



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

" ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΕΣΩ ΟΡΑΤΟΥ ΦΩΤΟΣ "
(VISIBLE LIGHT COMMUNICATIONS)

ΑΠΟΣΤΟΛΙΔΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΟΛΙΤΗ ΧΡΙΣΤΙΝΑ, τίτλος, βαθμίδα

ΠΑΤΡΑ 2020



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Πάτρα, Ημερομηνία

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Ονοματεπώνυμο, Υπογραφή
2. Ονοματεπώνυμο, Υπογραφή
3. Ονοματεπώνυμο, Υπογραφή

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη εργασία.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία τού φοιτητή Χρήστου Αποστολίδη που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιοδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αποστολίδης Χρήστος, του Στέφανου Αποστολίδη, με αριθμό μητρώου 1602778, φοιτητής του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου πριν αναλάβω την εκπόνηση της πτυχιακής μου εργασίας, δηλώνω ρητά ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω.

- Η Πτυχιακή Εργασία αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να μοναδικό χαρακτήρα και μοναδικό περιεχόμενο
- Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου να της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Παρόμοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας την πτυχιακής εργασίας, ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων αυτής της πράξης
- Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα σε περίπτωση που το Ίδρυμα έχει απονεμίσει Πτυχίο στον υποψήφιο απόφοιτο, τότε ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφαση της, μετά από αίτηση νέου ενδιαφερόμενου υποψήφιου απόφοιτου, αναθέτεται εκ νέου η εκπόνηση πτυχιακής εργασίας με διαφορετικό θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω πτυχιακής εργασίας οφείλει να ολοκληρωθεί και να παραδοθεί εντός τουλάχιστον ακαδημαϊκού ημερολογιακού εξαμήνου (6 μήνες) από την ημερομηνία ανάθεσής της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα του άρθρου 18 παράγραφος 5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού.

Οπτική επικοινωνία είναι κάθε μορφή τηλεπικοινωνίας που χρησιμοποιεί το φως ως μέσο μετάδοσης. Προήλθε από πολύ παλιά χρόνια, στην αρχή με την μορφή φάρου αλλά και ακόμα παλιότερα από τα σήματα καπνού τα οποία προερχόντουσαν από φωτιά, για να μεταφέρουν ένα μήνυμα. Η οπτική ασύρματη επικοινωνία έχει εξελιχθεί (OWC-optical wireless communication) σε μια υψηλής χωρητικότητας συμπληρωματική τεχνολογία ραδιοσυχνότητας (RF-radio frequency). Τα συστήματα οπτικής ασύρματης επικοινωνίας χρησιμοποιούν μήκη κύματος σε φάσμα υπερευθρών για επικοινωνία μεταξύ τους (IR) και φάσμα ορατού φωτός για μια ορατή επικοινωνία μέσω φωτός (VLC-visible light communication). Απρόσκοπτη ορατή, υπέρυθρη (IR) ή υπεριώδης (UV) φωτεινότητα για τη μεταφορά ενός σήματος χρησιμοποιείται γενικά σε επικοινωνία μικρής εμβέλειας.

Τα συστήματα OWC που λειτουργούν στην ορατή ζώνη (390-750 nm) αναφέρονται συνήθως ως επικοινωνία ορατού φωτός (VLC). Τα συστήματα VLC επωφελούνται από διόδους εκπομπής φωτός (LED) που μπορούν να είναι παλλόμενα σε πολύ υψηλές ταχύτητες χωρίς αισθητή επίδραση στην έξοδο φωτισμού και στο ανθρώπινο μάτι. Το VLC μπορεί ενδεχομένως να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων ασύρματων τοπικών δικτύων, ασύρματων δικτύων προσωπικής περιοχής και δικτύων οχημάτων μεταξύ άλλων. Από την άλλη πλευρά, τα επίγεια συστήματα point-to-point OWC, γνωστά και ως συστήματα ελεύθερου χώρου (FSO), λειτουργούν στις συχνότητες εγγύτητας IR (750-1600 nm). Αυτά τα συστήματα συνήθως χρησιμοποιούν πομπούς λέιζερ και προσφέρουν έναν οικονομικά αποδοτικό σύνδεσμο-διαφανή πρωτόκολλο με υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, δηλαδή 10 Gbit / s ανά μήκος κύματος και παρέχουν μια πιθανή λύση για τη συμφόρηση εκ των υστέρων.

Abstract

Optical communication is any form of telecommunication that uses light as a means of transmission. It came from very old years, at first in the form of a lighthouse but even earlier with the smoke signals which came from fire, to convey a message. Optical wireless communication (OWC-optical wireless communication) has evolved into a large capacity complementary radio frequency technology (RF radio frequency). Optical wireless communication systems use wavelengths in the infrared spectrum to communicate with each other (IR) and a visible light spectrum for a visible light communication (VLC- visible light communication). Seamless visible, infrared (IR) or ultraviolet (UV) brightness for the transmission of a signal is generally used in short-range communication.

Visible band OWC systems (390-750 nm) are commonly referred to as visible light communication (VLC). VLC systems benefit from light emitting diodes (LEDs) that can be pulsed at very high speeds without noticeable effect on the light output and the human eye. VLC can potentially be used in a wide range of applications, including wireless LANs, personal area wireless networks, and vehicle networks, among others. On the other hand, OWC point-to-point ground systems, also known as free space systems (FSO), operate at IR proximity frequencies (750-1600 nm). These systems typically use laser transmitters and offer a cost-effective link-transparent protocol with high data rates of 10 Gbit / s per wavelength and provide a possible solution for post-congestion.





1. Εισαγωγή	10
1.1 Εισαγωγικές Έννοιες	10
1.2 Ιστορική Αναδρομή	10
1.3 Βασικές Τηλεπικοινωνιακές Έννοιες	11
1.3.1 Βασικά Στοιχεία.	12
1.3.2 Αναλογικές και Ψηφιακές Έννοιες	14
1.3.3 Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα	14
1.3.4 Κανάλια Επικοινωνίας	15
1.3.5 Διαμόρφωση	17
1.4 Οπτικές Ίνες ως Τηλεπικοινωνιακό Μέσο	18
1.4.1 Πλεονεκτήματα οπτικής ίνας σε σχέση με τον χαλκό	20
2. Επικοινωνία με Ορατό Φως	22
2.1 Γενικά Στοιχεία	22
2.2 Ιστορική Αναδρομή	23
2.3 Συστήματα Τηλεπικοινωνιών	24
2.4 Λειτουργία VLC	28
2.4.1 Πομπός με λάμπες LED	28
2.4.2 Οπτικοί Ανιχνευτές	32
2.4.2.1 Είδη φωτοανιχνευτών	35
2.4.3 Κυκλώματα οδήγησης των LED	39

3. Μοντέλο Διάδοσης σε εσωτερικό χώρο41
4. Προσομοίωση της κάλυψης σε εσωτερικό χώρο46
4.1 Προσομοιώσεις για μικρότερες γωνίες FOV	50
4.2 Συμπεράσματα	53
5. Κώδικας MATLAB	55
6. Βιβλιογραφία	57

1^ο ΚΕΦΑΛΛΑΙΟ: ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

1.1 Εισαγωγικές Έννοιες

Η τηλεπικοινωνία είναι η μετάδοση σημάτων, μηνυμάτων, λέξεων, κειμένων, εικόνων, ήχων ή πληροφοριών οποιασδήποτε φύσης με καλώδιο, ραδιόφωνο, οπτικά ή άλλα ηλεκτρομαγνητικά συστήματα. Οι τηλεπικοινωνίες πραγματοποιούνται όταν η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των συμμεχόντων 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 που παρέχουν τα πλεονεκτήματα της πολυπλεξίας. (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 περιλάμβαναν οπτικά σήματα, όπως φάρους, σήματα καπνού, τηλεγραφικά σηματοφόρου, σημαίες σήματος και οπτικούς ηλιογράφους. Άλλα παραδείγματα προ-σύγχρονης επικοινωνίας μεγάλων αποστάσεων περιλάμβαναν ηχητικά μηνύματα όπως τα κωδικοποιημένα χτυπήματα με τύμπανα, τα κέρατα που φυσούσαν και τα δυνατά σφυρίγματα. Οι τεχνολογίες του 20^{ου} και 21^{ου} αιώνα για την επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων αφορούσαν συνήθως ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές τεχνολογίες, όπως τηλεγραφήματα, τηλεφωνήματα, ραδιόφωνο, την μετάδοση μικροκυμάτων, τις οπτικές ίνες και τους δορυφόρους επικοινωνιών (Walrand, 1997).

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Μια επανάσταση στην ασύρματη επικοινωνία ξεκίνησε την πρώτη δεκαετία του 20ου 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 κλάδο των ηλεκτρονικών τηλεπικοινωνιών ήταν ο Charles Wheatstone και ο Samuel Morse (εφευρέτες του τηλεγράφου), 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).

Το 1972 ο Claude Chappe, γάλος μηχανικός, δημιούργησε το πρώτο σύστημα σταθερής τηλεγραφίας με οπτική ορατότητα (ή γραμμή ναυτιλίας) μεταξύ Λίλ και Παρισίου. Ωστόσο, το σηματοφόρο υπέφερε από την ανάγκη για εξειδικευμένους χρήστες και ακριβούς πύργους σε ένα εύρος απόστασης από 10 έως 30 χιλιόμετρα (6 με 10 μίλια). Ως αποτέλεσμα του ανταγωνισμού από το ηλεκτρικό τηλεγράφημα, η τελευταία εμπορική γραμμή εγκαταστάθηκε το 1880.

Ο Sir Charles Wheatstone και ο Sir William Fothergill Cooke εφηύραν τον ηλεκτρικό τηλεγράφο το 1837. Και οι δυο εφευρέτες είδαν την συσκευή τους ως «βελτίωση του ήδη υπάρχοντος ηλεκτρομαγνητικού τηλεγράφου» και όχι ως μια απλή 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 την μέθοδο σηματοδότησης του Wheatstone. Το πρώτο διατλαντικό καλώδιο ολοκληρώθηκε με επιτυχία στις 27 Ιουλίου 1866, επιτρέποντας για πρώτη φορά την υπερωκεάνια τηλεπικοινωνία.

Το συμβατικό τηλέφωνο εφευρέθηκε ανεξάρτητα από τον Alexander Graham 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 ούτε ηλεκτροφωνικό αποτέλεσμα, συνεπώς απαιτούσε από τους χρήστες να τοποθετήσουν τον δέκτη σε κοντινή απόσταση από το στόμα τους για να ακούν τον αποστολέα. Οι πρώτες εμπορικές τηλεφωνικές υπηρεσίες δημιουργήθηκαν το 1878 και το 1879 στις δυο πλευρές του Ατλαντικού Ωκεανού και συγκεκριμένα στις πόλεις New Heaven και Λονδίνο

1.3 Βασικές Τηλεπικοινωνιακές Έννοιες

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

1.3.1 Βασικά Στοιχεία

Οι τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών μπορούν να διαιρεθούν σε ενσύρματες και ασύρματες τεχνολογίες. Γενικότερα όμως, ένα βασικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα αποτελείται από τρία βασικά μέρη

- Έναν πομπό που λαμβάνει πληροφορίες και τις μετατρέπει σε σήμα.
- Ένα μέσο μετάδοσης το οποίο ονομάζεται επίσης φυσικό κανάλι όπου και 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.

Για παράδειγμα, σε σταθμό ραδιοφωνικής μετάδοσης ο ενισχυτής του σταθμού είναι ο πομπός και η κεραία εκπομπής είναι η διασύνδεση μεταξύ του ενισχυτή ισχύος και του σταθμού είναι ο πομπός και η κεραία εκπομπής και η διασύνδεση μεταξύ του ενισχυτή ισχύος και του «ελεύθερου χώρου». Το κανάλι ελεύθερου χώρου είναι το μέσο μετάδοσης και η κεραία του δέκτη είναι η διεπαφή μεταξύ του καναλιού ελεύθερου χώρου και δέκτη. Στην συνέχεια ο ραδιοφωνικός δέκτης είναι ο προορισμός του ραδιοφωνικού σήματος και στο σημείο αυτό μετατρέπεται από ηλεκτρισμό σε ήχο για να λαμβάνει το σήμα ο δέκτης, κοινώς να ακούει φωνή ο άνθρωπος .

Σε ορισμένες περιπτώσεις τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι αμφίδρομα (αμφίδρομα τηλεπικοινωνιακά συστήματα), δηλαδή έχουμε μόνο μια ηλεκτρονική συσκευή που λειτουργεί τόσο ως πομπός ως και δέκτης (πομποδέκτης).

Οι τηλεπικοινωνίες μέσω σταθερών γραμμών ονομάζονται «επικοινωνία από σημείο σε σημείο», καθώς είναι μεταξύ ενός πομπού και ενός δέκτη. Οι τηλεπικοινωνίες μέσω ραδιοφωνικών εκπομπών ονομάζονται επικοινωνίες μετάδοσης καθώς η υλοποίηση τους γίνεται μέσω ενός ισχυρού πομπού και πολλαπλών 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, το οποίο δεν είναι άλλο από τα συστήματα πολλαπλών λειτουργιών. Η κατανομή των φυσικών καναλιών με την μεθοδολογική χρήση πολυπλεξίας συχνά δίνει πολύ μεγάλες μειώσεις το κόστος. 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 συστήματα επικοινωνίας μπορούν είτε με αναλογικά σήματα είτε με ψηφιακά συστήματα. Υπάρχουν συστήματα αναλογικών επικοινωνιών και συστήματα ψηφιακής επικοινωνίας. Για τα αναλογικά συστήματα, το σήμα μεταβάλλεται συνεχώς σε σχέση με την πληροφορία που μεταδίδεται, από την άλλη πλευρά σε ένα ψηφιακό σύστημα οι πληροφορίες κωδικοποιούνται ως ένα σύνολο διακεκριμένων τιμών. Κατά την διάρκεια της διάδοσης και της λήψης, οι πληροφορίες που περιέχονται σε αναλογικά σήματα αναπόφευκτα θα υποβαθμιστούν από ανεπιθύμητο φυσικό θόρυβο. Συνήθως ο θόρυβος αυτός 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 είτε θετικός είτε αρνητικός σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Ο θόρυβος που δεν είναι πρόσθετος είναι μια πολύ δυσνόητη κατάσταση για να περιγραφεί ή να αναλυθεί.

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

1.3.3 Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα

Ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο είναι μια συλλογή πομπών, δεκτών και καναλιών επικοινωνίας που ανταλλάζουν 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 δυο τύπους δικτύου, 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 τον θόρυβο. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των ψηφιακών συστημάτων σε σχέση με των αναλογικών είναι πως η έξοδος τους είναι ευκολότερη στην αποθήκευση μνήμης, δηλαδή δυο διαφορετικές καταστάσεις τάσης (χαμηλή και υψηλή) είναι ευκολότερο να αποθηκευτούν από μια συνεχή σειρά καταστάσεων (Στρουθόπουλος, 2008).

1.3.4 Κανάλια Επικοινωνίας

Ο όρος «κανάλι» έχει δυο διαφορετικές έννοιες. Στην πρώτη έννοια, ένα κανάλι επικοινωνίας 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 καθώς και τα ηλεκτρικά ρεύματα σε αυτά και ο ελεύθερος χώρος επικοινωνίας με ορατό φως, υπέρυθρα κύματα, υπεριώδες φως αλλά και ραδιοκύματα. Οι τύποι ομοαξονικών καλωδίων ταξινομούνται βάση τύπου RG ή «ραδιοφωνικός οδηγός» (ορολογία που προέρχεται από τον Β΄ 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 ένα μέρος σε ένα 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 είδους ατμοσφαιρικού αέρα.

Η άλλη έννοια του όρου «κανάλι» στις τηλεπικοινωνίες φαίνεται σε κανάλι επικοινωνίας φράσης, το οποίο είναι μια υποδιαίρεση ενός μέσου μετάδοσης έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταυτόχρονη αποστολή πολλαπλών ροών πληροφοριών. Παραδείγματος χάρη, ένας ραδιοφωνικός σταθμός μπορεί να μεταδώσει ραδιοκύματα σε ελεύθερο χώρο σε συχνότητες κοντά στα 94,5 MHz (megahertz), ενώ ένας άλλος ραδιοφωνικός σταθμός μπορεί να εκπέμπει ραδιοκύματα σε συχνότητες κοντά στα 96,1 MHz. Κάθε ραδιοφωνικός σταθμός θα μεταδίδει ραδιοκύματα σε ένα εύρος ζώνης συχνότητας περίπου στα 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, όπου η διαφορά μεταξύ των 200 kHz και 180 kHz (20kHz) είναι ένα επίδομα για τις ατέλειες στο σύστημα επικοινωνίας.

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

Ένας επιπλέον τρόπος διαίρεσης ενός μέσου επικοινωνίας στα κανάλια, είναι η κατανομή ενός επαναλαμβανόμενου τμήματος χώρου («χρονική θυρίδα». Για παράδειγμα 20 χιλιοστά του δευτερολέπτου από κάθε δευτερόλεπτο) σε κάθε αποστολέα, η οποία τους επιτρέπει να στέλνουν μηνύματα μόνο εντός της δικιάς τους χρονικής θυρίδας. Μια τέτοια μέθοδος διαίρεσης ονομάζεται

«πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου» (TDM) και χρησιμοποιείται στην επικοινωνία οπτικών ινών. Ορισμένα συστήματα ραδιοεπικοινωνιών χρησιμοποιούν την μέθοδο TDM εντός ενός διατιθέμενου καναλιού FDM. Ως εκ τούτου, τα συστήματα αυτά να χρησιμοποιούν ένα υβρίδιο TDM και FDM (Στρουθόπουλος, 2008).

1.3.5 Διαμόρφωση

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

Η διαμόρφωση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την 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 και ως φέρον σήμα) πριν από την 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 απλό παράδειγμα αυτής

της διαδικασίας είναι ότι η φωνή του του δίσκου εντυπώνεται σε ένα φέρον κύμα 96 MHz χρησιμοποιώντας διαμόρφωση συχνότητας (η φωνή θα ληφθεί στην συνέχεια από ένα ραδιόφωνο ως το κανάλι «96 FM»). Επιπρόσθετα η διαμόρφωση έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να χρησιμοποιεί πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM) (Στρουθόπουλος, 2008).

1.4 Οπτικές Ίνες ως Τηλεπικοινωνιακό Μέσο

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 καθώς το φως διαδίδεται μέσω των ινών με μικρή εξασθένηση σε σύγκριση με τα ηλεκτρικά καλώδια. Αυτό επιτρέπει την τηλεπικοινωνιακή διασύνδεση μεγάλων αποστάσεων με λίγους αναμεταδότες.

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

Κάθε ίνα μπορεί να μεταφέρει πολλά ανεξάρτητα κανάλια, καθένα από τα οποία χρησιμοποιεί διαφορετικό μήκος κύματος φωτός (WDM - πολυπλεξία διαχωρισμού μήκους κύματος – wavelength division multiplexing). Ο ρυθμός καθαρών δεδομένων ανά ίνα είναι ο ρυθμός δεδομένων είναι ο ρυθμός δεδομένων ανά κανάλι που μειώνεται από την διόρθωση σφαλμάτων προς τα εμπρός (FEC – forward error correction) ή αλλιώς η κωδικοποίηση διαύλων, πολλαπλασιαζόμενο με τον αριθμό των καναλιών

Για εφαρμογές μικρής απόστασης, όπως ένα δίκτυο σε ένα κτίριο γραφείων (FTTO – fiberto the office), η καλωδίωση οπτικών ινών μπορεί να μεταφέρει πολύ περισσότερα δεδομένα από τα συνηθισμένα καλώδια, όπως η τυπική καλωδίωση Ethernet κατηγορίας 5, η οποία λειτουργεί με ταχύτητες 100 Mbits/s ή 1 Gbits/s. Επιπλέον 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 το 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 του είναι πιο δύσκολη σε σύγκριση με τις ηλεκτρικές συνδέσεις.

Πλέον οι οπτικές ίνες συχνά χρησιμοποιούνται για συνδέσεις μικρών αποστάσεων μεταξύ συσκευών. Παραδείγματος χάριν οι περισσότερες τηλεοράσεις υψηλής ευκρίνειας προσφέρουν ψηφιακή οπτική σύνδεση. Αυτό επιτρέπει τη συνεχή ήχου μέσου φωτισμού, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο TOSLINK.



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

1.4.1 Πλεονεκτήματα της οπτικής ίνας σε σχέση με τον χαλκό

Τα πλεονεκτήματα της επικοινωνίας των οπτικών ινών σε σχέση με τον χαλκό είναι τα εξής (Wilson & Hawkes, 2004)

- Ευρύ εύρος ζώνης : Μία ενιαία οπτική ίνα μπορεί να μεταφέρει πάνω από 3 εκατ. φωνητικές κλήσεις πλήρους αμφίδρομης ή 90 χιλ. 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 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 έτσι

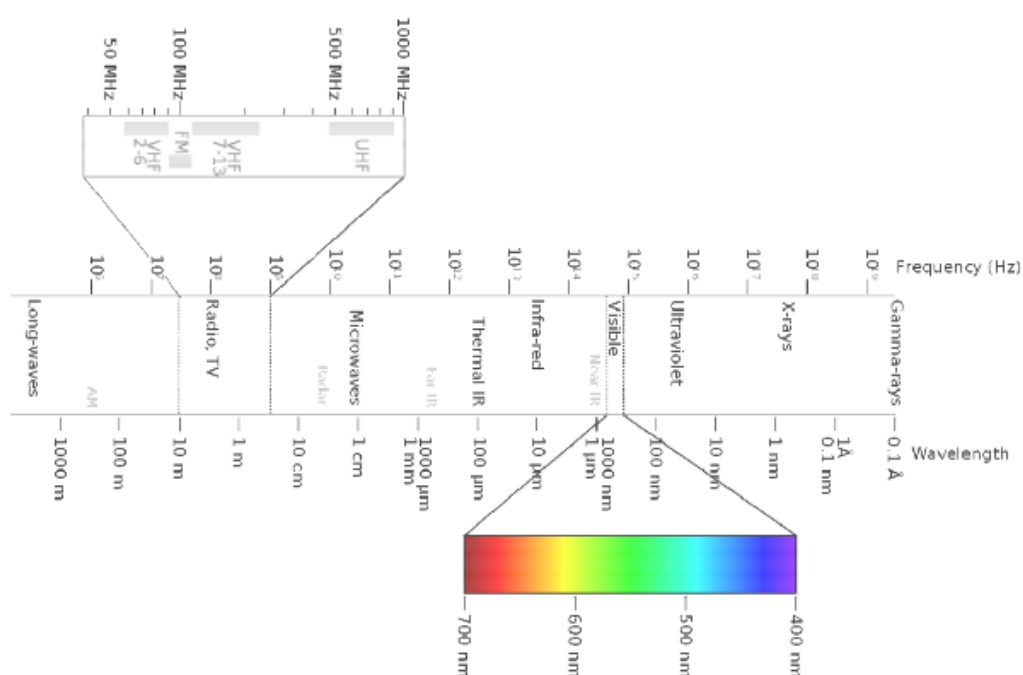
την μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς την ανάγκη επαναλήψεων.

- Υλικό κόστος & πρόληψη κλοπής : τα συμβατικά καλώδια συστήματα χρησιμοποιούν μεγάλες ποσότητες χαλκού. Οι παγκόσμιες τιμές χαλκού γνώρισαν μια έκρηξη στη δεκαετία του 2000 και ο χαλκός υπήρξε στόχος της κλοπής μετάλλων.
- Ηλεκτρικός μονωτήρας : οι οπτικές ίνες δεν λειτουργούν ηλεκτρική ενέργεια, αποτρέποντας με αυτόν τον τρόπο τα προβλήματα στους βρόχους γείωσης και διεξαγωγής κεραυνού. Οι οπτικές ίνες μπορούν να αρθρώσουν σε πόλους παράλληλα με καλώδια υψηλής τάσης.
- Χαμηλή απώλεια εξασθένησης σε μεγάλες αποστάσεις : Η απώλεια εξασθένησης μπορεί να είναι χαμηλή έως και τα 0,2 dB/km στα καλώδια οπτικών ινών, καθιστώντας εφικτή την μετάδοση μεγάλων αποστάσεων χωρίς επαναλήψεις.

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΕ ΟΡΑΤΟ ΦΩΣ

2.1 Γενικά Στοιχεία

Η επικοινωνία με ορατό φως (Visible Light Communication / VLC) είναι μια παραλλαγή επικοινωνίας δεδομένων η οποία χρησιμοποιεί φως μεταξύ 400 THz και 800 THz (375nm-780nm). Το VLC είναι ένα υποσύνολο οπτικών τεχνολογιών ασύρματων επικοινωνιών (Optical Wireless Communications / OWC) (Arnon, 2015).

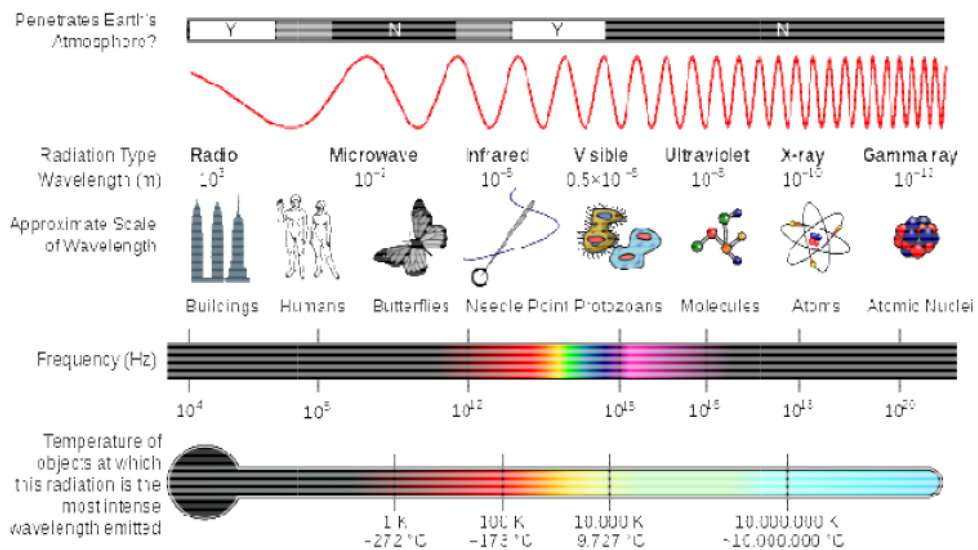


Σχήμα 2.1 : Το ορατό φως είναι μόνο ένα τμήμα του του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

[Το φως είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μέσα σε ένα ορισμένο τμήμα ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η λέξη συνήθως αναφέρεται στο ορατό φως το οποίο είναι το ορατό φάσμα στο ανθρώπινο μάτι και είναι υπεύθυνο για την αίσθηση της όρασης. Το ορατό φως ορίζεται συνήθως ως μήκος κύματος στην κλίμακα 400-700 νανόμετρα (nm), μεταξύ του υπέρυθρου και του υπεριώδους. Αυτό το μήκος κύματος σημαίνει εύρος συχνοτήτων περίπου μεταξύ 430-750 terahertz (THz).]

[Η οπτική ασύρματη επικοινωνία (OWC) είναι μια μορφή οπτικής επικοινωνίας στην οποία χρησιμοποιείται μη ορατό φως, υπέρυθρο (IR) ή υπεριώδες (UV) φως για την μεταφορά ενός σήματος.]

Η τεχνολογία χρησιμοποιεί λαμπτήρες φθορισμού (συνηθισμένους λαμπτήρες, όχι κάποια ειδική κατασκευή) για την μετάδοση σημάτων με ταχύτητα 10 Kbits/s ή με LED έως και 500 Mbits/s. Έχουν καταδειχθεί μεταδόσεις δεδομένων χαμηλού ρυθμού στα 1 και 3 χιλιόμετρα. Η οπτική επικοινωνία ελευθέρου χώρου RONSJA μπορεί να επιτυγχάνει πλήρη ταχύτητα Ethernet (10 Mbits/s) στην ίδια απόσταση χάρη στα μεγαλύτερα οπτικά συστήματα και τις ισχυρότερες λυχνίες LED. Ειδικά σχεδιασμένες ηλεκτρονικές κατασκευές που γενικά περιέχουν φωτοδίοδο 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 κατασκευές είναι στην πραγματικότητα μια σειρά φωτοδοτών (εικονοστοιχεία) και σε μερικές εφαρμογές η χρήση του μπορεί να προτιμάται μόνο σε μια φωτοδίοδο. Ένας τέτοιος αισθητήρας μπορεί να παρέχει είτε ένα πολυκαναλικό μέχρι ένα εικονοστοιχείο (=1 κανάλι) είτε μια συνειδητοποίηση των πολλαπλών φωτεινών πηγών (Arnon,2015).

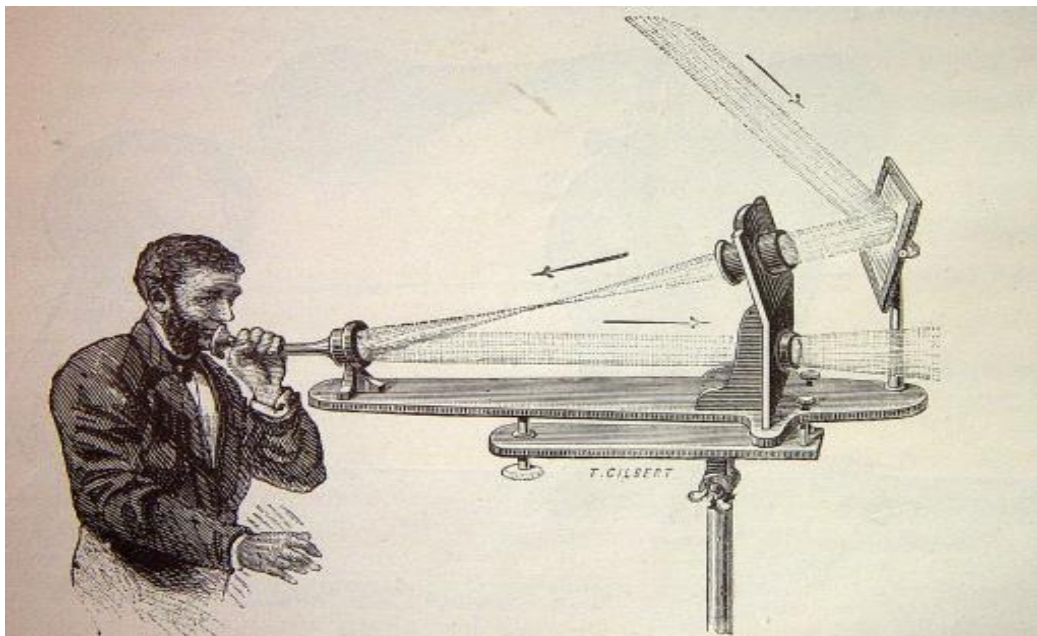


Σχήμα 2.2 : Διάγραμμα ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, παρουσιάζοντας διάφορες ιδιότητες σε όλο το φάσμα συχνοτήτων και των μηκών κύματος

Το VLC μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο επικοινωνίας στην Ubiquitous computing (ubicomp), δηλαδή στην σύνδεση στο διαδίκτυο παντού και με οπουδήποτε συσκευή, καθώς χρησιμοποιούνται παντού συσκευές που παράγουν φως (π.χ. εσωτερικοί / εξωτερικοί λαμπτήρες, τηλεοράσεις, πινακίδες κυκλοφορίας, εμπορικές οθόνες και προβολείς / φανάρια αυτοκίνητου). Επιπλέον η χρήση ορατού φως είναι λιγότερο επικίνδυνη για εφαρμογές υψηλής ισχύος επειδή οι άνθρωποι μπορούν να δράσουν και να προστατέψουν τα μάτια τους από ζημίες μόλις το αντιληφθούν.

2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η ιστορία των επικοινωνιών με ορατό φως (VLC) χρονολογείται από την δεκαετία του 1880 στην Ουάσιγκτον, όταν ο σκωτσέζος επιστήμονας Alexander Graham Bell εφηύρε το φωτόφωνο (Εικόνα 2.1), το οποίο μεταδίδει ομιλία σε διαμορφωμένο ηλιακό φως σε αρκετές εκατοντάδες μέτρα. Αυτό προετοιμάζει την μετάδοση της ομιλίας μέσω ραδιοφώνου (Blauenstein, Arnon, Korieika & Zilberman 2009).



Εικόνα 2.1 : Απεικόνιση ενός πομπού φωτόφωνου, διαδρομή ανακλώμενου φωτός πριν και μετά την διαμόρφωση από τον Alexander Graham Bell

Πρόσφατες εργασίες ξεκίνησαν το 2003 στο εργαστήριο Nakagawa στο Keio University της Ιαπωνίας χρησιμοποιώντας LED για την μετάδοση δεδομένων με ορατό φως. Ένα πρωτότυπο VLC είχε παρουσιαστεί από τρεις προπτυχιακούς φοιτητές του πανεπιστημίου Universidad de Buenos Aires το 1995 καταφεύγοντας έτσι στην διαμόρφωση εύρους μιας διόδου λείζερ 532 nm των 5 mW και ανιχνευτή φωτοδίοδων. Από τότε έχουν διεξαχθεί πολυάριθμες ερευνητικές δραστηριότητες με επίκεντρο το VLC.

Το 2006 οι ερευνητές από την CICTR στο Penn State πρότειναν ένα συνδυασμό επικοινωνίας γραμμής ισχύος (Power-line communication / PLC) και LED λευκού χρώματος φως 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.

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

Η διαδικασία τυποποίησης VLC διεξάγεται μέσα στην ομάδα εργασίας IEEE Wireless Personal Area Network (802.15).

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

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

Η επικοινωνία γραμμής ισχύος (PLC) μεταφέρει δεδομένα σε έναν αγωγό ο οποίος χρησιμοποιείται ταυτόχρονα για ηλεκτρική μετάδοση εναλλασσόμενου ρεύματος ή για διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, ψηφιακής γραμμής συνδρομητή (PDSL), Mains επικοινωνία, power lines τηλεπικοινωνιών, ή δικτύωση γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας (PLN)

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 «indoor location market/αγοράς εσωτερικών χώρων» αξίας πέντε δισεκατομμυρίων δολαρίων. Για το Byte Light 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 δεδομένων. Επιπλέον οργανικά LED (OLED) έχουν χρησιμοποιηθεί ως πομποδέκτες για την δημιουργία συνδέσεων επικοινωνίας VLC έως και 10Mbits/s. Τον Οκτώβριο του 2014, η Axterk ξεκίνησε ένα εμπορικό αμφίδρομο σύστημα RGB LED VLC που ονομάζεται MOMO και το οποίο μεταδίδει προς τα πάνω και κάτω ταχύτητες 300 Mbits/s και με εύρος 25 ποδιών.

Τον Μάιο του 2015 η Philips συνεργάστηκε με την εταιρεία των σούπερ μάρκετ Carrefour για την παροχή υπηρεσιών VLC βάσει τοποθεσίας σε smartphone αγοραστών σε υπεραγορά στην Λιλ της Γαλλίας. Τον Ιούνιο της ίδιας χρονιάς δυο κινέζικες εταιρίες η Kuang-Chi και η PinhAn Bank συνεργάστηκαν για την εισαγωγή μιας κάρτας πληρωμών που μεταδίδει πληροφορίες μέσω ενός μοναδικού ορατού φωτός. Τον Μάρτιο του 2017 η Philips πάλι δημιούργησε τις πρώτες υπηρεσίες που βασίζονταν στην εγκατάσταση VLC σε smartphones στην Γερμανία. Η εγκατάσταση αυτή παρουσιάστηκε στο Euro Shop στο Ντίσελντορφ. Το πρώτο σούπερ μάρκετ της Edeka στην ίδια πόλη της Γερμανίας χρησιμοποιεί το σύστημα και προσφέρει ακρίβεια τοποθέτησης 30 εκατοστών ικανοποιώντας έτσι τις ιδιαίτερες απαιτήσεις της λιανικής πώλησης τροφίμων. Τα συστήματα εσωτερικής τοποθέτησης τα οποία είναι βασισμένα στο VLC μπορούν να

χρησιμοποιηθούν σε χώρους όπως νοσοκομεία, οίκοι ευγηρίας, αποθήκες και μεγάλα ανοιχτά γραφεία για τον εντοπισμό ατόμων και τον έλεγχο εσωτερικών ρομποτικών οχημάτων (Ullah Khan, 2017).

2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Με το Visible Light Communication σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα καλύπτονται ταυτόχρονα και οι ανάγκες φωτισμού αλλά και η μεταφορά δεδομένων εσωτερικών και εξωτερικών χώρων. Στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων η γρήγορη μεταφορά πληροφοριών έχει γίνει αδιαπραγμάτευτη ανάγκη και δυνατότητα. Συχνά οι άνθρωποι έρχονται σε επαφή στην εργασία τους ή στον ελεύθερο τους 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 γεγονότων και συναλλαγών και λήψη πληροφοριών για διάφορες εξελίξεις οπουδήποτε στον κόσμο (Σεργιάδης, Αλεξιάδης, Βασιλειάδης & Βλάχος, 2015).

Καθίσταται σαφές από τα παραπάνω ότι δύσκολα σήμερα μπορεί κανείς έναν κόσμο χωρίς τηλέφωνο, διαδίκτυο και τηλεόραση. Το πιο σπουδαίο παρόλα αυτά είναι ότι τα σημερινά μέσα και συστήματα 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 πληροφορίας. Το VLC το οποίο ανήκει σε μια μεγαλύτερη κατηγορία τηλεπικοινωνιών μέσων, τις Οπτικές Επικοινωνίες Ελεύθερου Χώρου (Free Space Communication), αποτελεί το αποτέλεσμα αυτής της συνεχούς αναζήτησης.

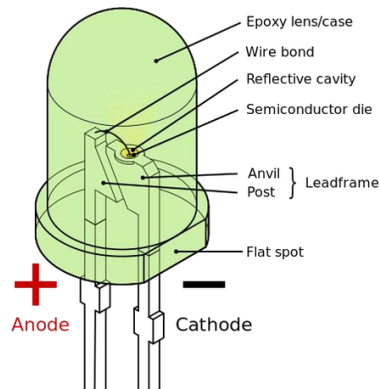
2.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ VLC

Αν κανείς ήθελε να περιγράψει σύντομα τον τρόπο που γίνεται η μετάδοση στην τεχνολογία VLC θα έλεγε τα εξής. Ο πομπός πρόκειται για μια λάμπα φωτισμού τύπου LED, ή και περισσότερες όπου η ένταση του φωτός εναλλάσσεται τόσο γρηγορά που το ανθρώπινο μάτι δεν μπορεί να αντιληφθεί. Η εναλλαγή αυτή γίνεται μεταξύ δύο επιπέδων, ένα υψηλής και ένα χαμηλής φωτεινότητας. Τα δύο αυτά επίπεδα αντιστοιχίζονται στο 0 και στο 1 που αντιλαμβάνονται οι συσκευές. Το κανάλι μετάδοσης; Είναι πολύ απλά το περιβάλλον μεταξύ πομπού και δέκτη (αέρας η νερό η διάστημα κλπ). Μια ή και παραπάνω φωτοδίοδοι αποτελούν τον δέκτη οι οποίες είτε είναι μέρος της συσκευής που χρησιμοποιείται είτε συνδέεται με αυτή εξωτερικά. Οι φωτοδίοδοι είναι υπεύθυνες για την μετατροπή της έντασης του φωτός σε ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο με τη σειρά του ενισχύεται και επεξεργάζεται από την συσκευή λήψης ώστε να γίνει αντιληπτή η πληροφορία που στάλθηκε. Το VLC αποτελεί μια σχετικά πρόσφατη τηλεπικοινωνιακή διάταξη. Το 2003 στο πανεπιστήμιο Keio της Ιαπωνίας έγινε η πρώτη καταγεγραμμένη και ολοκληρωμένη μελέτη.

2.4.1 ΠΟΜΠΟΣ ΜΕ ΛΑΜΠΕΣ LED

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

Το LED αποτελείται από μια επαφή p-n ημιαγωγού ο οποίος εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία στενού φάσματος όταν του παρέχεται μια ηλεκτρική τάση κατά τη φορά ορθής πόλωσης (forward biased). χρώμα του εκπεμπόμενου φωτός. Για να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας θα ξεκινήσουμε αναφέροντας κάποια βασικά στοιχεία για την επαφή p-n.



Εικόνα 2.2 : Δίοδος LED

Μία επαφή p-n σχηματίζεται από μια περιοχή τύπου p και μια περιοχή τύπου n στον ίδιο κρύσταλλο. Στην επαφή εμφανίζεται ένα λεπτό στρώμα το οποίο ουσιαστικά δεν έχει ελεύθερους φορείς (οπές ή ηλεκτρόνια), λόγω της μεταξύ τους επανασύνδεση και χαρακτηρίζεται ως στρώμα αραίωσης ή περιοχή αραίωσης (depletion layer). Στην περιοχή αραίωσης εμφανίζονται φορτία χώρου και αυτό οδηγεί σε ένα φράγμα δυναμικού το οποίο δεν επιτρέπει τη διάχυση των φορέων πλειονότητας. Στην απουσία εξωτερικής τάσης δεν υπάρχει καθαρή ροή φορέων από τη μία περιοχή στην άλλη.

Όταν το LED πολωθεί ορθά τότε διευκολύνεται η ροή ηλεκτρονίων από την περιοχή n και των οπών από την περιοχή p και συνεπώς αναπτύσσεται ροή ρεύματος διαμέσου της επαφής. Η περιοχή αραίωσης περιορίζεται και το ίδιο συμβαίνει και με το φράγμα δυναμικού. Λόγω της έγχυσης φορέων υπάρχουν ηλεκτρόνια στην κανονικά άδεια ζώνη αγωγιμότητας της περιοχής p όπως επίσης και οπές στην κανονικά άδεια ζώνη σθένους της περιοχής n. Οι οπές και τα ηλεκτρόνια επανασυνδέονται στην περιοχή της επαφής απελευθερώνοντας ενέργεια ίση με E_g . Αυτή η ποσότητα είναι γνωστή και ως ενεργειακό χάσμα των υλικών. Αυτή η απελευθέρωση ενέργειας μπορεί να χαρακτηριστεί ως μη ακτινοβολούσα όταν το ποσό αυτό χάνεται ως θερμότητα, μπορεί όμως να χαρακτηριστεί και ως ακτινοβολούσα ενέργεια εάν η επανασύνδεση απελευθερώσει ένα φωτόνιο με ενέργεια ίση με:

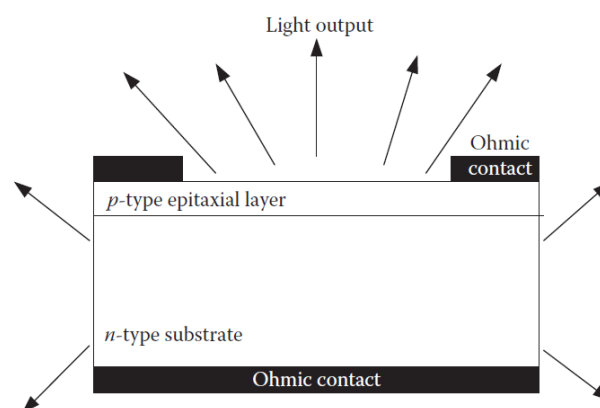
$$E_g = hf = hc/\lambda$$

Από την σχέση αυτή γίνεται αντιληπτό ότι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και άρα το μήκος κύματος λειτουργίας του LED κατά συνέπεια και το χρώμα του, εξαρτάται από τα υλικά που έχουν συνθέσει την επαφή p-n και πιο συγκεκριμένα από το ενεργειακό χάσμα που ορίσαμε παραπάνω. Το μήκος κύματος λοιπόν μπορεί να ανήκει στο υπέρυθρο, το υπεριώδες ή το ορατό κομμάτι του φωτός στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Η εκπομπή φωτός γίνεται κυρίως κοντά στην επαφή αν και επανασυνδέσεις μπορούν να λάβουν χώρα σε ολόκληρη τη δίοδο καθώς οι φορείς διαχέονται μακριά από την επαφή. Τα LED είναι πιο αποδοτικά σε σχέση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως από την άποψη ότι μεγαλύτερο ποσοστό από τις επανασυνδέσεις που πραγματοποιούνται είναι ακτινοβολούσες και λιγότερο ποσοστό χάνεται ως θερμότητα.

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε κάποιες βασικές κατηγορίες LED το επίπεδο και το LED θόλου (dome LED) και το LED εκπομπού ακμής.

A) Επίπεδο LED

Όσον αφορά το επίπεδο LED, το οποίο βλέπουμε στην εικόνα 2.3 μπορούμε να πούμε ότι αποτελεί την πιο απλή μορφή LED.



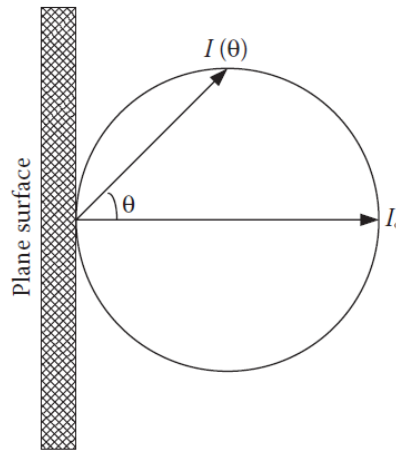
Εικόνα 2.3. Επίπεδο LED

Όταν το διεγείρουμε κάτω από συνθήκες ορθής πόλωσης δίνει μια Lambertian κατανομή φωτός. Αυτό σημαίνει ότι η πηγή είναι το ίδιο φωτεινή όταν παρατηρείται από οποιαδήποτε διεύθυνση. Η ισχύς που αποδίδεται στη γωνία θ μετράται από την κάθετο στην

εκπέμπουσα επιφάνεια , μεταβάλλεται συνημιτονοειδώς. Άρα για την Lambertian πηγή ισχύει:

$$I(\theta, \varphi) = I_0 \cdot \cos(\theta)$$

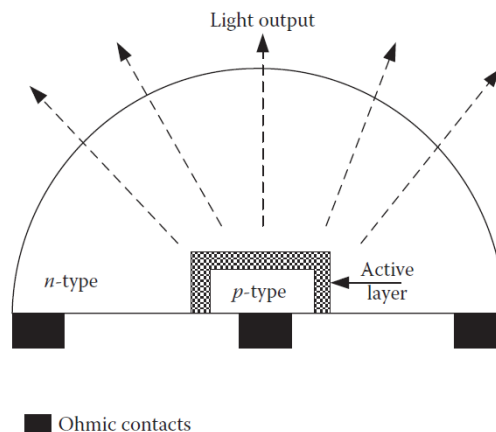
Αυτό μπορεί να γίνει φανερό και από την παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.4 Lambertian πηγή

B) LED θόλου

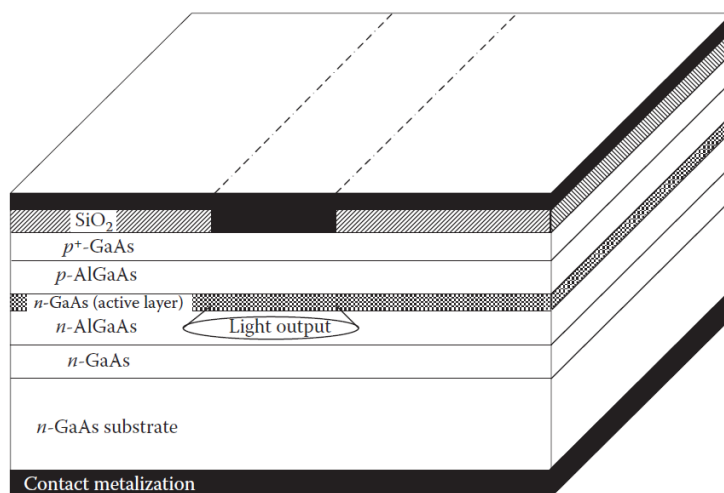
Η δομή ενός dome LED παρουσιάζεται στην εικόνα 2.5. Όπως μπορούμε να δούμε η περιοχή η έχει ημισφαιρικό σχήμα και περιβάλλει την περιοχή τύπου p. Η γεωμετρία του θόλου επιλέγεται έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η εξωτερική εκπομπή, η οποία είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτή ενός επίπεδου LED.



Εικόνα 2.5 LED θόλου

Γ) LED εκπομπού ακμής

Το LED εκπομπού ακμής αποτελεί μια σημαντική ασύμφωνη πηγή για οπτικές επικοινωνίες. Χρησιμοποιεί μια γεωμετρία ταινίας, όπως μπορεί να διαπιστωθεί και στην εικόνα 2.6, ενώ τυπικές τιμές για τη γωνιακή απόκλιση της δέσμης είναι 30° στο κάθετο στην επαφή επίπεδο και 120° στο παράλληλο με την επαφή επίπεδο.



Εικόνα 2.6 LED εκπομπού ακμής

Το φως εκπέμπεται κυρίως από το ένα άκρο της πηγής με την τοποθέτηση ενός ανακλαστήρα στο άλλο άκρο και με την τοποθέτηση ενός αντιανακλαστικού επιστρώματος στο άκρο της εκπομπής.

2.4.2 ΟΠΤΙΚΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ

Ο οπτικός ανιχνευτής μετατρέπει το λαμβανόμενο οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο ακολούθως ενισχύεται ηλεκτρικά και οδηγείται προς επεξεργασία. Στην περίπτωση του VLC και γενικά των οπτικών επικοινωνιών ο προτιμώμενος τύπος οπτικού ανιχνευτή είναι η φωτοδίοδος. Πρώτου εξετάσουμε τους δύο τύπους φωτοδιόδων, είναι χρήσιμο να αναφερθούμε στην οπτική ανίχνευση και πιο συγκεκριμένα στη βασική διαδικασία ανίχνευσης φωτός σε μια επαφή p-n. Η επαφή αυτή όταν είναι ανάστροφα πολωμένη, το ηλεκτρικό πεδίο σαρώνει τους φορείς κινητικότητας (οπές και ηλεκτρόνια) στην αντίστοιχη πλευρά πλειονότητας (p και n). Στην περιοχή της επαφής σχηματίζεται

το στρώμα της αραίωσης, το οποίο και σταματά τους φορείς πλειονότητας από το να διασχίσουν την επαφή. Αντίθετα, φορείς μειονότητας επιταχύνονται και διασχίζουν την επαφή συνιστώντας το ρεύμα διαρροής ανάστροφης πόλωσης. Εάν ένα φωτόνιο προσπέσει στην περιοχή αραίωσης ή κοντά σε αυτήν και έχει ενέργεια μεγαλύτερη από αυτή του διακένου του υλικού, τότε θα διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο από τη στοιβάδα σθένους στη στοιβάδα της αγωγιμότητας. Η διαδικασία αυτή ταυτόχρονα αφήνει μια οπή στη στοιβάδα σθένους και είναι γνωστή ως φωτογένεση (photogeneration) ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής. Το ζεύγος που δημιουργείται κοντά στην επαφή διαχωρίζεται και οι φορείς ολισθαίνουν κάτω από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου με αποτέλεσμα να εμφανίζεται στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα ένα ρεύμα καθ' υπέρβαση του ανάστροφου ρεύματος διαρροής. Το ηλεκτρικό αυτό ρεύμα ονομάζεται φωτόρρευμα. Η περιοχή αραίωσης θα πρέπει να έχει σχετικά μεγάλο πάχος έτσι ώστε να απορροφά μεγάλο ποσοστό του προσπίπτοντος φωτός επιτυγχάνοντας τη μέγιστη δυνατή γένεση ζευγών φορέων. Δυστυχώς, αύξηση του πάχους της περιοχής αραίωσης έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος ολίσθησης για τους φορείς, με συνέπεια τον περιορισμό της ταχύτητας λειτουργίας της φωτοδιόδου. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ευαισθησία (δηλαδή ο αριθμός των φωτονίων που απορροφώνται) και η ταχύτητα απόκρισης είναι δύο απαιτήσεις που δεν μπορούν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα. Στη συνέχεια θα ορίσουμε κάποια μεγέθη τα οποία αφορούν τις φωτοδιόδους.

A) Συντελεστής απορρόφησης φωτός και φωτόρρευμα

Η απορρόφηση φωτονίων από έναν ημιαγωγό η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη φωτογένεση και την εμφάνιση του φωτορρεύματος περιγράφεται από ένα συντελεστή απορρόφησης α_0 , ο οποίος χαρακτηρίζει τον ημιαγωγό της διάταξης. Για συγκεκριμένο μήκος κύματος και υποθέτοντας απευθείας μεταβάσεις στο διάκενο έχει δειχθεί ότι το φωτόρρευμα δίνεται από τη σχέση:

$$I_p = \frac{P_0 e (1-r)}{hf} [1 - e^{-\alpha_0 d}]$$

Σε αυτή τη σχέση r είναι ο συντελεστής ανάκλασης ισχύος Fresnel στη διαχωριστική επιφάνεια αέρα/ημιαγωγού, P_0 η προσπίπτουσα οπτική ισχύς και d είναι το πάχος της περιοχής απορρόφησης. Ο συντελεστής απορρόφησης έχει ισχυρή εξάρτηση από το μήκος κύματος.

Β) Κβαντική αποδοτικότητα και Συντελεστής απόκρισης

Ως κβαντική αποδοτικότητα ορίζουμε το κλάσμα του οποίου ο αριθμητής είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που συλλέγονται στους ακροδέκτες της φωτοδιόδου και ο παρονομαστής είναι ο αριθμός των φωτονίων που προσπίπτουν.

$$\eta = \frac{r_e}{r_p}$$

Το μέγεθος το οποίο μας απασχολεί περισσότερο διότι χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό της φωτοδιόδου στη μελέτη ενός οπτικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι ο συντελεστής απόκρισης (responsivity) R ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του dc φωτόρρέυματος I_p προς την continuous wave προσπίπτουσα οπτική ισχύ P_0 . Άρα:

$$R = \frac{I_p}{P_0}$$

Είναι φανερό ότι ο συντελεστής απόκρισης εξαρτάται από την κβαντική αποδοτικότητα. Ο ρυθμός των φωτονίων που προσπίπτουν (φωτόνια

ανα μονάδα χρόνου) είναι ίσος με $r_p = \frac{P_0}{hf}$ ενώ από τον ορισμό της

κβαντικής αποδοτικότητας έχουμε $r_e = \eta r_p = \eta \frac{P_0}{hf}$ και τελικά το

φωτόρρευμα εξόδου μπορεί να εκφραστεί ως εξής $I_p = \eta \frac{P_0 e}{hf}$.

Διαιρώντας με την προσπίπτουσα οπτική ισχύ έχουμε το κλάσμα ορισμού του συντελεστή απόκρισης το οποίο διαμορφώνεται τελικά ως εξής:

$$R = \frac{\eta e}{hf} = \frac{\eta e \lambda}{hc}$$

Σε αυτή τη σχέση φαίνεται ότι ο συντελεστής R είναι ευθέως ανάλογος της κβαντικής αποδοτικότητας σε κάποιο συγκεκριμένο μήκος κύματος.

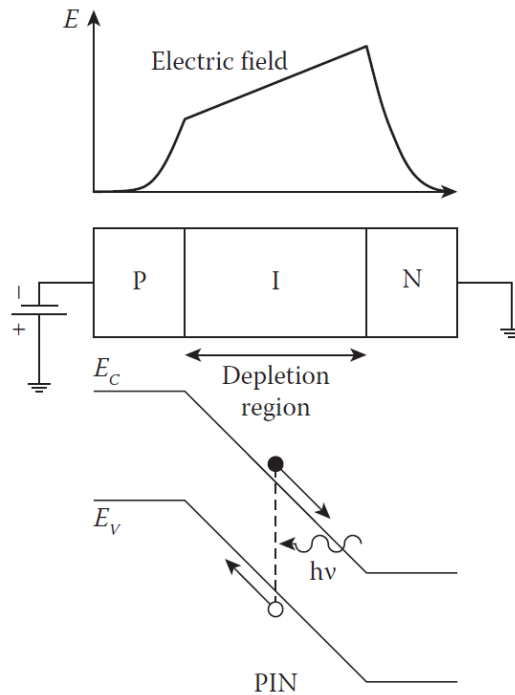
2.4.2.1 ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιάσουμε τις δυο κατηγορίες φωτοδίοδων της οποίες θα διαχωρίσουμε ως φωτοδιόδους χωρίς και με εσωτερικό κέρδος.

A) Φωτοδιόδοι χωρίς εσωτερικό κέρδος - PIN φωτοδιόδοι

Ένας φωτοανιχνευτής χωρίς εσωτερικό κέρδος παράγει ένα και μόνο ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής για κάθε φωτόνιο που απορροφάται. Έχουμε ήδη περιγράψει το σχηματισμό της περιοχής αραίωσης σε μια επαφή p-n καθώς και το μηχανισμό οπτικής ανίχνευσης. Ο τελευταίος περιλαμβάνει τη φωτογένεση, το διαχωρισμό τους ζεύγους ηλεκτρονίου οπής και την ολίσθηση των δύο φορέων προς τις πλευρές πλειονότητας κάτω από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου. Το εύρος της περιοχής αραίωσης εξαρτάται από το επίπεδο των προσμίξεων για ένα συγκεκριμένο ύψος ανάστροφης πόλωσης, με χαμηλότερα επίπεδα προσμίξεων να αντιστοιχούν σε ευρύτερες περιοχές αραίωσης. Η απορρόφηση του φωτονίου μπορεί να γίνει στην περιοχή αραίωσης ή στην περιοχή διάχυσης. Εάν το ζεύγος οπής-ηλεκτρονίου σχηματισθεί στην περιοχή διάχυσης τότε η οπή θα πρέπει να διαχυθεί προς την περιοχή της αραίωσης πριν να συλλεγεί. Ο μηχανισμός της διάχυσης είναι πολύ αργός σε σχέση με τον μηχανισμό της ολίσθησης με αποτέλεσμα να περιορίζει την ταχύτητα απόκρισης της φωτοδίοδου. Είναι δηλαδή σημαντικό τα φωτόνια να απορροφώνται στην περιοχή αραίωσης και άρα η τελευταία θα πρέπει να έχει κατά το δυνατόν μεγάλο εύρος, πράγμα το οποίο επιτυγχάνεται μειώνοντας το ντόπινγκ του υλικού n.

Η δίοδος PIN έχει περιοχή n με τόσο ελαφρύ ντόπινγκ που μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν ως intrinsic περιοχή (τύπου i) [3]. Προκειμένου βέβαια να έχει κανείς μια επαφή χαμηλής αντίστασης προστίθεται ένα στρώμα με ισχυρό ντόπινγκ τύπου n όπως φαίνεται στην εικόνα 2.7. Στη διάταξη της εικόνας 2.7 όλη η απορρόφηση λαμβάνει χώρα στην περιοχή αραίωσης.

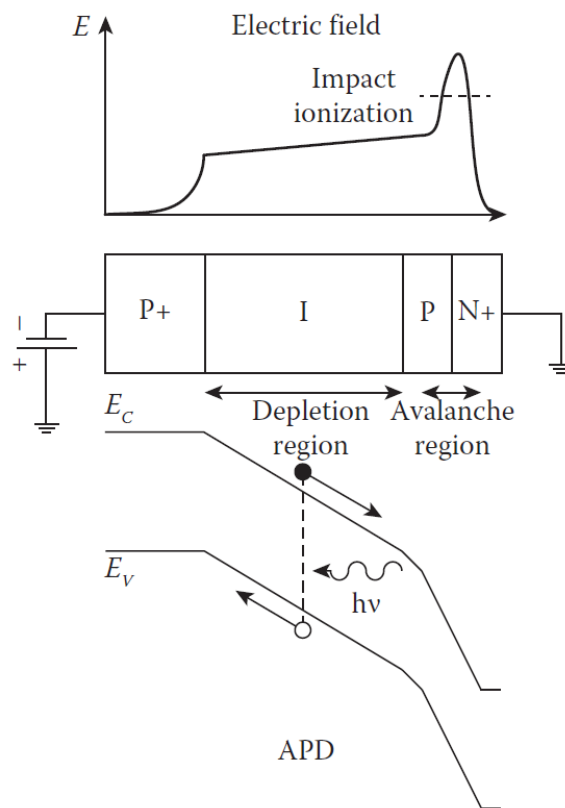


Εικόνα 2.7 PIN φωτοδίοδος σε ανάστροφη πόλωση

B) Φωτοδίοδοι με εσωτερικό κέρδος – Φωτοδίοδοι χιονοστιβάδας

Ο δεύτερος τύπος οπτικού ανιχνευτή για οπτικές επικοινωνίες είναι η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας (avalanche photodiode, APD). Μια φωτοδίοδος χιονοστιβάδας πολλαπλασιάζει εσωτερικά το πρωτογενές φωτόρρευμα, πριν αυτό εισέλθει στο κύκλωμα του ενισχυτή που ακολουθεί. Αυτό αυξάνει γενικά την ευαισθησία του δέκτη αφού το φωτόρρευμα ενισχύεται (ή αλλιώς πολλαπλασιάζεται) πριν υποστεί τις συνέπειες του θερμικού θορύβου που εισάγει το κύκλωμα του δέκτη. Η λειτουργία αυτού του τύπου ανιχνευτή απαιτεί μια περιοχή πολύ ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου της τάξης των $3 \cdot 10^5$ V/cm. Τα ζεύγη των φορέων που δημιουργούνται κατά τη φωτογένεση επιταχύνονται σημαντικά κάτω από την επίδραση του ισχυρού πεδίου με αποτέλεσμα να αποκτήσουν αρκετή ενέργεια ώστε να διεγείρουν νέα ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων. Ο μηχανισμός αυτός δημιουργίας νέων φορέων είναι γνωστός ως ιονισμός συγκρούσεων και βέβαια οι νέοι φορείς επίσης επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο οδηγώντας στη δημιουργία επιπρόσθετων φορέων σε ένα φαινόμενο χιονοστιβάδας. Το φαινόμενο

αυτό είναι το ίδιο που οδηγεί στην καταστροφή ή κατάρρευση χιονοστιβάδας σε μια συνήθη δίοδο που πολώνεται ανάστροφα. Συχνά οι οπτικοί ανιχνευτές αυτής της κατηγορίας απαιτούν ανάστροφες τάσεις πόλωσης στην περιοχή των 50-400V, πράγμα το οποίο δεν είναι ιδιαίτερα πρακτικό, όμως τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανισθεί κατάλληλα σχεδιασμένες διατάξεις που απαιτούν πολύ χαμηλότερες τάσεις στην περιοχή των 20V για παράδειγμα. Σε πρακτικές υλοποιήσεις είναι σημαντικό η διαδικασία χιονοστιβάδας να κυριαρχείται μόνον από ένα τύπο φορέων.



Εικόνα 2.8 APD φωτοδίοδος

Συντελεστές πολλαπλασιασμού της τάξης του 10^4 μπορούν να επιτευχθούν σε υλικά υψηλής ποιότητας. Για λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες απαιτείται πλήρης αραίωση της περιοχής απορρόφησης, δεδομένου ότι οι φορείς που σχηματίζονται εκτός της περιοχής αραίωσης συλλέγονται αργά από το μηχανισμό της διάχυσης. Πλήρης αραίωση σε φωτοδιόδους χιονοστιβάδας επιβάλλει ηλεκτρικά πεδία της τάξης του 10^6 V/cm και τότε όλοι οι φορείς κινούνται με τις ταχύτητες

κορεσμού τους. Κάτω από τις συνθήκες αυτές η ταχύτητα απόκρισης θα περιορίζεται από τους επόμενους 3 παράγοντες:

- Χρόνος που απαιτείται από τους φορείς για να διασχίσουν την περιοχή απορρόφησης (που πρακτικά είναι η ίδια με την περιοχή αραίωσης).
- Χρόνος που απαιτείται από τους φορείς για να εκτελέσουν τη διαδικασία πολλαπλασιασμού
- Την RC σταθερά χρόνου λόγω της χωρητικότητας της επαφής και του φορτίου (κύκλωμα δέκτη).

Εάν το κέρδος είναι χαμηλό τότε ο χρόνος διάβασης και η RC σταθερά χρόνου κυριαρχούν στην ταχύτητα απόκρισης και άρα στο εύρος ζώνης της διάταξης. Εάν η διάταξη χρησιμοποιηθεί με υψηλό κέρδος τότε ο χρόνος που απαιτείται για τον πολλαπλασιασμό χιονοστιβάδας των φορέων κυριαρχεί με αποτέλεσμα το εύρος ζώνης να ελαττώνεται με την αύξηση του κέρδους. Γενικά σε μια φωτοδίοδο χιονοστιβάδας το γινόμενο κέρδους επί εύρος ζώνης είναι σταθερό.

Συνήθως η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας χαρακτηρίζεται από ένα μέτρο του εσωτερικού κέρδους το οποίο ονομάζεται συντελεστής πολλαπλασιασμού και ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$M = I/I_p$$

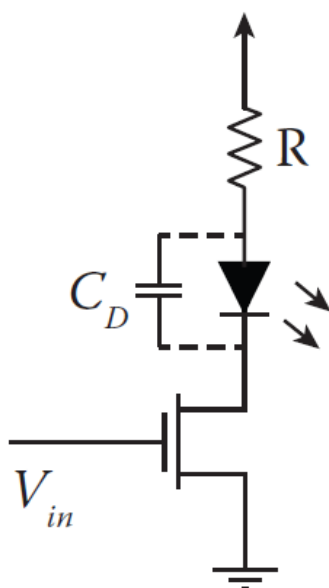
Όπου ως I συμβολίζεται το συνολικό ρεύμα εξόδου, ενώ ο παρονομαστής είναι το αρχικό ή πρωτογενές φωτόρρευμα, πριν δηλαδή επενεργήσει ο μηχανισμός πολλαπλασιασμού. Ο συντελεστής απόκρισης που εμφανίζεται πολλαπλασιαζόμενος επί M σε μια φωτοδίοδο χιονοστιβάδας ορίζεται ως:

$$R = \frac{I}{P_0} = \frac{\eta e \lambda}{hc} M$$

2.4.3 ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΤΩΝ LED

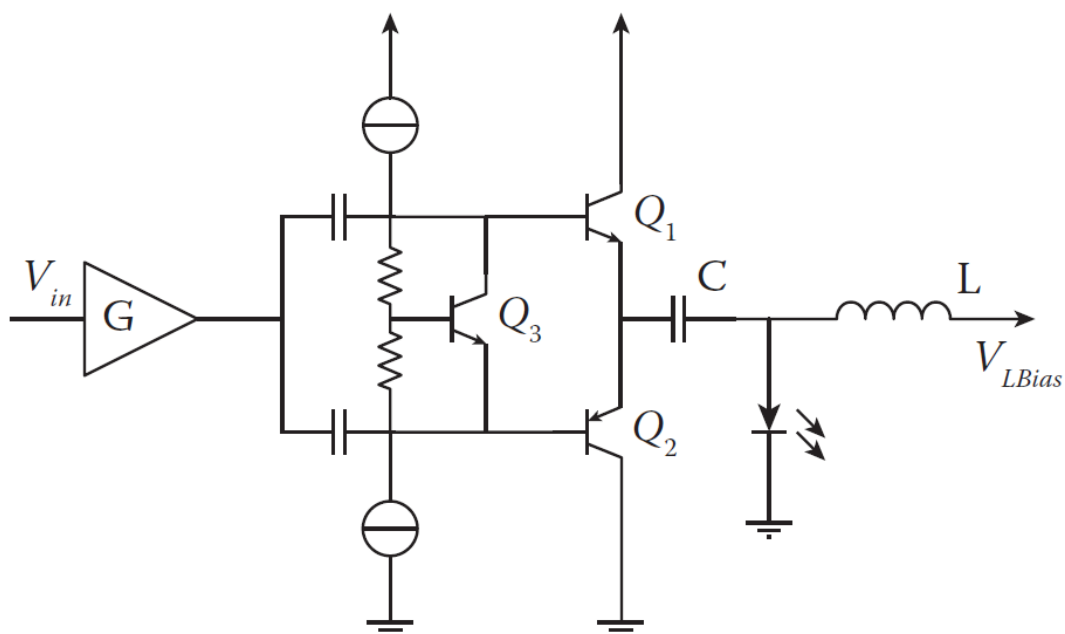
Τα κυκλώματα οδήγησης των LED είναι ηλεκτρονικές διατάξεις οι οποίες εγκαθίστανται πίσω από τους λαμπτήρες και διαμορφώνουν της έντασή τους σύμφωνα με την πληροφορία την οποία επιδιώκουμε να μεταδοθεί. Όταν υλοποιούμε ένα τέτοιο κύκλωμα είναι σημαντικό να ξέρουμε από την αρχή τι διαμόρφωση θέλουμε να έχουμε. Για ψηφιακή διαμόρφωση καταλληλότερα είναι τα on-off κυκλώματα οδήγησης ενώ για πιο σύνθετες διαμορφώσεις με πολλαπλά επίπεδα φωτεινότητας προτιμώνται τα αναλογικά κυκλώματα διαμόρφωσης. Είναι επίσης σημαντικό να αναφέρουμε ότι στα κυκλώματα οδήγησης υπάρχει μια εναλλαγή όταν σχεδιάζουμε με βάση την ισχύ ή το εύρος ζώνης. Μια προσπάθεια για διεύρυνση του εύρους ζώνης οδηγεί στο σημείο λειτουργίας του LED, ενώ όσο αναζητούμε κάποια βολική ισχύ μπορεί να περιορίζουμε το εύρος ζώνης.

Τα on-off κυκλώματα οδήγησης συνήθως ελέγχουν το ρεύμα που καταλήγει στο LED με ένα σήμα εισόδου το οποίο είναι χαμηλού ρεύματος και σταθερής τάσης. Συνεπώς χρειάζεται ένα ενεργό στοιχείο για τον έλεγχο αυτό. Το πιο σύνηθες είναι αυτό το στοιχείο να είναι ένα MOSFET. Στην παρακάτω εικόνα εμφανίζεται ένα τέτοιο κύκλωμα.



Εικόνα 2.9 ON-OFF κύκλωμα οδήγησης LED

Τα αναλογικά κυκλώματα οδήγησης θα πρέπει να παρουσιάζουν υψηλή γραμμικότητα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν τέτοια κυκλώματα η διαμόρφωση θεωρείται ότι είναι γραμμική σε αντίθεση με προηγούμενως. Επίσης σε αυτό τον τύπο κυκλωμάτων οδήγησης μπορούμε να προσεγγίζουμε τα σήματα εισόδου είτε ως τάσεις είτε ως ρεύματα. Η δεύτερη προσέγγιση ενδείκνυται για υψηλές ταχύτητες και επίσης φαίνεται πιο κατάλληλη λόγω της γραμμικής σχέσης τάσης ρεύματος του LED. Ως ενεργά στοιχεία σε αυτά τα κυκλώματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο MOSFET όσο και BJT.



Εικόνα 2.10 Αναλογικό κύκλωμα οδήγησης LED

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΧΩΡΟ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε πως γίνεται η διάδοση σε εσωτερικό χώρο στις επικοινωνίες ορατού φωτός. Αρχικά να πούμε ότι η πιο συνηθισμένη μέθοδος διάδοσης στις ασύρματες οπτικές επικοινωνίες είναι η διαμόρφωση έντασης και απευθείας ανίχνευσης (intensity modulation/direct detection – IM/DD). Σε αυτή τη μέθοδο το σήμα πληροφορίας $m(t)$ διαμορφώνεται απευθείας με το ρεύμα οδήγησης μιας οπτικής πηγής. Ως αποτέλεσμα η φωτεινή ένταση της πηγής διαμορφώνεται και «τρεμοπαίζει». Αυτή η ένταση συμβολίζει την είσοδο $x(t)$ στο κανάλι. Ως έξοδος $y(t)$ συμβολίζεται η τιμή του φωτορρεύματος που βλέπουμε στην έξοδο της φωτοδιόδου που αποτελεί τον δέκτη. Αυτό το φωτόρρευμα είναι ανάλογο με τη στιγμιαία οπτική ισχύ που προσπίπτει στο δέκτη, δηλαδή ανάλογο με το τετράγωνο του λαμβανόμενου ηλεκτρικού πεδίου.

Για να μπορέσουμε τώρα να χαρακτηρίσουμε το ασύρματο κανάλι διάδοσης αρκεί να βρούμε μια έκφραση για την κρουστική του απόκριση. Θα αρχίσουμε την ανάλυση υποθέτοντας ότι ο πομπός είναι ένα LED που εκπέμπει με Lambertian κατανομή. Τότε η ένταση της φωτεινότητάς του μπορεί να οριστεί ως την παράγωγο της φωτεινής ροής Φ ως προς την χωρική γωνία Ω .

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Έπειτα από αυτό τον ορισμό θα πρέπει να υπολογίσουμε την συνολική ισχύ η οποία εκπέμπεται, η οποία θα δοθεί από το ακόλουθο διπλό ολοκλήρωμα

$$P_E = \int_{\Lambda_{min}}^{\Lambda_{max}} \int_0^{2\pi} \Phi_e d\varphi d\lambda$$

Όπου Λ_{max} και Λ_{min} εξαρτώνται από τα διαγράμματα ευαισθησίας της διόδου εκομπής, λ είναι το μήκος κύματος, φ είναι η γωνία ακτινοβολίας και Φ_e η ροή της ενέργειας. Επόμενο βήμα είναι να συσχετίσουμε την

ισχύ αυτή με την φωτεινή ένταση η οποία λαμβάνεται όταν φωτίζουμε μια επιφάνεια. Αυτή η συσχέτιση μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη σχέση

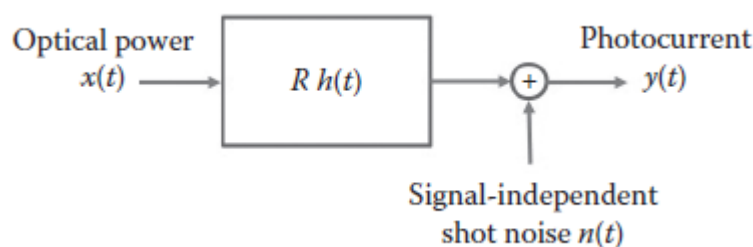
$$I(\varphi) = \rho \frac{m+1}{2\pi} P_E \cos^m(\varphi)$$

Όπου το ρ συμβολίζει το συντελεστή ανάκλασης της επιφάνειας και το m είναι η τάξη εκπομπή της Lambertian κατανομής και δίνεται από την σχέση

$$m = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos(\Phi_{1/2}))}$$

όπου $\Phi_{1/2}$ είναι η γωνία μισή γωνία στην οποία ο πομπός εκπέμπει με την μισή ισχύ του.

Τώρα επιστρέφοντας στην IM/DD μέθοδο διάδοσης και σχεδιάζοντας το διάγραμμα της επικοινωνίας όπως στην ακόλουθη εικόνα



Εικόνα 3.1 Διάγραμμα επικοινωνίας IM/DD

προσδιορίζουμε το λαμβανόμενο σήμα $y(t)$ ως εξής

$$y(t) = R \cdot x(t) \otimes h(t) + n(t)$$

Σε αυτή τη σχέση R είναι η απόκριση της φωτοδιόδου ενώ βλέπουμε συνέλιξη μεταξύ του σήματος $x(t)$ και της κρουστικής απόκρισης του καναλιού $h(t)$. Επίσης, ως $n(t)$ έχουμε συμβολίσει τον θόρυβο ο οποίος είναι ανεξάρτητος από το σήμα.

Όπως έχουμε πει από την αρχή στόχος μας είναι να επικεντρωθούμε στο να προσδιορίσουμε την κρουστική απόκριση $h(t)$. Επειδή μέσα σε έναν εσωτερικό χώρο προφανώς υπάρχουν ανακλάσεις οι οποίες προσπίπτουν και αυτές στην επιφάνεια της φωτοδιόδου και επηρεάζουν το λαμβανόμενο φωτόρρευμα, υπάρχει και μια συνιστώσα διάχυσης. Αν σε αυτό το σημείο για λόγους απλότητας αγνοήσουμε τη συνιστώσα

αυτή τότε μπορούμε να γράψουμε την λαμβανόμενη οπτική ισχύ σε σχέση με την εκπεμπόμενη ως εξής

$$P_r = H(0) P_E$$

όπου $H(0)$ είναι το DC κέρδος του καναλιού το οποίο ορίζεται ως εξής

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt$$

Ο δέκτης μας μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μια ενεργή περιοχή A_r η οποία μπορεί να συλλέγει ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτήν υπό γωνία ψ μικρότερη από την γωνία ορατού πεδίου (Ψ_{FOV}). Επίσης, αν και κάποιος μπορεί να σκεφτεί ότι ένας δέκτης με μεγάλη επιφάνεια θα ήταν ιδανικός επειδή θα μπορούσε να συλλέξει όσο το δυνατόν περισσότερη ακτινοβολία, αυτό πρακτικά είναι μια σκέψη η οποία δημιουργεί προβλήματα. Ένα πρώτο πρόβλημα είναι το αυξημένο κόστος κατασκευής, το μειωμένο εύρος ζώνης που θα προκληθεί από μια μεγάλη χωρητικότητα επαφής τέτοιου μεγέθους καθώς και το ότι ο θόρυβος και οι παρεμβολές σε ένα τέτοιο δέκτη θα είναι πολύ αυξημένα. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε απλούς, μικρής επιφάνειας δέκτες με non-imaging οπτικούς συγκεντρωτές οι οποίοι παρουσιάζουν ένα κέρδος το οποίο δίνεται από την σχέση

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(\Psi_{FOV})}, & 0 \leq \psi \leq \Psi_{FOV} \\ 0, & elsewhere \end{cases}$$

με n να είναι ο εσωτερικός δείκτης διάθλασης. Τελικά με τις υποθέσεις ότι η απόσταση d της ζεύξης πομπού δέκτη στο εσωτερικό περιβάλλον είναι πολύ μικρή και ότι ο δέκτης διαθέτει και ένα φίλτρο band-pass το οποίο συμβολίζεται ως $T(\psi)$ μπορούμε να προσεγγίσουμε το DC κέρδος τους καναλιού σε αυτή την απόσταση ως εξής:

$$H_{LOS}(0) = \frac{A_r(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m(\varphi) T(\psi) g(\psi) \cos(\psi)$$

όπου προφανώς αυτή η σχέση ισχύει όταν η γωνία ψ είναι μικρότερη από Ψ_{FOV} αλλιώς είναι $H_{LOS}=0$. Από της σχέση που αναφέραμε που συνδέει τα $H(0)$ και $h(t)$ μπορούμε τώρα να γράψουμε

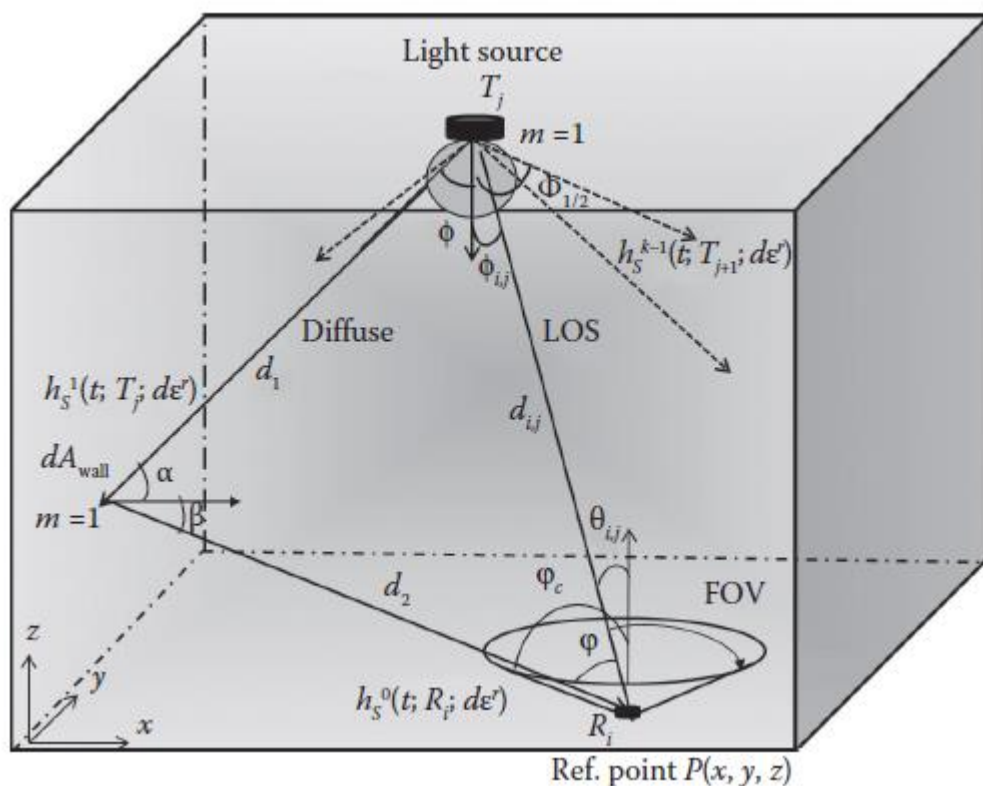
$$h_{LOS}(t) = \frac{A_r(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m(\varphi) T(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \delta(t - d/c)$$

με c να συμβολίζει την ταχύτητα του φωτός σε ελεύθερο χώρο, $\delta(\cdot)$ την συνάρτηση δέλτα του Dirac και το πηλίκο d/c να είναι η χρονική καθυστέρηση του σήματος να φτάσει από τον πομπό στο δέκτη.

Ο δείκτης «LOS» είναι για να συμβολίσει το ότι ο πομπός και ο δέκτης έχουν οπτική επαφή (line-of-sight) μεταξύ τους, μιας και υποθέσαμε από την αρχή ότι δεν λαμβάνουμε υπόψιν την ανακλώμενη ακτινοβολία. Γενικά

$$H(0) = H_{LOS}(0) + H_{DIFF}(0)$$

όπου ο δεύτερος όρος εκπροσωπεί το DC κέρδος καναλιού λόγω ανακλάσεων που προσπίπτουν στο δέκτη.



Εικόνα 3.2 Ευθεία και ανακλώμενη διάδοση σε εσωτερικό χώρο

Το DC κέρδος ενός ανακλώμενου σήματος σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα θα μπορούσε να γραφεί ως:

$$H_{DIFF}(0) = \frac{(m+1) \Lambda_{PD}}{2\pi(d_1 d_2)^2} \rho \Lambda_{wall} \cos^m(\varphi) \cos(\alpha) \cos(\beta) T(\varphi) g(\varphi) \cos(\varphi)$$

όπου β είναι η γωνία ακτινοβολίας από την επιφάνεια ανάκλασης, α είναι η γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνεια αυτή d_1 και d_2 είναι οι αποστάσεις πομπού-τοίχου και τοίχου δέκτη αντίστοιχα. A_{wall} θεωρούμε μια μικρή επιφάνεια, κομμάτι του τοίχου που κάνει την ανάκλαση. Θα

μπορούσαμε τώρα, ολοκληρώνοντας σε όλους τους τοίχους να γράψουμε τη συνολική ισχύ που λαμβάνει ο δέκτης και από τη LOS συνιστώσα και από τις ανακλάσεις ως εξής

$$P_R = P_E H_{LOS}(0) + \int_{walls} P_E dH_{DIFF}(0)$$

Τέλος, να αναφέρουμε κάποια στοιχεία για το σήμα εισόδου $x(t)$ καθώς και το SNR σε αυτά τα οπτικά συστήματα. Αρχικά μια βασική διαφορά σε σχέση με τις συμβατικές επικοινωνίες ραδιοσυχνοτήτων είναι ότι στα οπτικά ασύρματα συστήματα η στιγμιαία οπτική ισχύς είναι ανάλογη του ηλεκτρικού ρεύματος που γεννάται. Έτσι το $x(t)$ αντιπροσωπεύει την ισχύ και όχι το πλάτος του σήματος. Αυτό πρώτον καταλήγει στο γεγονός ότι το $x(t)$ είναι μη αρνητικό σε αντίθεση με τις επικοινωνίες ραδιοσυχνοτήτων όπου εκεί βλέπουμε και αρνητικές τιμές στην είσοδο. Δεύτερον πρέπει να σκεφτούμε ότι η ένταση δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλη έτσι ώστε να διαφυλάσσεται η ασφάλεια των ματιών και των συσκευών συνεπώς το $x(t)$ έχει περιορισμούς μέγιστης A και μέσης τιμής E δηλαδή

$$x(t) \leq A, E[x(t)] \leq E$$

Αυτές οι διαφορές οδηγούν στο γεγονός ότι τα οπτικά συστήματα ο λόγος σήματος προς θόρυβο δίνεται σε σχέση με το τετράγωνο της λαμβανόμενης ισχύος αντί της μέσης ισχύος που δίνεται στις επικοινωνίες ραδιοσυχνοτήτων. Ενδεικτικά ισχύει:

$$SNR = \frac{R^2 H^2(0) P^2}{\sigma^2}$$

με σ^2 να είναι η διασπορά του θορύβου.

4^ο ΚΕΦΆΛΑΙΟ: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΧΩΡΟ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παραθέσουμε κάποια παραδείγματα που έχουν προκύψει μέσω προσομοιώσεων που έγιναν στο MATLAB έτσι ώστε να αντιληφθούμε την κάλυψη που μπορεί να προσφέρει μια συστοιχία από LED. Ο αρχικός κώδικας πάρθηκε από το βιβλίο [1]. Στα σχήματα απεικονίζονται στο οριζόντιο επίπεδο οι διάφορες τοποθεσίες του δωματίου, στο ύψος των δεκτών, και στον κάθετο άξονα οι τιμές της λαμβανόμενης ισχύος σε dBm στις τοποθεσίες αυτές.

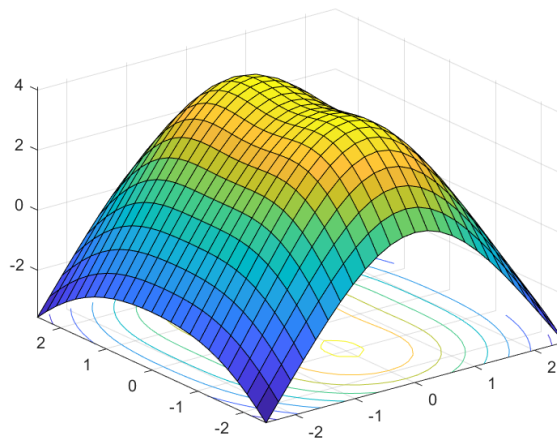
Έχουμε υποθέσει τρία μεγέθη δωματίων ($x*y*z$) ένα μικρό (5m*5m*3m), ένα μεσαίο (7m*7m*3.5m) και ένα μεγάλο (10m*10m*4m). Σε κάθε ένα από αυτά τα δωμάτια έχουμε υποθέσει ότι καλύπτονται από 4 συστοιχίες και από 2 συστοιχίες LED κάθε φορά. Θεωρούμε ότι ο δέκτης στέκεται σε ύψος 0.85 μέτρα από το έδαφος κάθε φορά. Συνεπώς για κάθε δωμάτιο η απόσταση μεταξύ των επιπέδων πομπών και δεκτών υπολογίζεται ως $h = z - 0.85$. Όσον αφορά τις υπόλοιπες παραμέτρους έχουμε:

$\Phi_{1/2}$	70°
P_{LED}	20W
N_{LED}	60
A_{PD}	1cm ²
$T(\Psi)$	1
n	1.5
Ψ_{FOV}	70°

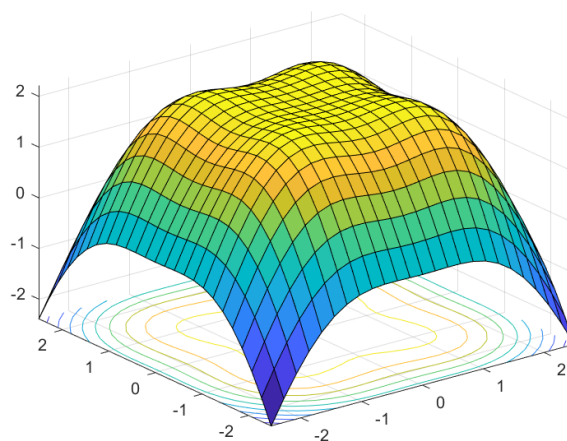
Σημειώνεται ότι ως P_{LED} συμβολίζεται η οπτική ισχύς ενός μεμονωμένου LED ενώ N_{LED} είναι ο αριθμός των συνολικών LED που χρησιμοποιούνται για μια συστοιχία. Οι οριζόντιοι άξονες στα διαγράμματα αφορούν τις συντεταγμένες εντός του δωματίου και ο κάθετος άξονα την λαμβανόμενη οπτική ισχύ σε dBm.

A) Σενάριο μικρού δωματίου:

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, σε ένα μικρό δωμάτιο, η κάλυψη είναι υψηλή ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται 4 συστοιχίες LED και η ισχύς μοιράζεται πιο ομοιόμορφα. Αξίζει να σχολιαστεί το γεγονός ότι όταν χρησιμοποιούμε 2 LED συστοιχίες η μέγιστη ισχύς που παρατηρείται στα σημεία όπου ο δέκτης βρίσκεται από κάτω είναι διπλάσια από αυτήν της περίπτωσης χρήσης 4 συστοιχιών. Αυτό συμβαίνει διότι στον αλγόριθμο του MATLAB οι ξεχωριστές πηγές που υπάρχουν στην περίπτωση των 4 συστοιχιών αθροίζονται σε 2. Συνεπώς οι πηγές της πρώτης περίπτωσης εκπέμπουν διπλάσια ισχύ.



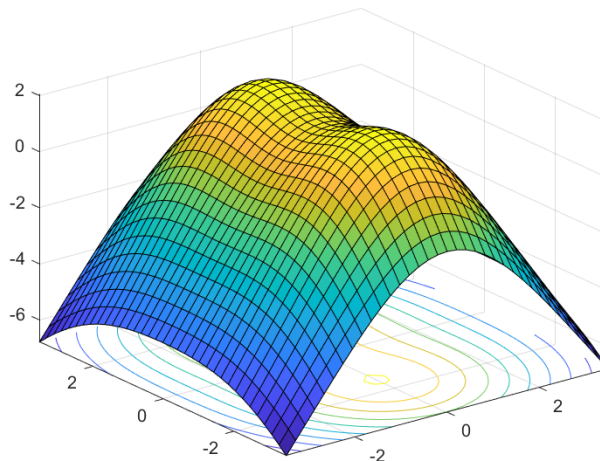
Εικόνα 4.1 Χρήση 2 συστοιχιών LED. Κατανομή λαμβανόμενης ισχύος σε dBm για διαστάσεις δωματίου 5x5x3



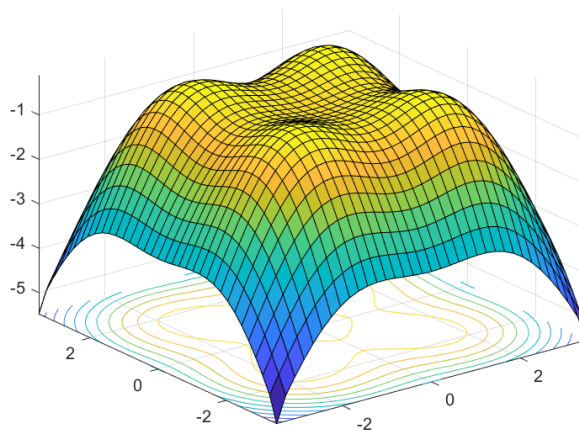
Εικόνα 4.2 Χρήση 4 συστοιχιών LED. Κατανομή λαμβανόμενης ισχύος σε dBm για διαστάσεις δωματίου 5x5x3

B) Σενάριο μέτρου δωματίου

Σε αυτό το σενάριο βλέπουμε τις τιμές της ισχύος στον κάθετο άξονα να είναι μειωμένες σε σχέση με αυτές του σεναρίου Α). Αυτό είναι συνέπεια 2 παραγόντων. Ο πρώτος παράγοντας είναι η αύξηση της κάθετης απόστασης η μεταξύ των επιπέδων τοποθέτησης των πηγών και των δεκτών. Ο δεύτερος παράγοντας είναι ότι πλέον υπάρχουν μεγαλύτερες αποστάσεις πηγών-δεκτών λόγω των μεγαλύτερων διαστάσεων του δωματίου.



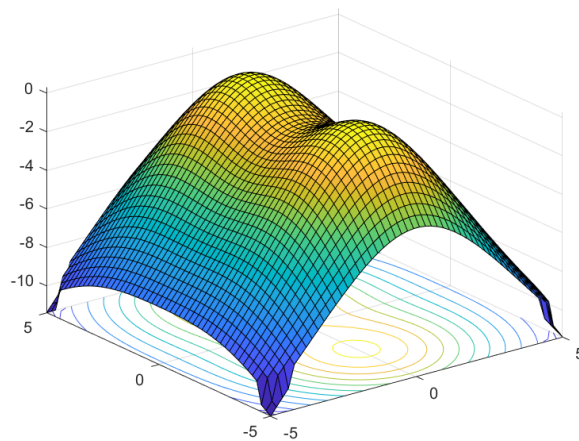
Εικόνα 4.3 Χρήση 2 συστοιχιών LED. Κατανομή λαμβανόμενης ισχύος σε dBm για διαστάσεις δωματίου 7x7x3.5



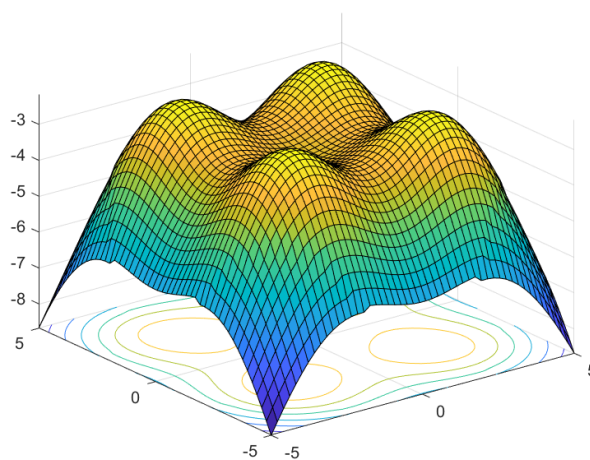
Εικόνα 4.4 Χρήση 4 συστοιχιών LED. Κατανομή λαμβανόμενης ισχύος σε dBm για διαστάσεις δωματίου 7x7x3.5

Γ) Σενάριο μεγάλου δωματίου

Πλέον σε αυτό το σενάριο παρατηρείται η μεγαλύτερη μείωση της λαμβανόμενης ισχύος. Ακόμα και στην περίπτωση χρήσης 4 συστοιχιών LED, στο κέντρο του δωματίου η λαμβανόμενη ισχύς μπορεί να μην είναι ικανοποιητική. Επίσης τονίζεται ότι έχουμε υποθέσει ότι το δωμάτιο είναι κλειστό και μόνες πηγές φωτισμού είναι οι πηγές που εμείς ορίσαμε. Σε ένα πρακτικό σενάριο όμως, όπου το δωμάτιο μπορεί να έχει παράθυρα, στις άκρες του δωματίου θα παρουσιάζονται παρεμβολές που δεν θα επιτρέπουν την επικοινωνία. Συνεπώς σε αυτό το σενάριο απαιτούνται λύσεις καλύτερης εμπόδισης παρεμβολών, καλύτερης κατανομής των πηγών ή και αύξηση της ισχύος εκπομπής εφόσον αυτό επιτρέπεται.



Εικόνα 4.5 Χρήση 2 συστοιχιών LED. Κατανομή λαμβανόμενης ισχύος σε dBm για διαστάσεις δωματίου 10x10x4

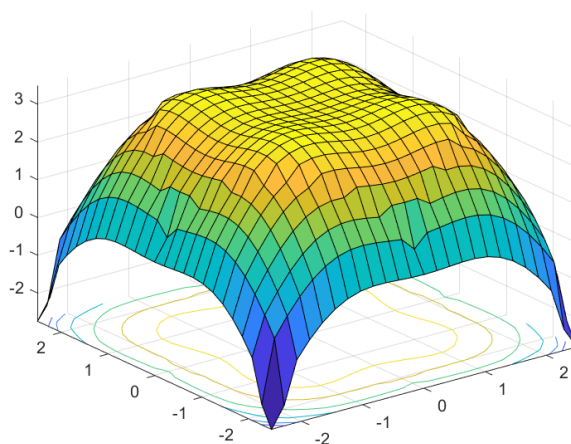


Εικόνα 4.6 Χρήση 4 συστοιχιών LED. Κατανομή λαμβανόμενης ισχύος σε dBm για διαστάσεις δωματίου 10x10x4

4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΙΚΡΟΤΕΡΕΣ ΓΩΝΙΕΣ FOV

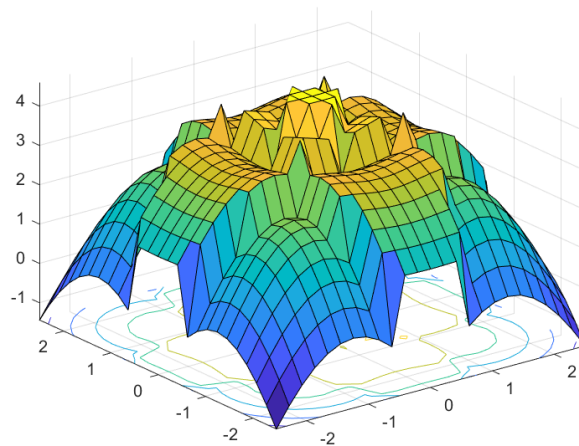
Σε αυτή την ενότητα, θα εξετάσουμε την επίδραση που μπορεί να έχουν πιο μικρές γωνίες FOV των δεκτών, στην κάλυψη του δικτύου. Οι διαστάσεις των δωματίων καθώς και οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων παραμένουν ίσες με των προηγούμενων προσομοιώσεων, για λόγους δίκαιων συγκρίσεων. Επίσης σε αυτή την υποενότητα η μελέτη μας αφορά μόνο τις περιπτώσεις των δωματίων με 4 συστοιχίες LED.

Στις Εικόνες 4.7 και 4.8, έχουμε την περίπτωση του δωματίου μικρών διαστάσεων για $\Psi_{FOV}=60^\circ$ και $\Psi_{FOV}=45^\circ$ αντίστοιχα. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, λόγω των μικρών διαστάσεων του δωματίου, η πρώτη περίπτωση δεν διαφέρει πολύ από την προηγούμενη (βλέπε Εικόνα 4.2).



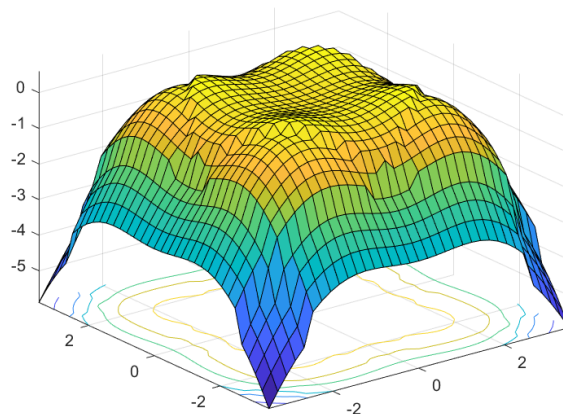
Εικόνα 4.7 Μικρό δωμάτιο $\Psi_{FOV}=60^\circ$

Στην περίπτωση που $\Psi_{FOV}=45^\circ$, οι διαφορές είναι πλέον πιο ορατές. Στις γωνίες του δωματίου φαίνεται η κάλυψη να είναι πιο αδύναμη.



Εικόνα 4.8 Μικρό δωμάτιο $\Psi_{\text{FOV}}=45^\circ$

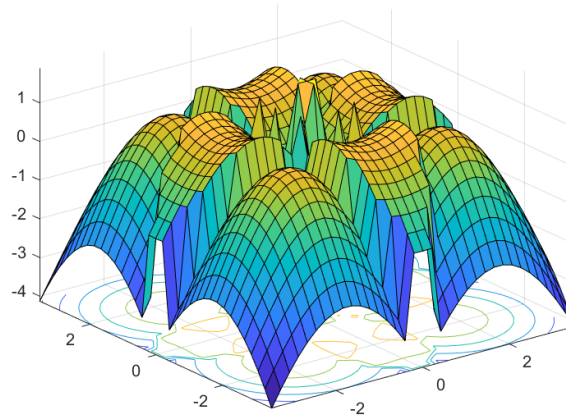
Στις εικόνες 4.9, 4.10 και 4.11, μελετήσαμε και προσομοιώσαμε την περίπτωση του μεσαίου δωματίου. Στην περίπτωση της εικόνας 4.9 όπου $\Psi_{\text{FOV}}=60^\circ$ βλέπουμε ότι οι διαστάσεις του δωματίου, επιβάλλουν ξανά μείωση της κάλυψης στις γωνίες του δωματίου. Παρόλα αυτά η γενική κάλυψη παραμένει ικανοποιητική.



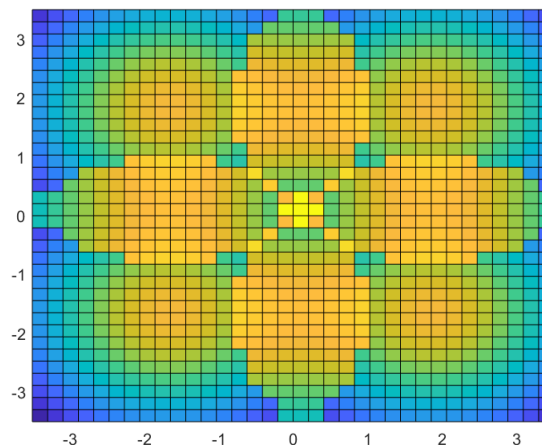
Εικόνα 4.9 Μεσαίο δωμάτιο $\Psi_{\text{FOV}}=60^\circ$

Στην περίπτωση των Εικόνων 4.10 και 4.11, έχουμε ρυθμίσει $\Psi_{\text{FOV}}=45^\circ$ και βλέπουμε, μια γενική εικόνα και την κάτοψη αντίστοιχα. Βλέπουμε ότι οι περιοχές όπου ο δέκτης λαμβάνει από περισσότερες από μια συστοιχίες LED, η κάλυψη είναι πιο ισχυρή. Αυτό δεν είναι όμως πάντα καλό, καθώς

εάν δεν εξυπηρετούν όλες οι συστοιχίες τον ίδιο χρήστη, αυτές οι περιοχές μετατρέπονται σε περιοχές παρεμβολών.



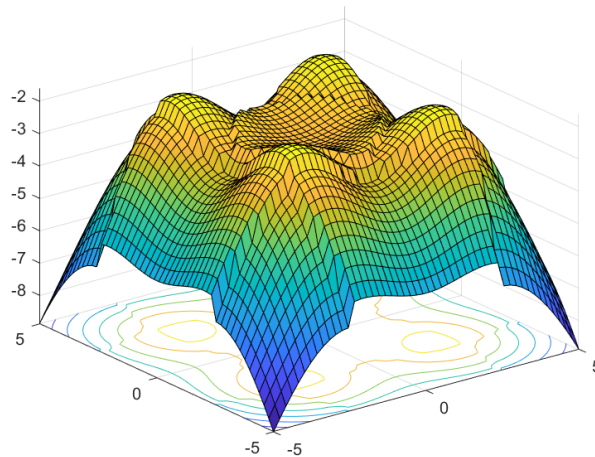
Εικόνα 4.10 Μεσαίο δωμάτιο $\Psi_{FOV}=45^\circ$



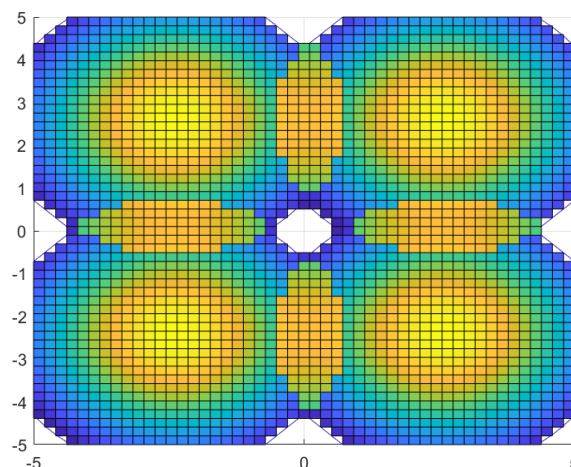
Εικόνα 4.11 Μεσαίο δωμάτιο $\Psi_{FOV}=45^\circ$. Κάτοψη

Τελευταίες περιπτώσεις, είναι αυτές του μεγάλου δωματίου, για τις δύο σταθερές υπό μελέτη τιμές της Ψ_{FOV} . Οι δύο αυτές τελευταίες περιπτώσεις, έχουν προσομοιωθεί και απεικονίζονται στις Εικόνες 4.12 και 4.13. Όταν λοιπόν η γωνία $\Psi_{FOV}=60^\circ$, βλέπουμε ότι οι μεγάλες διαστάσεις του δωματίου είναι υπαίτιες για μια γενικά ασταθή κάλυψη με αισθητή μείωση της λαμβανόμενης ισχύος ακόμα και στο κέντρο του δωματίου. Στην περίπτωση δε, όπου $\Psi_{FOV}=45^\circ$ η κάθε συστοιχία

εξυπηρετεί μια συγκεκριμένη περιοχή με πολύ μικρές επικαλύψεις, ενώ δεν υπάρχει κάλυψη στο κέντρο του δωματίου και στις γωνίες.



Εικόνα 4.12 Μεγάλο δωμάτιο $\Psi_{FOV}=60^\circ$



Εικόνα 4.13 Μεγάλο δωμάτιο $\Psi_{FOV}=45^\circ$

4.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την υποενότητα, θα αποτιμήσουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάσαμε. Αρχικά φαίνεται πως η κάλυψη του δικτύου δεν εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των πομπών LED που θα χρησιμοποιήσουμε. Δεν αρκεί μόνο να βάλουμε σε ένα δωμάτιο πολλές συστοιχίες LED δηλαδή, θα πρέπει να σκεφτούμε να χρησιμοποιήσουμε

και δέκτες με πιο μεγάλη γωνία Ψ_{FOV} . Σε περίπτωση όμως, που έχουμε συσκευές σταθερές στο δωμάτιο, η χρήση δεκτών με μικρή γωνία μπορεί να λειτουργήσει σαν λύση για αποφυγή παρεμβολών. Στο σενάριο όπου θέλουμε να επιτύχουμε ομοιόμορφη κάλυψη σε ένα μεγάλο δωμάτιο, η χρήση μεγαλύτερου αριθμού πομπών είναι αναπόφευκτη. Μεγάλοι ρυθμοί δεδομένων μπορούν να επιτευχθούν όταν τοποθετούμε δέκτες σε περιοχές όπου υπάρχει επικάλυψη από περισσότερους πομπούς αρκεί οι πομποί αυτοί να εξυπηρετούν του χρήστες και όχι κάποιον άλλον διότι έτσι θα δημιουργήσουν παρεμβολές και η απόδοση τους δικτύου θα πέσει. Οι προσομοιώσεις επίσης έδειξαν ότι, η χρήση της τεχνολογίας VLC, θα πρέπει να γίνεται όταν έχει υπάρξει μέριμνα για την πρακτική περίπτωση της ύπαρξης άλλων πηγών φωτός. Η κάλυψη στις άκρες των δωματίων όπου συνήθως υπάρχουν παράθυρα είναι ήδη μειωμένη, συνεπώς καθίσταται μεγάλης σημασίας η εξασφάλιση από πριν καλών συνθηκών δωματίου για εγκατάσταση δικτύου VLC.

KQAIKAE MATLAB

```
clear; clc;
%%
theta = 70;
% semi-angle at half power
ml=-log10(2)/log10(cosd(theta));
% Lambertian order of emission
P_LED=20;
% transmitted optical power by individual LED
nLED=60;
% number of LED array nLED*nLED
P_total=nLED*nLED*P_LED;
% Total transmitted power
Adet=1e-4;
% detector physical area of a PD
Ts=1;
% gain of an optical filter; ignore if no filter is used
index=1.5;
% refractive index of a lens at a PD; ignore if no lens is used
FOV=60;
% FOV of a receiver
G_Con=(index^2)/(sind(FOV).^2);
% gain of an optical concentrator; ignore if no lens is used
%%
lx=7; ly=7; lz=3.5;
% room dimension in meter
h=lz-0.85;
% the distance between source and receiver plane
[XT,YT]=meshgrid([-lx/4 lx/4],[-ly/4 ly/4]);
% XT = 0; YT=[-ly/4 ly/4];
% XT=0; YT=0;
% position of LED; it is assumed all LEDs are located at same
% point for
% faster simulation
% for one LED simulation located at the central of the room,
% use XT=0 and YT=0
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Nx=lx*5; Ny=ly*5;
% number of grid in the receiver plane
x=linspace(-lx/2,lx/2,Nx);
y=linspace(-ly/2,ly/2,Ny);
[XR,YR]=meshgrid(x,y);
D1=sqrt((XR-XT(1,1)).^2+(YR-YT(1,1)).^2+h^2);
% distance vector from source 1
cosphi_A1=h./D1;
% angle vector
receiver_angle=acosd(cosphi_A1);
H_A1=(ml+1)*Adet.*cosphi_A1.^(ml+1)./(2*pi.*D1.^2);
% channel DC gain for source 1
P_rec_A1=P_total.*H_A1.*Ts.*G_Con;
% received power from source 1;
P_rec_A1(abs(receiver_angle)>FOV)=0;
% if the angle of arrival is greater than FOV, no current is
% generated at
```

```
% the photodiode.
P_rec_A2=fliplr(P_rec_A1);
% received power from source 2, due to symmetry no need
separate
% calculations
P_rec_A3=flipud(P_rec_A1);
P_rec_A4=fliplr(P_rec_A3);
P_rec_total=P_rec_A1+P_rec_A2+P_rec_A3+P_rec_A4;
P_rec_dBm=10*log10(P_rec_total);
%%
figure;
surf(x,y,P_rec_dBm);
% contour(x,y,P_rec_dBm);hold on
% mesh(x,y,P_rec_dBm)
```


Βιβλιογραφία

[1] Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB® Z. Ghassemlooy, W. Popoola, S. Rajbhandari

[2] Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi. Sliven Dimitrov and Harald Haas

[3] Visible Light Communications: Theory and Applications. Zabih Ghassemlooy, Luis Nero Alves, Stanislav Zvánovec, Mohammad-Ali Khalighi