientific documentation is presented the following chapters:

In the first chapter: «Telecommunications», general data are recorded, historical background, basic telecommunication concepts (basic data, analogue and digital communications, telecommunications networks, communication channels, configuration) and fiber optics as a communication medium related to copper wiring).

In the 2<sup>nd</sup> chapter are recorded «Visibility with Visible Light», general information, historical background, telecommunication systems, the operation of VLC (LED light transmitter, LED advantages, Configuration), Optical Detector-Photodiode LED photodetector), and Visible Light Communication (Indoor Visible Light Communication) applications.

In the 3<sup>rd</sup> chapter, «Free Area Visual Communications», there are presented general data on Visual Frequency Communications, Li-Fi Wireless Visible Communication Technology (basic operating principle, Li-Fi technology standards), Visual Frequency Optical Communications applications (safety, underwater applications, hospital applications, vehicle applications, industrial automation), and finally the use and technologies of Optical Communications (LEDs).

In the 4<sup>th</sup> chapter «Optical Fiber Optic Communication» are analyzed general and historical data, optic fiber optic applications, the operating technology (transmitters, receivers, digital predigitation, types of fiber cables, amplification, wavelength multiplication); Optical Wireless Communication (current status, applications, recent trends), RONJA (Model, Restrictions, Technology) Freeway Communication, Infrared Data Association technology, Color Shift Keying (CSK) laser safety.

In the fifth and final chapter: «Conclusions» briefly outline the results of the bibliographic research on the advancement and technological development of Visible Light Communications.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....                                                   | 3  |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....                                                              | 4  |
| ABSTRACT .....                                                             | 6  |
| ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....                                                 | 7  |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ - ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....                                         | 10 |
| ΕΙΚΟΝΕΣ .....                                                              | 10 |
| ΣΧΗΜΑΤΑ.....                                                               | 10 |
| 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: «ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ».....                                         | 12 |
| 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ .....                                              | 12 |
| 1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....                                                | 13 |
| 1.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ .....                                | 14 |
| 1.3.1 Βασικά στοιχεία.....                                                 | 14 |
| 1.3.2 Αναλογικές και ψηφιακές επικοινωνίες .....                           | 15 |
| 1.3.3 Τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.....                                         | 15 |
| 1.3.4 Κανάλια επικοινωνίας .....                                           | 16 |
| 1.3.5 Διαμόρφωση .....                                                     | 17 |
| 1.4 ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΩΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟ ΜΕΣΟ .....                               | 18 |
| 1.4.1 Πλεονεκτήματα της οπτικής ίνας σε σχέση με την καλωδίωση χαλκού..... | 20 |
| 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: «ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΕ ΟΡΑΤΟ ΦΩΣ» .....                               | 22 |
| 2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....                                                  | 22 |
| 2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....                                                | 24 |
| 2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ.....                                         | 27 |
| 2.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ VLC .....                                               | 28 |
| 2.4.1 Πομπός με Λάμπες LED .....                                           | 28 |

|       |                                                                   |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.2 | Πλεονεκτήματα LED.....                                            | 29 |
| 2.4.3 | Διαμόρφωση.....                                                   | 30 |
| 2.5   | ΟΠΤΙΚΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ-ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΣ .....                               | 30 |
| 2.5.1 | Εφαρμογές Οπτικής Ζεύξης LED-Φωτοανιχνευτή.....                   | 33 |
| 2.6   | ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ VISIBLE LIGHT COMMUNICATION.....                        | 34 |
| 2.6.1 | Γενικές εφαρμογές.....                                            | 34 |
| 2.6.2 | Indoor Visible Light Communication .....                          | 35 |
| 3     | ΚΕΦΑΛΑΙΟ: «ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ».....             | 37 |
| 3.1   | ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ..... | 37 |
| 3.2   | Li-Fi ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΟΡΑΤΟΥ ΦΩΤΟΣ.....         | 38 |
| 3.2.1 | Βασική Αρχή Λειτουργίας .....                                     | 39 |
| 3.2.2 | Τεχνολογικά Πρότυπα τεχνολογίας Li-Fi .....                       | 41 |
| 3.3   | ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ .....                                                   | 43 |
| 3.3.1 | Ασφάλεια.....                                                     | 43 |
| 3.3.2 | Υποβρύχιες εφαρμογές.....                                         | 43 |
| 3.3.3 | Νοσοκομειακές εφαρμογές.....                                      | 43 |
| 3.3.4 | Εφαρμογές σε οχήματα .....                                        | 44 |
| 3.3.5 | Βιομηχανικοί αυτοματισμοί .....                                   | 44 |
| 3.4   | ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ .....                          | 44 |
| 3.4.1 | Χρήση και τεχνολογίες.....                                        | 44 |
| 3.4.2 | LEDs.....                                                         | 48 |
| 4     | ΚΕΦΑΛΑΙΟ: «Η ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΕΣΩ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ».....           | 53 |
| 4.1   | ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....                                              | 53 |
| 4.2   | ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....                                           | 53 |
| 4.3   | ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΜΕΣΩ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ.....             | 54 |



|       |                                                  |    |
|-------|--------------------------------------------------|----|
| 4.4   | ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ .....                                 | 54 |
| 4.4.1 | Μεταδότες .....                                  | 55 |
| 4.4.2 | Δέκτες .....                                     | 57 |
| 4.4.3 | Ψηφιακή προδιάταξη .....                         | 57 |
| 4.4.4 | Τύποι καλωδίων ινών .....                        | 58 |
| 4.4.5 | Ενίσχυση.....                                    | 59 |
| 4.4.6 | Πολλαπλασιασμός με διαίρεση μήκους κύματος.....  | 60 |
| 4.5   | Η ΟΠΤΙΚΗ ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ .....              | 61 |
| 4.5.1 | Τρέχουσα κατάσταση .....                         | 61 |
| 4.5.2 | Εφαρμογές .....                                  | 62 |
| 4.5.3 | Πρόσφατες τάσεις.....                            | 62 |
| 4.6   | ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ «RONJA» ..... | 63 |
| 4.6.1 | Μοντέλα .....                                    | 64 |
| 4.6.2 | Περιορισμοί .....                                | 64 |
| 4.6.3 | Τεχνολογία.....                                  | 65 |
| 4.7   | ΕΝΩΣΗ ΥΠΕΡΥΘΡΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....                  | 66 |
| 4.8   | Color shift keying .....                         | 68 |
| 4.9   | Η ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΜΕ ΛΕΙΖΕΡ .....                       | 69 |
| 5     | ΚΕΦΑΛΑΙΟ: «ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ» .....                   | 71 |
|       | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....                                | 73 |

# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ - ΣΧΗΜΑΤΩΝ

## ΕΙΚΟΝΕΣ

|                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 1.1: Βασικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα. ....                                                                                                                    | 14 |
| Εικόνα 1.2: Το καλώδιο TOSLINK με στρογγυλή υποδοχή σύνδεσης S/PDIF. ....                                                                                            | 20 |
| Εικόνα 2.1: Απεικόνιση ενός πομπού φωτοφώνου, που δείχνει τη διαδρομή του ανακλώμενου ηλιακού φωτός, πριν και μετά τη διαμόρφωση από τον Alexander Graham Bell. .... | 25 |
| Εικόνα 2.2: Ημιαγωγός LED. ....                                                                                                                                      | 29 |
| Εικόνα 3.1: παράδειγμα επικοινωνίας με ορατό φως. ....                                                                                                               | 40 |
| Εικόνα 3.2: Δύο ηλιακοί δορυφόροι που επικοινωνούν οπτικά στο διάστημα μέσω λέιζερ. .                                                                                | 47 |
| Εικόνα 3.3: Απεικόνιση της οπτικής μονάδας επικοινωνίας LADEE Lunare Laser (LLCD).                                                                                   | 48 |
| Εικόνα 4.1: Ένα δομοστοιχείο GigaBit Interface Converter (GBIC). ....                                                                                                | 55 |

## ΣΧΗΜΑΤΑ

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 1.1: πλεονεκτήματα της επικοινωνίας οπτικών ινών σε σχέση με τα συστήματα χάλκινων συρμάτων. ....                                               | 21 |
| Σχήμα 2.1: Το ορατό φως είναι μόνο ένα μικρό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. .                                                                  | 22 |
| Σχήμα 2.2: Ένα διάγραμμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, παρουσιάζοντας διάφορες ιδιότητες σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων και των μηκών κύματος. .... | 24 |
| Σχήμα 2.3: Η διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση σε έναν οπτικό ανιχνευτή (optical detector). ....                                                           | 32 |
| Σχήμα 2.4: Η διάταξη LED-Φωτοδίοδος. ....                                                                                                             | 33 |
| Σχήμα 2.5: Χρήση της Τεχνολογίας VLC σε αυτοκινητοδρόμους. ....                                                                                       | 35 |
| Σχήμα 2.6: Χρήση της Τεχνολογίας VLC σε εσωτερικούς χώρους. ....                                                                                      | 36 |

|                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 4.1: Δομικό διάγραμμα του συστήματος RONJA για μία πλήρη αμφίδρομη σύνδεση.<br>.....                                                                                                                      | 65 |
| Σχήμα 4.2: Στοίβαπρωτοκόλλων IrDA, συμπεριλαμβανομένων IrPHY, IrLAP, IrLMP, TinyTP, IrCOMM, IrOBEX, IrUSB.....                                                                                                  | 67 |
| Σχήμα 4.3: Ο χώρος χρωματογραφίας CIE 1931 xy, ο οποίος δείχνει επίσης τους χρωματισμούς των πηγών φωτός μαύρου σώματος διαφόρων θερμοκρασιών και των γραμμών σταθερής συσχετισμένης θερμοκρασίας χρώματος..... | 69 |

# 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: «ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ»

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Η τηλεπικοινωνία είναι η μετάδοση σημάτων, μηνυμάτων, λέξεων, κειμένων, εικόνων και ήχων ή πληροφοριών οποιασδήποτε φύσης με καλώδιο, ραδιόφωνο, οπτικά ή άλλα ηλεκτρομαγνητικά συστήματα. Οι τηλεπικοινωνίες πραγματοποιούνται όταν η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των συμμετεχόντων στην επικοινωνία περιλαμβάνει τη χρήση της τεχνολογίας. Μεταδίδεται είτε ηλεκτρικά μέσω φυσικών μέσων, όπως καλωδίων, είτε μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τέτοιες διαδρομές μετάδοσης συχνά διαιρούνται σε κανάλια επικοινωνίας<sup>1</sup> που παρέχουν τα πλεονεκτήματα της πολυπλεξίας<sup>2</sup> (Κωνσταντίνου, Καψάλης, & Κωττής, 1995).

Δεδομένου ότι ο όρος επικοινωνία θεωρείται η κοινωνική διαδικασία ανταλλαγής πληροφοριών, ο όρος τηλεπικοινωνίες χρησιμοποιείται συχνά στον πληθυντικό επειδή περιλαμβάνει πολλές διαφορετικές τεχνολογίες.

Τα πρώιμα μέσα επικοινωνίας από απόσταση περιελάμβαναν οπτικά σήματα, όπως φάρους, σήματα καπνού, τηλεγραφικά σηματοφόρου, σημαίες σήματος και οπτικού τηλεγράφου. Άλλα παραδείγματα προ-σύγχρονης επικοινωνίας μεγάλων αποστάσεων περιελάμβαναν ηχητικά μηνύματα όπως τα κωδικοποιημένα χτυπήματα με τύμπανα, τα κέρατα που φυσούσαν και τα δυνατά σφυρίγματα. Οι τεχνολογίες του 20<sup>ου</sup> και 21<sup>ου</sup> αιώνα για την επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων περιλαμβάνουν συνήθως ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές τεχνολογίες, όπως τηλεγραφήματα, τηλεφωνήματα, ραδιόφωνο, τη μετάδοση μικροκυμάτων, τις οπτικές ίνες και τους δορυφόρους επικοινωνιών (Walrand, 1997).

---

<sup>1</sup>Το επικοινωνιακό κανάλι ή κανάλι μετάδοσης είναι όρος των τηλεπικοινωνιών που αναφέρεται στην σύνδεση μεταξύ μιας πηγής και ενός προορισμού. Το κανάλι μπορεί να είναι ένα ζευγάρι σύρματα, το τηλεφωνικό καλώδιο ο αέρας ή το κενό, όπου διαδίδεται το ακτινοβολούμενο σήμα που μεταφέρει την πληροφορία.

<sup>2</sup>Πολυπλεξία (multiplexing) λέγεται η μέθοδος, η οποία επιτρέπει σε ψηφιακά δεδομένα ή αναλογικά σήματα από διαφορετικές πηγές, τα οποία, π.χ., εκφράζουν διαφορετικές δικτυακές συνδέσεις, να διέλθουν μέσα από το ίδιο φυσικό μέσο (ένα καλώδιο, στην ενσύρματη επικοινωνία, ή ο ελεύθερος χώρος, στην ασύρματη επικοινωνία).

Μια επανάσταση στην ασύρματη επικοινωνία ξεκίνησε την πρώτη δεκαετία του 20ού αιώνα με τις πρωτοποριακές εξελίξεις στον τομέα των ραδιοεπικοινωνιών από τον Guglielmo Marconi, ο οποίος κέρδισε το βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 1909. Άλλοι αξιοσημείωτοι πρωτοπόροι εφευρέτες και προγραμματιστές στον τομέα των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών τηλεπικοινωνιών ήταν ο Charles Wheatstone και ο Samuel Morse (εφευρέτες του τηλεγράφου), ο Alexander Graham Bell (εφευρέτης του τηλεφώνου), ο Edwin Armstrong και ο Lee de Forest (εφευρέτες του ραδιοφώνου), καθώς και οι Vladimir K. Zworykin, John Logie Baird και Philo Farnsworth (μερικοί από τους εφευρέτες της τηλεόρασης) (Walrand, 1997).

## 1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Το 1792, ο Claude Chappe, γαλλικός μηχανικός, δημιούργησε το πρώτο σύστημα σταθερής οπτικής τηλεγραφίας (ή γραμμή ναυτιλίας) μεταξύ Λιλ και Παρισιού. Ωστόσο, το σηματοφόρο υπέφερε από την ανάγκη για εξειδικευμένους χειριστές και ακριβούς πύργους σε διαστήματα από δέκα έως τριάντα χιλιόμετρα (έξι έως δεκαεννιά μίλια). Ως αποτέλεσμα του ανταγωνισμού από το ηλεκτρικό τηλεγράφημα, η τελευταία εμπορική γραμμή εγκαταλείφθηκε το 1880.

Ο Sir Charles Wheatstone και ο Sir William Fothergill Cooke εφηύραν τον ηλεκτρικό τηλεγράφο το 1837. Και οι δύο εφευρέτες είδαν τη συσκευή τους ως «βελτίωση του υπάρχοντος ηλεκτρομαγνητικού τηλεγράφου» όχι ως νέα συσκευή.

Ο Samuel Morse ανέπτυξε μια ανεξάρτητη έκδοση του ηλεκτρικού τηλεγράφου που απέτυχε στις 2 Σεπτεμβρίου 1837. Ο κώδικας του ήταν μια σημαντική πρόοδος σε σχέση με τη μέθοδο σηματοδότησης του Wheatstone. Το πρώτο διατλαντικό καλώδιο ολοκληρώθηκε με επιτυχία στις 27 Ιουλίου 1866, επιτρέποντας για πρώτη φορά τη διατλαντική τηλεπικοινωνία.

Το συμβατικό τηλέφωνο εφευρέθηκε ανεξάρτητα από τον Alexander Bell και τον Elisha Gray το 1876. Ο Antonio Meucci εφηύρε την πρώτη συσκευή που επέτρεψε την ηλεκτρική μετάδοση φωνής σε μια γραμμή το 1849. Ωστόσο, η συσκευή του Meucci δεν είχε πρακτική αξία, ηλεκτροφωνικό αποτέλεσμα και συνεπώς απαιτούσε από τους χρήστες να τοποθετήσουν τον δέκτη στο στόμα τους για να «ακούν» τι λέγεται. Οι πρώτες εμπορικές τηλεφωνικές υπηρεσίες δημιουργήθηκαν το 1878 και το 1879 στις δύο πλευρές του Ατλαντικού στις πόλεις New Haven και Λονδίνο (Κωνσταντίνου, Καψάλης, & Κωττής, 1995).

### 1.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Η σύγχρονη τηλεπικοινωνία βασίζεται σε μια σειρά από βασικές έννοιες που γνώρισαν προοδευτική ανάπτυξη και τελειοποίηση σε μια περίοδο πάνω από έναν αιώνα.

#### 1.3.1 Βασικά στοιχεία

Οι τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών μπορούν κατά κύριο λόγο να διαιρεθούν σε ενσύρματες και ασύρματες. Γενικά όμως, ένα βασικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα αποτελείται από τρία βασικά μέρη (Κωνσταντίνου, Καψάλης, & Κωττής, 1995):

- Έναν πομπό που λαμβάνει πληροφορίες και τις μετατρέπει σε σήμα.
- Ένα μέσο μετάδοσης, που ονομάζεται επίσης φυσικό κανάλι το οποίο μεταφέρει το σήμα. Ένα παράδειγμα αυτού είναι το «κανάλι ελεύθερου χώρου».
- Έναν δέκτη που παίρνει το σήμα από το κανάλι και το μετατρέπει σε χρήσιμες πληροφορίες για τον παραλήπτη.



Εικόνα 1.1: Βασικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα.

Πηγή: (Κωνσταντίνου, Καψάλης, & Κωττής, 1995).

Για παράδειγμα, σε σταθμό ραδιοφωνικής μετάδοσης, ο μεγάλος ενισχυτής ισχύος του σταθμού είναι ο πομπός και η κεραία εκπομπής είναι η διασύνδεση μεταξύ του ενισχυτή ισχύος και του «ελεύθερου διαύλου χώρου». Το κανάλι ελεύθερου χώρου είναι το μέσο μετάδοσης και η κεραία του δέκτη είναι η διεπαφή μεταξύ του καναλιού ελεύθερου χώρου και του δέκτη. Στη συνέχεια, ο ραδιοφωνικός δέκτης είναι ο προορισμός του ραδιοφωνικού σήματος και εδώ μετατρέπεται από ηλεκτρισμό σε ήχο για να ακούει ο κόσμος.

Μερικές φορές, τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι «αμφίδρομα» (αμφίδρομα συστήματα) με μία μόνο ηλεκτρονική συσκευή που λειτουργεί τόσο ως πομπός όσο και ως δέκτης (πομποδέκτης).

Οι τηλεπικοινωνίες μέσω σταθερών γραμμών ονομάζονται «επικοινωνία από σημείο σε σημείο» επειδή είναι μεταξύ ενός πομπού και ενός δέκτη. Οι τηλεπικοινωνίες μέσω ραδιοφωνικών εκπομπών ονομάζονται «επικοινωνίες μετάδοσης» επειδή είναι μεταξύ ενός ισχυρού πομπού και πολλών ραδιοφωνικών δεκτών χαμηλής ισχύος.

Οι τηλεπικοινωνίες στις οποίες πολλαπλοί πομποί και πολλαπλοί δέκτες έχουν σχεδιαστεί για να συνεργάζονται και να μοιράζονται το ίδιο φυσικό κανάλι ονομάζονται «συστήματα πολλαπλών λειτουργιών». Η κατανομή των φυσικών καναλιών με τη χρήση πολυπλεξίας συχνά δίνει πολύ μεγάλες μειώσεις του κόστους. Πολλαπλά συστήματα βρίσκονται σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και τα πολυπλεγμένα σήματα μεταφέρονται στους κόμβους μέχρι τον σωστό δέκτη τερματικού προορισμού (Tse & Viswanath, 2009).

### **1.3.2 Αναλογικές και ψηφιακές επικοινωνίες**

Τα σήματα επικοινωνίας μπορούν να αποστέλλονται είτε με αναλογικά σήματα είτε με ψηφιακά σήματα. Υπάρχουν συστήματα αναλογικών επικοινωνιών και συστήματα ψηφιακής επικοινωνίας. Για αναλογικό σήμα, το σήμα μεταβάλλεται συνεχώς σε σχέση με τις πληροφορίες. Σε ένα ψηφιακό σήμα, οι πληροφορίες κωδικοποιούνται ως ένα σύνολο διακεκριμένων τιμών. Κατά τη διάρκεια της διάδοσης και της λήψης, οι πληροφορίες που περιέχονται σε αναλογικά σήματα αναπόφευκτα θα υποβαθμιστούν από ανεπιθύμητο φυσικό θόρυβο. Συνήθως, ο θόρυβος σε ένα σύστημα επικοινωνίας μπορεί να εκφραστεί ως προσθήκη ή αφαίρεση από το επιθυμητό σήμα σε ένα εντελώς τυχαίο. Αυτή η μορφή θορύβου ονομάζεται πρόσθετος θόρυβος, με την κατανόηση ότι ο θόρυβος μπορεί να είναι αρνητικός ή θετικός σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Ο θόρυβος που δεν είναι πρόσθετος θόρυβος είναι μια πολύ πιο δύσκολη κατάσταση για να περιγραφεί ή να αναλυθεί.

Από την άλλη πλευρά, εκτός εάν η διαταραχή του θορύβου του προσθέτου υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο όριο, οι πληροφορίες που περιέχονται στα ψηφιακά σήματα παραμένουν άθικτες. Η αντοχή τους στο θόρυβο αποτελεί βασικό πλεονέκτημα των ψηφιακών σημάτων έναντι των αναλογικών σημάτων (Στρουθόπουλος, 2008).

### **1.3.3 Τηλεπικοινωνιακά δίκτυα**

Ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο είναι μια συλλογή πομπών, δεκτών και καναλιών επικοινωνίας που στέλνουν μηνύματα μεταξύ τους. Ορισμένα δίκτυα ψηφιακών επικοινωνιών περιέχουν έναν ή περισσότερους δρομολογητές που συνεργάζονται για τη μετάδοση πληροφοριών στον σωστό χρήστη. Ένα αναλογικό δίκτυο επικοινωνιών

αποτελείται από έναν ή περισσότερους διακόπτες οι οποίοι δημιουργούν μια σύνδεση μεταξύ δύο ή περισσότερων χρηστών. Και για τους δύο τύπους δικτύου, οι αναμεταδότες μπορεί να είναι απαραίτητοι για την ενίσχυση ή την αναδημιουργία του σήματος όταν μεταδίδεται σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτό είναι για την καταπολέμηση της εξασθένησης που μπορεί να καταστήσει το σήμα διακριτό από το θόρυβο. Ένα άλλο πλεονέκτημα των ψηφιακών συστημάτων σε σχέση με το αναλογικό είναι ότι η έξοδος τους είναι ευκολότερη στην αποθήκευση στη μνήμη, δηλαδή δύο καταστάσεις τάσης (υψηλή και χαμηλή) είναι ευκολότερο να αποθηκευτούν από μια συνεχή σειρά καταστάσεων (Στρουθόπουλος, 2008).

### 1.3.4 Κανάλια επικοινωνίας

Ο όρος «κανάλι» έχει δύο διαφορετικές έννοιες. Στη μία έννοια, ένα κανάλι είναι το φυσικό μέσο που μεταφέρει ένα σήμα μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Παραδείγματα αυτού του είδους είναι η ατμόσφαιρα για επικοινωνίες ήχου, οι οπτικές ίνες γυαλιού για ορισμένα είδη οπτικών επικοινωνιών, τα ομοαξονικά καλώδια για επικοινωνίες μέσω των τάσεων και τα ηλεκτρικά ρεύματα σε αυτά και ο ελεύθερος χώρος επικοινωνίας με ορατό φως, υπέρυθρα κύματα, υπεριώδες φως, και ραδιοκύματα. Οι τύποι ομοαξονικών καλωδίων ταξινομούνται βάσει τύπου RG ή «ραδιοφωνικός οδηγός», ορολογία που προέρχεται από τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Οι διάφορες ονομασίες RG χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση των συγκεκριμένων εφαρμογών μετάδοσης σήματος. Αυτό το τελευταίο κανάλι ονομάζεται «κανάλι ελεύθερου χώρου». Η αποστολή ραδιοκυμάτων από το ένα μέρος στο άλλο δεν έχει καμία σχέση με την παρουσία ή την απουσία ατμόσφαιρας μεταξύ των δύο. Τα ραδιοκύματα μετακινούνται μέσα από ένα τέλειο κενό εξίσου εύκολα καθώς ταξιδεύουν με αέρα, ομίχλη, σύννεφα ή οποιοδήποτε άλλο είδος αερίου.

Η άλλη έννοια του όρου «κανάλι» στις τηλεπικοινωνίες φαίνεται στο κανάλι επικοινωνίας φράσης, το οποίο είναι μια υποδιαίρεση ενός μέσου μετάδοσης έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταυτόχρονη αποστολή πολλαπλών ροών πληροφοριών. Για παράδειγμα, ένας ραδιοφωνικός σταθμός μπορεί να μεταδίδει ραδιοκύματα σε ελεύθερο χώρο σε συχνότητες κοντά στα 94,5 MHz (megahertz), ενώ ένας άλλος ραδιοφωνικός σταθμός μπορεί ταυτόχρονα να εκπέμπει ραδιοκύματα σε συχνότητες κοντά στα 96,1 MHz. Κάθε ραδιοφωνικός σταθμός θα μεταδίδει ραδιοκύματα σε ένα εύρος ζώνης συχνότητας περίπου 180 kHz (kilohertz), με κέντρο σε συχνότητες όπως οι παραπάνω, οι οποίες ονομάζονται «συχνότητες φορέα». Κάθε σταθμός σε αυτό το παράδειγμα χωρίζεται από τους γειτονικούς σταθμούς του κατά 200 kHz και η διαφορά



μεταξύ 200 kHz και 180 kHz (20 kHz) είναι ένα μηχανικό επίδομα για τις ατέλειες στο σύστημα επικοινωνίας.

Στο παραπάνω παράδειγμα, το «ελεύθερο διάλυο διάστημα» έχει διαιρεθεί σε κανάλια επικοινωνίας σύμφωνα με τις συχνότητες και κάθε κανάλι διαθέτει ένα χωριστό εύρος ζώνης συχνοτήτων στο οποίο εκπέμπει ραδιοκύματα. Αυτό το σύστημα διαίρεσης του μέσου σε κανάλια σύμφωνα με τη συχνότητα ονομάζεται «πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας». Ένας άλλος όρος για την ίδια ιδέα είναι η «πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος», η οποία χρησιμοποιείται συχνότερα στις οπτικές επικοινωνίες όταν πολλαπλοί πομποί μοιράζονται το ίδιο φυσικό μέσο.

Ένας άλλος τρόπος διαίρεσης ενός μέσου επικοινωνίας στα κανάλια είναι να καταναίμει σε κάθε αποστολέα ένα επαναλαμβανόμενο τμήμα χρόνου («χρονική θυρίδα», για παράδειγμα, 20 χιλιοστά του δευτερολέπτου από κάθε δευτερόλεπτο) και να επιτρέπει σε κάθε αποστολέα να στέλνει μηνύματα μόνο εντός της δικής του χρονικής θυρίδας. Αυτή η μέθοδος διαίρεσης του μέσου σε κανάλια επικοινωνίας ονομάζεται «πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου» ( TDM ) και χρησιμοποιείται στην επικοινωνία οπτικών ινών. Ορισμένα συστήματα ραδιοεπικοινωνιών χρησιμοποιούν το TDM εντός ενός διατιθέμενου καναλιού FDM. Ως εκ τούτου, τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν ένα υβρίδιο TDM και FDM(Στρουθόπουλος, 2008).

### **1.3.5 Διαμόρφωση**

Η διαμόρφωση ενός σήματος για τη μετάδοση πληροφοριών είναι γνωστή ως διαμόρφωση. Η διαμόρφωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαραγωγή ενός ψηφιακού μηνύματος ως αναλογική κυματομορφή. Αυτό κοινώς ονομάζεται «κλείδωμα» - ένας όρος που προέρχεται από την παλαιότερη χρήση του MorseCode στον τομέα των τηλεπικοινωνιών - και υπάρχουν αρκετές τεχνικές πληκτρολόγησης (σε αυτά περιλαμβάνονται διαμόρφωση μετατόπισης φάσης, διαμόρφωση μετατόπισης συχνότητας, και διαμόρφωση μετατόπισης πλάτους). Το σύστημα «Bluetooth», για παράδειγμα, χρησιμοποιεί πληκτρολόγηση με μετατόπιση φάσης για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφόρων συσκευών. Επιπλέον, υπάρχουν συνδυασμοί πλήκτρων μετατόπισης φάσης και πλήκτρων μετατόπισης πλάτους που ονομάζονται «τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους» (QAM) που χρησιμοποιούνται σε ψηφιακά συστήματα ραδιοεπικοινωνίας υψηλής χωρητικότητας.

Η διαμόρφωση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση πληροφοριών αναλογικών σημάτων χαμηλής συχνότητας σε υψηλότερες συχνότητες. Αυτό είναι χρήσιμο επειδή τα αναλογικά σήματα χαμηλής συχνότητας δεν μπορούν να μεταδοθούν αποτελεσματικά στον ελεύθερο χώρο. Ως εκ τούτου, οι πληροφορίες από ένα αναλογικό σήμα χαμηλής συχνότητας πρέπει να εντυπωθούν σε ένα σήμα υψηλότερης συχνότητας (γνωστό ως «φέρων κύμα») πριν από τη μετάδοση. Υπάρχουν αρκετά διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης για να επιτευχθεί αυτό [δύο από τις πιο βασικές είναι η διαμόρφωση εύρους (AM) και η διαμόρφωση συχνότητας (FM)]. Ένα παράδειγμα αυτής της διαδικασίας είναι ότι η φωνή του δίσκου εντυπώνεται σε ένα φέρον κύμα 96 MHz χρησιμοποιώντας διαμόρφωση συχνότητας (η φωνή θα ληφθεί στη συνέχεια από ένα ραδιόφωνο ως το κανάλι «96 FM»). Επιπλέον, η διαμόρφωση έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να χρησιμοποιεί πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM)(Στρουθόπουλος, 2008).

#### **1.4 ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΩΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟ ΜΕΣΟ**

Οι οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσο τηλεπικοινωνιών και δικτύων υπολογιστών, επειδή είναι εύκαμπτες, μεγάλης χωρητικότητας και ταχύτητας και μπορούν να συνδυαστούν με τα υπάρχοντα δισύρματα χάλκινα καλώδια. Είναι ιδιαίτερα επωφελείς για τις επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων, επειδή το φως διαδίδεται μέσω των ινών με μικρή εξασθένιση σε σύγκριση με τα ηλεκτρικά καλώδια. Αυτό επιτρέπει την τηλεπικοινωνιακή διασύνδεση μεγάλων αποστάσεων με λίγους αναμεταδότες.

Τα φωτεινά σήματα ανά κανάλι που διαδίδονται στην οπτική ίνα διαμορφώνονται με ταχύτητες 111 Gigabits ανά δευτερόλεπτο (Gbit/s). Τον Ιούνιο του 2013, οι ερευνητές απέδειξαν μετάδοση 400 Gbit/s σε ένα μόνο κανάλι χρησιμοποιώντας πολυπλεξία *orbital angular momentum* (OAM) (τροχιακής γωνιακής ορμής) σε 4 τρόπους.

Κάθε ίνα μπορεί να μεταφέρει πολλά ανεξάρτητα κανάλια, καθένα από τα οποία χρησιμοποιεί διαφορετικό μήκος κύματος φωτός (πολυπλεξία διαχωρισμού μήκους κύματος (*wavelength-division multiplexing*-WDM)). Ο ρυθμός καθαρών δεδομένων /netdata rate (ρυθμός δεδομένων χωρίς επιβάρυνση ανά δευτερόλεπτο) ανά ίνα είναι ο ρυθμός δεδομένων ανά κανάλι που μειώνεται από την διόρθωση σφαλμάτων προς τα εμπρός (*forward error correction*-FEC) ή η κωδικοποίηση διαύλων, πολλαπλασιαζόμενο με τον αριθμό των καναλιών (συνήθως έως ογδόντα σε συστήματα *dense WDM* από το 2008). Από το 2011, το ρεκόρ για εύρος ζώνης σε έναν μόνο πυρήνα οπτικής ίνας ήταν 101

Tbit/s (370 κανάλια στα 273 Gbit /s το καθένα). Το ρεκόρ για μια πολυπύρηνη οπτική ίνα από τον Ιανουάριο του 2013 ήταν 1,05 petabits ανά δευτερόλεπτο. Το 2009, η BellLabs έσπασε το φράγμα των 100 (petabit ανά δευτερόλεπτο) χιλιομέτρων (15,5 Tbit/s σε μία μόνο οπτική ίνα μήκους 7.000 km).

Για εφαρμογές μικρής απόστασης, όπως ένα δίκτυο σε ένα κτίριο γραφείων (Fiberto the office-FTTO), η καλωδίωση οπτικών ινών μπορεί να εξοικονομήσει χώρο στους αγωγούς καλωδίων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μία μόνο οπτική ίνα μπορεί να μεταφέρει πολύ περισσότερα δεδομένα από τα συνηθισμένα καλώδια, όπως η τυπική καλωδίωση Ethernet κατηγορίας 5, η οποία τυπικά λειτουργεί με ταχύτητες 100 Mbit/s ή 1 Gbit/s. Επιπροσθέτως οι οπτικές ίνες είναι ανοσοποιημένες σε ηλεκτρικές παρεμβολές, δεν υπάρχει διασταυρούμενη παρεμβολή μεταξύ των σημάτων σε διαφορετικά καλώδια οπτικής ίνας, και ακόμη κανένα πρόβλημα από τον περιβαλλοντικό ή βιομηχανικό θόρυβο. Τα μη οπλισμένα καλώδια οπτικών ινών δεν έχουν ηλεκτρική ενέργεια, πράγμα που τα καθιστά καλές λύσεις για την προστασία εξοπλισμού επικοινωνιών σε περιβάλλοντα υψηλής τάσης, όπως εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή δομές επικοινωνίας επιρρεπείς σε κεραυνούς. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλοντα όπου υπάρχουν εκρηκτικοί ατμοί (μεθανίου κλπ), χωρίς κίνδυνο ανάφλεξης. Βέβαια η τροφοδοσία τους είναι πιο δύσκολη σε σύγκριση με τις ηλεκτρικές συνδέσεις.

Πλέον οι οπτικές ίνες συχνά χρησιμοποιούνται για συνδέσεις μικρών αποστάσεων μεταξύ συσκευών. Για παράδειγμα, οι περισσότερες τηλεοράσεις υψηλής ευκρίνειας προσφέρουν ψηφιακή οπτική σύνδεση. Αυτό επιτρέπει τη συνεχή ροή ήχου μέσω φωτισμού, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο TOSLINK<sup>3</sup> (Agarwal, 2014), (Bhatnagar, 2016).

---

<sup>3</sup>Το TOSLINK (από την ToshibaLink) είναι ένα τυποποιημένο σύστημα σύνδεσης οπτικών ινών.



Εικόνα 1.2: Το καλώδιο TOSLINK με στρογγυλή υποδοχή σύνδεσης S/PDIF.

### 1.4.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ της οπτικής ίνας σε σχέση με την καλωδίωση χαλκού

Τα πλεονεκτήματα της επικοινωνίας οπτικών ινών σε σχέση με τα συστήματα χάλκινων συρμάτων είναι τα εξής (Wilson&Hawkes, 2004):

- **Ευρύ εύρος ζώνης:** Μια ενιαία οπτική ίνα μπορεί να μεταφέρει πάνω από 3.000.000 φωνητικές κλήσεις πλήρους αμφίδρομης ή 90.000 τηλεοπτικά κανάλια.
- **Ανοχή στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές:** Η μετάδοση του φωτός μέσω των οπτικών ινών δεν επηρεάζεται από άλλες ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες που βρίσκονται κοντά. Η οπτική ίνα είναι ηλεκτρικά μη αγώγιμη, επομένως δεν ενεργεί ως κεραία για την ανίχνευση ηλεκτρομαγνητικών σημάτων. Οι πληροφορίες που ταξιδεύουν μέσα στην οπτική ίνα είναι άνοσοι σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, ακόμη και ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς που παράγονται από πυρηνικές συσκευές.
- **Χαμηλή απώλεια εξασθένησης σε μεγάλες αποστάσεις:** Η απώλεια εξασθένησης μπορεί να είναι τόσο χαμηλή όσο τα 0,2 dB / km στα καλώδια οπτικών ινών, επιτρέποντας τη μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς την ανάγκη επαναλήψεων.
- **Ηλεκτρικός μονωτήρας:** Οι οπτικές ίνες δεν εκτελούν ηλεκτρική ενέργεια, αποτρέποντας τα προβλήματα με τους βρόχους γείωσης και τη διεξαγωγή κεραυνού. Οι οπτικές ίνες μπορούν να αρθρωθούν σε πόλους παράλληλα με καλώδια υψηλής τάσης.
- **Υλικό κόστος και πρόληψη κλοπής:** Τα συμβατικά καλωδιακά συστήματα χρησιμοποιούν μεγάλες ποσότητες χαλκού. Οι παγκόσμιες τιμές χαλκού γνώρισαν μια έκρηξη στη δεκαετία του 2000 και ο χαλκός υπήρξε στόχος της κλοπής μετάλλων.

- **Ασφάλεια των πληροφοριών που διαβιβάζονται στο καλώδιο:** Ο χαλκός μπορεί να τραβηχτεί με ελάχιστες πιθανότητες ανίχνευσης.



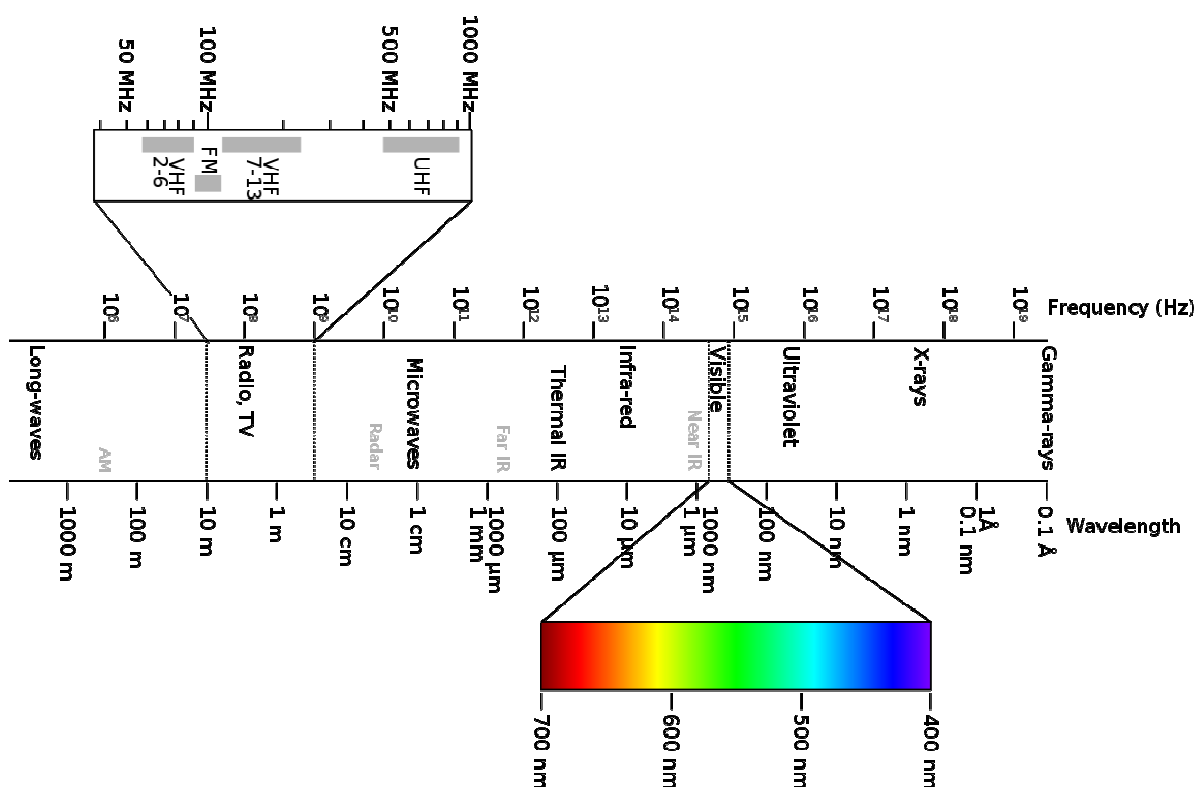
Σχήμα 1.1: πλεονεκτήματα της επικοινωνίας οπτικών ινών σε σχέση με τα συστήματα χάλκινων συρμάτων.

Πηγή: (Wilson & Hawkes, 2004)

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: «ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΕ ΟΡΑΤΟ ΦΩΣ»

### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η επικοινωνία με ορατό φως (VisibleLightCommunication/VLC) είναι μια παραλλαγή επικοινωνίας δεδομένων που χρησιμοποιεί ορατό φως<sup>4</sup> μεταξύ 400 και 800 THz (375-780nm). Το VLC είναι ένα υποσύνολο οπτικών τεχνολογιών ασύρματων επικοινωνιών (Opticalwirelesscommunications/ OWC)<sup>5</sup>(Arnon, 2015).



Σχήμα 2.1: Το ορατό φως είναι μόνο ένα μικρό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Πηγή: (depositphotos-Electromagnetic Spectrum, 2018).

<sup>4</sup>Το φως είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μέσα σε ένα ορισμένο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η λέξη συνήθως αναφέρεται στο ορατό φως, το οποίο είναι το ορατό φάσμα που είναι ορατό στο ανθρώπινο μάτι και είναι υπεύθυνο για την αίσθηση της όρασης. Το ορατό φως συνήθως ορίζεται ως μήκος κύματος στην κλίμακα 400-700 νανόμετρα (nm), ή  $4,00 \times 10^{-7}$  έως  $7,00 \times 10^{-7}$  m, μεταξύ του υπέρυθρου και του υπεριώδους. Αυτό το μήκος κύματος σημαίνει εύρος συχνοτήτων περίπου 430-750 terahertz (THz).

<sup>5</sup>Η οπτική ασύρματη επικοινωνία (OWC) είναι μια μορφή οπτικής επικοινωνίας στην οποία χρησιμοποιείται μη ορατό φως, υπέρυθρο (IR) ή υπεριώδες (UV) φως για τη μεταφορά ενός σήματος.

Η τεχνολογία χρησιμοποιεί λαμπτήρες φθορισμού<sup>6</sup>(συνηθισμένους λαμπτήρες, όχι ειδικές συσκευές επικοινωνίας) για τη μετάδοση σημάτων με ταχύτητα 10 kbit/s ή με LED έως 500 Mbit/s. Έχουν καταδειχθεί μεταδόσεις δεδομένων χαμηλού ρυθμού στα 1 και 2 χιλιόμετρα.

Η RONJA<sup>7</sup> επιτυγχάνει πλήρη ταχύτητα Ethernet (10 Mbit/s) στην ίδια απόσταση χάρη στα μεγαλύτερα οπτικά συστήματα και τις ισχυρότερες λυχνίες LED.

Ειδικά σχεδιασμένες ηλεκτρονικές συσκευές που γενικά περιέχουν φωτοδιόδο λαμβάνουν σήματα από πηγές φωτός, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις μια φωτογραφική μηχανή κινητού τηλεφώνου ή μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή θα ήταν επαρκής. Ο αισθητήρας εικόνας που χρησιμοποιείται σε αυτές τις συσκευές είναι στην πραγματικότητα μια σειρά φωτοδίοδων (εικονοστοιχεία) και σε μερικές εφαρμογές η χρήση του μπορεί να προτιμάται σε μία μόνο φωτοδίοδο. Ένας τέτοιος αισθητήρας μπορεί να παρέχει είτε πολυκαναλικό (έως 1 εικονοστοιχείο = 1 κανάλι) είτε μια συνειδητοποίηση των πολλαπλών φωτεινών πηγών (Arnon, 2015).

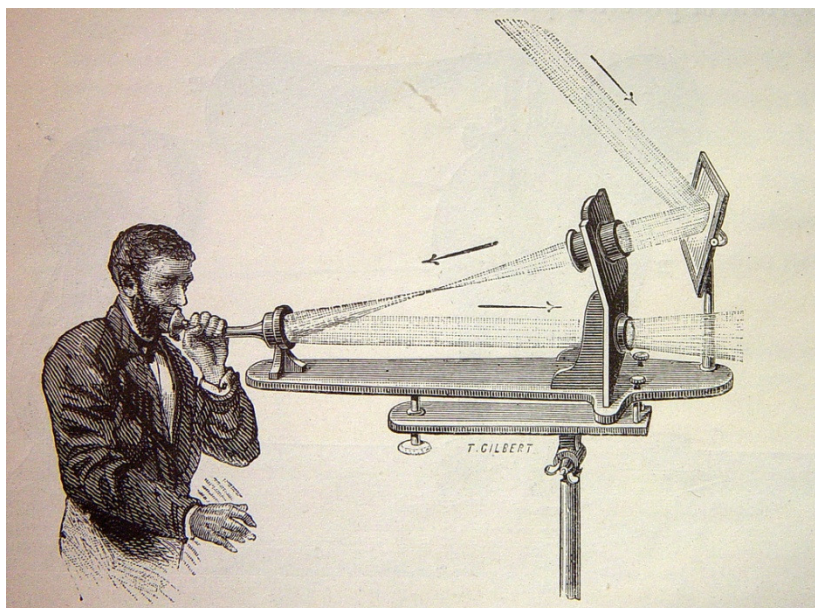
---

<sup>6</sup>Ένας λαμπτήρας φθορισμού ή σωλήνας φθορισμού είναι ένας λαμπτήρας εκκένωσης αερίου χαμηλής πίεσης υδραργύρου που χρησιμοποιεί φθορισμό για την παραγωγή ορατού φωτός.

<sup>7</sup>Ronja (Reasonable Optical Near Joint Access) είναι μια οπτική επικοινωνία ελεύθερου χώρου. Το Ronja μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία συνδέσμου point-to-point Ethernet με πλήρη αμφίδρομη σύνδεση 10 Mbit/s.







**Εικόνα 2.1:** Απεικόνιση ενός πομπού φωτοφώνου, που δείχνει τη διαδρομή του ανακλώμενου ηλιακού φωτός, πριν και μετά τη διαμόρφωση από τον AlexanderGrahamBell.

**Πηγή:** (Blaunstein, Arnon, Kopeika, & Zilberman, 2009).

Πρόσφατες εργασίες ξεκίνησαν το 2003 στο εργαστήριο Nakagawa, στο KeioUniversity της Ιαπωνίας, χρησιμοποιώντας LED για τη μετάδοση δεδομένων με ορατό φως. Ένα πρωτότυπο VLC είχε παρουσιαστεί από τρεις προπτυχιακούς φοιτητές στο Universidad de BuenosAires το 1995, καταφεύγοντας στη διαμόρφωση εύρους μιας δίοδου λέιζερ 532 nm των 5 mW και ανιχνευτή φωτοδιόδων. Από τότε έχουν διεξαχθεί πολυάριθμες ερευνητικές δραστηριότητες με επίκεντρο το VLC.

Το 2006, οι ερευνητές από την CICTR στο PennState πρότειναν ένα συνδυασμό επικοινωνίας γραμμής ισχύος (Power-linecommunication/ PLC)<sup>8</sup> και LED λευκού φωτός για την παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης για εσωτερικές εφαρμογές. Η έρευνα αυτή πρότεινε ότι το VLC θα μπορούσε να αναπτυχθεί ως μια τέλεια λύση τελευταίου μιλίου στο μέλλον.

---

<sup>8</sup>Η επικοινωνία γραμμής ισχύος (PLC) μεταφέρει δεδομένα σε έναν αγωγό ο οποίος χρησιμοποιείται ταυτόχρονα για ηλεκτρική μετάδοση εναλλασσόμενου ρεύματος ή για διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Είναι επίσης γνωστή ως μεταφορέας τροφοδοσίας γραμμής, γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας, ψηφιακής γραμμής συνδρομητή (PDSL), Mains επικοινωνία, power-line τηλεπικοινωνιών, ή δικτύωση γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας (PLN).

Τον Ιανουάριο του 2010 μια ομάδα ερευνητών της Siemens και του Ινστιτούτου Τηλεπικοινωνιών Fraunhofer του Ινστιτούτου HeinrichHertz στο Βερολίνο παρουσίασε μετάδοση στα 500 Mbit/s με λευκό LED σε απόσταση 5 μέτρων (16 ft) και 100 Mbit/s σε μεγάλη απόσταση χρησιμοποιώντας πέντε LED.

Η διαδικασία τυποποίησης VLC διεξάγεται μέσα στην ομάδα εργασίας IEEE WirelessPersonalAreaNetworks (802.15).

Τον Δεκέμβριο του 2010 ο St. Cloud της Μινεσότα υπέγραψε σύμβαση με την LVX Minnesota και έγινε ο πρώτος που χρησιμοποίησε την τεχνολογία αυτή.

Τον Ιούλιο του 2011 παρουσιάστηκε στο TED Global μια ζωντανή επίδειξη βίντεο υψηλής ευκρίνειας που μεταδίδεται από μια τυπική λυχνία LED.

Πρόσφατα, τα συστήματα εσωτερικής τοποθέτησης που βασίζονται σε VLC έχουν γίνει ένα ελκυστικό θέμα. Η έρευνα της ABI προβλέπει ότι θα μπορούσε να αποτελέσει βασική λύση για την απελευθέρωση της «indoorlocationmarket /αγοράς εσωτερικών χώρων» αξίας 5 δισεκατομμυρίων δολαρίων. Για το ByteLight κατατέθηκε αίτηση διπλώματος ευρεσιτεχνίας σε ένα ελαφρύ σύστημα εντοπισμού θέσης με χρήση LED αναγνώρισης ψηφιακών παλμών τον Μάρτιο του 2012.

Μια άλλη πρόσφατη εφαρμογή είναι στον κόσμο των παιχνιδιών, χάρη στην οικονομικά αποδοτική και χαμηλής πολυπλοκότητας εφαρμογή, η οποία απαιτεί μόνο ένα μικροελεγκτή και ένα LED ως οπτικό front-end.

Τα VLC μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή ασφάλειας. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε δίκτυα αισθητήρων σώματος και σε δίκτυα προσωπικών περιοχών.

Πρόσφατα οργανικά LED ( OLED ) έχουν χρησιμοποιηθεί ως οπτικοί πομποδέκτες για τη δημιουργία συνδέσεων επικοινωνίας VLC έως 10 Mbit/s.

Τον Οκτώβριο του 2014, η Axitek ξεκίνησε ένα εμπορικό αμφίδρομο σύστημα RGB LED VLC που ονομάζεται MOMO που μεταδίδει προς τα κάτω και επάνω σε ταχύτητες 300 Mbit / s και με εύρος 25 ποδιών.

Τον Μάιο του 2015, η Philips συνεργάστηκε με την εταιρεία σούπερ μάρκετ Carrefour για την παροχή υπηρεσιών VLC βάσει τοποθεσίας σε smartphone αγοραστών σε υπεραγορά στη Λιλ της Γαλλίας. Τον Ιούνιο του 2015, δύο κινεζικές εταιρείες, η Kuang-Chi και η PingAn Bank, συνεργάστηκαν για την εισαγωγή μιας κάρτας πληρωμών που μεταδίδει

πληροφορίες μέσω ενός μοναδικού ορατού φωτός. Τον Μάρτιο του 2017, η Philips δημιούργησε τις πρώτες υπηρεσίες που βασίζονται στην τοποθεσία VLC σε smartphones αγοραστών στη Γερμανία. Η εγκατάσταση παρουσιάστηκε στο EuroShop στο Ντίσελντορφ. Το πρώτο σούπερ μάρκετ στη Γερμανία, ένα σούπερ μάρκετ της Edeka στο Ντίσελντορφ-Μπιλκ χρησιμοποιεί το σύστημα, το οποίο προσφέρει ακρίβεια τοποθέτησης 30 εκατοστών, που ικανοποιεί τις ιδιαίτερες απαιτήσεις της λιανικής πώλησης τροφίμων. Τα συστήματα εσωτερικής τοποθέτησης που είναι βασισμένα στο VLC μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε χώρους όπως νοσοκομεία, οίκοι ευγηρίας, αποθήκες και μεγάλα ανοικτά γραφεία για τον εντοπισμό ατόμων και τον έλεγχο εσωτερικών ρομποτικών οχημάτων(UllahKhan, 2017).

### **2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

Με το VisibleLight Communications, ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, καλύπτονται ταυτόχρονα οι ανάγκες για φωτισμό και για μεταφορά δεδομένων, εσωτερικών και εξωτερικών χώρων. Δηλαδή, το ορατό φως όχι μόνο φωτίζει τα αντικείμενα που θέλει να δει ο άνθρωπος, αλλά χρησιμοποιείται και για μεταφορά δεδομένων με πολύ μεγάλες ταχύτητες.

Στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων η γρήγορη μετάδοση πληροφοριών έχει γίνει αδιαπραγμάτευτη ανάγκη και δυνατότητα. Καθημερινά, οι άνθρωποι έρχονται σε επαφή στην εργασία τους στον ελεύθερο χρόνο, αλλά και χρησιμοποιούν διάφορα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας και τηλεπικοινωνιακά μέσα, όπως είναι το τηλέφωνο, το ραδιόφωνο, η τηλεόραση και το διαδίκτυο. Με αυτά τα μέσα υπάρχει η ευχέρεια άμεσης επικοινωνίας με άτομα που βρίσκονται σε διαφορετικές ηπείρους, διεκπεραίωσης καθημερινών υποθέσεων και συναλλαγών και λήψη πληροφοριών για διάφορες εξελίξεις και γεγονότα οπουδήποτε στον κόσμο(Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).

Καθίσταται σαφές από τα παραπάνω ότι δύσκολα σήμερα μπορεί να φανταστεί κανείς έναν κόσμο χωρίς τηλέφωνο, διαδίκτυο και τηλεόραση. Το πιο σπουδαίο, όμως είναι ότι τα περισσότερα από τα σημερινά συστήματα και μέσα επικοινωνίας έχουν εφευρεθεί και αναπτυχθεί κατά την διάρκεια του περασμένου αιώνα. Συνεπώς ο σύγχρονος άνθρωπος μέσω της εξέλιξης της τεχνολογίας, αναζητά ολοένα και πιο αξιόπιστα συστήματα για αμεσότερη μετάδοση της πληροφορίας. Το VLC το οποίο ανήκει σε μία μεγαλύτερη κατηγορία τηλεπικοινωνιακών μέσων, τις Οπτικές Επικοινωνίες Ελεύθερου χώρου (Free

SpaceCommunication), αποτελεί το αποτέλεσμα αυτής της συνεχούς αναζήτησης(Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).

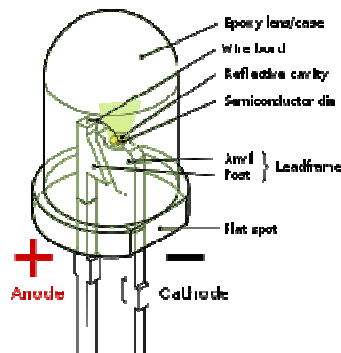
## **2.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ VLC**

Αν κανείς ήθελε να περιγράψει σύντομα το VLC θα έλεγε ότι είναι ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα του οποίου η περιγραφή της λειτουργίας ακολουθεί παρακάτω. Ο πομπός πρόκειται για μία λάμπα φωτισμού τύπου LED, όπου η ένταση του φωτός εναλλάσσεται τόσο γρήγορα που ο άνθρωπος δεν μπορεί να το αντιληφθεί. Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι πολύ απλά το κανάλι. Μία ή και παραπάνω φωτοδίοδο αποτελούν τον δέκτη, οι οποίες είτε είναι μέρος της συσκευής που χρησιμοποιείται, είτε συνδέεται με αυτή εξωτερικά. Το VLC αποτελεί μία σχετικά πρόσφατη τηλεπικοινωνιακή διάταξη. Το 2003 στο Keio University της Ιαπωνίας έγινε η πρώτη καταγεγραμμένη και ολοκληρωμένη μελέτη.(Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).

### **2.4.1 Πομπός με Λάμπες LED**

Σε ένα σύστημα που χρησιμοποιεί το ορατό φως για να μεταφέρει δεδομένα, πηγή του φωτός είναι ο πομπός. Οι λάμπες LED (Light-emitting diode-δίοδος εκπομπής φωτός) είναι ο συμβατικός τύπος που τελικά επικράτησε και χρησιμοποιείται σε VLC εφαρμογές. Η επικράτηση τους οφείλεται στο ότι υπερτερούν των υπόλοιπων λαμπών, ως προς τα χαρακτηριστικά φωτισμού, αλλά και ως προς την δυνατότητα μεταφοράς πληροφορίας.

Το LED αποτελεί έναν ημιαγωγό από τον οποίο εκπέμπεται φωτεινή ακτινοβολία στενού φάσματος, όταν του παρέχεται μία ηλεκτρική τάση κατά τη φορά ορθής πόλωσης (forward-biased). Συνεπώς από την χημική σύσταση του ημιαγωγικού υλικού που χρησιμοποιείται, και μπορεί να είναι υπεριώδες, ορατό ή υπέρυθρο εξαρτάται το μήκος κύματος, η συχνότητα και το χρώμα του εκπεμπόμενου φωτός. Ο έλεγχος του χρώματος του φωτός της εκπομπής, είναι πολύ χρήσιμο για κάποια προβλήματα που δημιουργούνται στο σύστημα. Άρα, το μήκος κύματος του φωτός, εξαρτάται από το χάσμα ενέργειας των υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την δημιουργία του περάσματος p-n. Όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 2.2 μία επαφή p-n σχηματίζεται από μία περιοχή τύπου p και μία περιοχή τύπου n στον ίδιο κρύσταλλο(Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).



Εικόνα 2.2: Ημιαγωγός LED.

Πηγή: (Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).

## 2.4.2 Πλεονεκτήματα LED

Οι λάμπες LED, ως συσκευές φωτισμού, εμφανίζουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα(Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015):

- Απόδοση: Τα LED συγκριτικά με της λάμπες πυράκτωσης παράγουν περισσότερο φως ανά watt.
- Μικρή εξάρτηση της χαρακτηριστικής ισχύος ρεύματος-οπτικής από τη διακύμανση της θερμοκρασίας. Μάλιστα το LED δεν έχει ρεύμα κατωφλίου, το οποίο θα διατηρούσε ισχυρή εξάρτηση από τη θερμοκρασία.
- Χρώμα: Τα LED χωρίς την χρήση φίλτρων σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους φωτισμού,εκπέμπουν φως συγκεκριμένου χρώματος. Είναι πιο αποδοτικά και χαμηλώνουν το αρχικό κόστος.
- Μέγεθος: Το μέγεθος των LED είναι πολύ μικρό (μικρότερα από 2mm) και γι' αυτό μπορούν να τοποθετηθούν σε πινάκες αποτύπωσης.
- Χρόνος ON/OFF: Τα LED έχουν γρήγορη απόκριση. Για παράδειγμα μια τυπική κόκκινη LED μπορεί να έρθει σε κατάσταση πλήρους φωτεινότητας σε χρόνο μs, όπως και τα LED που χρησιμοποιούνται ως συσκευές επικοινωνίας έχουν ακόμα μικρότερους χρόνους απόκρισης.
- Ψυχρό φως: Τα LED αντίθετα με τις κοινές πηγές φωτός, εκπέμπουν πολύ λίγη θερμότητα σε μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας ώστε δεν προκαλεί ζημιά σε ευαίσθητα αντικείμενα ή κατασκευές. Η ενέργεια που χάνεται διαχέεται ως θερμότητα μέσω της βάσης του LED.

- Χρόνος ζωής: Τα LED έχουν μεγάλους χρόνους ζωής. Οι ώρες λειτουργίας τους κυμαίνονται από 35.000 έως 50.000 ώρες, αριθμός τεράστιος συγκριτικά με αυτόν των λαμπτήρων πυράκτωσης που κυμαίνεται από 1.000 έως 2.000 ώρες και των λαμπτήρων φθορισμού που κυμαίνεται από 10.000 έως 15.000 ώρες.

### 2.4.3 Διαμόρφωση

Ο τρόπος αποστολής δεδομένων σε ένα VLC είναι πολύ απλός. Πιο συγκεκριμένα, το LED αναβοσβήνει πολύ γρήγορα, κάθε φορά που στέλνει φως στέλνει το δυαδικό 1 ενώ κάθε φορά που μένει σκοτεινό στέλνει το δυαδικό 0. Πρόκειται για διαμόρφωση πλάτους στην πιο απλή και πιο εύκολα υλοποιήσιμη μορφή της. Αυτή η διαμόρφωση καλείται On-offKeying(OOK). Η χρήση της είναι η πιο απλή και υλοποιείται πολύ εύκολα, επειδή σε τόσο υψηλές συχνότητες, το bandwidth είναι πολύ μεγάλο. Συνεπώς δεν είναι απαραίτητη η χρήση περίπλοκων μορφών διαμόρφωσης για τη βελτίωση της ταχύτητας αποστολής δεδομένων.

Για τις οπτικές επικοινωνίες ελευθέρου χώρου πρόκειται για μία από τις πιο συνηθισμένες τεχνικές διαμόρφωσης και γνωρίζει ταχύτερη ανάπτυξη λόγω της απλοϊκής μορφής της. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιείται ο παλμός πλάτους 2P για να μεταδώσει την πρώτη κατάσταση και παραμένει στο μηδέν για την μετάδοση της δεύτερης κατάστασης. Το είδος αυτής της διαμόρφωσης είναι γνωστό και ως NRZ (Non-Return-to-Zero).

Η αποστολή δεδομένων από τον πομπό στο VLC, γίνεται με την εναλλαγή της έντασης του φωτός που εκπέμπει η λάμπα LED. Η εναλλαγή αυτή, με την προϋπόθεση ότι το VLC πρέπει να λύνει και το πρόβλημα του φωτισμού, δεν πρέπει ο άνθρωπος να την αντιλαμβάνεται. Ο παραπάνω περιορισμός ικανοποιείται, διότι η διάρκεια του παλμού σε αυτό το σύστημα είναι πάρα πολύ μικρή, ενώ εξαρτάται από την επιθυμητή ταχύτητα αποστολής δεδομένων. Παραδείγματος χάριν, για αποστολή με 100Mbps η διάρκεια του παλμού είναι 10ns ενώ για 400 Mbps είναι 2.5ns. Το χρονικό διάστημα και στις δύο περιπτώσεις είναι πολύ μικρό για να μπορεί να ξεχωρίσει ο άνθρωπος δύο διαφορετικές καταστάσεις (Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).

## 2.5 ΟΠΤΙΚΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ-ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΣ

Ένας φωτοανιχνευτής που λαμβάνει την εκπεμπόμενη δέσμη είναι ο δέκτης σε ένα VLC σύστημα. Ο οπτικός ανιχνευτής (optical detector) έχει τη δυνατότητα να μετατρέψει το

λαμβανόμενο οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια ενισχύεται ηλεκτρικά και οδηγείται προς επεξεργασία. Ένα από τα πιο κρίσιμα στοιχεία του συστήματος αποτελούν οι επιδόσεις ενός συστήματος οπτικών επικοινωνιών που αξιολογούνται στο δέκτη και άρα στον οπτικό ανιχνευτή ή φωτοανιχνευτή. Στη συνέχεια ακολουθούν οι γενικές απαιτήσεις που θα πρέπει να έχει κανείς από τους οπτικούς ανιχνευτές (Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015):

- Υψηλή ευαισθησία στα μήκη κύματος που εκπέμπουν οι οπτικές πηγές (ορατή και κοντινή υπέρυθη).
- Υψηλή πιστότητα, δηλαδή ικανότητα πιστής αναπαραγωγής του οπτικού σήματος που λαμβάνεται. Στην αναλογική οπτική μετάδοση αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, γιατί η απόκριση του ανιχνευτή θα πρέπει να είναι γραμμική όσον αφορά το οπτικό σήμα μέσα σε κάποιο ικανοποιητικό εύρος οπτικής ισχύος.
- Ο ανιχνευτής θα πρέπει να αποδίδει το μέγιστο δυνατό ηλεκτρικό σήμα για ένα συγκεκριμένο επίπεδο προσπίπτουσας οπτικής ισχύος, δηλαδή να έχει τη μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα (O/E conversion efficiency).
- Γρήγορη απόκριση ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με συστήματα που προορίζονται για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.
- Χαμηλή εισαγωγή θορύβου, όπως τα χαμηλά σκοτεινά ρεύματα (dark currents) ή ρεύματα διαρροής.
- Μικρή ευαισθησία στις μεταβολές των συνθηκών του περιβάλλοντος, όπως της θερμοκρασίας.
- Μικρό μέγεθος, αποτελεσματική σύζευξη με τις οπτικές ίνες και εύκολη συσκευασία με τα ηλεκτρονικά που ακολουθούν.
- Υψηλή αξιοπιστία για αδιάλειπτη λειτουργία πολλών ετών σε συνθήκες δωματίου.
- Χαμηλό κόστος.

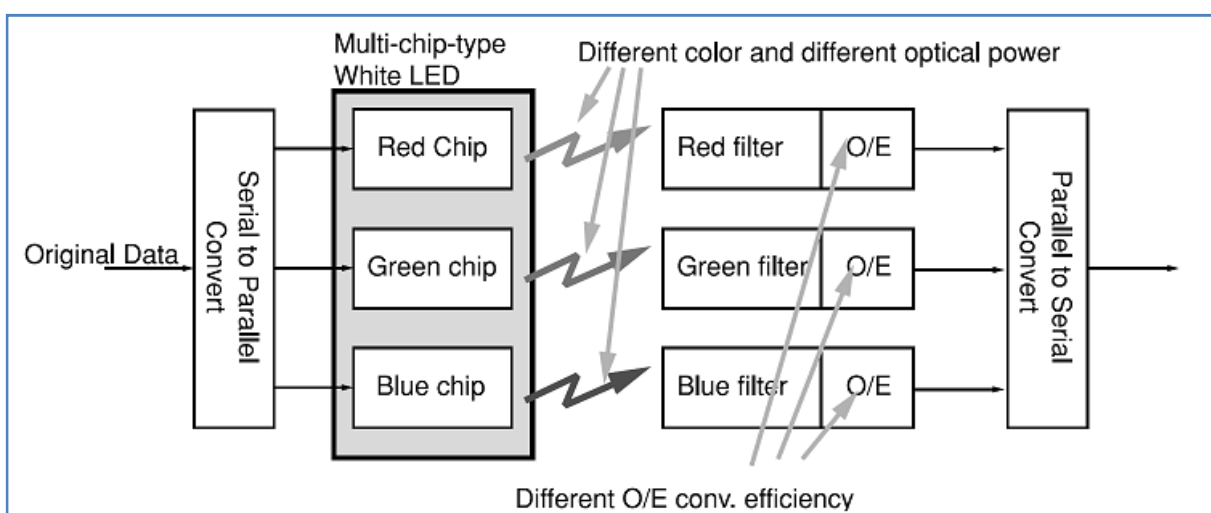
Στις οπτικές επικοινωνίες ο προτιμώμενος τύπος ανιχνευτή είναι η φωτοδίοδος (photodiode). Τα υλικά των φωτοδίοδων είναι ημιαγωγοί όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο, όπως και κράματα των ομάδων III και V του περιοδικού συστήματος των στοιχείων.

Συνεπώς στο VLC χρησιμοποιούνται φωτοδιόδοι για της λήψη της φωτεινής δέσμης. Πολλές φορές μάλιστα χρησιμοποιούνται συστοιχίες φωτοδίοδων. Η λειτουργία του συστήματος του VLC είναι πολύ διαδεδομένη στις οπτικές επικοινωνίες και ονομάζεται

διαμόρφωση έντασης και απευθείας ανίχνευση (Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD)

Ουσιαστικά αυτό που κάνει η φωτοδίοδος είναι η συλλογή του φωτός με την βοήθεια φακών και η μετατροπή της οπτικής ισχύος σε ηλεκτρικό σήμα. Όμως για να αντιμετωπιστεί ένα πρόβλημα που προκύπτει στις επικοινωνίες ορατού φωτός, θα πρέπει να μεσολαβήσει κάτι μεταξύ των δύο παραπάνω διαδικασιών. Έτσι το πρόβλημα που ανακύπτει είναι το φως περιβάλλοντος που υπάρχει στα μέρη όπου μπορεί να εγκατασταθεί το VLC. Αυτό συμβαίνει διότι το φως περιβάλλοντος είναι σε μήκη κύματος όμοια με αυτά του εκπεμπόμενου φωτός, με αποτέλεσμα να μπορεί να λειτουργήσει καταστροφικά για την ανίχνευση, καθώς η φωτοδίοδος θα μπερδεύει το φως περιβάλλοντος με τη φωτεινή δέσμη που εκπέμπεται από τον πομπό.

Για την αντιμετώπιση αυτής της κατάστασης, που ουσιαστικά αποτελεί ένα είδος θορύβου, τοποθετούνται στην φωτοδίοδο λεπτές στρώσεις διηλεκτρικού, οι οποίες λειτουργούν σαν bandpass φίλτρο. Ως εκ τούτου ο φωτοανιχνευτής λαμβάνει το φως της συχνότητας εκπομπής. Διαφορετικά για να ξεπεραστεί αυτή η «ενόχληση» την οποία δημιουργεί το φως περιβάλλοντος στην ζεύξη, είναι απαραίτητη η αξιοποίηση της ιδιότητας του Multi-chip white LED, να παράγει διάφορες εκδοχές του λευκού φωτός, με μεταβολή του ποσοστού που συμμετέχει κάθε ένα από τα βασικά χρώματα στην εκπομπή. Στο παρακάτω Σχήμα 2.3 φαίνεται η διαμόρφωση και η αποδιαμόρφωση (Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).



Σχήμα 2.3: Η διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση σε έναν οπτικό ανιχνευτή (optical detector).

Πηγή: (Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).

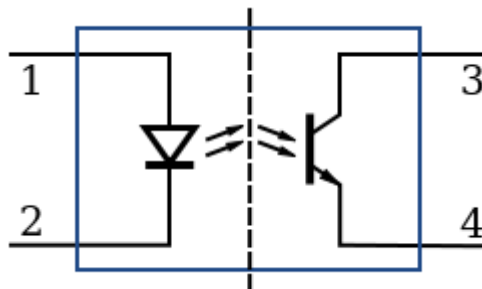


Η ιδιότητα του Multi-chipwhite LED, χρησιμοποιείται και για την βελτίωση της οπτικής ζεύξης. Με βάση την κατασκευή της κάθε φωτοδιόδου, αποκρίνεται καλύτερα σε κάποια συγκεκριμένη συχνότητα. Με αυτό το δεδομένο ρυθμίζεται η συχνότητα εκπομπής του LED, στην συχνότητα βέλτιστης απόκρισης του φωτοανιχνευτή.

Τέλος, η χρήση συστοιχιών φωτοδιόδων και επιτρέπει την καλύτερη λήψη και αναπαραγωγή ενός φωτεινού σήματος, αλλά δίνει και τη δυνατότητα εν δυνάμει πολυκάναλης ζεύξης, όπου κάθε φωτοδιόδος ή ομάδα φωτοδιόδων θα λαμβάνει σήματα διαφορετικής συχνότητας (Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).

### 2.5.1 Εφαρμογές Οπτικής Ζεύξης LED-Φωτοανιχνευτή

Σε πολλές άλλες εφαρμογές χρησιμοποιείται η διάταξη LED-Φωτοδιόδου, εκτός από το VLC, καθώς η δομή και η λειτουργία της είναι απλή, όπως είναι και αξιόπιστη στο χρόνο και ανθεκτική στις φθορές. Ο optocoupler ή αλλιώς Opto-isolator, (οπτοζεύκτης) είναι μία από τις πιο ενδιαφέρουσες και ευρύτερα χρησιμοποιημένες εφαρμογές (Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).



Σχήμα 2.4: Η διάταξη LED-Φωτοδιόδου.

Πηγή: (Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).

Χρησιμοποιείται κυρίως σε μετασχηματιστές τάσης με ένα εύρος χρήσης από μεγάλες βιομηχανικές μονάδες μέχρι τις πιο απλές συσκευές που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή ζωή. Η διάταξη φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Μεταξύ LED και οπτοανιχνευτή μεσολαβεί ένα στρώμα διηλεκτρικού. Ο optocoupler αποτελεί μία ξεχωριστή κατηγορία τηλεπικοινωνιακού συστήματος, της οποίας η ιδιαιτερότητα είναι ότι στην ουσία συζεύγνει δυναμικά (Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).

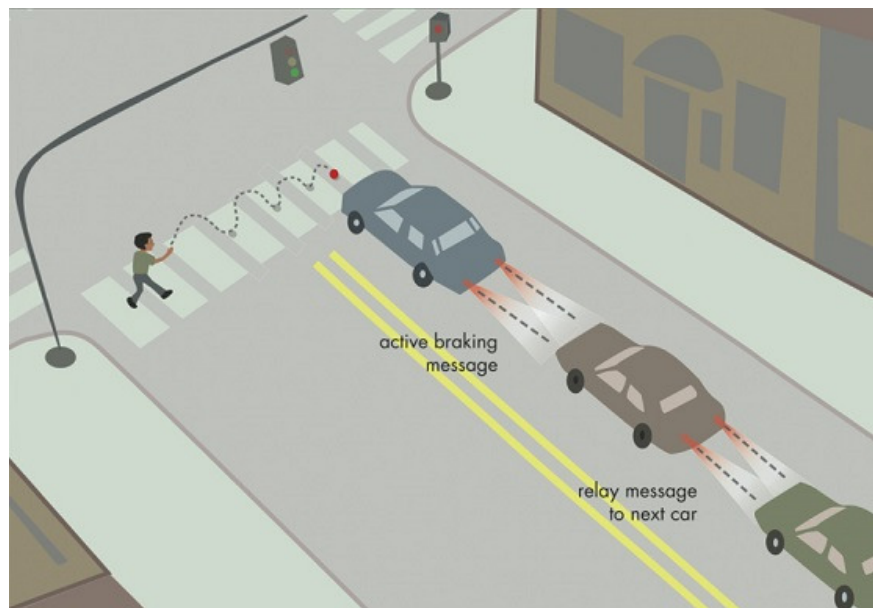
## 2.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ VISIBLE LIGHT COMMUNICATION

### 2.6.1 Γενικές εφαρμογές

Το VLC αποτελεί ένα σύστημα που έχει δυνατότητα εφαρμογής στα περισσότερα μέρη που ο άνθρωπος έχει επιλέξει να μένει και να κινείται, καθώς παντού υπάρχουν πηγές φωτισμού. Οι λάμπες LED, ανεξάρτητα με τη μετάδοση δεδομένων, έχουν ήδη αρχίσει να παίρνουν την θέση των συμβατικών λαμπών.

Τα VLC συστήματα γίνονται πολύ θελκτικά λόγω του συνδυασμού αποδοτικού φωτισμού και ταχύτατης μεταφοράς δεδομένων. Μάλιστα, οι εφαρμογές διαχωρίζονται σε συστήματα εξωτερικών και εσωτερικών χώρων. Σύμφωνα με πολλούς ερευνητές θα ήταν απαραίτητη η εγκατάσταση VLC στις οδικές αρτηρίες με τοποθέτηση LED λαμπτήρων στις κολώνες φωτισμού και στους φωτεινούς σηματοδότες.

Στην καθημερινότητα αυτές οι εγκαταστάσεις έχουν εφαρμογή. Παραδείγματος χάριν, τα οχήματα και οι πεζοί, με τις κατάλληλες συσκευές φωτοανίχνευσης σε ένα σταθερό σημείο στο παρ-μπριζ του αυτοκινήτου ή ενσωματωμένα σε κινητά τηλέφωνα, θα μπορούν να ενημερώνονται για την κίνηση στους δρόμους της πόλης, την θέση τους και να αντλούν πληροφορίες για την πόλη και τα μέσα μαζικής μεταφοράς. Επίσης, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την επικοινωνία μεταξύ δύο αυτοκινήτων σε έκτακτες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα κάποια προειδοποίηση για απότομο φρενάρισμα του προπορευόμενου αυτοκινήτου (Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).



**Σχήμα 2.5:** Χρήση της Τεχνολογίας VLC σε αυτοκινητοδρόμους.

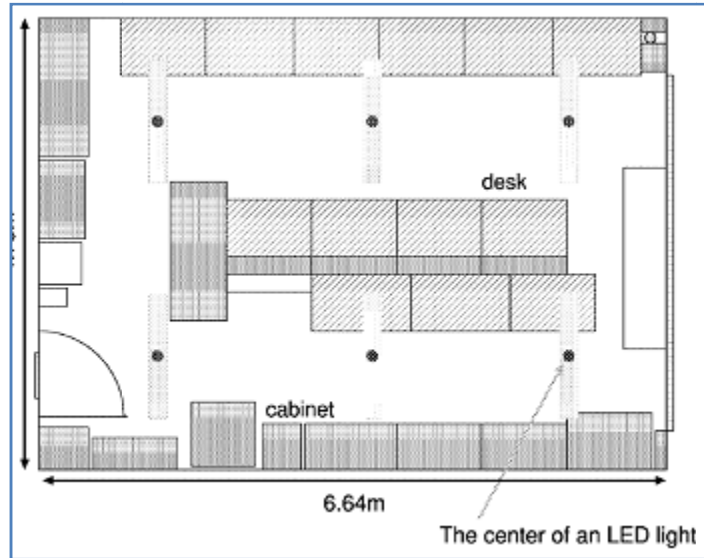
**Πηγή:** (Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).

Επίσης, ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου η επίδραση της RF ακτινοβολίας απαγορεύει την χρήση της. Τέτοια χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα αεροπλάνα και τα νοσοκομεία. Το ορατό φως δεν έχει καμία επίδραση στον άνθρωπο ή σε άλλες συσκευές, καθώς είναι μία «καθαρή» ακτινοβολία (Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).

## **2.6.2 Indoor Visible Light Communication**

Εκτός από τις αναφερόμενες εφαρμογές υπάρχουν αρκετές τροποποιήσεις και υποπεριπτώσεις. Ωστόσο είναι σημαντική η εφαρμογή του VLC σε εσωτερικούς χώρους, όπου μπορεί να καλύψει τις επικοινωνίες τελικού βρόχου (last-mile communication) (Σχήμα 2.5). το παράδειγμα που ακολουθεί αφορά την περίπτωση μιας αίθουσας διδασκαλίας όπου έχει εγκατασταθεί ένα σύστημα VLC.

Έστω λοιπόν η αίθουσα που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι λαμπτήρες LED είναι τα έξι ορθογώνια που φαίνονται και είναι τοποθετημένοι σε ύψος 2.5 m ενώ το ύψος των γραφείων, όπου είναι εγκατεστημένες οι φωτοδιόδοι βρίσκονται σε ύψος 0.85 m.



Σχήμα 2.6: Χρήση της Τεχνολογίας VLC σε εσωτερικούς χώρους.

Πηγή: (Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).

Η εγκατάσταση θα πρέπει να εξυπηρετεί και τους δύο σκοπούς του VLC, δηλαδή να φωτίζει επαρκώς τον χώρο ενώ ταυτόχρονα να προσφέρει ανεμπόδιση και αδιάλειπτη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων.

### **3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: «ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ»**

#### **3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ**

Η τεχνολογία των οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου εξαρτώνται από την οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Αυτός ο τρόπος μεταφοράς πληροφορίας είναι γνωστός από προηγούμενες εποχές και έχει χρησιμοποιηθεί σε απλούστερα συστήματα σε για την μετάδοση σύντομων μηνυμάτων σε μικρές αποστάσεις. Ως ο πρόγονος των οπτικών επικοινωνιών μπορούν να εκληφθούν πολύ απλά συστήματα τα οποία χρησιμοποιούσαν σήματα φωτιάς και ανακλαστικά κάτοπτρα.

Οι επιδόσεις τους προφανώς και ήταν πολύ περιορισμένες λόγω της ακαταλληλότητας των διαθέσιμων πηγών φωτός, της απαίτησης γραμμής οπτικής επαφής (line of sight), όπως και από την ανεξέλεγκτη απόσβεση του φωτός λόγω των καιρικών φαινομένων (βροχή, ομίχλη, χιόνι κτλ) (Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης, & Βλάχος, 2015).

Με την βοήθεια της τεχνολογίας στα σύγχρονα συστήματα οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου, αντικαταστάθηκε ο πομπός και ο δέκτης με ηλεκτρονικά συστήματα υψηλής χρονικής αναλυτικότητας. Το αποτέλεσμα ήταν καλύτερες επιδόσεις και μεγαλύτεροι ρυθμοί μετάδοσης πληροφορίας.

Είναι γνωστό ότι στις οπτικές επικοινωνίες ελευθέρου χώρου χρειάζονται ένας πομπός, ένας δέκτης και ένα μέσο διάδοσης του σήματος. Τον ρόλο του πομπού λαμβάνει μία πηγή φωτός η οποία εκπέμπει ακτίνες φωτός χαμηλής ενέργειας και διαδίδονται μέσω του καναλιού, συνήθως του ατμοσφαιρικού αέρα, με κατεύθυνση προς τον δέκτη. Ο δέκτης είναι ένα οπτικό σύστημα το οποίο εστιάζει την διαδιδόμενη δέσμη φωτός πάνω σε έναν αισθητήρα. Για την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ δύο σημείων πρέπει να χρησιμοποιηθούν πομποδέκτες οι οποίοι υλοποιούν τις λειτουργίες του πομπού και του δέκτη ταυτόχρονα (Capelle, Huguet, Jozefowicz, & Olive, 2018).

Τρεις χρήσιμες εφαρμογές των οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου είναι (Chen, Chao, Daoman, & Xian, 2018):

- Η διασύνδεση μεταξύ δύο δορυφόρων
- Η διασύνδεση μεταξύ δύο επίγειων θέσεων
- Η διασύνδεση συσκευών μέσα σε κτίρια

Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη των οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου οφείλεται στην υπεροχή τους σε κάποιους τομείς των τηλεπικοινωνιών συγκριτικά με τις επικοινωνίες RF και οπτικών ινών. Αντίθετα με τις οπτικές επικοινωνίες ελευθέρου χώρου οι επικοινωνίες RF έχουν πολύ περιορισμένο ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας. Το κόστος υλοποίησης και εξοπλισμού για τις RF επικοινωνίες αλλά και για τις οπτικές επικοινωνίες ελευθέρου χώρου κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με τις τελευταίες να είναι ακριβότερες λόγω της δυνατότητας γρήγορης εγκατάστασης τους.

Επίσης, σταπλεονεκτήματα συγκαταλέγεται και το γεγονός ότι η εγκατάσταση οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου δεν χρειάζεται αδειοδότηση από κάποια αρχή, εν αντιθέσει με τη χρήση του φάσματος των RF επικοινωνιών. Τέλος, οι RF επικοινωνίες είναι λιγότερο ασφαλείς σε σύγκριση με τις οπτικές επικοινωνίες ελευθέρου χώρου, καθώς στις τελευταίες η παρεμβολή είναι ανιχνεύσιμη.

Τέλος, η εγκατάσταση ενός δικτύου οπτικών ινών είναι χρονοβόρα και αρκετά δαπανηρή σε σχέση με τις οπτικές επικοινωνίες ελευθέρου χώρου, καθώς απαιτείται σχετική άδεια από τις πολεοδομικές αρχές για την τοποθέτηση των οπτικών ινών (Chen, Chao, Daoman, & Xian, 2018).

### **3.2 Li-Fi ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΟΡΑΤΟΥ ΦΩΤΟΣ**

Η Li-Fi (lightfidelity) είναι μια τεχνολογία για ασύρματη επικοινωνία μεταξύ συσκευών χρησιμοποιώντας το φως για τη μετάδοση δεδομένων. Στη σημερινή κατάσταση μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο λαμπτήρες LED για τη μετάδοση ορατού φωτός. Ο όρος εισήχθη για πρώτη φορά από τον Harald Haas κατά τη διάρκεια μιας ομιλίας TED Global του 2011 στο Εδιμβούργο. Από τεχνική άποψη, το Li-Fi είναι ένα σύστημα επικοινωνιών ορατού φωτός που είναι ικανό να μεταδίδει δεδομένα σε υψηλές ταχύτητες κατά τη διάρκεια του ορατού φάσματος φωτός, της υπεριώδους και της υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Όσον αφορά την τελική χρήση της, η τεχνολογία είναι παρόμοια με το Wi-Fi. Η βασική τεχνική διαφορά είναι ότι το Wi-Fi χρησιμοποιεί ραδιοσυχνότητα για τη μετάδοση δεδομένων. Η χρήση του φωτός για τη μετάδοση δεδομένων επιτρέπει στα Li-Fi να προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως να εργάζονται σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης, να εργάζονται σε περιοχές ευαίσθητες σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (π.χ. καμπίνες αεροσκαφών, νοσοκομεία) και να προσφέρουν υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης. Η τεχνολογία αναπτύσσεται ενεργά από αρκετούς οργανισμούς ανά τον κόσμο (Sewaiwar, Tiwari, & Chung, 2015).

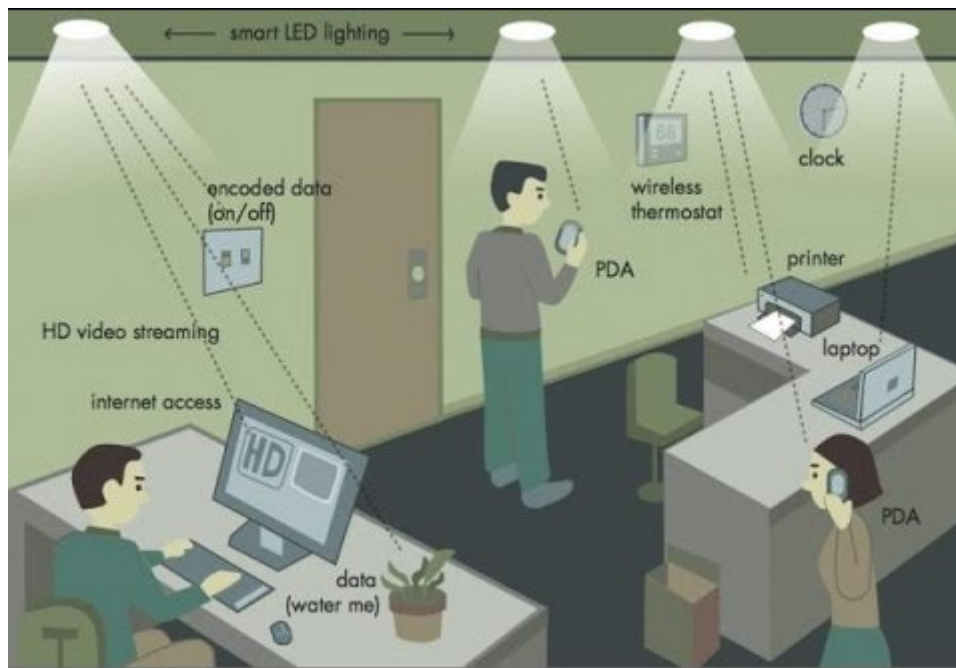
### 3.2.1 Βασική Αρχή Λειτουργίας

Αυτή η τεχνολογία οπτικών ασύρματων επικοινωνιών (Optical wireless communications / OWC) χρησιμοποιεί φως από διόδους εκπομπής φωτός (LED) ως μέσο για την παροχή δικτύωσης, κινητής επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας με παρόμοιο τρόπο με το Wi-Fi. Η αγορά Li-Fi προβλέπεται να έχει σύνθετο ετήσιο ρυθμό αύξησης 82% από το 2013 έως το 2018 και να ανέρχεται σε πάνω από 6 δισεκατομμύρια δολάρια ετησίως έως το 2018. Η επικοινωνία με ορατό φως (Visible light communication / VLC) λειτουργεί με την ενεργοποίηση του ρεύματος στις λυχνίες LED σε πολύ υψηλό ρυθμό, πολύ γρήγορη για να παρατηρηθεί από το ανθρώπινο μάτι. Αν και οι λυχνίες LED Li-Fi θα πρέπει να συνεχίσουν να μεταδίδουν δεδομένα, θα μπορούσαν να εξασθενίσουν κάτω από την ανθρώπινη ορατότητα ενώ εξακολουθούν να εκπέμπουν αρκετό φως για να μεταφέρουν δεδομένα. Τα φωτεινά κύματα δεν μπορούν να διεισδύσουν σε τοίχους, γεγονός που κάνει πολύ μικρότερο το εύρος, αν και πιο ασφαλές από την πειρατεία, σε σχέση με το Wi-Fi. Η άμεση οπτική επαφή δεν είναι απαραίτητη για τη μετάδοση σήματος από τη Li-Fi. Τέλος, το φως που αντανακλάται στους τοίχους μπορεί να φτάσει τα 70 Mbit/s.

Το Li-Fi έχει το πλεονέκτημα ότι είναι χρήσιμο σε ηλεκτρομαγνητικές ευαίσθητες περιοχές όπως σε καμπίνες αεροσκαφών, νοσοκομεία και πυρηνικούς σταθμούς χωρίς να προκαλεί ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Και τα Wi-Fi και Li-Fi μεταδίδουν δεδομένα μέσω του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, αλλά, ενώ το Wi-Fi χρησιμοποιεί ραδιοκύματα, το Li-Fi χρησιμοποιεί ορατό φως, υπεριώδη ακτινοβολία και υπέρυθη ακτινοβολία. Ενώ η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των ΗΠΑ προειδοποίησε για πιθανή κρίση φάσματος επειδή το Wi-Fi είναι κοντά στην πλήρη χωρητικότητα, η Li-Fi δεν έχει σχεδόν κανένα περιορισμό στην ικανότητα. Το ορατό φάσμα φωτός είναι 10.000 φορές μεγαλύτερο

από ό, τι το σύνολο της ραδιοσυχνότητας φάσματος. Οι ερευνητές έχουν φθάσει τα ποσοστά δεδομένων άνω των 224 Gbit/s, τα οποία ήταν πολύ ταχύτερα από την τυπική ταχεία ευρυζωνικότητα το 2013. Το Li-Fi αναμένεται να είναι δέκα φορές φθηνότερο από το Wi-Fi. Ωστόσο, η μικρή απόσταση, η χαμηλή αξιοπιστία και το υψηλό κόστος εγκατάστασης αποτελούν πιθανά μειονεκτήματα.

Η PureLiFi παρουσίασε το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο σύστημα Li-Fi, το Li-1st, στο Παγκόσμιο Συνέδριο Κινητών Τηλεφώνων 2014 στη Βαρκελώνη (Sewaiwar, Tiwari, & Chung, 2015).



**Εικόνα 3.1: παράδειγμα επικοινωνίας με ορατό φως.**

**Πηγή: (Sewaiwar, Tiwari, & Chung, 2015).**

Το Bg-Fi είναι ένα σύστημα Li-Fi που αποτελείται από μια εφαρμογή για μια κινητή συσκευή και ένα απλό καταναλωτικό προϊόν, όπως μια συσκευή IoT (Internet of Things), με αισθητήρα χρώματος, μικροελεγκτή και ενσωματωμένο λογισμικό. Το φως από την οθόνη κινητής συσκευής επικοινωνεί με τον αισθητήρα χρώματος στο καταναλωτικό προϊόν, το οποίο μετατρέπει το φως σε ψηφιακές πληροφορίες. Οι δίοδοι εκπομπής φωτός επιτρέπουν στο καταναλωτικό προϊόν να επικοινωνεί συγχρόνως με την κινητή συσκευή (Shamsudheen, Sureshkumar, & Chunkath, 2016).



### 3.2.2 Τεχνολογικά Πρότυπα τεχνολογίας Li-Fi

Όπως το Wi-Fi, το Li-Fi είναι ασύρματο και χρησιμοποιεί παρόμοια πρωτόκολλα 802.11<sup>9</sup>, αλλά χρησιμοποιεί υπεριώδη, υπέρυθρη και ορατή επικοινωνία (αντί των κυμάτων ραδιοσυχνότητας), που έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης.

Ένα μέρος του VLC διαμορφώνεται μετά από πρωτόκολλα επικοινωνίας που ορίζονται από την ομάδα εργασίας IEEE 802. Ωστόσο, το πρότυπο IEEE 802.15<sup>10</sup> είναι παρωχημένο: δεν λαμβάνει υπόψη τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των οπτικών ασύρματων επικοινωνιών, συγκεκριμένα με την εισαγωγή μεθόδων διαφοροποίησης οπτικής ορθογώνιας πολυπλεξίας, διαίρεσης συχνότητας (O-OFDM) που έχουν βελτιστοποιηθεί για ταχύτητες δεδομένων, πολλαπλή πρόσβαση και ενεργειακή απόδοση. Η εισαγωγή του O-OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing)<sup>11</sup> σημαίνει ότι απαιτείται μια νέα μονάδα για την τυποποίηση των οπτικών ασύρματων επικοινωνιών.

Παρόλα αυτά, το πρότυπο IEEE 802.15 ορίζει το φυσικό επίπεδο (physical layer /PHY) και ελέγχου πρόσβασης πολυμέσων (Medium access control/MAC). Το πρότυπο είναι σε θέση να παρέχει αρκετούς ρυθμούς δεδομένων για τη μετάδοση υπηρεσιών

---

<sup>9</sup>Το IEEE 802.11 είναι ένα σύνολο προδιαγραφών ελέγχου πρόσβασης πολυμέσων (MAC) και φυσικού επιπέδου (PHY) για την υλοποίηση ασύρματης επικοινωνίας μέσω ασύρματου τοπικού δικτύου (WLAN) στις ζώνες συχνοτήτων 900 MHz και 2.4, 3.6, 5 και 60 GHz. Πρόκειται για τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα πρότυπα ασύρματης δικτύωσης υπολογιστών παγκοσμίως, που χρησιμοποιούνται στα περισσότερα δίκτυα οικιακού και γραφείου ώστε να επιτρέπουν στους φορητούς υπολογιστές, τους εκτυπωτές και τα smartphones να μιλούν μεταξύ τους και να έχουν πρόσβαση στο Internet χωρίς να συνδέουν καλώδια.

<sup>10</sup>Το IEEE 802.15 είναι μια ομάδα εργασίας του επιτροπής προτύπων IEEE 802 του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων Ηλεκτρονικών και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE), η οποία καθορίζει τα πρότυπα ασύρματων προσωπικών δικτύων (WPAN). Υπάρχουν 10 βασικοί τομείς ανάπτυξης, όχι όλοι οι οποίοι δραστηριοποιούνται. Ο αριθμός των ομάδων εργασίας στο IEEE 802.15 ποικίλλει ανάλογα με τον αριθμό των ενεργών έργων. Η τρέχουσα λίστα ενεργών έργων βρίσκεται στον ιστότοπο IEEE 802.15.

<sup>11</sup>Στις τηλεπικοινωνίες, η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) είναι μια μέθοδος κωδικοποίησης ψηφιακών δεδομένων σε πολλαπλές συχνότητες φορέα. Το OFDM έχει εξελιχθεί σε ένα δημοφιλές σύστημα ψηφιακής επικοινωνίας ευρείας ζώνης, το οποίο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως ψηφιακή τηλεόραση και ηχητική μετάδοση, DSL πρόσβαση στο διαδίκτυο, ασύρματα δίκτυα, δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και 4G κινητές επικοινωνίες.

ήχου, βίντεο και πολυμέσων. Λαμβάνει υπόψη την κινητικότητα οπτικής μετάδοσης, τη συμβατότητά της με τον τεχνητό φωτισμό που υπάρχει στις υποδομές και τις παρεμβολές που μπορεί να δημιουργηθούν από τον περιβάλλοντα φωτισμό. Το επίπεδο MAC επιτρέπει τη χρήση του συνδέσμου με τα άλλα στρώματα όπως και με το πρωτόκολλο TCP/IP (Shamsudheen, Sureshkumar, & Chunkath, 2016).

Το πρότυπο ορίζει τρία επίπεδα PHY με διαφορετικούς ρυθμούς (Shamsudheen, Sureshkumar, & Chunkath, 2016):

1. Το PHY 1 δημιουργήθηκε για υπαίθριες εφαρμογές και λειτουργεί από 11,67 kbit/s έως 267,6 kbit/s.
2. Το επίπεδο PHY 2 επιτρέπει την επίτευξη ρυθμών δεδομένων από 1,25 Mbit/s σε 96 Mbit/s.
3. Το PHY 3 χρησιμοποιείται για πολλές πηγές εκπομπών με μια συγκεκριμένη μέθοδο διαμόρφωσης που ονομάζεται πλήκτρο μετατόπισης χρώματος (CSK). Το PHY III μπορεί να παρέχει ταχύτητες από 12 Mbit/s έως 96 Mbit/s.

Οι μορφές διαμόρφωσης που αναγνωρίζονται για PHY I και PHY II είναι κλειδώματος On -Off (OOK) και μεταβλητής διαμόρφωσης θέσης παλμών (VPPM). Η κωδικοποίηση Μάντσεστερ που χρησιμοποιείται για τα στρώματα PHY I και PHY II περιλαμβάνει το ρολόι μέσα στα μεταδιδόμενα δεδομένα παριστάνοντας μια λογική 0 με ένα σύμβολο OOK «01» και μια λογική 1 με ένα σύμβολο OOK «10», όλα με ένα στοιχείο DC. Το στοιχείο DC αποφεύγει την εξαφάνιση φωτός σε περίπτωση εκτεταμένης λειτουργίας λογικής 0.

Το πρώτο πρωτότυπο smartphone VLC παρουσιάστηκε στο Consumer Electronics Show στο Λας Βέγκας από τις 7 έως τις 10 Ιανουαρίου 2014. Το τηλέφωνο χρησιμοποιεί το Wysips CONNECT της SunPartner, μια τεχνική που μετατρέπει τα φωτεινά κύματα σε χρησιμοποιήσιμη ενέργεια, καθιστώντας το τηλέφωνο ικανό να λαμβάνει και να αποκωδικοποιεί σήματα χωρίς να αντλεί από την μπαταρία του. Ένα καθαρό λεπτό στρώμα κρυστάλλου μπορεί να προστεθεί σε μικρές οθόνες όπως τα ρολόγια και τα smartphones που τα καθιστούν ηλιακά. Τα Smartphones θα μπορούσαν να κερδίσουν κατά 15% περισσότερη διάρκεια ζωής μπαταρίας κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας. Αυτή η οθόνη μπορεί επίσης να λαμβάνει σήματα VLC καθώς τη φωτογραφική μηχανή. Το κόστος αυτών των οθονών ανά smartphone είναι μεταξύ \$ 2 και \$ 3, πολύ φθηνότερο από ό, τι οι περισσότερες νέες τεχνολογίες.

Η εταιρεία φωτισμού της Philips έχει αναπτύξει ένα σύστημα VLC για αγοραστές στα καταστήματα. Πρέπει να κατεβάσουν μια εφαρμογή στο smartphone τους και έπειτα το smartphone τους λειτουργεί με τις λυχνίες LED. Οι λυχνίες LED μπορούν να εντοπίσουν το σημείο στο οποίο βρίσκονται στο κατάστημα και να τους δώσουν αντίστοιχα κουπόνια και πληροφορίες βάσει του διαδρόμου που βρίσκονται και του τι βλέπουν(Shamsudheen, Sureshkumar, & Chunkath, 2016).

### **3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

#### **3.3.1 Ασφάλεια**

Σε αντίθεση με τα κύματα ραδιοσυχνότητας που χρησιμοποιούνται από το Wi-Fi, το φως δεν μπορεί να διαπεράσει τους τοίχους και τις πόρτες. Αυτό το καθιστά ασφαλέστερο και διευκολύνει τον έλεγχο του ποιος μπορεί να συνδεθεί σε ένα δίκτυο. Εφόσον καλύπτονται διαφανή υλικά όπως τα παράθυρα, η πρόσβαση σε ένα κανάλι Li-Fi περιορίζεται σε συσκευές μέσα στο δωμάτιο(Shamsudheen, Sureshkumar, & Chunkath, 2016).

#### **3.3.2 Υποβρύχιες εφαρμογές**

Τα περισσότερα υποβρύχια οχήματα (remotelyoperatedunderwatervehicle-ROVs) που λειτουργούν από απόσταση χρησιμοποιούν καλώδια για την εκπομπή εντολών, αλλά το μήκος των καλωδίων περιορίζει την περιοχή που μπορούν να ανιχνεύσουν οι ROVs. Ωστόσο, καθώς ένα φως κύμα θα μπορούσε να ταξιδέψει μέσα από το νερό, Li-Fi θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε οχήματα για να λαμβάνει και να στείλει πίσω σήματα.

Ενώ είναι θεωρητικά δυνατό το Li-Fi να χρησιμοποιείται σε υποβρύχιες εφαρμογές, η χρησιμότητά του περιορίζεται από το γεγονός ότι το φως απόστασης μπορεί να διεισδύσει στο νερό. Σημαντικές ποσότητες φωτός δεν διεισδύουν πέραν των 200 μέτρων(Shamsudheen, Sureshkumar, & Chunkath, 2016).

#### **3.3.3 Νοσοκομειακές εφαρμογές**

Για πολλές θεραπείες, το σύστημα Li-Fi θα μπορούσε να είναι ένα καλύτερο σύστημα για τη μετάδοση της επικοινωνίας σχετικά με τις πληροφορίες των ασθενών. Εκτός από την παροχή μεγαλύτερης ταχύτητας, τα φωτεινά κύματα έχουν επίσης μικρή επίδραση

στα ιατρικά όργανα και τα ανθρώπινα σώματα(Shamsudheen, Sureshkumar, & Chunkath, 2016).

### **3.3.4 Εφαρμογές σε οχήματα**

Τα οχήματα θα μπορούσαν να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω εμπρόσθιων και οπίσθιων φώτων για την αύξηση της οδικής ασφάλειας. Επίσης, τα φώτα του δρόμου και τα σήματα κυκλοφορίας θα μπορούσαν επίσης να παρέχουν πληροφορίες για τις τρέχουσες καταστάσεις οδικής κυκλοφορίας(Shamsudheen, Sureshkumar, & Chunkath, 2016).

### **3.3.5 Βιομηχανικοί αυτοματισμοί**

Οπουδήποτε στις βιομηχανικές περιοχές πρέπει να διαβιβάζονται τα δεδομένα, η Li-Fi είναι ικανή να αντικαταστήσει τα δακτυλίδια ολίσθησης, τις ολισθαίνουσες επαφές και τα σύντομα καλώδια, όπως το Industrial Ethernet. Λόγω της ικανότητας του Li-Fi σε πραγματικό χρόνο, που απαιτείται συχνά για διαδικασίες αυτοματοποίησης, αποτελεί επίσης εναλλακτική λύση στα κοινά πρότυπα ασύρματων LAN(Shamsudheen, Sureshkumar, & Chunkath, 2016).

## **3.4 ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ**

Η οπτική επικοινωνία ελεύθερου χώρου (FSO) είναι μια τεχνολογία οπτικών επικοινωνιών που χρησιμοποιεί το φως που διαδίδεται σε ελεύθερο χώρο για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων για τηλεπικοινωνίες ή δικτύωση υπολογιστών. «Ελεύθερος χώρος» σημαίνει αέρας, εξωτερικός χώρος, κενό ή κάτι παρόμοιο. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη χρήση στερεών όπως το καλώδιο οπτικών ινών.

Η τεχνολογία είναι χρήσιμη όταν οι φυσικές συνδέσεις δεν είναι πρακτικές λόγω του υψηλού κόστους ή άλλων παραμέτρων(Capelle, Huguet, Jozefowicz, & Olive, 2018).

### **3.4.1 Χρήση και τεχνολογίες**

Οι οπτικοί σύνδεσμοι από σημείο σε σημείο ελεύθερου χώρου μπορούν να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας υπέρυθρη ακτινοβολία λέιζερ, παρόλο που η χαμηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων σε μικρές αποστάσεις είναι δυνατή με τη χρήση LED. Η τεχνολογία σύνδεσης υπέρυθρων δεδομένων(IrDA) είναι μια πολύ απλή μορφή οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου. Από την πλευρά των επικοινωνιών, η τεχνολογία FSO θεωρείται ως μέρος των εφαρμογών οπτικών ασύρματων επικοινωνιών. Τα οπτικά

συστήματα ελεύθερου χώρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνίες μεταξύ διαστημικών οχημάτων (Capelle, Huguet, Jozefowicz, & Olive, 2018).

### **3.4.1.1 Εμπορικά προϊόντα**

Το 2008, η MRV Communications εισήγαγε ένα σύστημα με βάση το οπτικό σύστημα ελεύθερου χώρου (FSO) με ρυθμό δεδομένων 10 Gbit / s που απαιτούσε αρχικά απόσταση 2 km με υψηλή διαθεσιμότητα. Ο εξοπλισμός αυτός δεν είναι πλέον διαθέσιμος.

Το 2013, η εταιρεία MOSTCOM άρχισε να παράγει σειριακά ένα νέο ασύρματο σύστημα επικοινωνιών που είχε επίσης ρυθμό δεδομένων 10 Gbit / s καθώς και βελτιωμένο φάσμα μέχρι και 2,5 χιλιομέτρων, αλλά για 99,99% uptime τους σχεδιαστές χρησιμοποίησε μια υβριδική λύση RF, που σημαίνει ότι ο ρυθμός δεδομένων πέφτει σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα κατά τη διάρκεια ατμοσφαιρικών διαταραχών (συνήθως κάτω των 10 Mbit / s). Τον Απρίλιο του 2014, η εταιρεία με το Επιστημονικό και Τεχνολογικό Κέντρο «Fiord» απέδειξε την ταχύτητα μετάδοσης 30 Gbit/s σε εργαστηριακές συνθήκες.

Το LightPointe προσφέρει πολλές παρόμοιες υβριδικές λύσεις στην προσφορά της MOSTCOM.

Η Mynaric κατασκευάζει εξοπλισμό επικοινωνίας με λέιζερ για αερομεταφερόμενα και διαστημικά δίκτυα επικοινωνίας, τους λεγόμενους αστερισμούς. Η εταιρεία διαφημίζει αποστάσεις διασύνδεσης έως 4000km μεταξύ δορυφόρων με ταχύτητες δεδομένων 10 Gbit/s (Capelle, Huguet, Jozefowicz, & Olive, 2018).

### **3.4.1.2 Χρήσιμες αποστάσεις**

Η αξιοπιστία των μονάδων FSO ήταν πάντα πρόβλημα για τις εμπορικές τηλεπικοινωνίες. Συνεπώς, μελέτες εντοπίζουν πάρα πολλά σφάλματα σήματος σε μικρές σειρές (400 έως 500 μέτρα). Αυτό προέρχεται τόσο από ανεξάρτητες μελέτες όσο και από επίσημες εσωτερικές εθνικές μελέτες, όπως αυτές που διενεργήθηκαν από το προσωπικό της MRV FSO. Οι στρατιωτικές μελέτες βασίζονται σε συνεχείς εκτιμήσεις για την αξιοπιστία, προβλέποντας τη μέγιστη εμβέλεια για τους επόμενους συνδέσμους της τάξης των 2 έως 3 χιλιομέτρων (1,2 έως 3,1km). Όλες οι μελέτες συμφωνούν ότι η σταθερότητα και η ποιότητα της σύνδεσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από ατμοσφαιρικούς παράγοντες όπως βροχή, ομίχλη, σκόνη και θερμότητα.

Ο κύριος λόγος επίγειας επικοινωνίας περιορίστηκε στις μη εμπορικές λειτουργίες τηλεπικοινωνιών είναι ομίχλη. Η ομίχλη διατηρεί σταθερά τις συνδέσεις λέιζερ FSO σε απόσταση μεγαλύτερη των 500 μέτρων από την επίτευξη ενός ποσοστού σφάλματος bit ανά έτος 1 ανά 100.000. Αρκετές οντότητες προσπαθούν συνεχώς να ξεπεράσουν αυτά τα βασικά μειονεκτήματα στις επικοινωνίες της FSO και να βρουν ένα σύστημα με καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Η DARPA έχει χορηγήσει πάνω από 130 εκατομμύρια δολάρια στην έρευνα για την προσπάθεια αυτή, με τα προγράμματα ORCA και ORCLE.

Άλλες μη κυβερνητικές ομάδες διεξάγουν δοκιμές για την αξιολόγηση διαφορετικών τεχνολογιών που κάποιοι ισχυρίζονται ότι έχουν τη δυνατότητα να αντιμετωπίσουν τις βασικές προκλήσεις υιοθέτησης του FSO. Από τον Οκτώβριο του 2014, κανένας δεν έχει δημιουργήσει ένα λειτουργικό σύστημα που να καλύπτει τα πιο κοινά ατμοσφαιρικά γεγονότα.

Η έρευνα της FSO για την περίοδο 1998-2006 στον ιδιωτικό τομέα ανήλθε σε 407,1 εκατομμύρια δολάρια, κατανομημένα πρωτίστως σε τέσσερις νεοσύστατες επιχειρήσεις. Και οι τέσσερις δεν κατάφεραν να παραδώσουν προϊόντα που θα πληρούσαν τα πρότυπα ποιότητας και αποστάσεως των τηλεπικοινωνιών (Capelle, Huguet, Jozefowicz, & Olive, 2018):

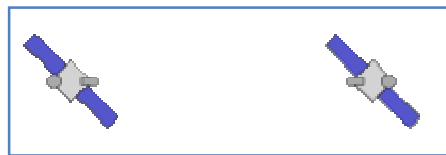
1. Η Terabeam έλαβε περίπου 575 εκατομμύρια δολάρια σε χρηματοδότηση από επενδυτές όπως οι Softbank, Mobius Venture Capital και Oakhill Venture Partners. Η AT & T και ο Lucent υποστήριξαν αυτήν την απόπειρα. Το έργο απέτυχε τελικά, και η εταιρεία αγοράστηκε το 2004 για 52 εκατομμύρια \$ και χρησιμοποίησε το όνομα Terabeam για τη νέα οντότητα. Στις 4 Σεπτεμβρίου 2007, η Terabeam (που εδρεύει στο Σαν Χοσέ της Καλιφόρνιας) ανακοίνωσε ότι θα αλλάξει το όνομα σε Proxim Wireless Corporation και θα αλλάξει το σύμβολο μετοχών NASDAQ από το TRBM στο PRXM.
2. Η AirFiber έλαβε χρηματοδότηση ύψους 96,1 εκατομμυρίων δολαρίων και ποτέ δεν έλυσε το ζήτημα του καιρού. Πώλησαν τις επικοινωνίες MRV το 2003 και η MRV πούλησε τις μονάδες FSO μέχρι το 2012, όταν αναγγέλθηκε απότομα το τέλος της για τη σειρά Telescope.
3. Η LightPointe Communications έλαβε 76 εκατομμύρια δολάρια σε κεφάλαια εκκίνησης και τελικά αναδιοργανώθηκε για να πουλήσει υβριδικές μονάδες FSO-RF για να ξεπεράσει τις προκλήσεις που βασίζονται στον καιρό.

4. Η MaximaCorporation δημοσίευσε τη θεωρία λειτουργίας της στην επιστήμη και έλαβε 9.000.000 \$ στη χρηματοδότηση πριν από μόνιμο τερματισμό. Καμία γνωστή απόσπαση ή αγορά δεν ακολούθησε αυτή την προσπάθεια.
5. Η WirelessExcellence ανέπτυξε και ξεκίνησε λύσεις CableFree UNITY που συνδυάζουν την τεχνολογία FSO με χιλιοστά κύματα και τεχνολογίες ραδιοφώνου για την επέκταση της απόστασης, της χωρητικότητας και της διαθεσιμότητας, με στόχο να καταστεί η FSO μια πιο χρήσιμη και πρακτική τεχνολογία.

Μια ιδιωτική εταιρεία δημοσίευσε ένα έγγραφο στις 20 Νοεμβρίου 2014, υποστηρίζοντας ότι είχε επιτύχει εμπορική αξιοπιστία (99,999% διαθεσιμότητα) σε ακραίες ομίχλες. Δεν υπάρχει καμία ένδειξη ότι αυτό το προϊόν είναι επί του παρόντος εμπορικά διαθέσιμο.

### 3.4.1.3 Διαστημική Τεχνολογία

Τα τεράστια πλεονεκτήματα της επικοινωνίας λέιζερ στο διάστημα έχουν πολλούς διαστημικούς οργανισμούς που αγωνίζονται να αναπτύξουν μια σταθερή πλατφόρμα επικοινωνίας διαστήματος, με πολλές σημαντικές επιδείξεις και επιτεύγματα (Chen, Chao, Daoman, & Xian, 2018).



Εικόνα 3.2: Δύο ηλιακοί δορυφόροι που επικοινωνούν οπτικά στο διάστημα μέσω λέιζερ.

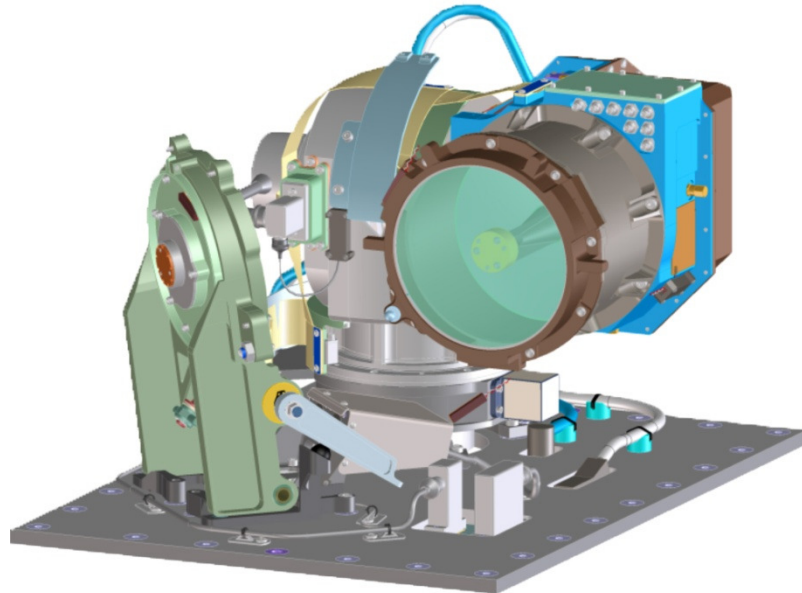
Πηγή: (Chen, Chao, Daoman, & Xian, 2018).

Η πρώτη επικοινωνία με λέιζερ gigabit επιτεύχθηκε από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος και ονομάστηκε το Ευρωπαϊκό Σύστημα Αναμετάδοσης Δεδομένων (EDRS) στις 28 Νοεμβρίου 2014. Το σύστημα λειτουργεί και χρησιμοποιείται καθημερινά.

Τα OPALS της NASA ανακοίνωσαν μια σημαντική ανακάλυψη στην επικοινωνία χώρου-εδάφους στις 9 Δεκεμβρίου 2014, ανεβάζοντας 175 megabytes σε 3,5 δευτερόλεπτα. Το σύστημά τους είναι επίσης σε θέση να επανακτήσει την παρακολούθηση μετά την απώλεια του σήματος λόγω της κάλυψης σύννεφου.

Τον Ιανουάριο του 2013, η NASA χρησιμοποίησε λέιζερ για να προβάλει μια εικόνα της MonaLisa στο LunarReconnaissanceOrbiter περίπου 390.000 χλμ (240.000 μίλια)

μακριά. Για να αντισταθμιστεί η ατμοσφαιρική παρεμβολή, εφαρμόστηκε ένας αλγόριθμος, κώδικας διόρθωσης σφαλμάτων παρόμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται στα CD(Chen, Chao, Daoman, & Xian, 2018).



**Εικόνα 3.3:** Απεικόνιση της οπτικής μονάδας επικοινωνίας LADEE LunareLaser (LLCD).

**Πηγή:** (Chen, Chao, Daoman, & Xian, 2018).

Μια εγγραφή διπλής κατεύθυνσης για επικοινωνία καθορίστηκε από το όργανο υψόμετρου λέιζερ Mercury πάνω στο διαστημικό σκάφος MESSENGER και μπόρεσε να επικοινωνήσει σε απόσταση 24 εκατομμυρίων χιλιομέτρων (15 εκατομμύρια μίλια), καθώς το σκάφος προσέγγισε τη Γη σε μια πτήση τον Μάιο 2005. Το προηγούμενο αρχείο καταγράφηκε με μια μονόδρομη ανίχνευση του φωτός λέιζερ από τη Γη, από τον ανιχνευτή Galileo, των 6 εκατομμυρίων χιλιομέτρων το 1992.

Διάφοροι προγραμματισμένοι δορυφορικοί αστερισμοί, όπως το Starlink του SpaceX που αποσκοπούν στην παροχή παγκόσμιας ευρυζωνικής κάλυψης, χρησιμοποιούν επικοινωνία λέιζερ για διασυνδεδετικές δορυφορικές συνδέσεις μεταξύ των εκατοντάδων χιλιάδων δορυφόρων που δημιουργούν αποτελεσματικά ένα οπτικό δίκτυο οπτικών ματιών με βάση το διάστημα(Chen, Chao, Daoman, & Xian, 2018).

### **3.4.2 LEDs**

Το 2001, η TwibrightLabs κυκλοφόρησε τη RonjaMetropolis, μια ανοιχτού κώδικα DIY 10 Mbit/s πλήρως αμφίδρομη LED FSO σε απόσταση 1.4 χλμ. Το 2004 δημιουργήθηκε μια Ιαπωνική Κοινοπραξία Ορατού Φωτισμού. Αυτό βασίστηκε στη δουλειά ερευνητών που



χρησιμοποίησαν ένα σύστημα φωτισμού χώρου με βάση το λευκό LED για επικοινωνίες εσωτερικού τοπικού δικτύου (LAN). Αυτά τα συστήματα παρουσιάζουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά UHF RF-based συστήματα από τη βελτιωμένη απομόνωση μεταξύ των συστημάτων, το μέγεθος και το κόστος των δεκτών / πομπών, τους νόμους περί αδειών RF και συνδυάζοντας τον φωτισμό χώρου και την επικοινωνία στο ίδιο σύστημα. Τον Ιανουάριο του 2009, μια ομάδα εργασίας για επικοινωνία ορατού φωτός δημιουργήθηκε από την ομάδα εργασίας του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών για πρότυπα ασύρματων προσωπικών δικτύων γνωστών ως IEEE.

Οι ραδιοερασιτέχνες έχουν επιτύχει σημαντικά μεγαλύτερες αποστάσεις χρησιμοποιώντας ασύγκριτες πηγές φωτός από LED υψηλής έντασης. Ωστόσο, οι φυσικοί περιορισμοί του εξοπλισμού χρησιμοποίησαν περιορισμένα εύρη ζώνης σε περίπου 4 kHz. Οι υψηλές ευαισθησίες που απαιτούνται από τον ανιχνευτή για την κάλυψη τέτοιων αποστάσεων καθιστούν την εσωτερική χωρητικότητα της φωτοδιόδου έναν κυρίαρχο παράγοντα στον ενισχυτή υψηλής σύνθετης αντίστασης που ακολούθησε, σχηματίζοντας φυσικά ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης με συχνότητα αποκοπής στα 4 kHz εύρος. Η χρήση λέιζερ μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλά ποσοστά δεδομένων τα οποία είναι συγκρίσιμα με τις επικοινωνίες με ίνες.

Οι αναμενόμενοι ρυθμοί δεδομένων και οι μελλοντικές αξιώσεις ρυθμού δεδομένων ποικίλλουν. Μια χαμηλού κόστους λευκή λυχνία LED (GaN-phosphor) η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για φωτισμό χώρου μπορεί τυπικά να ρυθμιστεί μέχρι τα 20 MHz. Τα ποσοστά δεδομένων άνω των 100 Mbit/s μπορούν εύκολα να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας αποτελεσματικά συστήματα διαφοροποίησης. Η έρευνα που δημοσιεύτηκε το 2009, χρησιμοποίησε ένα παρόμοιο σύστημα ελέγχου κυκλοφορίας αυτοματοποιημένων οχήματα με φώτα πορείας LED.

Τον Σεπτέμβριο του 2013, η καθαρή LiFi, που ξεκίνησε το Εδιμβούργο με Li-Fi, παρουσίασε επίσης υψηλής ταχύτητας συνδεσιμότητα από σημείο σε σημείο με τη χρήση οποιασδήποτε λυχνίας LED. Σε προηγούμενες εργασίες, χρησιμοποιούνται LEDs ειδικού εύρους ζώνης υψηλής ευκρίνειας για την επίτευξη των υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων. Το νέο σύστημα, το Li-1st, μεγιστοποιεί το διαθέσιμο οπτικό εύρος ζώνης για οποιαδήποτε συσκευή LED, μειώνοντας έτσι το κόστος και βελτιώνοντας την απόδοση των εσωτερικών συστημάτων FSO (Capelle, Huguet, Jozefowicz, & Olive, 2018).

### 3.4.2.1 Μηχανικές λεπτομέρειες

Συνήθως, τα καλύτερα σενάρια χρήσης αυτής της τεχνολογίας είναι (Capelle, Huguet, Jozefowicz, & Olive, 2018):

- Συνδέσεις LAN-LAN σε πανεπιστημιούπολεις σε ταχύτητες FastEthernet ή GigabitEthernet.
- Συνδέσεις LAN-to-LAN σε μια πόλη, δίκτυο μητροπολιτικής περιοχής.
- Για να διασχίσετε έναν δημόσιο δρόμο ή άλλα εμπόδια που ο αποστολέας και ο παραλήπτης δεν κατέχουν.
- Ταχεία παροχή υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας πρόσβασης σε δίκτυα οπτικών ινών.
- Συγκεντρωμένη σύνδεση φωνής-δεδομένων.
- Προσωρινή εγκατάσταση δικτύου (για συμβάντα ή άλλους σκοπούς).
- Επαναφορά γρήγορης σύνδεσης υψηλής ταχύτητας (αποκατάσταση καταστροφών).
- Ως εναλλακτική λύση ή αναβάθμιση του πρόσθετου στις υπάρχουσες ασύρματες τεχνολογίες.
- Ως πρόσθετο ασφαλείας για σημαντικές συνδέσεις με ίνες (πλεονασμός).
- Για επικοινωνίες μεταξύ διαστημικών οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων στοιχείων δορυφορικού αστερισμού.
- Για επικοινωνία εντός και εντός τσιπ.

Η δέσμη φωτός μπορεί να είναι πολύ στενή, γεγονός που καθιστά δύσκολο το FSO να παρεμποδίζει, βελτιώνοντας την ασφάλεια. Σε κάθε περίπτωση, είναι συγκριτικά εύκολο να κρυπτογραφηθούν οποιαδήποτε δεδομένα που ταξιδεύουν μέσω της σύνδεσης FSO για πρόσθετη ασφάλεια. Το FSO παρέχει εξαιρετικά βελτιωμένη συμπεριφορά ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) σε σύγκριση με τη χρήση μικροκυμάτων.

### 3.4.2.2 Τεχνικά πλεονεκτήματα

Τα τεχνικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας LED FSO είναι (Capelle, Huguet, Jozefowicz, & Olive, 2018):

- ✓ Ευκολία ανάπτυξης
- ✓ Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία συσκευών
- ✓ Λειτουργία ελεύθερης άδειας μεγάλης εμβέλειας (σε αντίθεση με την ραδιοεπικοινωνία)

- ✓ Υψηλή ταχύτητες bit
- ✓ Χαμηλότεροι ρυθμοί σφάλματος bit
- ✓ Ανοχή στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές
- ✓ Λειτουργία πλήρους αμφίδρομης λειτουργίας
- ✓ Διαφάνεια πρωτοκόλλου
- ✓ Αυξημένη ασφάλεια κατά την εργασία με στενές δέσμες
- ✓ Δεν απαιτείται ζώνη Fresnel
- ✓ Αναφορά εφαρμογής ανοιχτού κώδικα

### 3.4.2.3 Περιοριστικοί παράγοντες εύρους

Οι περιοριστικοί παράγοντες εύρους της τεχνολογίας LED FSO είναι (Capelle, Huguet, Jozefowicz, & Olive, 2018):

- ✓ Για τις επίγειες εφαρμογές, οι κύριοι περιοριστικοί παράγοντες είναι:
- ✓ Ομίχλη (από 10 έως 100 dB / km εξασθένηση)
- ✓ Διασπορά δέσμης
- ✓ Ατμοσφαιρική απορροφητικότητα
- ✓ Βροχή
- ✓ Χιόνι
- ✓ Γήινο σπινθηρισμό
- ✓ Παρεμβολή από πηγές φωτός φόντου (συμπεριλαμβανομένου του ήλιου)
- ✓ Σκίαση
- ✓ Σταθερότητα δείκτη στον άνεμο
- ✓ Ρύπανση / νέφος

Αυτοί οι παράγοντες προκαλούν ένα εξασθενημένο σήμα δέκτη και οδηγούν σε υψηλότερο λόγο σφάλματος δυαδικών ψηφίων (BER). Για να ξεπεραστούν αυτά τα ζητήματα, οι πωλητές βρήκαν κάποιες λύσεις, όπως αρχιτεκτονικές πολλαπλών ή πολλαπλών διαδρομών, οι οποίες χρησιμοποιούν περισσότερους από έναν αποστολέα και περισσότερους από έναν δέκτες. Ορισμένες συσκευές τελευταίας τεχνολογίας έχουν επίσης μεγαλύτερο περιθώριο εξασθένησης (επιπλέον ισχύ, που προορίζεται για βροχή, νέφος, ομίχλη). Για να διατηρηθεί ένα περιβάλλον ασφαλές για τα μάτια, τα καλά συστήματα FSO έχουν περιορισμένη πυκνότητα ισχύος λέιζερ και υποστηρίζουν τάξεις λέιζερ 1 ή 1M. Η ατμοσφαιρική και η εξασθένηση της ομίχλης, που έχουν εκθετική φύση, περιορίζουν την

πρακτική εμβέλεια των συσκευών FSO σε αρκετά χιλιόμετρα. Ωστόσο, η οπτική του ελεύθερου χώρου, με βάση το μήκος κύματος 1550 nm, έχει σημαντικά χαμηλότερη οπτική απώλεια από την οπτική του ελεύθερου χώρου, χρησιμοποιώντας μήκος κύματος 830 nm, σε συνθήκες πυκνής ομίχλης. Το FSO χρησιμοποιώντας σύστημα μήκος κύματος 1550 nm είναι ικανό να μεταδίδει αρκετές φορές μεγαλύτερη ισχύ από τα συστήματα με 850 nm και είναι ταυτόχρονα ασφαλές για το ανθρώπινο μάτι (κατηγορία 1M). Επιπλέον, ορισμένα οπτικά συστήματα ελεύθερου χώρου, όπως το EC SYSTEM, εξασφαλίζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία σύνδεσης σε κακές καιρικές συνθήκες παρακολουθώντας συνεχώς την ποιότητα της ζεύξης για να ρυθμίσουν την ισχύ μετάδοσης λέιζερ με ενσωματωμένο αυτόματο έλεγχο κέρδους.

## **4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: «Η ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΕΣΩ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ»**

### **4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

Η οπτική επικοινωνία μέσω οπτικών ινών είναι μια μέθοδος μετάδοσης πληροφοριών από ένα μέρος σε άλλο με την αποστολή παλμών φωτός μέσω μιας οπτικής ίνας. Το φως σχηματίζει ένα ηλεκτρομαγνητικό φέρον κύμα που διαμορφώνεται για να μεταφέρει πληροφορίες. Προτιμάται η χρήση ινών σε σχέση με την ηλεκτρική καλωδίωση όταν απαιτείται υψηλό εύρος ζώνης, μεγάλη απόσταση ή απαλλαγή από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται από πολλές εταιρείες τηλεπικοινωνιών για τη μετάδοση τηλεφωνικών σημάτων, επικοινωνιών μέσω Διαδικτύου και σημάτων καλωδιακής τηλεόρασης. Οι ερευνητές στο BellLabs έχουν φτάσει ταχύτητες Internet άνω των 100 petabit x χιλιόμετρα ανά δευτερόλεπτο χρησιμοποιώντας οπτική επικοινωνία (Zhang & Dai, 2016).

### **4.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

Στη δεκαετία του 1970, οι οπτικές ίνες έφεραν επανάσταση στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση της εποχής της πληροφορίας. Λόγω των πλεονεκτημάτων της έναντι της ηλεκτρικής μετάδοσης, οι οπτικές ίνες έχουν αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τις επικοινωνίες χάλκινων καλωδίων σε δίκτυα πυρήνα στον ανεπτυγμένο κόσμο.

Η διαδικασία επικοινωνίας με οπτικές ίνες περιλαμβάνει τα ακόλουθα βασικά βήματα (Zhang & Dai, 2016):

1. Δημιουργία του οπτικού σήματος που περιλαμβάνει τη χρήση ενός πομπού, συνήθως από ένα ηλεκτρικό σήμα.
2. Αναμεταδίδοντας το σήμα κατά μήκος της ίνας, διασφαλίζοντας ότι το σήμα δεν γίνεται πολύ παραμορφωμένο ή αδύναμο.
3. Λήψη του οπτικού σήματος.
4. Μετατροπή σε ηλεκτρικό σήμα.

### **4.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΜΕΣΩ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ**

Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται από πολλές εταιρείες τηλεπικοινωνιών για τη μετάδοση τηλεφωνικών σημάτων, επικοινωνιών μέσω Internet και σημάτων καλωδιακής τηλεόρασης. Λόγω της πολύ μικρότερης εξασθένησης και παρεμβολής, η οπτική ίνα έχει μεγάλα πλεονεκτήματα έναντι του υπάρχοντος καλωδίου χαλκού σε εφαρμογές μεγάλης απόστασης, υψηλής ζήτησης. Ωστόσο, η ανάπτυξη υποδομών εντός των πόλεων ήταν σχετικά δύσκολη και χρονοβόρα, ενώ τα συστήματα οπτικών ινών ήταν πολύπλοκα και δαπανηρά εγκατεστημένα και λειτουργικά. Λόγω αυτών των δυσκολιών, τα συστήματα επικοινωνίας οπτικών ινών εγκαταστάθηκαν κυρίως σε εφαρμογές μεγάλων αποστάσεων, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πλήρη μεταφορική τους ικανότητα, αντισταθμίζοντας το αυξημένο κόστος. Οι τιμές των οπτικών ινών έχουν μειωθεί σημαντικά από το 2000.

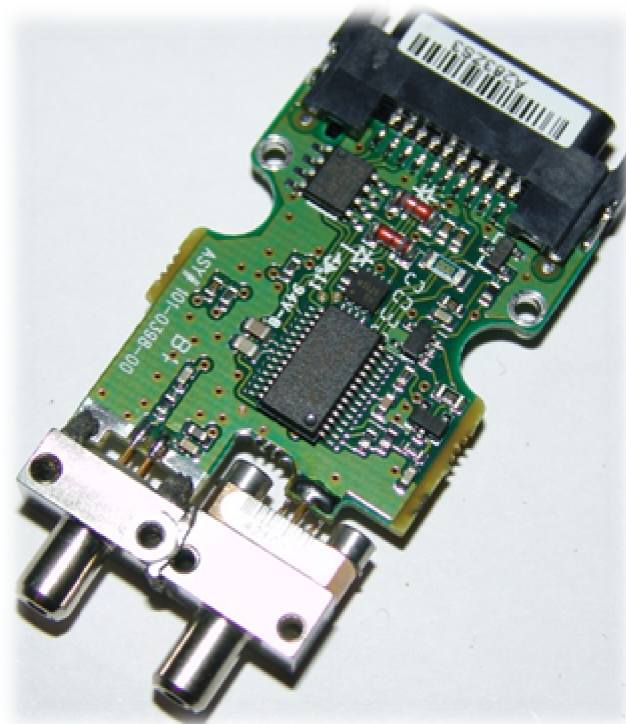
Από το 1990, όταν τα οπτικά συστήματα ενίσχυσης διατέθηκαν στο εμπόριο, ο κλάδος των τηλεπικοινωνιών έθεσε ένα τεράστιο δίκτυο γραμμών επικοινωνίας υπεραστικών και υπερυψωμένων ινών. Μέχρι το 2002, ολοκληρώθηκε ένα διηπειρωτικό δίκτυο 250.000 χιλιομέτρων καλωδίων υποθαλάσσιων επικοινωνιών με χωρητικότητα 2.56 Tb/s και παρόλο που οι ειδικές δυνατότητες δικτύου είναι προνομακές πληροφορίες, οι εκθέσεις επενδύσεων τηλεπικοινωνιών δείχνουν ότι η χωρητικότητα του δικτύου έχει αυξηθεί δραματικά από το 2004(Zhang & Dai, 2016).

### **4.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ**

Τα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας με οπτικές ίνες περιλαμβάνουν γενικά έναν οπτικό πομπό για τη μετατροπή ενός ηλεκτρικού σήματος σε ένα οπτικό σήμα για αποστολή μέσω της οπτικής ίνας, ενός καλωδίου που περιέχει δέσμες πολλαπλών οπτικών ινών που κατευθύνεται μέσω υπόγειων αγωγών και κτιρίων, πολλαπλών τύπων ενισχυτών και ένα οπτικό δέκτη για την ανάκτηση του σήματος ως ηλεκτρικό σήμα. Οι πληροφορίες που μεταδίδονται είναι συνήθως ψηφιακές πληροφορίες που παράγονται από υπολογιστές, τηλεφωνικά συστήματα και εταιρείες καλωδιακής τηλεόρασης(Zhang & Dai, 2016).

#### 4.4.1 Μεταδότες

Οι πιο συνηθισμένοι οπτικοί πομποί / μεταδότες είναι οι συσκευές ημιαγωγών όπως οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED) και οι δίοδοι λέιζερ. Η διαφορά μεταξύ των LED και των δίοδων λέιζερ είναι ότι τα LEDs παράγουν ασυνάρτητο φως, ενώ οι δίοδοι λέιζερ παράγουν συνεκτικό φως. Για χρήση σε οπτικές επικοινωνίες, οι οπτικοί πομποί ημιαγωγών πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να είναι συμπαγείς, αποτελεσματικοί και αξιόπιστοι, ενώ λειτουργούν σε ένα βέλτιστο εύρος μήκους κύματος και διαμορφώνονται απευθείας σε υψηλές συχνότητες (Zhang & Dai, 2016).



**Εικόνα 4.1:** Ένα δομοστοιχείο GigaBit Interface Converter (GBIC).

Είναι ένας οπτικός και ηλεκτρικός πομποδέκτης. Ο ηλεκτρικός σύνδεσμος βρίσκεται στο πάνω δεξιό μέρος και οι οπτικοί σύνδεσμοι βρίσκονται στο κάτω αριστερό μέρος.

Πηγή: (Zhang & Dai, 2016).

Στην απλούστερη μορφή του, ένα LED είναι μια επαφή, που εκπέμπει φως μέσω αυθόρμητης εκπομπής, ένα φαινόμενο που αναφέρεται ως ηλεκτροφωταύγεια. Το εκπεμπόμενο φως δεν είναι συνεκτικό με ένα σχετικά ευρύ φασματικό πλάτος 30-60 nm. Τα LEDs εκπομπής φωτός είναι επίσης αναποτελεσματικά, με μόνο περίπου 1% της ισχύος εισόδου, ή περίπου 100 microwatts, που τελικά μετατρέπεται σε δύναμη η οποία έχει

συζευχθεί στην οπτική ίνα. Ωστόσο, λόγω του σχετικά απλού σχεδιασμού τους, τα LED είναι πολύ χρήσιμα για εφαρμογές χαμηλού κόστους.

Οι επικοινωνίες LED συνήθως κατασκευάζονται από φωσφίδιοαρσενιδίου του ινδίου γαλλίου (InGaAsP) ή αρσενικό γάλλιο (GaAs). Τα LED InGaAsP λειτουργούν σε μεγαλύτερο μήκος κύματος από τα LED GaAs (1,3 μικρομέτρα έναντι 0,81-0,87 μικρομέτρων). Οι λυχνίες LED είναι κατάλληλες κυρίως για εφαρμογές τοπικού δικτύου με ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων 10-100 Mbit/s και αποστάσεις μετάδοσης λίγων χιλιομέτρων. Έχουν επίσης αναπτυχθεί LED που χρησιμοποιούν διάφορα «κβαντικά πηγάδια» για να εκπέμπουν φως σε διαφορετικά μήκη κύματος σε ένα ευρύ φάσμα και χρησιμοποιούνται προς το παρόν για δίκτυα WDM τοπικής εμβέλειας (Wavelength-Division Multiplexing).

Σήμερα, τα LED έχουν αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από συσκευές VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser), οι οποίες προσφέρουν βελτιωμένες ταχύτητες, ισχύ και φασματικές ιδιότητες, με χαμηλό κόστος. Οι συνηθισμένες συσκευές VCSEL συνδέονται δίχως προβλήματα με οπτικές ίνες.

Ένα λέιζερ ημιαγωγών εκπέμπει φως μέσω διεγερμένων εκπομπών και όχι αυθόρμητης εκπομπής, με αποτέλεσμα υψηλή ισχύ εξόδου (~100 mW) καθώς και άλλα οφέλη που σχετίζονται με τη φύση του συνεκτικού φωτός. Η έξοδος ενός λέιζερ είναι σχετικά κατευθυντική, επιτρέποντας υψηλή απόδοση σύζευξης (~50%) σε μονότροπες ίνες. Το στενό φασματικό πλάτος επιτρέπει επίσης υψηλούς ρυθμούς δυαδικών ψηφίων, καθώς μειώνει την επίδραση της χρωματικής διασποράς. Επιπλέον, τα λέιζερ ημιαγωγών μπορούν να ρυθμιστούν απευθείας σε υψηλές συχνότητες λόγω του μικρού χρόνου ανασυνδυασμού.

Οι κοινώς χρησιμοποιούμενες κλάσεις πομποί λέιζερ ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται σε οπτικές ίνες περιλαμβάνουν VCSEL (Laser Κατακόρυφης Κυματοειδούς Εκπομπής), Fabry-Pérot και DFB (Distributed Feed Back).

Οι δίοδοι λέιζερ είναι συχνά απευθείας διαμορφωμένες, δηλαδή η έξοδος φωτός ελέγχεται από ένα ρεύμα που εφαρμόζεται απευθείας στη συσκευή. Για πολύ υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων ή συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων, μια πηγή λέιζερ μπορεί να λειτουργεί συνεχόμενο κύμα και το φως διαμορφώνεται από μια εξωτερική συσκευή, έναν οπτικό διαμορφωτή, όπως ένας διαμορφωτής ηλεκτρικής απορρόφησης ή συμβολόμετρο Mach-Zehnder. Η εξωτερική διαμόρφωση αυξάνει την



επιτευχθείσα απόσταση σύνδεσης εξαλείφοντας το «σκίτσο» λέιζερ, το οποίο διευρύνει το εύρος γραμμήςτων άμεσα διαμορφωμένων λέιζερ, αυξάνοντας τη χρωματική διασπορά των οπτικών ινών. Για αποτελεσματικότητα πολύ υψηλού εύρους ζώνης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνεπής διαμόρφωση για τη μεταβολή της φάσης του φωτός εκτός από το εύρος, επιτρέποντας τη χρήση των QPSK, QAM και OFDM(Zhang & Dai, 2016).

#### 4.4.2 Δέκτες

Το κύριο συστατικό ενός οπτικού δέκτη είναι ένας φωτοανιχνευτής που μετατρέπει το φως σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Οι κύριοι φωτοανιχνευτές για τις τηλεπικοινωνίες κατασκευάζονται από αρσενικό ινδίου. Ο φωτοανιχνευτής είναι συνήθως φωτοδίοδος με βάση ημιαγωγούς. Διάφοροι τύποι φωτοδίοδων περιλαμβάνουν φωτοδίοδοι, φωτοδίοδους πινάκων και φωτοδίοδους χιονοστιβάδας. Οι φωτοανιχνευτές μεταλλικών ημιαγωγών(MSM) χρησιμοποιούνται επίσης λόγω της καταλληλότητάς τους για ενσωμάτωση κυκλωμάτων σε αναγεννητές και πολυπλέκτες διαίρεσης μήκους κύματος.

Οι οπτικοί-ηλεκτρικοί μετατροπείς συνδέονται τυπικά με έναν ενισχυτή transimpedance και έναν περιοριστικό ενισχυτή για την παραγωγή ενός ψηφιακού σήματος στον ηλεκτρικό τομέα από το εισερχόμενο οπτικό σήμα, το οποίο μπορεί να εξασθενεί και να παραμορφώνεται κατά τη διέλευση από το κανάλι. Περαιτέρω επεξεργασία σήματος όπως ανάκτηση ρολογιού από δεδομένα (CDR) που εκτελείται από βρόγχο κλειδώματος φάσης μπορεί επίσης να εφαρμοστεί πριν από τη μετάδοση των δεδομένων.

Οι συνεπείς δέκτες χρησιμοποιούν ένα τοπικό λέιζερ ταλαντωτή σε συνδυασμό με ένα ζεύγος υβριδικών συζευκτών και τέσσερις φωτοανιχνευτές ανά πόλωση, ακολουθούμενο από ADC υψηλής ταχύτητας και επεξεργασία ψηφιακού σήματος για την ανάκτηση δεδομένων διαμορφωμένων με QPSK, QAM ή OFDM(Zhang & Dai, 2016).

#### 4.4.3 Ψηφιακή προδιάταξη

Ένας πομπός συστήματος οπτικών επικοινωνιών αποτελείται από μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό(DAC), ενισχυτή οδηγού και διαμορφωτή Mach-Zehnder . Η ανάπτυξη μορφών υψηλότερης διαμόρφωσης (> 4 QAM ) ή υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης (> 32 GBaud) μειώνει την απόδοση του συστήματος λόγω γραμμικών και μη γραμμικών αποτελεσμάτων του πομπού. Αυτές οι επιδράσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε γραμμικές παραμορφώσεις λόγω DAC περιορισμό του εύρους ζώνης και του πομπού I /

Q, καθώς και μη-γραμμικές επιδράσεις που προκαλούνται από τον κορεσμό στον ενισχυτή οδηγού και του διαμορφωτή Mach-Zehnder. Η Ψηφιακή προδιάταξη αντισταθμίζει τα επιζήμια αποτελέσματα και επιτρέπει ταχύτητες Baud έως και 56 μορφές GBaud και διαμόρφωσης όπως 64 QAM και 128 QAM με τα εμπορικά διαθέσιμα στοιχεία. Ο επεξεργαστής ψηφιακού σήματος του πομπού εκτελεί ψηφιακό πρόδρομο στα σήματα εισόδου χρησιμοποιώντας το μοντέλο αντίστροφου πομπού πριν φορτώσει τα δείγματα στο DAC.

Οι παλαιότερες μέθοδοι ψηφιακής προδιάθεσης αφορούσαν μόνο τα γραμμικά εφέ. Οι πρόσφατες δημοσιεύσεις αντιστάθμισαν επίσης τις μη γραμμικές στρεβλώσεις. Οι Berengueretal. μοντελοποιούν τον διαμορφωτή Mach-Zehnder ως ανεξάρτητο σύστημα Wiener και ο DAC και ο ενισχυτής οδηγού μοντελοποιούνται από μια κολοβωμένη, χρονικά αμετάβλητη σειρά Volterra. Οι Khannaetal χρησιμοποίησαν ένα πολώνυμο μνήμης για να μοντελοποιήσουν από κοινού τα στοιχεία του πομπού. Και στις δύο προσεγγίσεις η σειρά Volterra ή οι συντελεστές πολωνυμικής μνήμης εντοπίζονται χρησιμοποιώντας αρχιτεκτονική έμμεσης μάθησης (Zhang & Dai, 2016).

#### **4.4.4 Τύποι καλωδίων ινών**

Ένα καλώδιο οπτικών ινών αποτελείται από έναν πυρήνα, μια επένδυση και ένα buffer (μια προστατευτική εξωτερική επικάλυψη), στην οποία το περίβλημα κατευθύνει το φως κατά μήκος του πυρήνα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Ο πυρήνας και η επένδυση (που έχει δείκτη χαμηλότερης διαθλάσεως) κατασκευάζονται συνήθως από γυαλί πυριτίου υψηλής ποιότητας, παρόλο που και οι δύο μπορούν να είναι κατασκευασμένα από πλαστικό. Η σύνδεση δύο οπτικών ινών γίνεται με συγκόλληση σύντηξης ή με μηχανική συγκόλληση και απαιτεί ειδικές δεξιότητες και τεχνολογία διασύνδεσης λόγω της μικροσκοπικής ακρίβειας που απαιτείται για την ευθυγράμμιση των πυρήνων ινών.

Δύο κύριοι τύποι οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται σε οπτικές επικοινωνίες περιλαμβάνουν multi-mode οπτικές ίνες και single-mode οπτικές ίνες. Μια οπτική ίνα πολλαπλών λειτουργιών έχει μεγαλύτερο πυρήνα ( $\geq 50$  μικρομέτρων), επιτρέποντας να συνδεθούν με λιγότερο ακριβούς, φθηνότερους πομπούς και δέκτες, καθώς και φτηνότερους συνδέσμους. Ωστόσο, μια ίνα πολλαπλών λειτουργιών εισάγει πολύμορφη παραμόρφωση, η οποία συχνά περιορίζει το εύρος ζώνης και το μήκος του συνδέσμου. Επιπλέον, λόγω του υψηλότερου περιεχομένου του σε προσμείξεις, οι ίνες πολλαπλών τρόπων είναι συνήθως δαπανηρές και παρουσιάζουν μεγαλύτερη εξασθένηση. Ο πυρήνας μιας ίνας μονής

κατεύθυνσης είναι μικρότερος (<10 μικρομέτρα) και απαιτεί ακριβότερα εξαρτήματα και μεθόδους διασύνδεσης, αλλά επιτρέπει πολύ μεγαλύτερες συνδέσεις υψηλότερης απόδοσης.

Προκειμένου να συσκευασθούν οι ίνες σε ένα εμπορικά βιώσιμο προϊόν, τυπικά επικαλύπτεται προστατευτικά με τη χρήση υπεριωδών ακτίνων (UV), ακρυλικών πολυμερών που έχουν σκληρυνθεί με φωτισμό, στη συνέχεια τερματίζεται με συνδεδητές οπτικών ινών και τελικά συναρμολογείται σε καλώδιο. Μετά από αυτό, μπορεί να τοποθετηθεί στο έδαφος και στη συνέχεια να τρέξει μέσα από τους τοίχους ενός κτιρίου και να αναπτυχθεί εναέρια με τρόπο παρόμοιο με τα καλώδια χαλκού. Αυτές οι ίνες απαιτούν λιγότερη συντήρηση από τα συνηθισμένα σύρματα συνεστραμμένου ζεύγους μόλις αυτά αναπτυχθούν.

Ειδικά καλώδια χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων υποθαλάσσιων αποστάσεων σε μεγάλες αποστάσεις, π.χ. καλώδιο υπερατλαντικών επικοινωνιών. Τα νέα καλώδια (2011-2013) που λειτουργούν από εμπορικές επιχειρήσεις (EmeraldAtlantis, Hibernia Atlantic) έχουν συνήθως τέσσερις δέσμες ινών και διασχίζουν τον Ατλαντικό (NYC-Λονδίνο) σε 60-70ms.

Μια άλλη κοινή πρακτική είναι η δέσμη πολλών οπτικών ινών στο καλώδιο μετάδοσης ισχύος μεγάλου μήκους. Αυτό εκμεταλλεύεται αποτελεσματικά τα δικαιώματα μετάδοσης ισχύος, διασφαλίζοντας ότι μια εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να κατέχει και να ελέγχει τις ίνες που απαιτούνται για την παρακολούθηση των δικών της συσκευών και γραμμών, να είναι αποτελεσματικά ανθεκτικές στην παρεμπόδιση και να απλοποιεί την ανάπτυξη της τεχνολογίας έξυπνου δικτύου (Zhang & Dai, 2016).

#### **4.4.5 Ενίσχυση**

Η απόσταση μετάδοσης ενός συστήματος επικοινωνίας οπτικών ινών παραδοσιακά περιορίστηκε από την εξασθένιση των ινών και από την παραμόρφωση των ινών. Χρησιμοποιώντας οπτο-ηλεκτρονικά αναμεταδότες, αυτά τα προβλήματα έχουν εξαλειφθεί. Αυτοί οι αναμεταδότες μετατρέπουν το σήμα σε ένα ηλεκτρικό σήμα και στη συνέχεια χρησιμοποιούν έναν πομπό για να στείλουν ξανά το σήμα σε μεγαλύτερη ένταση από ό, τι λήφθηκε, εξουδετερώνοντας έτσι την απώλεια που προκλήθηκε στο προηγούμενο τμήμα. Λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας με τα πολυπλεγμένα σήματα σύγχρονης διαίρεσης μήκους κύματος (συμπεριλαμβανομένου του γεγονότος ότι έπρεπε να εγκατασταθούν περίπου κάθε 20 χιλιόμετρα), το κόστος αυτών των επαναληπτών είναι πολύ υψηλό.

Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η χρήση οπτικών ενισχυτών οι οποίοι ενισχύουν το οπτικό σήμα απευθείας χωρίς να χρειάζεται να μετατρέψουν το σήμα στην ηλεκτρική περιοχή. Ένας κοινός τύπος οπτικού ενισχυτή ονομάζεται ενισχυτής ίνας ενισχυμένος με Erbium ή EDFA. Αυτά κατασκευάζονται με την προσθήκη ενός μήκους ίνας με το ορυκτό έρβιο σπανίων γαιών και την άντλησή του με φως από ένα λέιζερ με μικρότερο μήκος κύματος από το σήμα επικοινωνίας (τυπικά 980 nm). Τα EDFA παρέχουν κέρδος στη ζώνη ITU C στα 1550 nm, που είναι κοντά στο ελάχιστο της απώλειας για τις οπτικές ίνες.

Οι οπτικοί ενισχυτές έχουν αρκετά σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των ηλεκτρικών αναμεταδοτών. Πρώτον, ένας οπτικός ενισχυτής μπορεί να ενισχύσει μια πολύ ευρεία ζώνη ταυτόχρονα, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει εκατοντάδες ανεξάρτητα κανάλια, εξαλείφοντας την ανάγκη να αποπολυπλέκονται τα σήματα DWDM σε κάθε ενισχυτή. Δεύτερον, οι οπτικοί ενισχυτές λειτουργούν ανεξάρτητα από το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και τη μορφή διαμόρφωσης, επιτρέποντας την ταυτόχρονη συνύπαρξη πολλαπλών ρυθμών δεδομένων και μορφών διαμόρφωσης και επιτρέποντας την αναβάθμιση του ρυθμού δεδομένων ενός συστήματος χωρίς να χρειάζεται να αντικατασταθούν όλοι οι επαναλήπτες. Τρίτον, οι οπτικοί ενισχυτές είναι πολύ απλούστεροι από τους επαναλήπτες με τις ίδιες δυνατότητες και ως εκ τούτου είναι σημαντικά πιο αξιόπιστοι. Οι οπτικοί ενισχυτές έχουν αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τους αναμεταδότες σε νέες εγκαταστάσεις, αν και οι ηλεκτρονικοί αναμεταδότες εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως ως αναμεταδότες για τη μετατροπή σε μήκος κύματος (Zhang & Dai, 2016).

#### **4.4.6 Πολλαπλασιασμός με διαίρεση μήκους κύματος**

Η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) είναι η πρακτική του πολλαπλασιασμού της διαθέσιμης χωρητικότητας των οπτικών ινών μέσω της χρήσης παράλληλων καναλιών σε ειδικό μήκος κύματος φωτός. Αυτό απαιτεί έναν πολυπλέκτη διαίρεσης μήκους κύματος στον εξοπλισμό μετάδοσης και έναν αποπολυπλέκτη (ουσιαστικά ένα φασματόμετρο) στον εξοπλισμό λήψης. Τα συστοιχούμενα κυματοειδή σχάρες χρησιμοποιούνται συνήθως για την πολυπλεξία και την αποπολυπλεξία στο WDM. Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία WDM που είναι τώρα διαθέσιμη στο εμπόριο, το εύρος ζώνης μιας ίνας μπορεί να χωριστεί σε 160 κανάλια για να υποστηρίξει ένα συνδυασμένο ρυθμό bit στην περιοχή των 1,6 Tbit/s (Zhang & Dai, 2016).

## 4.5 Η ΟΠΤΙΚΗ ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ

Η οπτική ασύρματη επικοινωνία (Optical wireless communication- OWC) είναι μια μορφή οπτικής επικοινωνίας στην οποία χρησιμοποιείται μη ορατό, υπέρυθρο (IR) ή υπεριώδες (UV) φως για τη μεταφορά ενός σήματος.

Τα συστήματα OWC που λειτουργούν στην ορατή ζώνη (390-750 nm) αναφέρονται συνήθως ως επικοινωνία ορατού φωτός (VLC). Τα συστήματα VLC επωφελούνται από τις διόδους εκπομπής φωτός (LED), οι οποίες μπορούν να παλμονομηθούν σε πολύ υψηλές ταχύτητες χωρίς να έχουν αξιοσημείωτο αντίκτυπο στην έξοδο φωτισμού και στο ανθρώπινο μάτι. Το VLC μπορεί να χρησιμοποιηθεί ενδεχομένως σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων ασύρματων τοπικών δικτύων, ασύρματων προσωπικών δικτύων και μεταξύ άλλων δικτύων οχημάτων.

Από την άλλη πλευρά, τα επίγεια συστήματα OWC point-to-point, γνωστά και ως οπτικά συστήματα ελεύθερου χώρου (FSO) λειτουργούν στις εγγύς συχνότητες IR (750-1600 nm). Αυτά τα συστήματα τυπικά χρησιμοποιούν πομπούς λέιζερ και προσφέρουν ένα οικονομικά αποδοτικό πρωτόκολλο, δηλαδή διάφανη σύνδεση με υψηλά ποσοστά δεδομένων, δηλαδή 10 Gbit/s ανά μήκος κύματος, και παρέχουν μια πιθανή λύση για το εμπόδιο backhaul. Υπήρξε επίσης ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την υπεριώδη επικοινωνία (UVC) ως αποτέλεσμα της πρόσφατης προόδου σε οπτικές πηγές / ανιχνευτές στερεάς κατάστασης που λειτουργούν εντός ηλιακού φασματοσκοπίου (200-280 nm). Σε αυτή τη λεγόμενη βαθιά ζώνη υπεριώδους ακτινοβολίας, η ηλιακή ακτινοβολία είναι αμελητέα στο επίπεδο του εδάφους και αυτό καθιστά δυνατό τον σχεδιασμό ανιχνευτών μέτρησης φωτονίων με ευρείς δέκτες οπτικών πεδίων που αυξάνουν την ενέργεια που λαμβάνεται με λίγο πρόσθετο θόρυβο περιβάλλοντος (Ghassemloooy, Zvanovec, Khalighi, & Popoola, 2017).

### 4.5.1 Τρέχουσα κατάσταση

Κατά τη διάρκεια των δεκαετιών, το ενδιαφέρον για το OWC παρέμεινε κυρίως περιορισμένο στις συγκαλυμμένες στρατιωτικές εφαρμογές και στις διαστημικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των διαδανικών και των διαστημικών συνδέσεων. Η μαζική διείσδυση της OWC στην αγορά έχει περιοριστεί μέχρι τώρα, με εξαίρεση την IrDA, η οποία είναι εξαιρετικά επιτυχημένη λύση ασύρματης μετάδοσης μικρής εμβέλειας (Ghassemloooy, Zvanovec, Khalighi, & Popoola, 2017).

## 4.5.2 Εφαρμογές

Οι παραλλαγές του OWC μπορούν ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών επικοινωνίας που κυμαίνονται από οπτικές διασυνδέσεις εντός ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μέσω εξωτερικών διασυνδετικών δομών με δορυφορικές επικοινωνίες.

Το OWC μπορεί να χωριστεί σε πέντε κατηγορίες με βάση την περιοχή μετάδοσης (Ghassemloooy, Zvanovec, Khalighi, & Popoola, 2017):

1. Εξαιρετικά σύντομη εμβέλεια: Επικοινωνία chip-to-chip σε πακέτα πολλαπλών τσιπ που είναι στοιβαγμένα και στενά συσκευασμένα.
2. Σύντομη εμβέλεια: Ασύρματο δίκτυο χώρου σώματος (WBAN) και εφαρμογές ασύρματου προσωπικού δικτύου (WPAN) σύμφωνα με τις πρότυπες υποβρύχιες επικοινωνίες IEEE 802.15.7.
3. Μεσαία κλίμακα: Εσωτερικές επικοινωνίες IR και ορατού φωτός (VLC) για ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και επικοινωνίες μεταξύ οχημάτων και οχήματος προς υποδομή.
4. Μεγάλο εύρος: Συνδέσεις μεταξύ κτιρίων, ονομαζόμενες επίσης οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου (FSO).
5. Εξαιρετικά μακρά εμβέλεια: Επικοινωνία με λέιζερ στο διάστημα ειδικά για διαδορυφορικές συνδέσεις και δημιουργία δορυφορικών αστερισμών.

## 4.5.3 Πρόσφατες τάσεις

Οι πρόσφατες τάσεις της οπτικής ασύρματης επικοινωνίας (Optical wireless communication- OWC) είναι οι εξής (Ghassemloooy, Zvanovec, Khalighi, & Popoola, 2017):

1. Τον Ιανουάριο του 2015, το IEEE 802.15 δημιούργησε μια ομάδα εργασίας για να γράψει μια αναθεώρηση του IEEE 802.15.7-2011 που φιλοξενεί υπέρυθρα και κοντά σε υπεριώδη μήκη κύματος, εκτός από το ορατό φως και προσθέτει επιλογές όπως οπτικές κάμερες επικοινωνίας και LiFi.
2. Σε εφαρμογές OWC μεγάλου βεληγεκούς, έχει αποδειχθεί η σύνδεση μεταξύ εδάφους και αεροσκάφους με ταχύτητα 800 km / h σε απόσταση 1 Gbit / s - 60 km, «Extreme Test for Terminal Communication MLT-20 - Οπτική Downlink από αεροσκάφος Jet 800 km / h», DLR και EADS τον Δεκέμβριο του 2013.

3. Σε συσκευές καταναλωτών και εφαρμογές OWC μικρής εμβέλειας σε τηλέφωνα. Τα δεδομένα λαμβάνονται με το φως στο smartphone του χρήστη. Η TCL Communication / ALCATEL ONETOUCH και η Sunpartner Technologies ανακοινώνουν το πρώτο πλήρως ενσωματωμένο ηλιακό smartphone τον Μάρτιο του 2014.
4. Σε εφαρμογές OWC εξαιρετικά μακρινής εμβέλειας, η επίδειξη επικοινωνίας σε σεληνιακό λέιζερ (LLCD) της NASA μεταδίδει δεδομένα από τη σεληνιακή τροχιά στη Γη με ρυθμό 622 Megabits-ανά-δευτερόλεπτο (Mbps), Νοέμβριος 2013.
5. Η επόμενη γενιά επικοινωνιών OWC / ορατού φωτός έδειξε μετάδοση 10 Mbit/s με διόδους εκπομπής πολυμερών ή OLED.
6. Στις ερευνητικές δραστηριότητες του OWC υπάρχει δράση ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου IC1101 OPTICWISE του προγράμματος COST (Ευρωπαϊκή συνεργασία στην επιστήμη και την τεχνολογία) που χρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Ίδρυμα Επιστημών, επιτρέποντας τον συντονισμό της εθνικής χρηματοδότησης έρευνας σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Η δράση στοχεύει να χρησιμεύσει ως μια ευρεία ενοποιημένη ευρωπαϊκή επιστημονική πλατφόρμα για ερευνητικές δραστηριότητες διεπιστημονικής οπτικής ασύρματης επικοινωνίας (OWC).
7. Η υιοθέτηση τεχνολογιών OWC από τους καταναλωτές και τους κλάδους της βιομηχανίας αντιπροσωπεύεται από την κοινοπραξία Li-Fi, η οποία ιδρύθηκε το 2011, και είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός αφιερωμένος στην εισαγωγή οπτικής ασύρματης τεχνολογίας. Προωθεί την υιοθέτηση προϊόντων LightFidelity (Li-Fi).
8. Ένα παράδειγμα ασιατικής συνειδητοποίησης σχετικά με το OWC είναι η κοινοπραξία επικοινωνίας VLCC ορατού φωτός στην Ιαπωνία, η οποία ιδρύθηκε το 2007 με σκοπό την υλοποίηση ασφαλούς συστήματος τηλεπικοινωνιών με ορατό φως μέσω των δραστηριοτήτων έρευνας αγοράς, προώθησης και τυποποίησης.
9. Στις ΗΠΑ, υπάρχουν διάφορες πρωτοβουλίες του OWC, συμπεριλαμβανομένου του «Ερευνητικού Κέντρου Τεχνολογίας Έξυπνου Φωτισμού», το οποίο ιδρύθηκε το 2008 από το Εθνικό Ίδρυμα Επιστημών (NSF), είναι μια εταιρική σχέση του Πολυτεχνικού Ινστιτούτου Rensselaer, του Πανεπιστημίου της Βοστώνης και του Πανεπιστημίου του Νέου Μεξικού.

#### **4.6 ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ «RONJA»**

Η Ronja είναι σύστημαοπτικής επικοινωνίας ελεύθερου χώρου, που αναπτύχθηκε από τον KarelKulhavy της TwibrightLabs και κυκλοφόρησε το 2001. Μεταδίδει

δεδομένα ασύρματα χρησιμοποιώντας ακτίνες του φωτός. Η Ronja μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία συνδέσμου point-to-point Ethernet με πλήρη αμφίδρομη σύνδεση 10 Mbit/s. Εκτιμάται ότι παγκοσμίως έχουν κατασκευαστεί 1000 έως 2000 συνδέσεις.

Η εμβέλεια της βασικής διαμόρφωσης είναι 1,4 km (0,87 mi). Η συσκευή αποτελείται από ένα σωλήνα δέκτη και πομπού(οπτική κεφαλή) τοποθετημένο σε ανθεκτικό ρυθμιζόμενο στήριγμα. Δύο ομοαξονικά καλώδια χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση της εγκατάστασης στην οροφή με ένα μεταφραστή πρωτοκόλλου εγκατεστημένο στο σπίτι κοντά σε υπολογιστή ή διακόπτη. Η εμβέλεια μπορεί να επεκταθεί σε 1,9 km (1,2 mi) διπλασιάζοντας ή τριπλασιάζοντας τον αγωγό του πομπού.

Οι οδηγίες κατασκευής, τα σχεδιαγράμματα και τα σχήματα δημοσιεύονται υπό την άδεια GNU Free Documentation License. Χρησιμοποιούνται μόνο εργαλεία ελεύθερου λογισμικού για την ανάπτυξη. Ο συγγραφέας ονομάζει αυτό το επίπεδο ελευθερίας «Τεχνολογία ελεγχόμενη από τον χρήστη» και η Ronja είναι ένα έργο των εργαστηρίων TwibrightLabs(Ghassemlooy, Zvanovec, Khalighi, & Popoola, 2017).

#### **4.6.1 Μοντέλα**

Τα διάφορα μοντέλα τουσυστήματος οπτικής επικοινωνίας ελεύθερου χώρου Ronja είναι(Ghassemlooy, Zvanovec, Khalighi, & Popoola, 2017):

- RonjaTetrapolis: Με εύρος 1,4 χλμ. (0,87 μίλια) και κόκκινο ορατό φως. Ο χρήστης πρέπει να συνδέσει τη σύνδεση 8P8C σε κάρτα δικτύου ή διακόπτη.
- Ronja 10MMetropolis: Με εύρος 1,4χλμ. (0,87 μίλια), κόκκινο ορατό φως και σύνδεση στη διεπαφή μονάδας προσάρτησης.
- RonjaInferno: Με εύρος 1,25 km (0,78 mi) και αόρατο υπέρυθρο φως.
- RonjaBenchpress: Μια συσκευή μέτρησης για προγραμματιστές για τη φυσική μέτρηση του κέρδους συνδυασμού φακών / LED και τον υπολογισμό του εύρους από αυτό.
- RonjaLoripe: Ο αρχικός σχεδιασμός (με διακοπή) με χρήση κόκκινου ορατού φωτός και διεπαφή RS232 για σύνδεση PPP / SLIP max 115 kbit/s.

#### **4.6.2 Περιορισμοί**

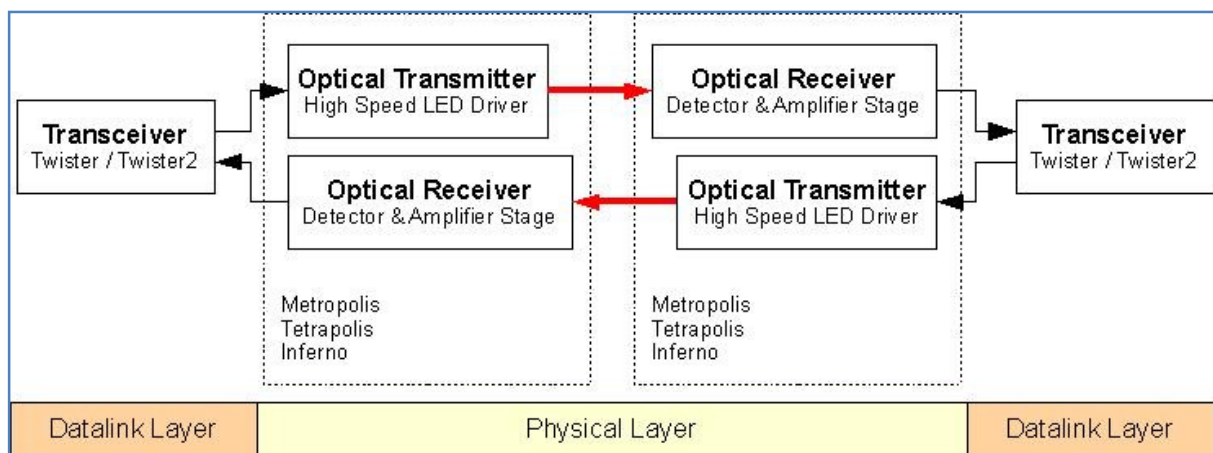
Εξ ορισμού, είναι απαραίτητη η σαφής ορατότητα μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Εάν η δέσμη είναι σκοτεινή με οποιονδήποτε τρόπο, ο σύνδεσμος θα σταματήσει να λειτουργεί. Συνήθως, ενδέχεται να προκύψουν προβλήματα σε συνθήκες χιονιού ή



πυκνής ομίχλης. Μια συσκευή ζυγίζει 15,5 kg και απαιτεί 70 ώρες χρόνου κατασκευής. Απαιτεί τη δυνατότητα να οριστεί μη αυτόματα η πλήρης αμφίδρομη λειτουργία στην κάρτα δικτύου ή του διακόπτη για να εκμεταλλευτεί η πλήρης αμφίδρομη λειτουργία καθώς δεν υποστηρίζει αυτόματη διαπραγμάτευση. Πρέπει να συνδεθεί απευθείας σε υπολογιστή ή διακόπτη χρησιμοποιώντας το ενσωματωμένο καλώδιο Ethernet 1 m (Ghassemlooy, Zvanovec, Khalighi, & Popoola, 2017).

### 4.6.3 Τεχνολογία

Ένα πλήρες σύστημα RONJA αποτελείται από 2 πομποδέκτες, δηλαδή 2 οπτικούς πομπούς και 2 οπτικούς δέκτες. Συγκροτούνται μεμονωμένα ή ως συνδυασμός. Η πλήρης διάταξη του συστήματος φαίνεται στο μπλοκ διάγραμμα του παρακάτω Σχήματος 4.1.



Σχήμα 4.1: Δομικό διάγραμμα του συστήματος RONJA για μία πλήρη αμφίδρομη σύνδεση.

Εμφανίζει επίσης τα επίπεδα του μοντέλου αναφοράς OSI για τα διάφορα στοιχεία.

Πηγή: (Ghassemlooy, Zvanovec, Khalighi, & Popoola, 2017).

#### 1. Οπτικός δέκτης - Στάθμη προενισχυτή

Η συνήθης προσέγγιση στους προενισχυτές FSO (Free Space Optics) είναι η χρήση ενός ενισχυτή transimpedance. Ένας ενισχυτής transimpedance είναι μια πολύ ευαίσθητη ευρυζωνική συσκευή υψηλής ταχύτητας που διαθέτει ένα βρόχο ανατροφοδότησης. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η διάταξη έχει μολυνθεί από προβλήματα σταθερότητας και πρέπει να πραγματοποιηθεί ειδική αντιστάθμιση της

χωρητικότητας διόδου PIN, επομένως αυτό δεν επιτρέπει την επιλογή μιας ευρείας γκάμας φθηνών φωτοδιόδων PIN με διαφορετικές χωρητικότητες.

## **2. Οπτικός πομπός - οδηγός υπέρυθρης ακτινοβολίας Nebulus**

Το υπέρυθρο LED HSDL4220 είναι αρχικά ακατάλληλο για λειτουργία 10 Mbit/s. Έχει ένα εύρος ζώνης 9 MHz, με 10 Mbit/s όπου τα διαμορφωμένα συστήματα χρειάζονται εύρος ζώνης περίπου 16 MHz. Η λειτουργία σε ένα συνηθισμένο κύκλωμα με τρέχουσα κίνηση θα οδηγούσε σε σημαντική διαφθορά σήματος και μείωση της εμβέλειας. Συνεπώς, η TwibrightLabs ανέπτυξε μια ειδική τεχνική οδήγησης η οποία συνίσταται στην οδήγηση της LED απευθείας με ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) 74AC04 παράλληλα με μεγάλους πυκνωτές. Καθώς η τάση για τη διατήρηση του ονομαστικού μέσου ρεύματος LED (100mA) ποικίλλει ανάλογα με τις ανοχές θερμοκρασίας και συνιστώσας, τοποθετείται σε σειρά ένας αισθητήρας ανίχνευσης ρεύματος παράκαμψης AC σε σειρά. Ένας βρόχος ανατροφοδότησης μετρά την τάση σε αυτή την αντίσταση και τη διατηρεί σε προκαθορισμένο επίπεδο μεταβάλλοντας την τάση τροφοδοσίας των θυρών 74AC04. Επομένως, η ονομαστική ψηφιακή 74AC04 λειτουργεί ως διακόπτης CMOS δομημένης ισχύος πλήρως σε αναλογική λειτουργία.

## **3. Πομποδέκτης - RonjaTwister**

Το RonjaTwister είναι μια ηλεκτρονική διεπαφή για οπτικό ζεύγος δεδομένων ελεύθερου χώρου που βασίζεται σε τσιπ καταγραφών μετρητών και μετατόπισης. Είναι μέρος του σχεδιασμού Ronja και ένας οπτικός πομποδέκτης Ethernet χωρίς το τμήμα της μονάδας οπτικού δίσκου.

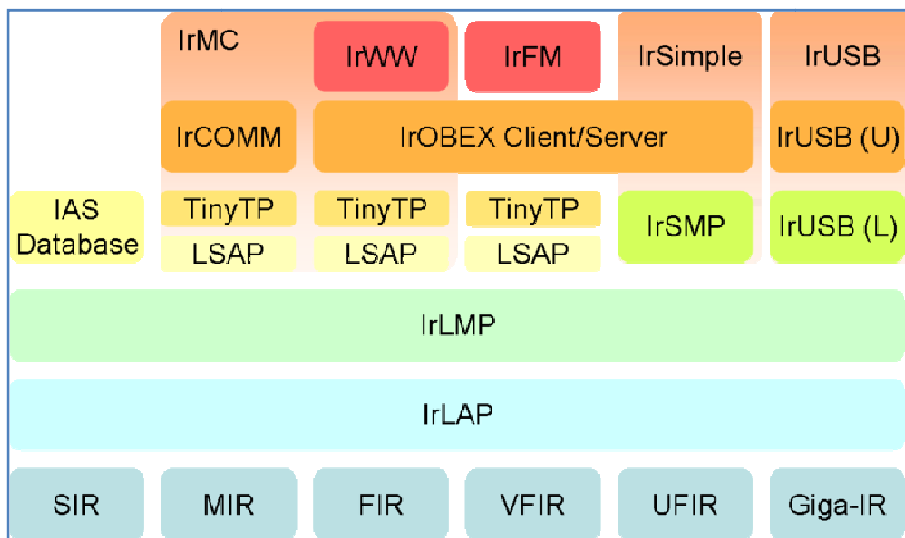
Ο αρχικός σχεδιασμός έχει αντικατασταθεί από το Twister2 αλλά το λογικό κύκλωμα παρέμεινε το ίδιο.

## **4.7 ΕΝΩΣΗ ΥΠΕΡΥΘΡΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

Η ένωση υπέρυθρων δεδομένων (InfraredData Association/ IrDA) είναι μια ομάδα συμφερόντων που δημιουργήθηκε το 1993 από περίπου 50 εταιρείες. Το IrDA παρέχει προδιαγραφές για ένα πλήρες σύνολο πρωτοκόλλων για ασύρματες επικοινωνίες υπέρυθρων και το όνομα «IrDA» αναφέρεται επίσης σε εκείνο το σύνολο πρωτοκόλλων. Ο κύριος λόγος για τη χρήση του IrDA ήταν η ασύρματη μεταφορά δεδομένων μέσω του «τελευταίου μέτρου» χρησιμοποιώντας τις αρχές «point-and-shoot». Έτσι, έχει εφαρμοστεί σε φορητές

συσκευές όπως τα κινητά τηλέφωνα, οι φορητοί υπολογιστές, οι κάμερες, οι εκτυπωτές και οι ιατρικές συσκευές. Κύρια χαρακτηριστικά αυτού του είδους ασύρματης οπτικής επικοινωνίας είναι η φυσική ασφάλεια της μεταφοράς δεδομένων, της οπτικής επαφής (line-of-sight / LOS) και του πολύ χαμηλού ποσοστού σφάλματος δυαδικών ψηφίων (biterrorrate/BER) που την καθιστά πολύ αποτελεσματική.

Οι πομποδέκτες IrDA επικοινωνούν με τους υπέρυθρους παλμούς (δείγματα) σε κώνο που εκτείνεται τουλάχιστον 15 μοίρες με το μισό γωνιακό κέντρο. Οι φυσικές προδιαγραφές του IrDA απαιτούν το κατώτερο και ανώτερο όριο της ακτινοβολίας έτσι ώστε ένα σήμα να είναι ορατό έως ένα μέτρο μακριά, αλλά ένας δέκτης δεν είναι εξοπλισμένος με φωτεινότητα όταν μια συσκευή έρχεται κοντά. Πρακτικά, υπάρχουν ορισμένες συσκευές που δεν φτάνουν το ένα μέτρο, ενώ άλλες συσκευές μπορεί να φτάσουν μέχρι και μερικά μέτρα. Υπάρχουν επίσης συσκευές που δεν ανέχονται εξαιρετική εγγύτητα. Το τυπικό σημείο για τις επικοινωνίες IrDA είναι από 5 έως 60 cm μακριά από έναν πομποδέκτη, στο κέντρο του κώνου. Οι επικοινωνίες δεδομένων IrDA λειτουργούν σε ημι-αμφίδρομη λειτουργία επειδή κατά τη μετάδοση, ο δέκτης μιας συσκευής τυφλώνεται από το φως του δικού του πομπού, οπότε δεν είναι εφικτή η πλήρης αμφίδρομη επικοινωνία. Οι δύο συσκευές που επικοινωνούν προσομοιώνουν την πλήρη αμφίδρομη επικοινωνία μετατρέποντας γρήγορα το σύνδεσμο γύρω. Η κύρια συσκευή ελέγχει τον συγχρονισμό του συνδέσμου, αλλά και οι δύο πλευρές συνδέονται με ορισμένους σκληρούς περιορισμούς και ενθαρρύνονται να γυρίσουν το σύνδεσμο όσο πιο γρήγορα γίνεται (Bhatnagar, 2016).



**Σχήμα 4.2:** Στοιβά πρωτοκόλλων IrDA, συμπεριλαμβανομένων IrPHY, IrLAP, IrLMP, TinyTP, IrCOMM, IrOBEX, IrUSB.

Πηγή: (Bhatnagar, 2016).

## 4.8 Colorshiftkeying

Η Colorshiftkeying (CSK), όπως περιγράφεται στο IEEE 802.15.7, είναι μια τεχνολογία διαμόρφωσης βασισμένη στην διαμόρφωση έντασης φωτός για VLC. Η CSK βασίζεται στην ένταση φωτός, καθώς το διαμορφωμένο σήμα λαμβάνει ένα στιγμιαίο χρώμα ίσο με το φυσικό άθροισμα των τριών (κόκκινων / πράσινων / μπλε) στιγμιαίων εντάσεων LED. Αυτό το διαμορφωμένο σήμα μεταπηδά ακαριαία, από σύμβολο σε σύμβολο, σε διαφορετικά ορατά χρώματα. Ως εκ τούτου, η CSK μπορεί να ερμηνευθεί ως μια μορφή αλλαγής συχνότητας. Ωστόσο, αυτή η στιγμιαία μεταβολή του μεταδιδόμενου χρώματος δεν πρέπει να είναι ανθρώπινη αντιληπτή, λόγω της περιορισμένης χρονικής ευαισθησίας στην ανθρώπινη όραση - το «κρίσιμο κατώτατο όριο σύντηξης» (critical flickerfusionthreshold/ CFF) και το «κατώτατο όριο σύντηξης χρώματος» (criticalcolorfusionthreshold/ CCF)<sup>12</sup>, άρα και στις δύο των περιπτώσεων δεν μπορούν να αντιληφθούν χρονικές αλλαγές μικρότερες από 0,01 δευτερόλεπτα. Οι μεταδόσεις επομένως είναι προκαθορισμένες σε μέσο χρόνο (μέσω CFF και CCF) σε ένα συγκεκριμένο χρονικά σταθερό χρώμα. Οι άνθρωποι μπορούν έτσι να αντιληφθούν μόνο αυτό το προκαθορισμένο χρώμα που φαίνεται σταθερό με την πάροδο του χρόνου, αλλά δεν μπορεί να αντιληφθούν το στιγμιαίο χρώμα που ποικίλλει με την πάροδο του χρόνου. Με άλλα λόγια, η μετάδοση CSK διατηρεί μια συνεχή φωτεινή ροή κατά τη διάρκεια του χρόνου, ακόμη και όταν η ακολουθία των συμβόλων της ποικίλλει ταχέως σε χρωματικότητα<sup>13</sup>(Bhatnagar, 2016).

---

<sup>12</sup>Ορίζεται ως η συχνότητα με την οποία ένα διακεκομμένο ερέθισμα φωτός φαίνεται να είναι τελείως σταθερό στον μέσο άνθρωπο παρατηρητή.

<sup>13</sup>Χρωματικότητα είναι μια αντικειμενική προδιαγραφή της ποιότητας ενός χρώματος, ανεξάρτητα από τη φωτεινότητα του. Η χρωματικότητα αποτελείται από δύο ανεξάρτητες παραμέτρους, οι οποίες συχνά καθορίζονται ως απόχρωση (h) και χρωματισμό (ε), όπου ο τελευταίος ονομάζεται εναλλακτικά κορεσμός, χρώμα, ένταση ή καθαρότητα διέγερσης. Αυτός ο αριθμός παραμέτρων προκύπτει από την τριχρωματικότητα της όρασης των περισσότερων ανθρώπων, η οποία υποτίθεται από τα περισσότερα μοντέλα στην επιστήμη των χρωμάτων.



- Όλοι όσοι χρησιμοποιούν λέιζερ πρέπει να γνωρίζουν τους κινδύνους. Αυτή η συνειδητοποίηση δεν είναι απλώς θέμα χρόνου με λέιζερ. Αντίθετα, η μακροχρόνια αντιμετώπιση αόρατων κινδύνων (όπως από ακτίνες λέιζερ υπέρυθρων ακτίνων) τείνει να μειώσει την ευαισθητοποίηση του κινδύνου κυρίως λόγω εφησυχασμού, αντί να τον οξύνει.
- Τα οπτικά πειράματα πρέπει να διεξάγονται σε οπτικό τραπέζι με όλες τις δέσμες λέιζερ να κινούνται μόνο στο οριζόντιο επίπεδο και όλες οι δοκοί πρέπει να σταματούν στις άκρες του τραπεζιού. Οι χρήστες δεν θα πρέπει ποτέ να βάζουν τα μάτια τους στο επίπεδο του οριζόντιου επιπέδου όπου οι δοκοί είναι στην περίπτωση των ανακλώμενων δοκών που φεύγουν από το τραπέζι.
- Τα ρολόγια και άλλα κοσμήματα που ενδέχεται να εισέλθουν στο οπτικό επίπεδο δεν πρέπει να επιτρέπονται στο εργαστήριο. Όλα τα μη οπτικά αντικείμενα που βρίσκονται κοντά στο οπτικό επίπεδο πρέπει να έχουν ματ φινίρισμα για να αποτρέψουν τις κατοπτρικές αντανάκλασεις.
- Η επαρκής προστασία των ματιών θα πρέπει πάντα να απαιτείται, εάν υπάρχει σημαντικός κίνδυνος τραυματισμού των ματιών.
- Οι δοκοί υψηλής έντασης που μπορούν να προκαλέσουν βλάβη στη φωτιά ή στο δέρμα (κυρίως από λέιζερ κατηγορίας 4 και υπεριωδών ακτίνων) και που δεν τροποποιούνται συχνά θα πρέπει να κατευθύνονται μέσω αδιαφανών σωλήνων.
- Η ευθυγράμμιση δοκών και οπτικών εξαρτημάτων θα πρέπει να πραγματοποιείται με μειωμένη ισχύ δέσμης όποτε είναι δυνατόν.

## 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: «ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ»

Σύμφωνα με ιστορικές πηγές τα πρώιμα μέσα επικοινωνίας από απόσταση περιελάμβαναν οπτικά σήματα, όπως φάρους, σήματα καπνού, τηλεγραφικά σηματοφόρου, σημαίες σήματος και οπτικούς ηλιογράφους.

Η σύγχρονη τηλεπικοινωνία βασίζεται σε μια σειρά από βασικές έννοιες που γνώρισαν προοδευτική ανάπτυξη και τελειοποίηση σε μια περίοδο πάνω από έναν αιώνα.

Οι τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών μπορούν κατά κύριο λόγο να διαιρεθούν σε ενσύρματες και ασύρματες. Γενικά όμως, ένα βασικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα αποτελείται από τρία βασικά μέρη:

- Έναν πομπό που λαμβάνει πληροφορίες και τις μετατρέπει σε σήμα.
- Ένα μέσο μετάδοσης, που ονομάζεται επίσης φυσικό κανάλι το οποίο μεταφέρει το σήμα. Ένα παράδειγμα αυτού είναι το «κανάλι ελεύθερου χώρου».
- Έναν δέκτη που παίρνει το σήμα από το κανάλι και το μετατρέπει σε χρήσιμες πληροφορίες για τον παραλήπτη.

Οι τεχνολογίες του 20<sup>ου</sup> και 21<sup>ου</sup> αιώνα για την επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων περιλαμβάνουν συνήθως ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές τεχνολογίες, όπως τηλεγραφήματα, τηλεφωνήματα, ραδιόφωνο, τη μετάδοση μικροκυμάτων, τις οπτικές ίνες και τους δορυφόρους επικοινωνιών.

Οι Επικοινωνίες Ορατού Φωτός (Visible Light Communications) σίγουρα μελλοντικά θα ενδιαφέρουν πολύ κόσμο. Ωστόσο παρουσιάζουν συγκεκριμένες αδυναμίες, όπως κάθε τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Παραδείγματος χάριν στις εγκαταστάσεις εξωτερικών χώρων, είναι πολύ σημαντική η κατάσταση της ατμόσφαιρας και η ορατότητα.

Μία από τις ελλείψεις είναι η λειτουργία του uploading. Οι ερευνητές που αναφέρονται σε αυτό προτείνουν έναν συμβατικό τρόπο uploading καθώς είναι πολύ δύσκολη η αμφίδρομη λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος. Σε τέτοιου είδους τηλεπικοινωνιακά συστήματα οι μεγαλύτερες απαιτήσεις που αφορούν το downloading, επομένως το VLC ακόμα και αν δεν προβλέπει το uploading, συνεχίζει να είναι ένα ρηξικέλευθο σύστημα. Ωστόσο, το πρόβλημα έγκειται με το κατά πόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί το VLC σε περιοχές «ευαίσθητες» στην RF ακτινοβολία.

Στη συνέχεια ακολουθούν συνοπτικά τα πλεονεκτήματα του VLC ως τηλεπικοινωνιακό σύστημα:

- Τηλεπικοινωνιακό σύστημα χωρίς επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό.
- Ασφάλεια στις επικοινωνίες.
- Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων.
- Δεν απαιτείται αδειοδότης.



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Agarwal, T. (2014). *What are the Basic Elements of a Fiber Optic Communication System?* Ανάκτηση από elprocus: <https://www.elprocus.com/basic-elements-of-fiber-optic-communication-system-and-its-working/>
- Arnon, S. (2015). *Visible Light Communication*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bhatnagar, K. (2016). *Latest Trends in Fiber Optics Communication*. New Delhi, India: International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET).
- Blaunstein, N., Arnon, S., Kopeika, N., & Zilberman, A. (2009). *Applied Aspects of Optical Communication and LIDAR*. CRC Press.
- Capelle, M., Huguet, M.-J., Jozefowicz, N., & Olive, X. (2018, 2). Ground stations networks for Free-Space Optical communications: maximizing the data transfer. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 64, σσ. 255-264.
- Chen, M., Chao, L., Daoman, R., & Xian, H. (2018, 5). Experimental results of 5-Gbps free-space coherent optical communications with adaptive optics. *Optics Communications*, 418, σσ. 115-119.
- depositphotos-Electromagnetic Spectrum*. (2018, 4). Ανάκτηση από depositphotos: <https://gr.depositphotos.com/159555192/stock-illustration-electromagnetic-spectrum-diagram.html>
- Ghassemlooy, Z., Zvanovec, S., Khalighi, M.-A., & Popoola, W. (2017, 12). Optical wireless communication systems. *Optik*, 151, σσ. 1-6.
- Sewaiwar, A., Tiwari, S., & Chung, Y.-H. (2015, 3 15). Novel user allocation scheme for full duplex multiuser bidirectional Li-Fi network. *Optics Communications*, 339, σσ. 153-156.
- Shamsudheen, P., Sureshkumar, E., & Chunkath, J. (2016). Performance Analysis of Visible Light Communication System for Free Space Optical Communication Link. *Procedia Technology*, σσ. 827-833.

- Tse, D., & Viswanath, P. (2009). *Βασικές αρχές ασύρματης επικοινωνίας*. (Ι. Κουτσόπουλος, Λ. Τασιούλας, Μ. Χρυσανθοπούλου, Επιμ., Ι. Κουτσόπουλος, Λ. Τασιούλας, & Μ. Χρυσανθοπούλου, Μεταφρ.) Αθήνα: Κλειδάριθμος.
- UllahKhan, L. (2017, 5). Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges. *Digital Communications and Networks*, 3(2), σσ. 78-88.
- Walrand, J. (1997). *Δίκτυα επικοινωνιών*. (Μ. Αναγνώστου, Επιμ., & Μ. Αναγνώστου, Μεταφρ.) Αθήνα: Παπασωτηρίου.
- Wilson, J., & Hawkes, J. (2004). *Οπτοηλεκτρονική: Μια εισαγωγή*. (Α. Σεραφετινίδης, Μ. Μακροπούλου, & Ι. Ζεργιώτη, Επιμ.) Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ.
- Zhang, H., & Dai, G. (2016, 12). Design of optical fiber communication network monitoring and detection system based on address resolution protocol cheats. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 127(23), σσ. 11242-11249.
- Κωνσταντίνου, Φ., Καψάλης, Χ., & Κωττής, Π. (1995). *Εισαγωγή στις τηλεπικοινωνίες*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.
- Λάζος, Χ. (1997). *Τηλεπικοινωνίες των αρχαίων Ελλήνων*. Αθήνα: Αίολος.
- Σεργιάδης, Γ., Αλεξιάδης, Δ., Βασιλειάδης, Θ., & Βλάχος, Ι. (2015, 3 5). *VisibleLightCommunication*. Ανάκτηση από Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης-Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών: [http://brain.ee.auth.gr/dokuwiki/doku.php?id=visible\\_light\\_communications:visible\\_light\\_communications](http://brain.ee.auth.gr/dokuwiki/doku.php?id=visible_light_communications:visible_light_communications)
- Στρουθόπουλος, Χ. (2008, 11 27). *Δίκτυα Τηλεπικοινωνιών & Μετάδοσης*. Ανάκτηση από Τ.Ε.Ι. Σερρών-ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ: [http://anamorfosi.teicm.gr/ekp\\_yliko/e-notes/Data/commnets/main.htm#id97](http://anamorfosi.teicm.gr/ekp_yliko/e-notes/Data/commnets/main.htm#id97)