



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**"Μελέτη και Εφαρμογές των Επικοινωνιών Ορατού  
Φωτός (VLC)"**

**"Study and Applications of Visible Light Communications  
(VLC)"**

ΦΟΙΤΗΤΗΣ:

ΚΑΙΣΑΡΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ (2761)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ ΜΙΧΑΗΛ

ΠΑΤΡΑ 2022

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΟ ΟΡΑΤΟ ΦΑΣΜΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΣΤΙΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ.....	6
1.1 Το ορατό φάσμα του φωτός.....	6
1.2 Ιστορία των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών.....	9
1.3 Η παρούσα κατάσταση στις ασύρματες επικοινωνίες.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ VLC.....	17
2.1 Η αρχιτεκτονική των οπτικών επικοινωνιών στο ορατό φάσμα.....	17
2.1.1 Πομπός.....	17
2.1.2 Δέκτης.....	22
2.2 Φυσικό στρώμα.....	24
2.3 Στρώμα MAC – Μέσο στρώμα προσπέλασης.....	25
2.4 Διαμορφώσεις VLC.....	26
2.4.1 Παράγοντες που έχουν επίπτωση στη διαμόρφωση VLC.....	26
2.4.2 Τεχνικές διαμόρφωσης σήματος.....	27
2.4.3 Ρυθμός μετάδοσης σφαλμάτων.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ VLC ΖΕΥΞΗΣ.....	34
3.1 Μοντελοποίηση καναλιού.....	34
3.2 Οπτικό ασύρματο κανάλι επικοινωνίας για εσωτερικές εφαρμογές.....	34
3.3 Μοντέλο διάδοσης LOS.....	38
3.4 Μοντέλο διάδοσης non-LOS.....	41
3.5 Διασυμβολική παρεμβολή.....	44
3.6 Κρουστική απόκριση.....	45
3.7 Θόρυβος στα συστήματα VLC.....	46
3.8 Τεχνικές αντιμετώπισης του θορύβου στα συστήματα VLC.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΓΚΡΙΣΗ VLC ΜΕ ΑΛΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ.....	52
4.1 Σύγκριση με επικοινωνίες υπερύθρων IR.....	52
4.2 Σύγκριση με την επικοινωνία ραδιοσυχνοτήτων (RF).....	52
4.3 Σύγκριση με μικροκυψέλες και ετερογενή δίκτυα (HetNets).....	56
4.4 Αδυναμίες των συστημάτων VLC.....	57
4.5 Προηγμένες τεχνικές βελτίωσης της χωρητικότητας ενός συστήματος VLC.....	59
4.6 Πλεονεκτήματα των συστημάτων VLC.....	60

4.7 Σχήματα πολλαπλής πρόσβασης VLC.....	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ VLC.....	64
5.1 Εισαγωγή.....	64
5.2 Light Fidelity Li-Fi.....	65
5.2.1 Αρχή λειτουργίας του Li-Fi.....	65
5.2.2 Διαμορφώσεις.....	66
5.2.3 Πολλαπλή πρόσβαση.....	68
5.3 Δικτύωση με τη χρήση τεχνολογίας Li-Fi Attocell.....	69
5.4 Συνύπαρξη Wi-Fi και Li-Fi σε εσωτερικούς χώρους.....	72
5.5 Ευφυή συστήματα μεταφοράς (ITS) .....	73
5.6 Vehicle to Vehicle (V2V) .....	75
5.7 Τοπικά ασύρματα δίκτυα (WLAN) .....	75
5.8 Άλλες εφαρμογές.....	76
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	80

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών (Visible Light Communications-VLC) έχουν προσελκύσει το ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια λόγω των σημαντικών χαρακτηριστικών τους. Πλεονεκτήματά τους αποτελούν κυρίως το υψηλό ποσοστό μετάδοσης δεδομένων, το χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας και το γεγονός ότι είναι φιλικά προς το περιβάλλον.

Ο πομπός σε αυτά τα συστήματα μπορεί να είναι μία δίοδος εκπομπής φωτός (Light Emitting Diode-LED) που προσφέρει πλεονεκτικές ιδιότητες όπως η φωτεινότητα, η εξαιρετικά υψηλή μετάδοση δεδομένων και η μεγάλη διάρκεια ζωής, ενώ ως δέκτες χρησιμοποιούνται φωτοδίοδοι.

Σε σύγκριση, για παράδειγμα, με τις κλασσικές ζεύξεις RF, οι ζεύξεις VLC παρουσιάζουν πολύ υψηλό εύρος ζώνης που επιτρέπει πολύ υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Επίσης το VLC δεν επηρεάζεται από παρεμβολές από ηλεκτρομαγνητικές πηγές, έχει μη αδειοδοτημένα κανάλια επικοινωνίας, είναι σύστημα πολύ χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και δεν έχει κανέναν κίνδυνο για την υγεία. Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας VLC και την ποικιλία των εφαρμογών της, η χρήση της έχει εμπόδια λόγω των μειονεκτημάτων της, όπως η εξάρτησή της από την οπτική επαφή της σύνδεσης.

Επιπλέον το VLC έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών συμπεριλαμβανομένων των αξιόπιστων επικοινωνιών με χαμηλές καθυστερήσεις, όπως η επικοινωνία στην ασφάλεια του οχήματος και οι εφαρμογές δικτύων επικοινωνίας τεχνολογίας 5G.

## **ABSTRACT**

Visible Light Communications (VLC) systems have attracted research interest in recent years due to their important characteristics. Their advantages are mainly the high data transmission rate, low installation and operating costs and the fact that they are environmentally friendly. The transmitter in these systems can be a light-emitting diode (Light Emitting Diode-LED) that offers advantageous properties such as brightness, extremely high data transmission and long lifetime, while photodiodes are used as receivers.

Compared to, for example, classical RF links, VLC links exhibit a very high bandwidth allowing for much higher data rates. Also VLC is not affected by interference from electromagnetic sources, has unlicensed communication channels, is a very low power consumption system and has no health risks. Despite the significant advantages of VLC technology and its variety of applications, its use is hindered by its disadvantages, such as its dependence on line-of-sight connection.

In addition, VLC has a wide range of applications including reliable low-latency communications such as vehicle safety communication and 5G technology communication network applications.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΟ ΟΡΑΤΟ ΦΑΣΜΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΣΤΙΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

## 1.1 Το ορατό φάσμα του φωτός

Όσον αφορά το ορατό φως αρχικά θα πρέπει να αναφέρουμε ότι το φως είναι μια μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελείται από το μαγνητικό και το ηλεκτρικό πεδίο. Με άλλα λόγια, όταν ένα άτομο, για κάποιο λόγο αποκτήσει ενέργεια, είναι δυνατόν ηλεκτρόνιο να μεταπηδήσει από την τροχιά του σε τροχιά μεγαλύτερης ενεργειακής στάθμης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διέγερση του ατόμου και αποτελεί μια ασταθή κατάσταση, που έχει πολύ μικρή χρονική διάρκεια. Στην συνέχεια, το ηλεκτρόνιο επανέρχεται στην αρχική του τροχιά και στην αρχική του ενεργειακή στάθμη εκπέμποντας πολύ περισσότερη ενέργεια. Δηλαδή, συμπεραίνουμε ότι η ακτινοβολία είναι μια μορφή ενέργειας.

Κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από το μήκος κύματος της. Όταν το μήκος κύματος μιας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι μεταξύ 4000-7500 Å<sup>0</sup> (1 Åmstrong=10<sup>-10</sup> m) ή 400nm-750nm τότε η ακτινοβολία έχει την ιδιότητα να διεγείρει το ανθρώπινο μάτι και ονομάζεται φωτεινή ακτινοβολία ή απλά φως. Για να είμαστε πιο σωστοί το μήκος κύματος του ορατού φωτός κυμαίνεται μεταξύ 3800 Å<sup>0</sup> και 7800 Å<sup>0</sup> (380nm-780nm). Όμως το ανθρώπινο μάτι ενός μέσου ανθρώπου δεν μπορεί να δει αυτό το μήκος την ακτινοβολία.

Το φως σαν μια μορφή ενέργειας διαδίδεται στο κενό και με προσέγγιση στον αέρα είναι  $C=3 \times 10^8$  m/s. Η ταχύτητα διάδοσης κάθε ακτινοβολίας εξαρτάται από το υλικό μέσα από το οποίο διαδίδεται. Γενικά, ισχύει η σχέση  $C = \lambda f/n$  όπου C η ταχύτητα σε m/s, λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας σε m, f η συχνότητα της ακτινοβολίας σε Hz και n ο συντελεστής διάθλασης του υλικού μέσα από το οποίο γίνεται η διάδοσή της.

Εκτός από το ορατό φως υπάρχουν και άλλες ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες με μικρότερο και άλλες με μεγαλύτερο μήκος κύματος. Και οι δύο περιπτώσεις δεν μπορούν να γίνουν ορατές από το ανθρώπινο μάτι. Το μήκος κύματος του ορατού φωτός κυμαίνεται από 380nm με 780nm. Οι ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες με μικρότερο μήκος κύματος είναι οι κοσμικές ακτίνες, οι ακτίνες X και Y και οι υπεριώδεις ακτινοβολίες ενώ αυτές με μεγαλύτερο μήκος κύματος είναι οι υπέρυθρες ακτίνες, τα μικροκύματα και τα κύματα radar και τα ραδιοφωνικά κύματα.

Όλο το φάσμα των ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών φαίνεται στον πίνακα 1.1.

ΠΕΡΙΟΧΕΣ	ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΕ NM(1 NM <sub>s</sub> 10 <sup>-9</sup> M)
ΚΟΣΜΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ	10 <sup>-5</sup>
ΑΚΤΙΝΕΣ Υ	10 <sup>-4</sup>
ΑΚΤΙΝΕΣ Χ	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-1</sup>
ΥΠΕΡΙΩΔΕΣ	1 - 10
ΟΡΑΤΟ	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>3</sup> { 380 780 Iώδες Μπλέ Πράσινο Κίτρινο Κόκκινο
ΥΠΕΡΥΘΡΟ	10 <sup>4</sup> – 10 <sup>5</sup>
ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ	10 <sup>6</sup> – 10 <sup>9</sup>
ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ ΚΑΙ ΚΥΜΑΤΑ RADAR	10 <sup>10</sup> – 10 <sup>14</sup>
ΡΑΔΙΟΦΩΝΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ	10 <sup>15</sup> – 10 <sup>16</sup>

Πίνακας 1.1. Ολικό φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Μονοχρωματική φωτεινή ακτινοβολία ονομάζουμε την ακτινοβολία που συνίσταται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα με περίπου το ίδιο μήκος κύματος. Για παράδειγμα το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στην ακτινοβολία με μήκος κύματος περίπου 700nm. Αντίθετα, σύνθετη ακτινοβολία ονομάζεται η ακτινοβολία που αποτελείται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα με διαφορετικά μήκη κύματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το λευκό φως το οποίο περιλαμβάνει όλα τα μήκη κύματος της φωτεινής ακτινοβολίας.

Το λευκό φως μπορούμε να το παρατηρήσουμε αν τοποθετήσουμε ένα τριγωνικό πρίσμα και ρίξουμε πάνω στην μία έδρα του μια δέσμη λευκού φωτός τότε στην άλλη έδρα αν τοποθετήσουμε ένα διάφραγμα θα παρατηρήσουμε μια έγχρωμη φωτεινή ταινία. Τα χρώματα αυτά αποτελούν τις μονοχρωματικές ακτινοβολίες στις οποίες αναλύεται το λευκό φως.

Η έγχρωμη ταινία που παίρνουμε ή αλλιώς φάσμα λευκού φωτός ή απλά ορατό φάσμα ονομάζουμε το σύνολο των συχνοτήτων που αντιστοιχούν στα φωτόνια την ακτινοβολίας όπως φαίνεται στον πίνακα 1.2.

Χρώμα	Μήκος κύματος σε Å <sup>ο</sup>	Μήκος κύματος σε nm
Ερυθρό	7700 – 6400	770 – 640
Πορτοκαλί	6400 – 5900	640 – 590
Κίτρινο	5900 – 5500	590 – 550
Πράσινο	5500 – 4900	550 – 490
Κυανό	4900 – 4500	490 – 450
Ιώδες	4500 – 4000	450 – 400

Πίνακας 1.2. Φάσμα λευκού φωτός.

Το ανθρώπινο μάτι παρουσιάζει μέγιστη ευαισθησία στην περιοχή με μήκος κύματος της τάξης των 5500 Å<sup>ο</sup> ή 550nm, που αντιστοιχεί στην περιοχή του κίτρινοπράσινου φωτός. Αυτός είναι και ο λόγος που ο άνθρωπος βλέπει καλύτερα στο κίτρινο φως του λαμπτήρα νατρίου. Το λευκό φως εκτός από τις ακτινοβολίες που μπορεί να δει το ανθρώπινο μάτι και είναι μεταξύ ερυθρού και ιώδους χρώματος, περιέχει και άλλες ακτινοβολίες που δεν διεγείρουν το ανθρώπινο μάτι, και γι' αυτό ονομάζονται αόρατες.

Οι αόρατες ακτινοβολίες που βρίσκονται πέρα από το ερυθρό χρώμα λέγονται υπέρυθρες και χρησιμοποιούνται για τη φωτογράφιση αντικειμένων, που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση, ανεξάρτητα αν υπάρχει φως ενώ αυτές που βρίσκονται πέρα από το ιώδες ονομάζονται υπεριώδες και έχουν βιολογικές δράσεις, απορροφώντας από το κοινό γυαλί και προκαλεί εκτός από τα χημικά φαινόμενα, το φθορισμό ορισμένων ουσιών και τον ιονισμό αερίων.

Όταν μια ακτινοβολία του ορατού φάσματος πέσει στο ανθρώπινο μάτι, προκαλεί διαφορετικό φωτοερέθισμα, που ερμηνεύεται από τον άνθρωπο ως χρώμα. Η εντύπωση του χρώματος διαφέρει από άνθρωπο σε άνθρωπο. Η πρόσθεση δύο χρωμάτων παράγει τρίτο χρώμα. Η πρόσθεση των τριών βασικών χρωμάτων, κόκκινου, πράσινου και μπλε δίνει λευκό χρώμα.

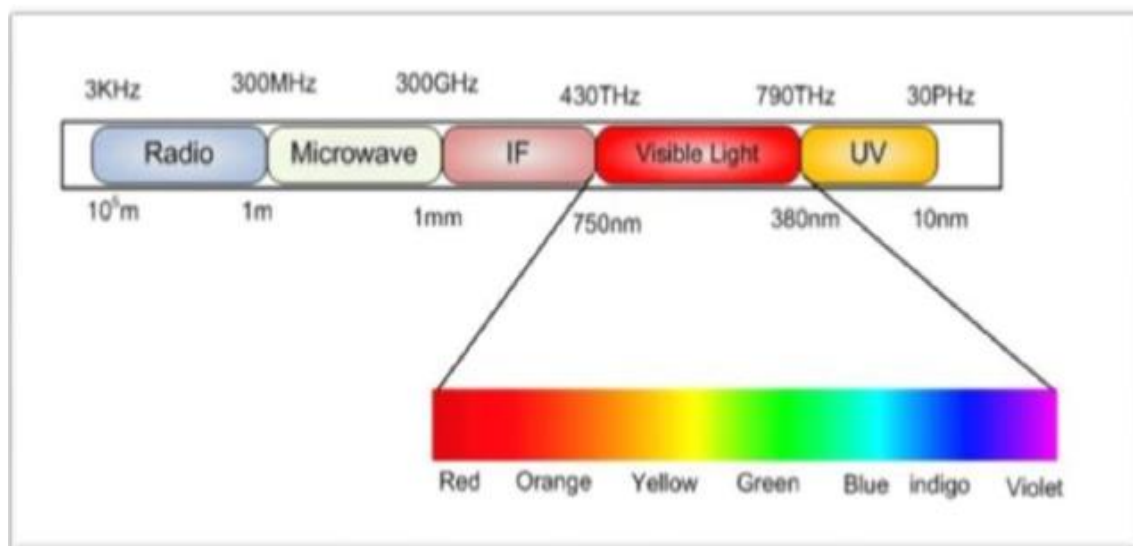
Όπως αναφέραμε, τα συστήματα επικοινωνιών μέσω του ορατού φωτός, καταλαμβάνουν το φάσμα μεταξύ 380nm με 750nm που αντιστοιχούν σε ένα φάσμα συχνοτήτων 430THz με 790THz όπως φαίνεται στην εικόνα 1.1. Η χρήση της τεχνολογίας VLC λόγω της υψηλής διαθεσιμότητας μεγάλου εύρους ζώνης επιλύει το πρόβλημα του χαμηλού εύρους ζώνης που υπάρχει στα συστήματα RF. Για να λάβει τα σήματα ο δέκτης του VLC θα πρέπει ο πομπός να βρίσκεται στο ίδιο δωμάτιο, επομένως οι δέκτες έξω από το δωμάτιο δεν είναι σε θέση να λάβουν οποιοδήποτε σήμα άρα παρέχει τεράστια ασφάλεια σε σχέση με τα συστήματα RF.

Μεταξύ άλλων μια σημαντική εφαρμογή των συστημάτων VLC είναι το Li-Fi. Το Li-Fi χρησιμοποιεί το ορατό φως για την επικοινωνία για να παρέχει υψηλής ταχύτητας διαδίκτυο μέχρι 10Gbits/s. Είναι αντίστοιχο του Wi-Fi το οποίο δουλεύει στην περιοχή των



ραδιοσυχνοτήτων. Η τεχνολογία Wi-Fi η οποία είναι η πλέον καθιερωμένη τεχνολογία για εσωτερικές εφαρμογές αντιμετωπίζει μερικά προβλήματα όπως την χαμηλή λήψη δεδομένων, τις παρεμβολές και τον περιορισμένο αριθμό καναλιών που μπορεί να δώσει. Η τεχνολογία Li-Fi είναι μια ενισχυμένη έκδοση της Wi-Fi η οποία εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα του ορατού φωτός για να πραγματοποιήσει την επικοινωνία σε πολύ υψηλές ταχύτητες.

Για να κατανοήσουμε τον τρόπο λειτουργίας του Li-Fi με απλό τρόπο αρκεί να πούμε ότι αν το LED είναι αναμμένο τότε μεταφέρει το ψηφίο 1, αν είναι σβηστό τότε μεταφέρει το ψηφίο 0. Τα LEDs μπορούν να αναβοσβήσουν πολύ γρήγορα και έτσι μεταφέρονται δεδομένα με μεγάλες ταχύτητες. Η τεχνολογία Li-Fi είναι μια δομή η οποία είναι κατάλληλη για αυτούς που παρέχουν νέες υπηρεσίες και ειδικότητες.



Εικόνα 1.1: Φάσμα συχνοτήτων ορατού φωτός.

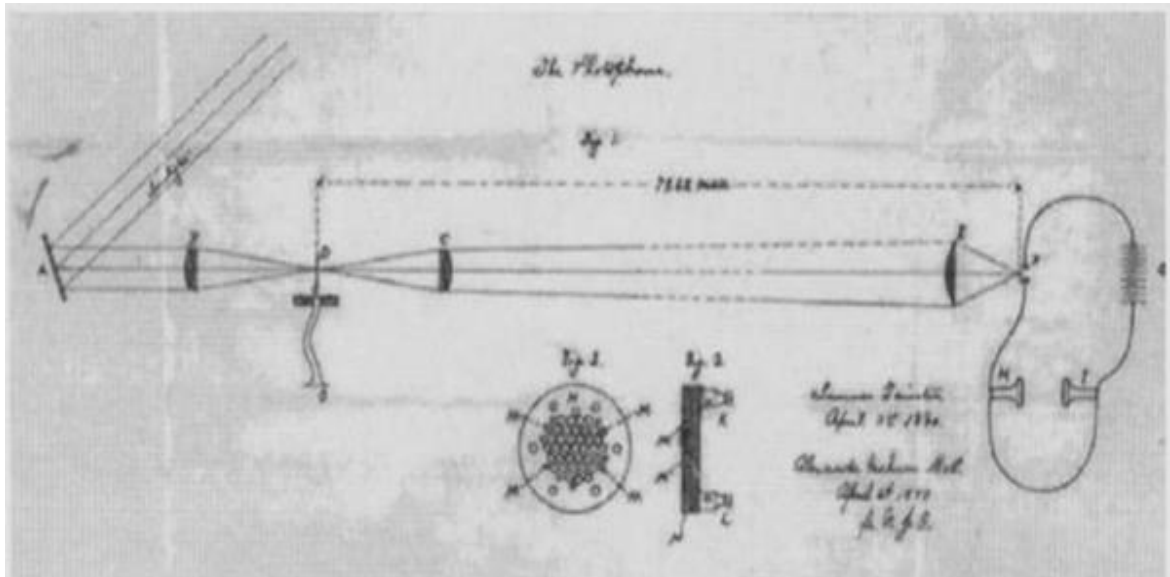
## 1.2 Ιστορία των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών

Η χρήση οπτικών εκπομπών για τη μετάδοση πληροφοριών χρησιμοποιείται από την αρχαιότητα. Πυρσοί ανάβονταν ανάμεσα στις βουνοκορφές με σκοπό τη μετάδοση μηνυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις. Ο Όμηρος στην Ιλιάδα αναφέρει τη χρησιμότητα των οπτικών σημάτων για τη μετάδοση ενός μηνύματος που αφορούσε την πολιορκία της Τροίας από τους Έλληνες περίπου το 1200 π.Χ.



Εικόνα 1.2: Ο οπτικός τηλέγραφος του C.Chappe, 1790.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1790 ο Claude Chappe, επινόησε τον οπτικό τηλέγραφο, που ήταν εγκατεστημένος σε έναν ψηλό πύργο και μπορούσε να στέλνει μηνύματα σε μεγάλες αποστάσεις αλλάζοντας τον προσανατολισμό των τριών άκρων απ' τα οποία απαρτιζόταν. Για τη μετάδοση της πληροφορίας αναπτύχθηκε ένας κώδικας ανάλογα με τις θέσεις των τριών άκρων για να κωδικοποιηθούν γράμματα, νούμερα, κοινές λέξεις και σήματα ελέγχου. Τα μηνύματα μπορούσαν να σταλούν σε αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων σε μερικά λεπτά. Μια από τις πιο πρόσφατες συσκευές ασύρματης οπτικής επικοινωνίας με την χρήση ηλεκτρονικών ανιχνευτών ήταν το φωτόφωνο (photo-phone) το οποίο επινοήθηκε από τον Alexander Graham Bell και τον Charles Sumner Tainter και προτυποποιήθηκε στις 14 Δεκεμβρίου του 1880. Το σύστημα σχεδιάστηκε για να μεταδίδει τη φωνή του χειριστή σε απόσταση μέσω της διαμόρφωσης ηλιακών ακτινών οι οποίες ανακλώνται από ένα λεπτό μεταλλικό διάφραγμα. Ο δέκτης ήταν φτιαγμένος από έναν κρύσταλλο σεληνίου που μετέτρεπε το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό ρεύμα. Με τη μέθοδο αυτή έγινε εφικτή η μετάδοση ακουστικού σήματος σε απόσταση 213m.



Εικόνα 1.3: Σχέδιο του φωτόφωνου από τους Alexander Graham Bell, Charles Sumner Tainter, Απρίλιος 1880.

Η σύγχρονη εποχή των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών δωματίου, ξεκίνησε το 1979 από τον F.R. Gfeller και τον U. Bapst, που πρότειναν τη χρήση της διάχυσης ακτινοβολίας υπερύθρου για επικοινωνίες δωματίου. Από τότε έχουν γίνει αρκετές μελέτες που αφορούν το χαρακτηρισμό των καναλιών δωματίου, το σχεδιασμό του δέκτη και του πομπού, την ανάπτυξη νέων τοπολογιών καναλιού όπως επίσης και στο θέμα της σχεδίασης συστημάτων επικοινωνίας.

Καθώς αναπτύσσονται οι κινητές επικοινωνίες τρίτης γενιάς, οι κατασκευαστές και η επιστημονική κοινότητα στρέφουν την έρευνα τους στα μελλοντικά ασύρματα συστήματα. Είναι κοινά συμφωνημένο ότι τα συστήματα τέταρτης γενιάς (4G) καθώς και τα επόμενα συστήματα, δεν θα βασίζονται σε μόνο μία τεχνική πρόσβασης. Αντίθετα τα συστήματα αυτά θα περιλαμβάνουν και διαφορετικές συμπληρωματικές τεχνολογίες πρόσβασης. Τα μελλοντικά συστήματα δε θα συνδέουν απλώς τους χρήστες με τον προσωπικό τους εξοπλισμό, αλλά θα έχουν τη δυνατότητα πρόσβασης και σε ανεξάρτητο εξοπλισμό.

Τελικά, κάποιος θα περίμενε όλες οι συνδέσεις να είναι αποκλειστικά ασύρματες. Αυτή η λογική, τοποθετεί τις ασύρματες επικοινωνίες μικρής εμβέλειας σε θέση ισχύος. Βέβαια κάποιος θα μπορούσε να διαφωνήσει, ότι οι περισσότερες ασύρματες ζεύξεις στα μελλοντικά δίκτυα θα εγκατασταθούν σε σχετικά μικρές αποστάσεις. Επιπλέον, ένα σημαντικό μέρος αυτών των ζεύξεων θα χαρακτηρίζονται από υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Πιθανόν, το μεγαλύτερο μέρος των πρακτικών εφαρμογών των επικοινωνιών μικρής εμβέλειας παίρνουν τη μορφή των τοπικών (local), προσωπικών (personal), και δικτύων κάλυψης σώματος (body)

ή WLAN, WPAN, και WBAN αντίστοιχα, καλύπτοντας εμβέλειες από μερικές δεκάδες μέτρα έως επικοινωνίες μικρότερης εμβέλειας από ένα μέτρο.

Ένα μεγάλο μέρος της κατανάλωσης ενέργειας οφείλεται στο φωτισμό. Εκτιμάται ότι το ένα τρίτο της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρισμού, διατίθεται για λόγους φωτισμού. Έτσι είναι σημαντική η ανάπτυξη πιο αποδοτικών πηγών φωτισμού. Αυτή η αλήθεια για τη κατανάλωση, έχει δημιουργήσει μια σημαντική δραστηριότητα για την ανάπτυξη πηγών στερεάς κατάστασης για να αντικαταστήσουν τις λάμπες πυρακτώσεως, και τις λάμπες φθορισμού. Οι λάμπες φθορισμού εμπεριέχουν υλικά που μολύνουν το περιβάλλον. Έτσι η εξάλειψη τους θα αφαιρέσει μια σημαντική πηγή περιβαλλοντικής μόλυνσης.

Πιο συγκεκριμένα, η αντικατάστασή τους με πολύ αποδοτικές LED (Light Emitting Diodes), που παράγουν λευκό φως, θα ελαττώσει τη κατανάλωση ενέργειας. Είναι ευτύχημα, ότι οι λευκές LED είναι ήδη εμπορικά διαθέσιμες. Οι λευκές LED (White LED - WLED) απαιτούν στη χειρότερη περίπτωση 20 φορές μικρότερη ενέργεια από τις συμβατικές πηγές λευκού φωτός, που ισούται με 5 φορές μικρότερη ισχύ από τις λάμπες φθορισμού, οι οποίες καταναλώνουν μικρότερη ενέργεια. Ένα ολόκληρο αγροτικό χωριό μπορεί να φωτιστεί με λιγότερη ενέργεια από αυτή που χρησιμοποιείται από μια συμβατική λάμπα 100W. Η μετάβαση σε φωτισμό στερεάς κατάστασης θα μειώσει τη παγκόσμια χρήση ηλεκτρισμού κατά 50%, και θα μειώσει την κατανάλωση ενέργειας κατά 760 GW μόνο στις ΗΠΑ σε μια περίοδο 20 ετών.

Ο τομέας της φωτονικής ξεκινά με την αποδοτική γενιά φωτός. Η γενιά του αποδοτικού αλλά και πολύ ελεγχόμενου φωτισμού, μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση LEDs. Η χρήση μιας WLED αντί του συμβατικού φωτισμού, σημαίνει σημαντική μείωση του όγκου, του κόστους και της κατανάλωσης ενέργειας, αφού οι οπτικές συσκευές είναι μικρότερες και απλούστερες από τις ηλεκτρικές συσκευές. Οι WLEDs είναι ημιαγώγιμες συσκευές.

Πριν από περίπου 12 έτη, οι ερευνητές συνειδητοποίησαν ότι οι WLEDs, εκτός του ότι ήταν πού κατάλληλες για φωτισμό χώρου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ασύρματες επικοινωνίες. Τα θετικά μιας τέτοιας τεχνολογίας είναι πολλά. Ένα είναι ότι ανήκουν στην πράσινη τεχνολογία όταν χρησιμοποιούνται για φωτισμό, και γίνονται ακόμα πιο φιλικές στο περιβάλλον, όταν αυτές χρησιμοποιούνται για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς, όταν συγκρίνονται με τις εναλλακτικές τεχνολογίες ραδιοσυχνοτήτων (RF). Επίσης οι LED και οι φωτοανιχνευτές (photo-detectors), τείνουν να γίνουν αρκετά φθηνότεροι συγκρινόμενα με τα RF αντίστοιχά τους.

Οι οπτικές ασύρματες επικοινωνίες επιτρέπουν την εύκολη επαναχρησιμοποίηση εύρους ζώνης, και βελτιώνουν την ασφάλεια, αφού το φως περιορίζεται στο δωμάτιο που φωτίζει. Επίσης δεν παράγουν RF μόλυνση, ούτε επηρεάζονται από RF παρεμβολή. Έτσι, αντικαθιστώντας RF συσκευές με συσκευές που χρησιμοποιούν λευκό φως ως μέσο για τις τηλεπικοινωνίες (τουλάχιστον σε κλειστούς χώρους) θα μειωθεί η παρεμβολή στις RF ζώνες συχνοτήτων.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι καθώς οι καταναλωτές και οι κατασκευαστές προϊόντων θα επωφεληθούν, η τεχνολογία μπορεί να εισχωρήσει αρκετά σε περιπτώσεις που δεν μπορεί η RF τεχνολογία, όπως σε νοσοκομεία, σχολεία, αεροπλάνα και ορυχεία. Οι RF παρεμβολές έχουν προκαλέσει ατυχείς πυροδοτήσεις εκρήξεων όταν χρησιμοποιούνται συσκευές πυροδότησης από απόσταση.

Ομοσπονδιακοί κανονισμοί θέτουν το 1Watt ως μέγιστο επιτρεπτό όριο RF ισχύος μέσα σε ορυχεία που χρησιμοποιούν ασύρματους πυροκροτητές. Επίσης, σήματα RF έχουν παρεμβληθεί σε οδηγίες προσγείωσης σε αεροπλάνα που προσγειώνονται. Αντικαθιστώντας τους συμβατικούς λαμπτήρες με WLED και χρησιμοποιώντας τα για διαβίβαση δεδομένων και φωτισμό, μπορούν να εξοικονομηθούν μεγάλα ποσά ενέργειας.

Η ευρέως διαδεδομένη εμπορική χρήση της οπτικής επικοινωνίας ελευθέρου χώρου (Free Space Optics - FSO), εμφανίστηκε πριν επικρατήσει η χρήση των αντίστοιχων RF. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούσαν υπέρυθρες συχνότητες (IR), ήταν για εσωτερική χρήση, και χρησιμοποιήθηκαν σε διάφορες εφαρμογές (π.χ. για μονάδες τηλεχειρισμού, και ως θύρες επικοινωνίας ανάμεσα σε συσκευές). Σε αυτά τα πρώτα χρόνια, μόνο οι IR LED ήταν διαθέσιμες με μικρό κόστος.

Το 1993 δημιουργήθηκε ο Infrared Data Association (IrDA), για να παράγει χαμηλού κόστους παγκόσμια - συμβατή υπέρυθρη τεχνολογία και ένα forum για την ανάπτυξη των IR FSO προτύπων. Το πρωτόκολλο IrDA, αναπτύχθηκε και έχει μεταβληθεί σε βιομηχανικό πρότυπο. Το πρότυπο IEEE 802.11 παρείχε λεπτομέρειες για το φυσικό επίπεδο (physical layer) του IR. Ωστόσο, αυτά μπορεί να μην είναι εφαρμόσιμα σήμερα. Σε όρους διαμόρφωσης και ανίχνευσης, η διαμόρφωση έντασης (Intensity Modulation-IM) και η άμεση ανίχνευση (Direct Detection-DD), δύνανται να παρέχουν ένα οικονομικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα FSO, πολύ οικονομικότερο από το αντίστοιχο RF.

Ενώ το FSO μπορεί να επιτύχει πολύ υψηλούς ρυθμούς bit, σε περίπτωση ανεμπόδιστης οπτικής επαφής (Line Of Sight-LOS) ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη, ο ρυθμός μετάδοσης μειώνεται σημαντικά όταν δεν υπάρχουν συνθήκες LOS. Σε πολλές περιπτώσεις, η

διασφάλιση των συνθηκών LOS είναι μια μεγάλη πρόκληση, και συνήθως απαιτεί τη χρήση σχετικά περίπλοκης και ακριβής τεχνολογίας. Βέβαια, η παρεμβολή από το φως του περιβάλλοντος έχει αρνητική επίδραση και μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση εύρωστων μορφών σημάτων, ή/και οπτικών φίλτρων.

Η ερευνητική περιοχή των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών, δεν είχε αρκετή απήχηση για αρκετά χρόνια, εκτός από κάποιες στρατιωτικές εφαρμογές λόγω της ασφάλειας που προσφέρει. Εν τούτοις, ο μεγαλύτερος αριθμός ασύρματων συσκευών που έχουν πωληθεί, τα τηλεχειριστήρια TV, χρησιμοποιούν ακτίνες IR για να λειτουργήσουν. Ο αριθμός των ερευνητών και ερευνητικών συνεργασιών, που ασχολούνται με ασύρματες οπτικές επικοινωνίες δεν συγκρίνεται με τον αριθμό των αντίστοιχων ερευνητών που ασχολούνται με ασύρματες RF τεχνολογίες.

Οι ασύρματες οπτικές τεχνολογίες, χρησιμοποιούν οπτικά φέροντα για τη μετάδοση της πληροφορίας από το ασύρματο οπτικό κανάλι από το ένα μέρος στο άλλο. Αυτά τα κανάλια διαχωρίζονται μεταξύ τους από τα αντίστοιχα RF. Αυτά μπορούν να απασχολήσουν χωρίς άδεια οπτικό φάσμα πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο, στις περιοχές του υπερύθρου (IR), του ορατού (VL), και του υπεριώδους (UV), και έτσι να προσφέρουν μεγάλες δυνατότητες σε ρυθμούς υψηλής μετάδοσης με βελτιωμένη ασφάλεια δεδομένων.

Αυτές οι συχνότητες δεν προσβάλλονται από ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (Electromagnetic Interference-EMI), ιδανική για πολιτικές εφαρμογές σε ευαίσθητα περιβάλλοντα όπως νοσοκομεία και αεροπλοΐα, όπως και στρατηγικές εφαρμογές που απαιτούν προστασία από παρεμβολές (anti-jamming). Το πολύ μικρό μήκος κύματος ενός οπτικού φέροντος, δίνει τη δυνατότητα σε ένα πομπο-δέκτη πολύ μικρών διαστάσεων, να ακτινοβολεί οπτικά σήματα υψηλής πυκνότητας με μικρή ισχύ και μπορεί να οδηγήσει σε υψηλή διακριτική ικανότητα (resolution) στην οπτική απεικόνιση.

Οι ανάγκες για υψηλή διακριτική ικανότητα στην οπτική απεικόνιση, εκτείνονται από βιοϊατρικές εφαρμογές μέχρι προσωπικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Η UV απεικόνιση βασίζεται στους άριστα εξελιγμένους ημιαγωγικούς ανιχνευτές UV όπως οι φωτοανιχνευτές χιονοστιβάδας (Avalanche Photodetectors – APD), είναι ένα αναδυόμενο πεδίο για την προσγείωση αεροπλάνων σε ομιχλώδη και ασαφή περιβάλλοντα, καθώς και πληροφορίες ατμοσφαιρικής ρύπανσης για την προστασία του περιβάλλοντος. Όταν η UV ακτινοβολία χρησιμοποιείται για τηλεπικοινωνίες, η ελάχιστη ηλιακή ακτινοβολία και η ατμοσφαιρική σκέδαση που συμβαίνει σε αυτές τις συχνότητες, βοηθά στην κατασκευή μιας υψηλής ποιότητας μη-άμεσης (NLOS) ζεύξης.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό τα εξωτερικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα να λειτουργούν χωρίς περιορισμούς στροφής πομποδεκτών. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ελκυστικό στην εφαρμογή δικτύων των Unattended Ground Sensors (UGS–εφαρμογή για μαχητικά συστήματα των ΗΠΑ). Για την εύρωστη συνδεσιμότητα των κόμβων των αισθητήρων του συστήματος.

Οι ερευνητικές ομάδες που έστρεψαν τις έρευνές τους για εφαρμογές των LED ορατού φωτός στις τηλεπικοινωνίες, εντοπίζονται χρονικά περίπου στα 1998 - 1999. Ωστόσο, σε σύγκριση με άλλες περιοχές των ασύρματων επικοινωνιών, οι ερευνητικές μελέτες που έχουν ανακοινωθεί είναι αξιοσημείωτα περιορισμένες. Οι πολύ αρχικές μελέτες, υποδεικνύουν εφαρμογές και συστήματα στενού φάσματος και μικρού ρυθμού δεδομένων.

Έρευνες που παρουσιάζουν ευρυζωνικές επικοινωνίες ορατού φωτός (VLC), με χρήση WLED ξεκίνησαν να εμφανίζονται το 2001 και συνεχίστηκαν τα επόμενα χρόνια με έρευνες που διεξήχθησαν από το Keio University στη Yokohama της Ιαπωνίας. Το Νοέμβριο του 2003 ιδρύθηκε στην Ιαπωνία ο VLCC (Visible Light Communications Consortium), έχοντας ανάμεσα στα μέλη του μεγάλους Ιαπωνικούς βιομηχανικούς οργανισμούς: Toshiba, NEC, KDDI, Panasonic, Sony, Toyota, Sumitomo, Mitsubishi, NTT DoCoMo, Casio, και Sharp είναι ανάμεσα σε αυτούς. Και η Samsung από τη Νότιο Κορέα έγινε μέλος του consortium. Ο VLCC ιδρύθηκε από αυτές τις μεγάλες εταιρίες για να εξελίξει, να σχεδιάσει, να ερευνήσει, και να προτυποποιήσει τα ιαπωνικά συστήματα VLC. Ο στόχος του είναι να εξελίξει, να ερευνήσει, να σχεδιάσει και να προτυποποιήσει τα μόνιμης πρόσβασης, υψηλής ταχύτητας και φιλικά για υγεία συστήματα VLC.

Αργότερα ο WWRF (Wireless World Research Form) ξεκίνησε κάποια δραστηριότητα στον τομέα αυτόν. Παρόλο που μερικές ακόμα ερευνητικές ομάδες εμφανίστηκαν την περίοδο ανάμεσα στο 2000 και 2006 από άλλους ερευνητές, η έρευνα στην περιοχή αυτή άρχισε να γίνεται αξιοπρόσεκτη από το 2007 όταν μια έρευνα από τον J. Kahn με τίτλο “Imaging Diversity Receivers for High-Speed Infrared Wireless Communication”, εμφανίστηκε στο περιοδικό Scientific American το οποίο μεταφράστηκε σε πολλές γλώσσες.

Η Ευρώπη και οι ΗΠΑ ξεκίνησαν τη χρηματοδότηση μεγάλων προγραμμάτων στον τομέα αυτόν το 2008. Η Ευρωπαϊκή Ένωση χρηματοδότησε πολύ καλά το σχέδιο hOME Gigabit Access (OMEGA), με σκοπό την ανάπτυξη παγκόσμιων προτύπων για οικιακά δίκτυα, που να περιλαμβάνουν τη χρήση οπτικών επικοινωνιών στις συχνότητες των τεχνολογιών IR και VLC. Αυτό ιδρύθηκε σαν μέρος του προγράμματος Framework Programme 7 (P7) R&D της

Ευρωπαϊκής Ένωσης. Κυριότερα βιομηχανικά μέλη είναι η France Telecom, η Thomson, η IHP Microelectronics, η ComNets (RWTH), και η Siemens.

Τελικά ο IEEE εξέδωσε μια έκκληση για συμμετοχή (Call for Contributions) στο IEEE 802.15.7 VLC το 2009, και διεξήχθη η πρώτη συνάντηση.

### 1.3 Η παρούσα κατάσταση στις ασύρματες επικοινωνίες

Εκτός από την έλλειψη φάσματος η ασύρματη επικοινωνία ραδιοσυχνοτήτων πάσχει και από το πρόβλημα των παρεμβολών, δεδομένου ότι οι περισσότερες ασύρματες συσκευές είναι ηλεκτρομαγνητικές. Επιγραμματικά η επικοινωνία ραδιοσυχνοτήτων υποφέρει από πολλά προβλήματα τα οποία πολλές φορές είναι ανυπέρβλητα. Κάποια από αυτά είναι:

- Παρεμβολές εναλλασσόμενου ρεύματος: παράδειγμα των παρεμβολών αυτών είναι η χρήση κινητών τηλεφώνων στα αεροσκάφη, τα οποία προκαλούν παρεμβολές με την επικοινωνία και τα συστήματα πλοήγησης των αεροσκαφών. Εκτός από τις παρεμβολές εντός του αεροσκάφους, τα κινητά τηλέφωνα προκαλούν παρεμβολές και με τα επίγεια συστήματα πλοήγησης και τους πύργους ελέγχου όπως χαρακτηριστικά αναφέρει η Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας- FCC.
- Χαμηλές απαιτήσεις λανθάνουσας κατάστασης: ανεξάρτητα από τις παρεμβολές, είναι σαφές ότι σε ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνιών χρειάζονται πολύ χαμηλές απαιτήσεις λανθάνουσας κατάστασης όπως γίνεται στην επικοινωνία μεταξύ οχημάτων ή σε συστήματα ασφαλείας. Το περιορισμένο εύρος ζώνης των ραδιοσυχνοτήτων δεν είναι κατάλληλο για αυτό τον σκοπό.
- Θέματα ασφάλειας: τα ραδιοκύματα διαπερνούν εύκολα τα εμπόδια άρα πάσχουν από θέματα ασφάλειας.
- Η αύξηση της ισχύς μετάδοσης των ραδιοκυμάτων πέραν από κάποιο όριο ενέχει κινδύνους για την υγεία των ανθρώπων.

Τα προβλήματα των επικοινωνιών μέσω ραδιοκυμάτων (RF) έχουν δημιουργήσει μια στασιμότητα όσον αφορά την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων και την μετάβαση σε επόμενες γενιές ασύρματης μετάδοσης. Πολλά από τα προβλήματα που υπάρχουν στα συστήματα RF μπορούν να αντιμετωπιστούν με συστήματα επικοινωνιών μέσω του ορατού φωτός VLC τα οποία χρησιμοποιούν το ορατό φως σαν φέρον σήμα για την μετάδοση της πληροφορίας.

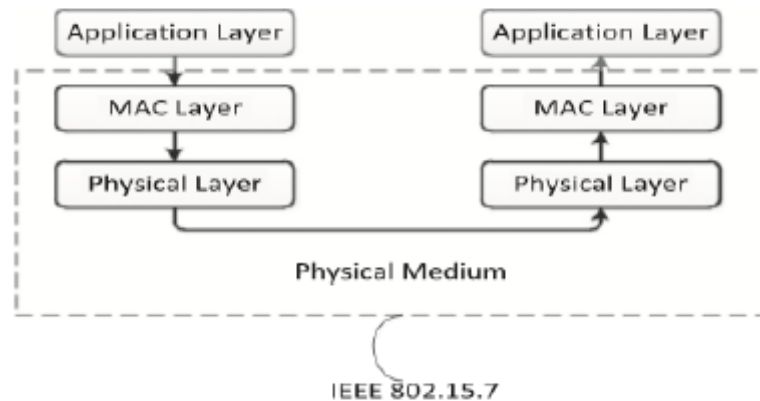


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ VLC

### 2.1 Η αρχιτεκτονική των οπτικών επικοινωνιών στο ορατό φάσμα

Σε όλα τα συστήματα επικοινωνιών αναπόσπαστα τμήματα αποτελούν ο πομπός και ο δέκτης. Έτσι και στα συστήματα VLC ο πομπός και ο δέκτης αποτελούν τα βασικά συστατικά του που αποτελούνται γενικά από τρία στρώματα. Το φυσικό στρώμα, το στρώμα της MAC και το στρώμα εφαρμογής.

Το πρότυπο αναφοράς του συστήματος επικοινωνιών VLC παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1. Η IEEE της 802.15.7, καθορίζει μόνο δύο στρώματα το φυσικό στρώμα και το στρώμα της MAC λόγω απλότητας.



Εικόνα 2.1: Αρχιτεκτονικές στρωμάτων VLC.

#### 2.1.1 Πομπός

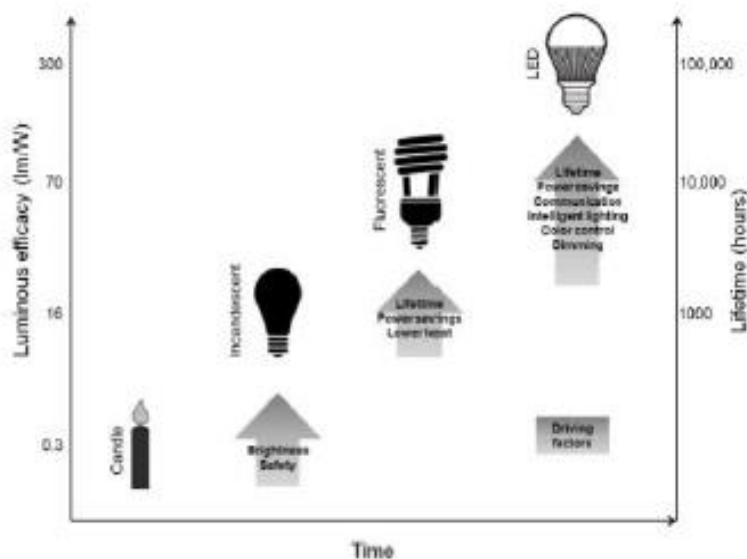
Για να λειτουργήσει ένας πομπός στα συστήματα VLC θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν LEDs ή λείζερ. Σημαντικό στοιχείο της τεχνολογίας VLC είναι τα LEDs και αυτά θα μελετήσουμε καθώς χρησιμοποιούνται ευρέως και κυρίως όταν υπάρχει η ανάγκη για την ταυτόχρονη οπτική επικοινωνία η οποία γίνεται με την χρήση μιας ενιαίας συσκευής.

Η ανάπτυξη των LEDs έχει δημιουργήσει ένα σταθερό τομέα ανάπτυξης της οπτικής επικοινωνίας. Η τεχνολογία της οπτικής επικοινωνίας φάνταζε αδύνατη πριν λίγα χρόνια λόγω της μη ύπαρξης των LEDs. Τα LEDs είναι πιο αξιόπιστες και με μεγαλύτερη ισχύ και αποδοτικότητα πηγές φωτός παρά οι πυρακτωμένες πηγές φωτός.

#### Λαμπτήρες LED

Η έννοια του φωτισμού προήλθε από πολύ παλιά όταν οι άνθρωποι ήθελαν να φωτίσουν τον χώρο τους με την χρήση της φωτιάς και στην συνέχεια με την χρησιμοποίηση κεριών. Σταδιακά, μετά από πολλές βελτιώσεις καταλήξαμε σήμερα να χρησιμοποιούμε τα LEDs. Οι

αρχικές τεχνολογίες φωτισμού χρησιμοποιούσαν λευκοπυρωμένες λάμπες, όμως λόγω της τεράστιας ενέργειας που σπαταλούσαν, πλέον χρησιμοποιούνται οι λάμπες φθορισμού. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.2, οι λαμπτήρες LED έχουν πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και είναι πιο οικονομικές σύμφωνα με την απόδοση ανά ενέργεια που καταναλώνουν συγκριτικά με άλλες παραδοσιακές τεχνολογίες φωτισμού.



Εικόνα 2.2: Ανάπτυξη της τεχνολογίας φωτός.

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι σε ένα σύστημα που χρησιμοποιεί το ορατό φως για να μεταφέρει δεδομένα, ο πομπός είναι η πηγή του φωτός. Από όλους του συμβατικούς τύπους φωτισμού που υπάρχουν αυτός που τελικά επικράτησε και χρησιμοποιείται σε VLC εφαρμογές είναι οι λάμπες LED (Light emitting diode – δίοδος εκπομπής φωτός). Αυτό οφείλεται στο ότι οι λάμπες LED υπερτερούν των υπόλοιπων λαμπτήρων φωτισμού, ως προς τα χαρακτηριστικά φωτισμού, αλλά και ως προς την δυνατότητα μεταφοράς πληροφορίας.

Τα LEDs είναι μια συσκευή ημιαγωγών στερεάς κατάστασης που έχει την ικανότητα εναλλαγής ηλεκτρικής ενέργειας σε φωτεινή ενέργεια. Η βασική δομή του LED είναι ένα τσιπ ημιαγωγών το οποίο δημιουργεί μια σύνδεση p – n. Περιέχει ένα ημιαγωγικό υλικό που βοηθάει στη δημιουργία της p-n σύνδεσης. Μέσα στην σύνδεση ρέουν κάποιοι φορείς ηλεκτροδότησης, κυρίως ηλεκτρόνια και τρύπες από ηλεκτρόδια με διαφορετικές τάσεις. Στην εφαρμογή της τάσης, ένα ηλεκτρόνιο συναντά μια τρύπα και πέφτει σε ένα χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο, που απελευθερώνει την ενέργεια υπό μορφή φωτονίων το οποίο φαίνεται ως ορατό φως. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται electro luminescence.

Τα LEDs έχουν πολλά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις παραδοσιακές τεχνολογίες φωτισμού.

- Τα LEDs είναι ενεργειακά αποδοτικά και παράγουν λιγότερη θερμότητα. Μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας κατά 80% στις εσωτερικές εφαρμογές φωτισμού.
- Τα LEDs έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής και μπορούν να λειτουργήσουν για 25000 – 50000 ώρες πριν η απόδοσή τους πέσει στο 70% συγκριτικά με τις πυρακτωμένες λάμπες που έχουν διάρκεια ζωής 6000 – 15000 ώρες μόνο.
- Έχουν υψηλότερη φωτεινή αποτελεσματικότητα από τις παραδοσιακές πηγές φωτισμού. Η ανάπτυξη των μπλε και πράσινο LEDs ανοίγουν τις πόρτες για τα αποδοτικά WLEDs, τα οποία κατά τη διάρκεια των τελευταίων 2 δεκαετιών έχουν ξεπεράσει τη φωτεινή αποτελεσματικότητα των πυρακτωμένων λαμπτήρων φωτός (14 lm/W) και πιο πρόσφατα, τους λαμπτήρες φθορισμού (75 lm/W).
- Είναι απαλλαγμένες από επικίνδυνες ουσίες όπως τον ψευδάργυρο.
- Το έμφυτο εύρος ζώνης διαμόρφωσης που έχουν τα LEDs (μέχρι 100's του MHz) τα βοηθά να έχουν ένα διπλό ρόλο ως συσκευή επικοινωνιών εκτός από το φωτισμό του χώρου.
- Τα LEDs έχουν τη πρωτοφανή μεταβλητότητα στον έλεγχο του φάσματος ακτινοβολίας, όντας σε θέση να παραγάγουν φωτισμό με μια υψηλή ποικιλομορφία χρώματος και έντασης.
- Τα LEDs εκπέμπουν φως συγκεκριμένου χρώματος χωρίς την χρήση φίλτρων που απαιτούν οι παραδοσιακοί μέθοδοι φωτισμού. Είναι πιο αποδοτικά και χαμηλώνουν το αρχικό κόστος.
- Τα LED έχουν γρήγορη απόκριση. Μια τυπική λάμπα LED κόκκινου χρώματος μπορεί να έρθει σε κατάσταση πλήρους φωτεινότητας σε χρόνο ms. Τα LED που χρησιμοποιούνται ως συσκευές επικοινωνίας έχουν ακόμα μικρότερους χρόνους απόκρισης.

Αυτές οι συναρπαστικές συμπληρωματικές πτυχές για την επικοινωνία μέσω του φωτισμού των LEDs έχει παράξει ιδιαίτερη έρευνα και βιομηχανικό ενδιαφέρον για την χρήση των LEDs στα συστήματα VLC. Με την υψηλή φωτεινότητα των LEDs, όπως είναι τα HB-LEDs, να κερδίζουν έδαφος στον εσωτερικό φωτισμό, στο φωτισμό στα φανάρια τροχαίας, στις υπαίθριες εφαρμογές η χρησιμοποίηση της υπάρχουσας υποδομής φωτισμού για VLC συστήματα θα είναι μια συναρπαστική τεχνολογική εξέλιξη.

Μερικά από τα είδη των LEDs μαζί με τα κύρια χαρακτηριστικά τους δίνονται στον πίνακα 2.1. Όπως φαίνεται, κάθε τύπος έχει τα ειδικά χαρακτηριστικά, που του επιτρέπουν να

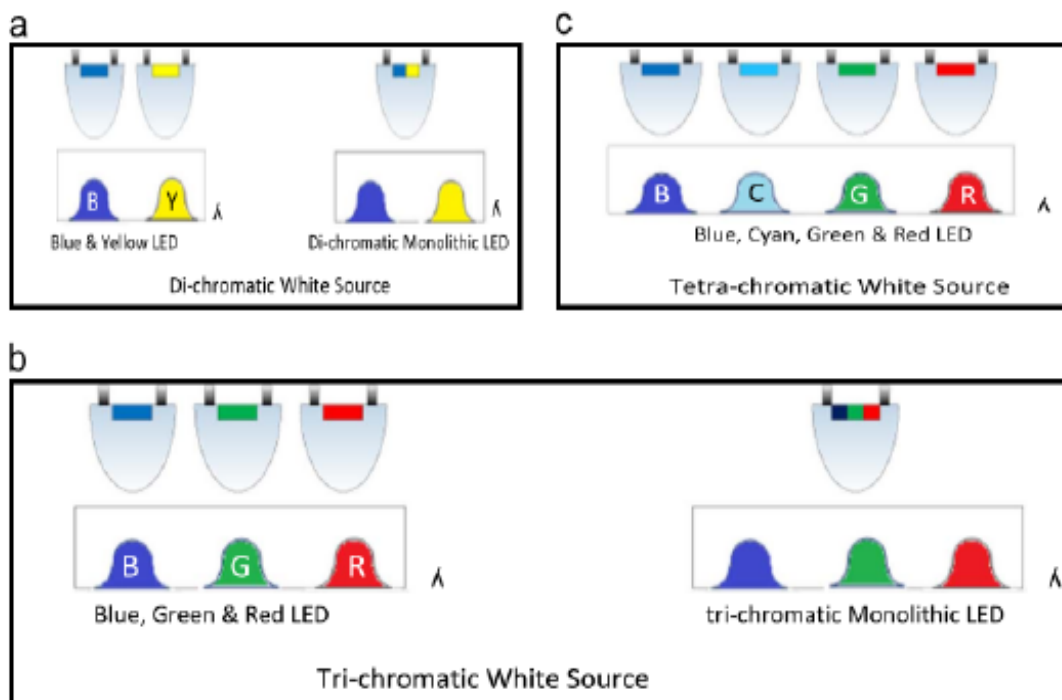
επιλεχτεί συγκεκριμένα για τους διαφορετικούς τύπους εφαρμογών με συγκεκριμένες απαιτήσεις.

### PC-LEDs

Το άσπρο φως από τα LEDs παράγεται χρησιμοποιώντας δύο μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος, αποτελείται από ένα Phosphor Converted LED (PC-LED) το οποίο χρησιμοποιεί ένα μπλε Indium Gallium Nitride LED (InGaN) τσιπ για να αντλήσει ένα Yttrium Aluminum Garnet (YAG) φωσφορικό επίστρωμα. Ο φωσφόρος μετατρέπει ένα μέρος του μπλε φωτός σε πράσινη, κίτρινη και κόκκινη μερίδα του φάσματος ενώ το άλλο μέρος του μπλε φωτός διαρρέεται έξω, το μίγμα του οποίου παράγει το λευκό φως. Ανάλογα με το ποσό φωσφόρου το άσπρο φως που παράγεται από PC-LEDs μπορεί να χαρακτηριστεί σαν θερμό-λευκό, ουδέτερο-λευκό ή δροσερό-λευκό και χαρακτηρίζεται από την Correlated Color Temperature (CCT).

### RGB LED

Οι βασικοί υποψήφιοι για να χρησιμοποιηθούν σαν πηγή στα συστήματα VLC είναι το άσπρο φως που βασίζεται σε LEDs και οι μετατροπείς μήκος κύματος. Για τη δημιουργία του άσπρου φωτός υπάρχουν αρκετά διαφορετικά φάσματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Είναι οι τετραχρωματικοί, οι διχρωματικοί και οι τριχρωματικοί τρόποι οι οποίοι παρουσιάζονται στην εικόνα 2.3. Η πιο κοινή μέθοδος για την παραγωγή του άσπρου φωτός είναι οι τριχρωματικοί ή αλλιώς RGB η οποία αποτελείται από LEDs χρώματος κόκκινου, πράσινου και μπλε. Τα RGB LEDs παρέχουν ένα υψηλό εύρος ζώνης και έτσι υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης. Έχουν όμως μεγάλη πολυπλοκότητα και δυσκολίες στην υλοποίηση.



Εικόνα 2.3: Πηγή άσπρου φωτός βασισμένη σε LEDs.

### Micro LEDs (μ-LED)

Στις μέρες μας ερευνάται η ανάπτυξη των AlGaIn και θα χρησιμοποιηθούν στα συστήματα VLC και στα συστήματα πολυμερών οπτικών ινών (POF). Τα μ-LEDs έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ως οθόνες που ενσωματώνουν παράλληλη επικοινωνία υψηλής πυκνότητας. Αυτές οι σειρές χαρακτηριστικά εκπέμπουν φως σε ακτίνα μήκους κύματος 370-520 nm, με τη δυνατότητα το μήκος κύματος να μετατρέπεται σε άσπρο φως. Το κάθε ένα pixel έχει εμβέλεια 14-84 μm και το 3-dB εύρος ζώνης φθάνει σε 450 MHz επιτρέποντας ταχύτητες μέχρι και 1.5 Gb/s.

### Οργανικό LED (OLED)

Τα OLEDs παράγουν φως χρησιμοποιώντας ένα οργανικό στρώμα στρωμαγμένο μεταξύ των θετικών και αρνητικών φορέων και χρησιμοποιείται κυρίως μέσα στις οθόνες. Η χαρακτηριστική απόκριση συχνότητας για τα OLEDs είναι της τάξεως των 100kHz πολύ χαμηλότερου από τα ανόργανα LEDs που καθιστά τα OLEDs λιγότερο κατάλληλα για τις εφαρμογές υψηλής ταχύτητας. Η διάρκεια ζωής των άσπρων OLEDs είναι 50.000 ώρες, λιγότερο από τη διάρκεια ζωής των χαρακτηριστικών ανόργανων LEDs.

Συνοπτικά, η υψηλή ικανότητα εναλλαγής των LEDs μαζί με άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα όπως η ενεργειακή αποδοτικότητα και η μακροχρόνια διάρκεια ζωής, κάνει τα

LEDs την ευνοϊκότερη πηγή φωτός που μπορεί να ενσωματωθεί στα VLC συστήματα. Επίσης δεν υπάρχει κανόνας για το ποια LEDs είναι καταλληλότερα. Τα κατάλληλα LEDs επιλέγονται βάση του προτύπου καναλιών

Παράμετρος	<i>Pc-LED</i>	<i>RGB LED</i>	<i>μ-LED</i>	<i>OLED</i>
Εύρος ζώνης	3-5 MHz	10-20 MHz	$\geq 300$ MHz	$\leq 1$ MHz
Απόδοση	130 lm/W	65 lm/W	-	45 lm/W
Κόστος	Χαμηλό	Υψηλό	Υψηλό	Χαμηλότερο
Πολυπλοκότητα	Χαμηλό	Μέτριο	Υψηλότερο	Υψηλό
Εφαρμογή	Φωτισμός	Φωτισμός	Βιο- αισθητήρες	Μετάδοση

Πίνακας 2.1: Σύγκριση των διαφορετικών τύπων LEDs.

### 2.1.2 Δέκτης

Ο χαρακτηριστικός δέκτης VLC αποτελείται από ένα κύκλωμα ενισχυτή, ένα οπτικό φίλτρο και ένα οπτικό συλλέκτη όπως φαίνεται στην εικόνα 2.4.

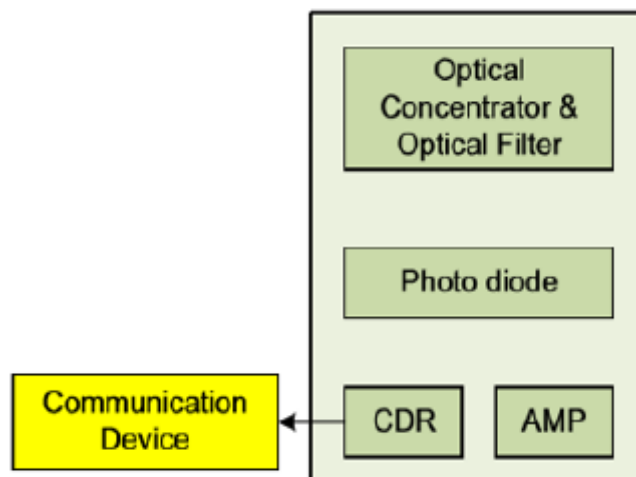
Χαρακτηριστικό γνώρισμα των LEDs είναι η απόκλιση των ακτινών φωτός λόγω της φωταγώγησης μεγάλης περιοχής η οποία οδηγεί σε απόσβεση. Έτσι ο οπτικός συλλέκτης είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει την απόσβεση αυτή. Για να ανιχνεύσει το φως ο δέκτης VLC χρησιμοποιεί μια φωτοδίοδο η οποία μετατρέπει το φως σε ένα οπτικό ρεύμα δεδομένων. Οι επιδόσεις ενός συστήματος οπτικών επικοινωνιών αξιολογούνται στο δέκτη και άρα ο οπτικός ανιχνευτής ή φωτοανιχνευτής αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα στοιχεία του συστήματος. Οι γενικές απαιτήσεις που πρέπει να έχει ένας οπτικός ανιχνευτής είναι:

1. Υψηλή ευαισθησία στα μήκη κύματος που εκπέμπουν οι οπτικές πηγές.
2. Υψηλή πιστότητα, δηλαδή ικανότητα πιστής αναπαραγωγής του οπτικού σήματος που λαμβάνεται. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην αναλογική οπτική μετάδοση, όπου η απόκριση του ανιχνευτή θα πρέπει να είναι γραμμική σε σχέση με το οπτικό σήμα μέσα σε κάποιο ικανοποιητικό εύρος οπτικής ισχύος.
3. Ο ανιχνευτής θα πρέπει να δίνει το μέγιστο δυνατό ηλεκτρικό σήμα για ένα δεδομένο επίπεδο προσπίπτουσας οπτικής ισχύος, να έχει δηλαδή τη μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα.

4. Γρήγορη απόκριση προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με συστήματα που προορίζονται για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.
5. Χαμηλή εισαγωγή θορύβου, όπως για παράδειγμα χαμηλά σκοτεινά ρεύματα (dark currents) ή ρεύματα διαρροής.
6. Μικρή ευαισθησία στις μεταβολές των συνθηκών του περιβάλλοντος, όπως της θερμοκρασίας.
7. Μικρό μέγεθος, αποτελεσματική σύζευξη με τις οπτικές ίνες και εύκολη συσκευασία με τα ηλεκτρονικά που ακολουθούν.
8. Υψηλή αξιοπιστία για αδιάλειπτη λειτουργία πολλών ετών σε συνθήκες δωματίου.
9. Χαμηλό κόστος.

Λόγω των διαφορετικών μηκών κύματος της υπέρυθρης και της οπτικής επικοινωνίας οι παράμετροι του VLC είναι διαφορετικοί από αυτούς της τεχνολογίας RF. Στα συστήματα VLC χρησιμοποιούνται οι φωτοдиодοι πυριτίου, οι φωτοдиодοι καρφισών (PIN) και φωτοдиодοι χιονοστιβάδων. Μια φωτοдиодος πυριτίου έχει υψηλότερο κέρδος από μια φωτοдиодο καρφισών αλλά με μεγαλύτερο κόστος. Η τεχνολογία VLC είναι τρωτή από τις παρεμβολές άλλων πηγών φωτός όπως είναι το φως του ήλιου επομένως πρέπει να σχεδιαστούν κατάλληλα οπτικά φίλτρα για να μετριάσουν το θόρυβο που βρίσκεται στο λαμβανόμενο σήμα.

Σε ένα δέκτη VLC γενικά χρησιμοποιείται μια φωτοдиодος για την υποδοχή των οπτικών σημάτων. Όταν έχουμε ένα στάσιμο δέκτη είναι καλύτερο να χρησιμοποιήσουμε μια φωτοдиодο εντούτοις, στην περίπτωση της κινητικότητας υιοθετείται ένας αισθητήρας απεικόνισης αντί της φωτοдиодου λόγω του μεγαλύτερου FOV (Field Of View). Αν και οι αισθητήρες απεικόνισης είναι ενεργειακά ακριβοί και αργοί εντούτοις μια ανταλλαγή πρέπει να γίνει μεταξύ του κόστους, της ταχύτητας και της πολυπλοκότητας.



Εικόνα 2.4: Τυπικός Δέκτης VLC.

Τελικά η φωτοδίοδος συλλέγει το φως με τη βοήθεια φακών και στη συνέχεια μετατρέπει την οπτική ισχύ σε ηλεκτρικό σήμα. Θα πρέπει όμως να μεσολαβήσει κάτι μεταξύ των δύο παραπάνω διαδικασιών, για να αντιμετωπιστεί ένα πρόβλημα που προκύπτει στις επικοινωνίες ορατού φωτός. Το πρόβλημα λοιπόν που θα πρέπει να αντιμετωπίσουμε είναι το φως περιβάλλοντος που υπάρχει στα μέρη που μπορεί να εγκατασταθεί το VLC. Το φως περιβάλλοντος είναι σε μήκη κύματος όμοια με αυτά του εκπεμπόμενου φωτός, κάτι το οποίο μπορεί λειτουργήσει καταστροφικά για την ανίχνευση, καθώς η φωτοδίοδος θα μπερδεύει το φως περιβάλλοντος με τη φωτεινή δέσμη που εκπέμπεται από τον πομπό.

## 2.2 Φυσικό στρώμα

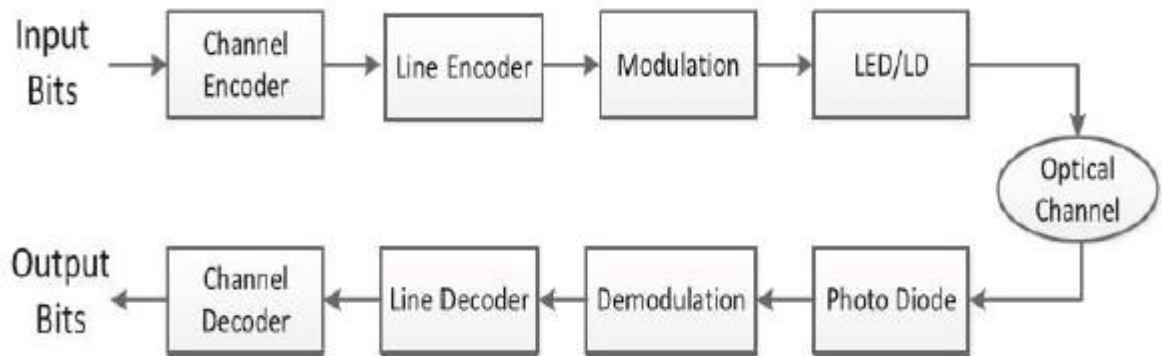
Το φυσικό στρώμα παρέχει τη φυσική προδιαγραφή της συσκευής και επίσης τη σχέση μεταξύ της συσκευής και του μέσου. Στην εικόνα 2.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα φραγμών της γενικής εφαρμογής στο φυσικό στρώμα του συστήματος VLC.

Καταρχάς το ρεύμα των bits εισόδου, περνά μέσω του κωδικοποιητή καναλιών. Οι γραμμικοί κώδικες φραγμών και οι συνελκτικοί κώδικες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν την απόδοση του συστήματος. Κατόπιν το κωδικοποιημένο κανάλι του ρεύματος των bits περνά μέσω του κωδικοποιητή γραμμών για να παράγει το κωδικοποιημένο ρεύμα των bits. Μετά από την κωδικοποίηση εκτελείται η διαμόρφωση, και τελικά τα στοιχεία τροφοδοτούν τα LEDs για τη μετάδοση μέσω του οπτικού καναλιού.

Ένα πλήρες διπλό αμφίδρομο σύστημα VLC που χρησιμοποιεί RGB LEDs τα οποία είναι διαθέσιμα στο εμπόριο, και είναι LEDs βασισμένα στο φωσφόρο προτείνονται για την άνω και κάτω ζεύξη αντίστοιχα. Για να επιτύχουμε την αμφίδρομη μετάδοση χρησιμοποιούνται ένας πολλαπλασιαστής τμήματος μήκους κύματος (WDM) και ένας υπομεταφορέας πολλαπλασιασμού (SCM). Επιπλέον για να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης υιοθετήθηκαν οι διαμορφώσεις OFDM (ορθογωνική πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας) και η QAM (διαμόρφωση ορθογωνισμού πλάτους). Η ταχύτητα του συστήματος VLC αυξήθηκε σε 3.75 Gb/s από 575 Mb/s στην κάτω ζεύξη και 225 Mb/s.

Τέλος στην πλευρά του δέκτη, ο δέκτης λαμβάνει το οπτικό σήμα πχ. με μια φωτοδίοδο πυριτίου ή μια φωτοδίοδο καρφισών. Μετά από την αποδιαμόρφωση και την αποκωδικοποίηση γραμμών, το ρεύμα των bits περνά μέσω του αποκωδικοποιητή καναλιού για να παράγει τα κομμάτια παραγωγής.





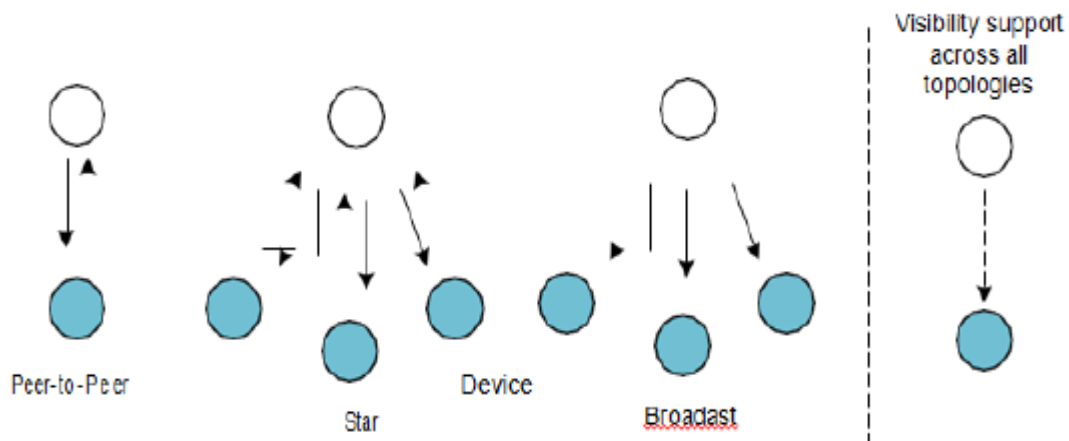
Εικόνα 2.5: Βαθμίδες φυσικού στρώματος.

### 2.3 Στρώμα MAC – Μέσο στρώμα προσπέλασης

Οι στόχοι που εκτελούνται από το μέσο στρώμα προσπέλασης – MAC περιλαμβάνουν:

- Υποστήριξη κινητικότητας
- Υποστήριξη εξασθένησης
- Υποστήριξη διαφάνειας
- Υποστήριξη ασφάλειας
- Σχέδια για το μετριασμό του τρεμουλιάσματος
- Υποστήριξη λειτουργίας χρώματος
- Υποστήριξη αποσύνδεσης και ένωσης VPAN
- Παροχή μιας αξιόπιστης σύνδεσης μεταξύ της όμοιας οντότητας MAC

Οι τοπολογίες που υποστηρίζονται από το στρώμα της MAC είναι peer-to-peer, ραδιοφωνική μετάδοση και τοπολογία αστέρα. Η επικοινωνία στην τοπολογία αστεριών εκτελείται χρησιμοποιώντας έναν ενιαίο συγκεντρωτικό ελεγκτή. Όλοι οι κόμβοι επικοινωνούν ο ένας με τον άλλον μέσω του συγκεντρωτικού ελεγκτή. Ο ρόλος του συντονιστή στην peer-to-peer τοπολογία εκτελείται από έναν από τους δύο κόμβους που περιλαμβάνονται στην επικοινωνία του ενός με τον άλλον.



Εικόνα 2.6: Υποστηρικτικές τοπολογίες του στρώματος MAC από την IEEE 802.15.7.

## 2.4 Διαμορφώσεις VLC

Η διαμόρφωση των συστημάτων VLC διαφέρει από αυτή της επικοινωνίας RF λόγω του μη κωδικοποιημένου χαρακτηριστικού γνωρίσματος των πληροφοριών στη φάση και το εύρος του φωτεινού σήματος. Επομένως, δε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη διαμόρφωση εύρους και φάσης της επικοινωνίας RF στην περίπτωση των VLC. Η διαμόρφωση των συστημάτων VLC επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τις παραλλαγές στην ένταση του φωτός που αντιστοιχεί στις πληροφορίες στο σήμα μηνυμάτων.

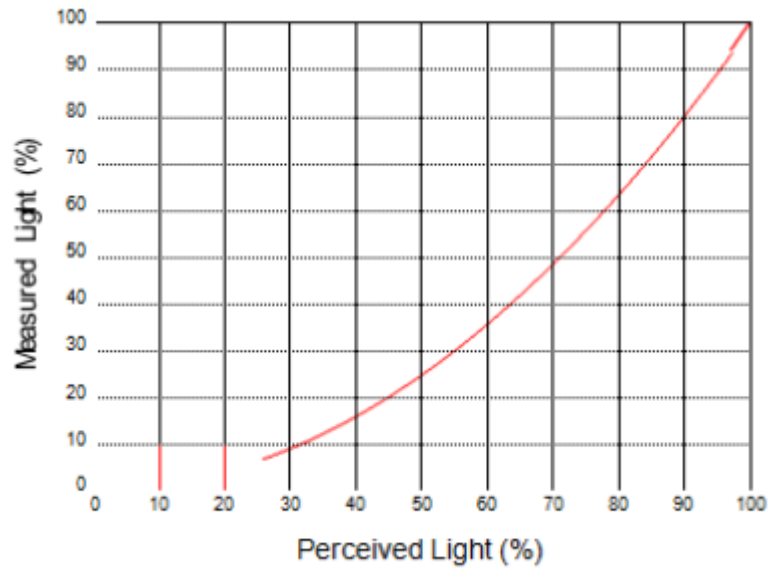
### 2.4.1 Παράγοντες που έχουν επίπτωση στη διαμόρφωση VLC

Δύο παράγοντες που εξετάζονται στη σχεδίαση της διαμόρφωσης των συστημάτων VLC είναι η εξασθένιση και η διακύμανση της έντασης του φωτός κατά τη λειτουργία του φωτιστικού σώματος.

Εξασθένιση είναι η διαφορετική κινητικότητα η οποία απαιτεί διαφορετικές εντάσεις του φωτός, όπως 30-100lux που απαιτούνται για τις κανονικές οπτικές δραστηριότητες σε ένα δημόσιο χώρο. Υπάρχει μια μη γραμμική σχέση μεταξύ του μετρήσιμου φωτός και του αντιληπτού φωτός:

$$\text{Αντιληπτό φως (\%)} = \sqrt{\frac{\text{Μετρήσιμο φως (\%)}}{100}}$$

Στην εικόνα 2.7 φαίνεται πώς το ανθρώπινο μάτι αντιλαμβάνεται το μετρήσιμο και το αντιληπτό φως.



Εικόνα 2.7: Σύγκριση μεταξύ του μετρήσιμου φωτός και του φωτός που γίνεται αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι.

Διακύμανση της έντασης του φωτός είναι οι αλλαγές στη φωτεινότητα του διαμορφωμένου φωτός που πρέπει να γίνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην επηρεάζουν την ανθρώπινη αντίληψη. Σύμφωνα με την IEEE της 802.15.7 η μετατροπή πρέπει να γίνει σε ένα ποσοστό γρηγορότερο του 200 Hz για την αποφυγή επιβλαβών αποτελεσμάτων.

## 2.4.2 Τεχνικές διαμόρφωσης σήματος

### 1. On – Off Διαμόρφωση (On – Off Keying – OOK)

Στη διαμόρφωση OOK τα LEDs αναβοσβήνουν με διακοπές σύμφωνα με τα bits που πρέπει να μεταφερθούν. Για παράδειγμα το 1 αντιπροσωπεύεται από την κατάσταση On και το 0 αντιπροσωπεύεται από την κατάσταση Off. Στην κατάσταση Off τα LEDs δεν κλείνουν εντελώς, αλλά εκτελείται μείωση του επιπέδου έντασης. Το κύριο πλεονέκτημα της OOK είναι η εύκολη εφαρμογή της.

### 2. Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού (Pulse Width Modulation)

Η διαμόρφωση OOK είναι ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης, ο οποίος παρακίνησε τους ερευνητές να αναπτύξουν νέες τεχνικές διαμόρφωσης με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Κάποιες από αυτές τις τεχνικές διαμόρφωσης είναι:

1. Το πλάτος των παλμών - PWM ( Pulse Width Modulation ) ποικίλει σύμφωνα με την εξασθένιση των επιπέδων. Χρησιμοποιώντας την υψηλή συχνότητα PWM, τα διαφορετικά επίπεδα εξασθένισης μπορούν να επιτευχθούν μεταξύ 0% και 100%. Ο

περιορισμός PWM είναι ο σχετικά χαμηλός ρυθμός μετάδοσης ο οποίος είναι μέχρι τα 4,8 Kbps.

2. Η διαμόρφωση θέσης σφυγμού – PPM, βασίστηκε στη θέση του σφυγμού. Το τμήμα της διάρκειας συμβόλων στα ίσα διαστήματα και τα χρονικά περιθώρια (t slot) έγιναν στο PPM και η μετάδοση του σφυγμού γίνεται σε οποιοδήποτε από τα χρονικά περιθώρια. Δεδομένου του ότι μόνο ένας ενιαίος σφυγμός είναι παρόν σε κάθε περίοδο συμβόλων στην περίπτωση του PPM, υποφέρει από το πρόβλημα του χαμηλού ρυθμού μετάδοσης.
3. Άλλες παραλλαγές του χαμηλού ρυθμού μετάδοσης αναπτύχθηκαν με τον καιρό. Ο πολυσφυγμός PPM (MPPM) εισήχθει καθιστώντας το PPM φασματικά αποδοτικό χρησιμοποιώντας τη μετάδοση πολλαπλών σφυγμών σε κάθε χρονο-σύμβολο. Το εκκαθαρισμένο PPM (EPPM) είναι η τροποποιημένη έκδοση της PPM η οποία παρουσιάστηκε για να βελτιώσει την απόδοση της μέγιστης ισχύς η οποία περιορίστηκε από τα συστήματα επικοινωνιών.
4. Πολλαπλής στάθμης EPPM (MEPPM) εισήχθει, για τη φασματική αποτελεσματικότητα του PPM επειδή η φασματική απόδοση του MPPM και του EPPM ήταν λιγότερη από 1.

Τεχνική διαμόρφωσης	Υποστήριξη σμίκρυνσης	Απόδοση φάσματος	Τρεμόπαιγμα	Ευαισθησία LED
MPPM	Ναι	0-1	Χαμηλό	Χαμηλό
EPPM	Ναι	0-1	Χαμηλό	Χαμηλό
MEPPM	Ναι	2-3	Πολύ χαμηλό	Χαμηλό

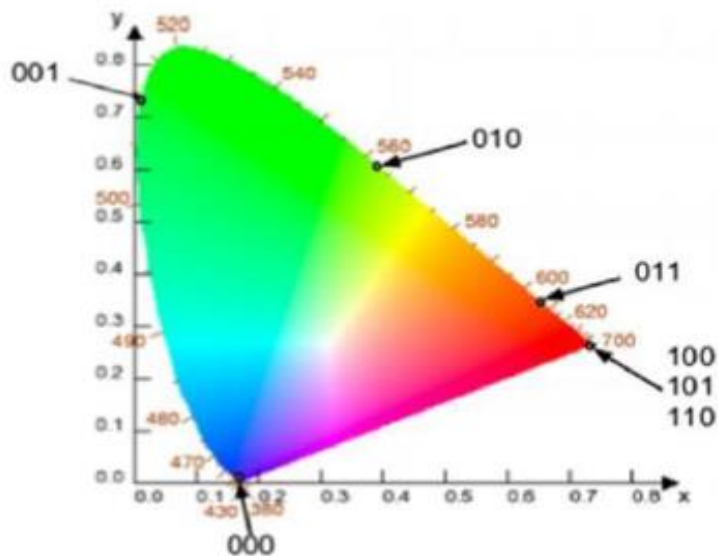
Πίνακας 2.2: Σύγκριση μεταξύ των τεχνικών διαμόρφωσης παλμού.

### 3. Διαμόρφωση Μετατόπισης Χρώματος (Color Shift Keying – CSK)

Η CSK προτάθηκε από την IEEE της 802.15.7 για να ενισχύσει τον ρυθμό μετάδοσης που ήταν χαμηλός σε άλλα σχέδια διαμόρφωσης. Είναι βασισμένη στη Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού ( C.I.E – Commission Internationale de l’Eclairage), η οποία το 1931 υιοθέτησε ένα χρωματικό σύστημα που εξακολουθεί να ισχύει μέχρι σήμερα με μικρές τροποποιήσεις και βασίζεται στη γενική αρχή κατά την οποία με μείξη των τριών βασικών χρωμάτων σε διάφορες αναλογίες μπορεί να παραχθεί οποιοδήποτε χρώμα. Στο κέντρο του τριγώνου απεικονίζεται το λευκό χρώμα. Το χρωματικό επίπεδο ή το επίπεδο απεικόνισης των χρωμάτων αποτελείται από ένα ορθογώνιο τρίγωνο οι κορυφές του οποίου αντιπροσωπεύουν ένα από τα τρία βασικά χρώματα. Ο άξονας των X αντιπροσωπεύει το κόκκινο χρώμα, ο Ψ το

πράσινο και ο Z το κυανό. Το συγκεκριμένο χρωματικό σύστημα χρησιμοποιείται πολύ στην επικοινωνία ορατού φωτός.

Η δυνατότητα μετατροπής επιβραδύνεται από την παραγωγή του άσπρου φωτός που χρησιμοποιεί μπλε LEDs και κίτρινο φωσφόρο (όπως στη διαμόρφωση OOK). Επομένως, ένας εναλλακτικός τρόπος να παραχθεί το άσπρο φως είναι η χρησιμοποίηση τριών χωριστών LEDs όπως το πράσινο το κόκκινο και το μπλε (RGB). Η διαμόρφωση CSK εκτελείται χρησιμοποιώντας την ένταση των τριών χρωμάτων σε μια RGB πηγή LEDs. Η CSK εξαρτάται από το χρωματικό διάγραμμα όπως φαίνεται στην εικόνα 2.8. Χαρτογραφεί όλα τα αισθητά από το μάτι χρώματα σε δύο άξονες τον x και τον y. Ο πίνακας 2.3 επεξηγεί το ανθρώπινο επτά ζωνών ορατό μήκος κύματος με τα κέντρα του όπως χαρακτηριστικά φαίνονται στην εικόνα 2.8.



Εικόνα 2.8: Χρωματομετρικό Τρίγωνο κατά CIE (Commission Interanational de l' Eclerage).

Εύρος (nm)	Κώδικας	Κεντρική συχνότητα(nm)	(x,y)
380-478	000	429	(0.169 , 0.007)
478-540	001	509	(0.011 , 0.733)
540-588	010	564	(0.402 , 0.597)
588-633	011	611	(0.669 , 0.331)
633-679	100	656	(0.729 , 0.271)
679-726	101	703	(0.734 , 0.265)
726-780	110	753	(0.734 , 0.265)

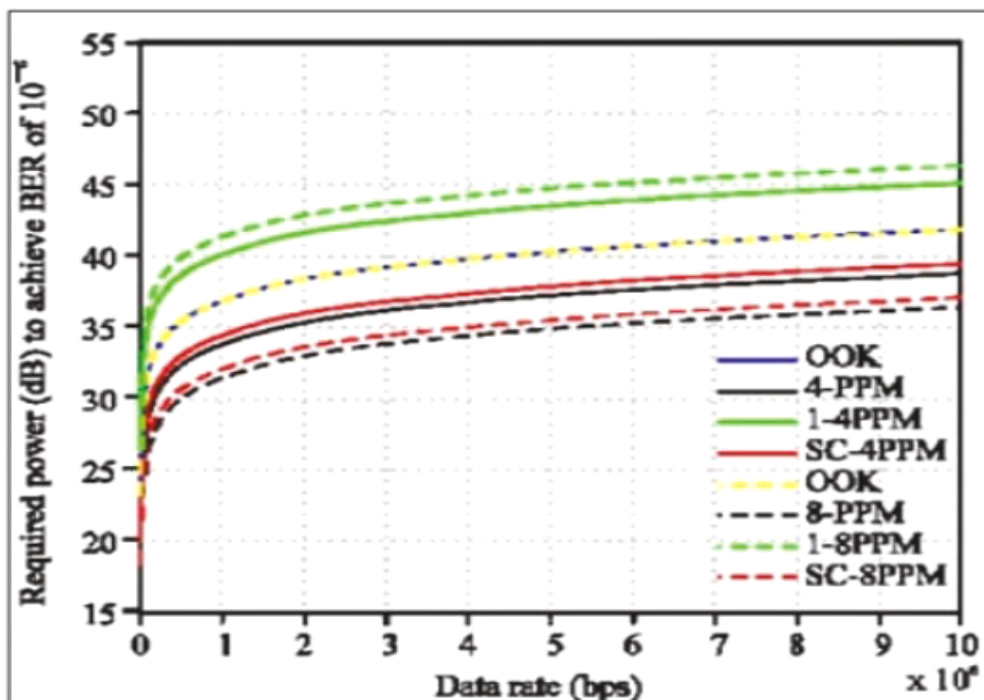
Πίνακας 2.3: Φάσμα ορατού φωτός σε nm.

### 2.4.3 Ρυθμός μετάδοσης σφαλμάτων

Ο ρυθμός λάθους δυαδικών ψηφίων (Bit Error Rate - BER) είναι ο αριθμός των σφαλμάτων των bit διαιρούμενος με το συνολικό αριθμό των bit που μεταφέρονται από τον πομπό στον δέκτη. Η πιθανότητα λάθους δυαδικών ψηφίων (Bit Error Probability - BEP) είναι η αναμενόμενη τιμή του BER στην εκάστοτε ζεύξη. Ο ρυθμός μπορεί να θεωρηθεί ως μία κατά προσέγγιση εκτίμηση της πιθανότητας που είναι ακριβής για μεγάλο χρονικό διάστημα και υψηλό BER.

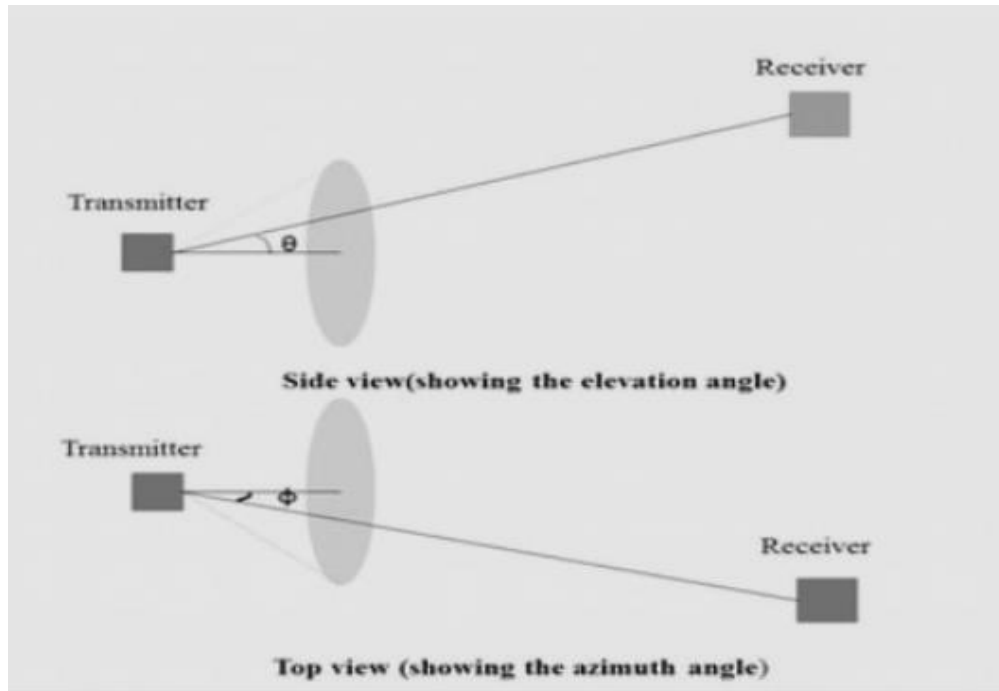
Στην εικόνα 2.9, απεικονίζονται οι απαιτήσεις ισχύος για να επιτευχθεί συγκεκριμένος ρυθμός σφάλματος bit για την τεχνική OOK, τη διαμόρφωση θέσης παλμού και κάποιες από τις παραλλαγές της, για διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης.

Παρατηρούμε ότι οι τεχνικές L-PPM και SC-PPM έχουν λιγότερες απαιτήσεις ισχύος σε σχέση με την τεχνική I-PPM.



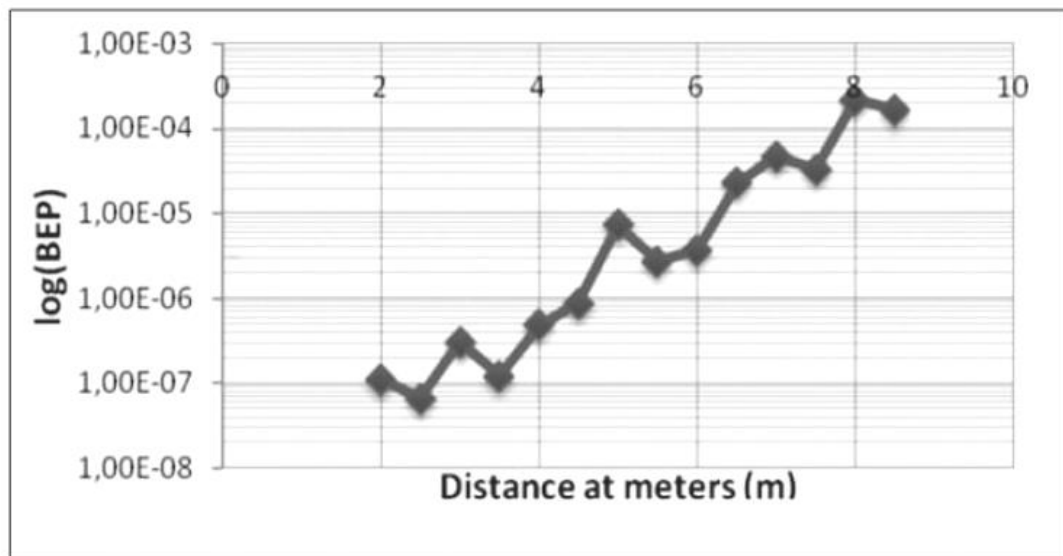
Εικόνα 2.9: Απαιτούμενη ισχύς για επίτευξη BER=10<sup>-6</sup> και για διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης.

Τα συστήματα οπτικής επικοινωνίας ορατού φάσματος έχουν υιοθετήσει την κατηγοριοποίηση των επικοινωνιών υπερέθρων όσον αφορά τον σχεδιασμό των ζεύξεων άρα οι φυσικές αρχές που σχετίζονται με την διάδοση και τις ανακλάσεις ισχύουν ομοίως και στα δύο είδη επικοινωνιών. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι η απόδοση των συστημάτων, με την βοήθεια της πιθανότητας σφάλματος bit, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αζιμουθιακή γωνία, την γωνία ανύψωσης και την απόσταση του πομπού σε σχέση με τον δέκτη. Η τοπολογία του συστήματος φαίνεται στην εικόνα 2.10.



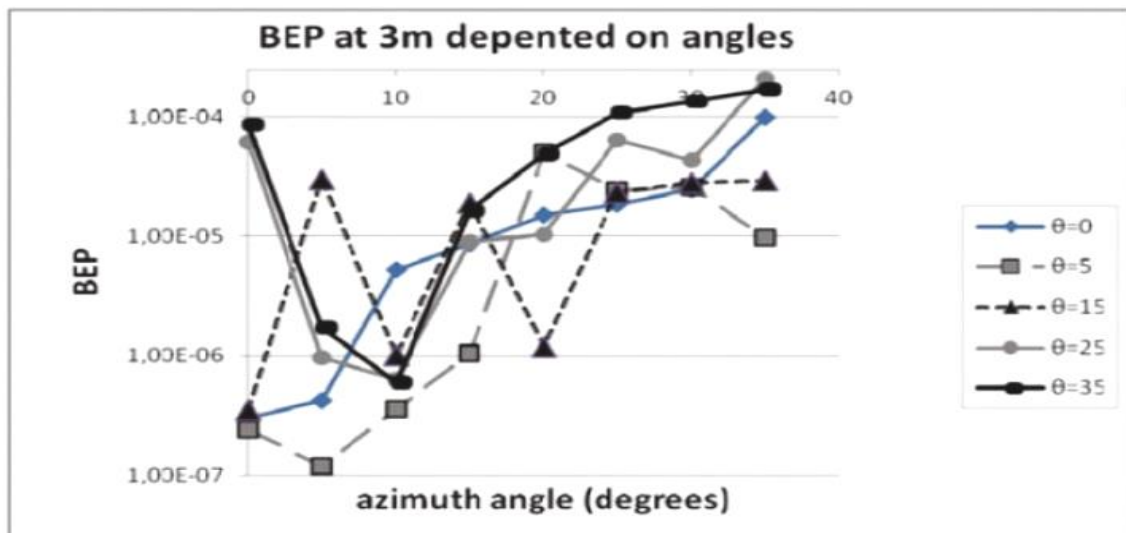
Εικόνα 2.10: Η τοπολογία του συστήματος που περιγράφεται.

Για ένα απλό σύστημα πομπού-δέκτη, μονής πηγής, με διαμόρφωση RZ-OOK μπορούμε να παρατηρήσουμε τις διάφορες τιμές του BEP σε σχέση με την απόσταση πομπού-δέκτη και τις μεταξύ τους γωνίες στα διαγράμματα που φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 2.11: BEP για διάφορες αποστάσεις σε οριζόντια διάταξη ( $\theta=0$ ,  $\varphi=0$ ).





Εικόνα 2.12: BER για διάφορες τιμές της γωνίας ανύψωσης ( $\theta$ ) σε απόσταση πομπού- δέκτη 3m.

Το μέγεθος του BER, όπως και το SNR, καθορίζει την ποιότητα της επικοινωνίας. Για ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας ορατού φάσματος σε εσωτερικό χώρο, με διαμόρφωση OOK χρειαζόμαστε BER της τάξεως του  $10^{-6}$ . Επιπλέον όμως πρέπει να ληφθεί υπόψη και ότι στην περίπτωση των VLC συστημάτων χρειάζεται να καλύπτεται και η ανάγκη φωτισμού έτσι η πιο πιθανή απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη είναι αυτή των 3m (τοποθετώντας τον πομπό στο ταβάνι και τον δέκτη στο πάτωμα ενός δωματίου).

Από την εικόνα 2.12 μπορούμε να δούμε ότι για ένα ικανοποιητικό μέγεθος BER ( $10^{-6}$ ) οι γωνίες (αζιμουθιακή και ανύψωσης) πρέπει να είναι μικρότερες από  $20^\circ$  και  $15^\circ$  αντίστοιχα. Παρατηρούμε επίσης ότι για  $\varphi < 10^\circ$  το αναγκαίο BER καλύπτεται για όλες τις μελετώμενες γωνίες ανύψωσης.

Στις παραπάνω μετρήσεις η κατεύθυνση του δέκτη, όταν η γωνία ανύψωσης είναι μεγαλύτερη από  $0^\circ$ , ήταν κάθετη προς το έδαφος, εάν ήταν ακτινική προς τον πομπό θα μπορούσε, επίσης, να δώσει καλύτερα αποτελέσματα. Καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται επίσης με την χρήση πομπού που αποτελείται από πολλές LED.

Είναι προφανές ότι το BER θα μειωθεί με την αύξηση της ισχύος (ή της φωτεινότητας) που μεταδίδεται από τη LED. Με άλλα λόγια, όσο πιο φωτεινό είναι το φως, τόσο μικρότερο είναι το BER. Ωστόσο, η φωτεινότητα του φωτός πέφτει όταν αυξάνεται η απόσταση. Επιπλέον, το φως από πολλές άλλες πηγές παρεμβάλλεται καθιστώντας την ανίχνευση του πραγματικού σήματος πολύ δύσκολη. Υπό αυτές τις συνθήκες, το BER θα αυξηθεί.

Από μετρήσεις για αποστάσεις  $> 3m$ , αν οι αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη αυξηθούν το BER μειώνεται δραστικά και πέφτει κάτω από τα επιτρεπτά όρια για τα VLC συστήματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ VLC ΖΕΥΞΗΣ

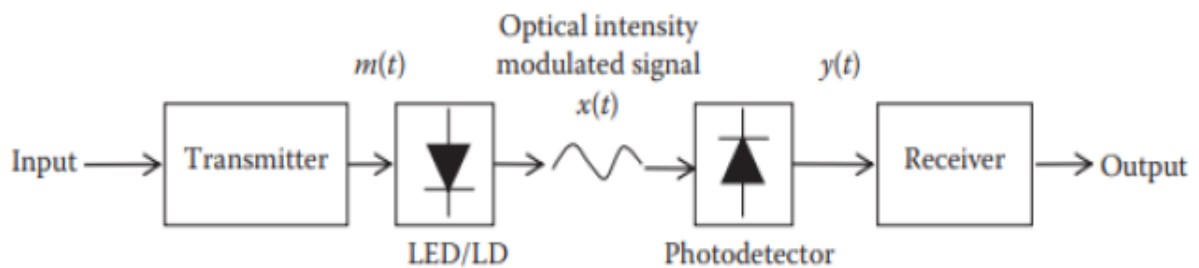
### 3.1 Μοντελοποίηση καναλιού

Για να σχεδιάσουμε ένα λειτουργικό σύστημα οπτικών επικοινωνιών, είναι επιτακτική η ανάγκη, να κατανοήσουμε τα χαρακτηριστικά του καναλιού αυτού. Ο χαρακτηρισμός ενός καναλιού εκτελείται από την απόκριση του καναλιού ώθησης, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την ανάλυση και την καταπολέμηση των διαταραχών στο κανάλι. Οι ποινές ισχύος που σχετίζονται με το κανάλι μπορούν να χωριστούν σε δύο παράγοντες, αυτή της απώλειας της οπτικής διαδρομής και την διασπορά πολλαπλών διαδρομών.

Για τις διαμορφώσεις άμεσου LOS, οι ανακλάσεις δεν χρειάζεται να ληφθούν υπόψη και κατά συνέπεια η απώλεια διαδρομής υπολογίζεται εύκολα φτάνει να γνωρίζουμε την απόκλιση της δέσμης του πομπού, του μεγέθους του δέκτη και της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη. Ωστόσο, μια διαμόρφωση non-LOS γνωστή και ως διάχυτο σύστημα (που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο σε εσωτερικούς χώρους) χρησιμοποιεί τις ανακλάσεις του φωτός στις επιφάνειες του δωματίου και των επίπλων. Αυτές οι ανακλάσεις μπορούν να θεωρηθούν ως ανεπιθύμητα σήματα ή διαστρεβλώσεις πολλαπλών διαδρομών που καθιστούν την πρόβλεψη της απώλειας διαδρομής πιο περίπλοκη.

### 3.2 Οπτικό ασύρματο κανάλι επικοινωνίας για εσωτερικές εφαρμογές

Υπάρχει ένας αριθμός από τοπολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνά για εσωτερικές εφαρμογές. Οι διαμορφώσεις μπορούν να ταξινομηθούν πρώτο σύμφωνα με το βαθμό κατευθυντικότητας του πομπού και του δέκτη και δεύτερο την ύπαρξη διαδρομής LOS μεταξύ πομπού και δέκτη. Το ρεύμα μιας οπτικής πηγής διαμορφώνεται άμεσα από το σήμα διαμόρφωσης  $m(t)$ , το οποίο με τη σειρά του μεταβάλλει την ένταση της οπτικής πηγής όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.1.

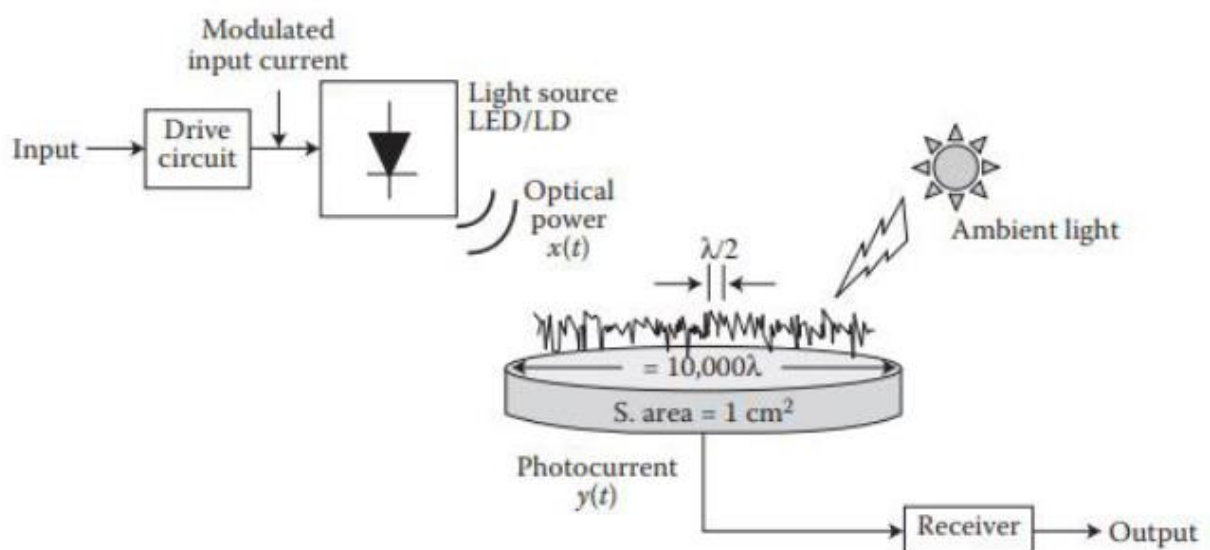


Εικόνα 3.1: Δομικό διάγραμμα της οπτικής έντασης, σε κανάλι επικοινωνιών άμεσης ανίχνευσης.

Ο δέκτης περιέχει ένα φωτοανιχνευτή με μια απόκριση η οποία είναι ίση με δεκάδες χιλιάδες πολύ μικρά μήκη κυμάτων του προσπίπτοντος οπτικού σήματος, που παράγει ένα ρεύμα φωτός  $y(t)$ . Αυτό το ρεύμα είναι ευθέως ανάλογο με τη στιγμιαία οπτική ισχύ, δηλαδή, ανάλογο προς το τετράγωνο του λαμβανόμενου ηλεκτρικού πεδίου.

Οι συνδέσεις Non-LOS, ιδιαίτερα σε εσωτερικές εφαρμογές, υπόκεινται στις επιπτώσεις της πολλαπλής διάδοσης με τον ίδιο τρόπο όπως τα συστήματα ραδιοσυχνοτήτων και τα αποτελέσματα αυτά είναι πιο έντονα. Αυτός ο τύπος σύνδεσης μπορεί να υποφέρει από σοβαρές ποινές επιδόσεων πολλαπλών διαδρομών.

Η πολλαπλή διάδοση προκαλεί στο ηλεκτρικό πεδίο μια σοβαρή εξασθένηση του εύρους ζώνης στην κλίμακα ενός μήκους κύματος. Ο ανιχνευτής θα βιώσει εξασθένηση πολλαπλής διαδρομής, αν το μέγεθος του ανιχνευτή (π.χ το εμβαδό της επιφάνειας) είναι ανάλογο προς ένα μήκος κύματος ή λιγότερο. Ευτυχώς, οι δέκτες στα συστήματα VLC χρησιμοποιούν ανιχνευτές με επιφάνεια την επιφάνεια τυπικά εκατομμυρίων μηκών κύματος. Επιπλέον, το συνολικό φωτόκτυταρο που παράγεται είναι ανάλογο προς το ολοκλήρωμα της οπτικής ισχύος σε ολόκληρη την επιφάνεια του φωτοανιχνευτή, αυτό παρέχει εγγενή χωρικό διαχωρισμό όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Ισοδύναμο μοντέλο βασικής ζώνης ενός οπτικού ασύρματου συστήματος.

Αν και οι εσωτερικοί σύνδεσμοι στα συστήματα VLC δεν υποφέρουν από τις επιπτώσεις της εξάπλωσης πολλαπλών διαδρομών, υποφέρουν από τις επιδράσεις της διασποράς η οποία εκδηλώνεται με πρακτική έννοια, όπως η διασυμβολική παρεμβολή. Η διασπορά μοντελοποιείται σαν ένα γραμμικό κανάλι βασικής ζώνης με απόκριση  $h(t)$ .

Το χαρακτηριστικό κανάλι ενός συστήματος VLC είναι σταθερό για μια δεδομένη θέση του πομπού, του δέκτη και των αντικειμένων που αντανακλάται το φως. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα του καναλιού αλλάζει μόνο όταν αυτά τα συστατικά μετακινούνται σε απόσταση της τάξης των εκατοστών. Λόγω των υψηλών ρυθμών μετάδοσης και της σχετικά αργής κίνησης των αντικειμένων και των ανθρώπων μέσα σε ένα δωμάτιο, το κανάλι θα ποικίλει μόνο σε χρονική κλίμακα πολλών περιόδων δυαδικών ψηφίων και συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ως ημιστατικό.

Το ισοδύναμο μοντέλο βασικής ζώνης μιας οπτικής ασύρματης σύνδεσης μπορεί να συνοψιστεί με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{aligned} y(t) &= Rx(t) \otimes h(t) + n(t) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} Rx(\tau)h(t - \tau)d + n(t) \end{aligned}$$

Όπου το σύμβολο  $\otimes$  υποδηλώνει τη συνέλιξη.

Η απόκριση παλμού  $h(t)$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση ή την προσομοίωση των επιδράσεων της διασποράς πολλαπλών διαδρομών σε εσωτερικά κανάλια στα συστήματα VLC.

Η απόκριση καναλιού μοντελοποιήθηκε από τους Gfeller και Bapst ως εξής:

$$h(t) = f(x) = \begin{cases} \frac{2t_0}{t^3 \sin^2(FOV)} & t_0 \leq t \leq \frac{t_0}{\cos(FOV)} \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

όπου το  $t_0$  είναι η ελάχιστη καθυστέρηση.

Ενώ η παραπάνω εξίσωση είναι απλώς ένα γραμμικό κανάλι φίλτρου με AWGN, τα οπτικά ασύρματα συστήματα διαφέρουν από τα συμβατικά ηλεκτρικά συστήματα ή ραδιοσυστήματα, καθώς η στιγμιαία οπτική ισχύς είναι ανάλογη προς το παραγόμενο ηλεκτρικό φορτίο.

Το  $x(t)$  αντιπροσωπεύει την ισχύ παρά το σήμα πλάτους. Αυτό επιβάλλει δύο περιορισμούς στο μεταδιδόμενο σήμα. Πρώτον, το  $x(t)$  πρέπει να είναι μη αρνητικό, δηλαδή:

$$x(t) \geq 0$$

Δεύτερον, οι απαιτήσεις ασφαλείας των ματιών περιορίζουν τη μέγιστη οπτική ισχύ εκπομπής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Γενικά, η μέση απαίτηση ισχύος είναι η πιο περιοριστική και ως εκ τούτου η μέση τιμή του  $x(t)$  δεν πρέπει να υπερβαίνει μια καθορισμένη τιμή μέγιστης ισχύος  $P_{\max}$ , δηλαδή:

$$P_{max} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt$$

Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την τιμή χρόνου-μέσης τιμής του σήματος  $|x(t)|^2$  το οποίο συμβαίνει στα συμβατικά κανάλια RF όταν το  $x(t)$  αντιπροσωπεύει το πλάτος.

Οι διαφορές αυτές έχουν βαθιά επίδραση στο σχεδιασμό του συστήματος. Σε συμβατικά κανάλια RF, ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) είναι ανάλογος με τη μέση λήψη, ενώ στις ασύρματες οπτικές συνδέσεις είναι ανάλογο προς το τετράγωνο της μέσης ισχύος του οπτικού σήματος που λαμβάνεται από:

$$SNR = \frac{R^2 H^2(0) P_r^2}{R_b N_0}$$

Όπου  $N_0$  είναι η φασματική πυκνότητα του θορύβου και  $H(0)$  είναι το κέρδος DC του καναλιού που δίνεται από:

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

Έτσι, σε οπτικά συστήματα απαιτούνται σχετικά υψηλές οπτικές μεταδόσεις, και μόνο μια περιορισμένη απώλεια διαδρομής μπορεί να γίνει ανεκτή. Το γεγονός ότι η μέση οπτική ισχύς εκπομπής είναι περιορισμένη υποδηλώνει ότι οι τεχνικές διαμόρφωσης που διαθέτουν υψηλό λόγο ισχύος αιχμής είναι πλέον ευνοϊκές.

Αυτό επιτυγχάνεται γενικά με την απενεργοποίηση της ενεργειακής απόδοσης έναντι της αποτελεσματικότητας του εύρους ζώνης. Όταν ο στιγμιαίος θόρυβος υπερیشχει, το SNR είναι επίσης ανάλογο με την περιοχή του φωτοανιχνευτή, επειδή η λαμβανόμενη ηλεκτρική ισχύς και η διακύμανση του θορύβου είναι ανάλογη της  $A_d$ , όπου  $A_d$  είναι η περιοχή του φωτοανιχνευτή.

Έτσι, οι δέκτες ευνοούν τη χρήση ανιχνευτών μεγάλης περιοχής. Ωστόσο, καθώς η περιοχή του ανιχνευτή αυξάνεται, έτσι και η χωρητικότητα του, η οποία έχει περιοριστική επίδραση στο εύρος ζώνης του δέκτη, και συνεπώς στη χωρητικότητα μετάδοσης. Αυτό έρχεται σε άμεση αντίθεση με την απαίτηση για αυξημένο εύρος ζώνης που συνδέεται με τις τεχνικές για εξοικονόμηση ενέργειας και ως εκ τούτο υπάρχει ένας συνδυασμός μεταξύ αυτών των δύο παραγόντων.

Η λειτουργία οπτικής ασύρματης μετάδοσης καναλιών ορίζεται από το:

$$H_{ow}(f) = H_{los} + H_{diff}(f)$$

Όπου το  $H_{los}$  είναι η συνεισφορά που οφείλεται στο κανάλι LOS, το οποίο είναι ανεξάρτητο από τη συχνότητα διαμόρφωσης και εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη και από τον προσανατολισμό του σε σχέση με το LOS, ενώ το  $H_{diff}$  είναι σχεδόν ομοιογενές και ισότροπο στα περισσότερα δωμάτια.

Σε ένα κατευθυνόμενο σύνδεσμο ο λόγος ισχύος μεταξύ του LOS και των διάχυτων ζεύξεων μπορεί να αυξηθεί μειώνοντας το πλάτος δέσμης του πομπού η και του δέκτη, το λεγόμενο FOV. Αυτό μπορεί να ποσοτικοποιηθεί από τον παράγοντα Rician:

$$k_{rf} = \left( \frac{H_{los}}{H_{diff}} \right)^2$$

Όπως και στις ραδιοεπικοινωνίες, ορίζεται μέσω της ηλεκτρικής ισχύς του σήματος.

### 3.3 Μοντέλο διάδοσης LOS

Σε γενικές γραμμές, τα συστήματα εσωτερικών οπτικών ασύρματων επικοινωνιών χρησιμοποιούν τα LEDs ως πηγή/πομπό και τις φωτοδιόδους ως δέκτες. Η γωνιακή κατανομή του προτύπου της έντασης της ακτινοβολίας μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας μια γενικευμένη ένταση ακτινοβολίας Lambertian με την ακόλουθη κατανομή:

$$R_0(\varphi) = \begin{cases} \frac{(m_l + 1)}{2\pi} \cos^{m_l}(\varphi) & \text{για } \Phi \in [-\pi/2, \pi/2] \\ 0 & \text{για } \varphi \geq \pi/2 \end{cases}$$

όπου το  $m_l$  είναι ο αριθμός λειτουργίας του Lambert που εκφράζει την κατευθυντικότητα της δέσμης φωτός του,  $\varphi=0$  είναι η γωνιά μέγιστης ακτινοβολούμενης ισχύος. Τα LEDs τα οποία χρησιμοποιούνται εκπέμπουν φως κατά τη Lambertian εκπομπή. Η σειρά εκπομπής Lambertian  $m_l$  σχετίζεται με την γωνιά ημισχύος  $\varphi_{1/2}$  του πομπού (LED) και ορίζεται ως:

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

Η ένταση ακτινοβολίας δίνεται από το τύπο:

$$S(\varphi) = P_t \frac{(m_t+1)}{2\pi} \cos^{m_l}(\varphi)$$

Ο ανιχνευτής μοντελοποιείται ως μια ενεργός περιοχή  $A_r$  συλλέγοντας το περιστατικό ακτινοβολίας σε γωνίες  $\psi$  μικρότερες από τον ανιχνευτή FOV. Η αποτελεσματική περιοχή συλλογής του ανιχνευτή δίνεται από:

$$A_{eff}(\psi) = \begin{cases} A_r \cos \psi & 0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \psi > \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

Αν και ιδανικά ένας ανιχνευτής μεγάλης περιοχής θα ήταν κατάλληλος για εσωτερική OWC για να συλλέξει όσο το δυνατόν περισσότερη δύναμη, θα προκαλούσε στην πράξη ένα μεγάλο πλήθος προβλημάτων, όπως το αυξημένο κόστος κατασκευής, η αυξημένη χωρητικότητα συνδέσεως, μειωμένο εύρος ζώνης στο δέκτη και αυξημένο θόρυβο στον δέκτη.

Ως εκ τούτου, η χρήση του συγκεντρωτή μη απεικόνισης είναι μια οικονομικά αποδοτική λύση προκειμένου να αυξηθεί η συνολική αποτελεσματική περιοχή συλλογής. Το οπτικό κέρδος ενός ιδανικού συγκεντρωτή μη απεικόνισης που έχει εσωτερικό δείκτη διαθλάσεως ( $n$ ) και ορίζεται ως:

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

όπου το  $\psi_c \leq \pi/2$  είναι το FOV.

Από το θεώρημα σταθερής ακτινοβολίας, το FOV του συστήματος στο δέκτη σχετίζεται με την περιοχή συλλογής του φακού  $A_{coll}$  και την περιοχή του φωτοανιχνευτή ως:

$$A_{coll} \sin\left(\frac{\psi_c}{2}\right) \leq A_r$$

Από την πιο πάνω εξίσωση είναι προφανές ότι το κέρδος του συγκεντρωτή αυξάνεται όταν μειώνεται το FOV.

Το μήκος σύνδεσης για το εσωτερικό OWC είναι σχετικά μικρό και επομένως η εξασθένηση λόγω της απορρόφησης και η σκέδαση είναι πολύ χαμηλή. Λαμβάνοντας υπόψη μια σύνδεση OWC με μία πηγή Lambertian, όπου  $\psi$  είναι η γωνία πρόσπτωσης σε σχέση με τον κανονικό άξονα του δέκτη, ένα φίλτρο οπτικής ζώνης διέλευσης  $T_s(\psi)$  και ένας συγκεντρωτής μη απεικόνισης κέρδους  $g(\psi)$ , για ένα δέκτη τοποθετημένο σε απόσταση  $d$  και γωνιά  $\varphi$ , η οριζόντια φωτεινότητα/ένταση σε ένα σημείο  $(x, y)$  και η λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη δίνεται ως:

$$H_{los}(\mathbf{0}) = \begin{cases} \frac{A_r(m_l+1)}{2\pi d^2} \cos^{m_l}(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \end{cases}$$

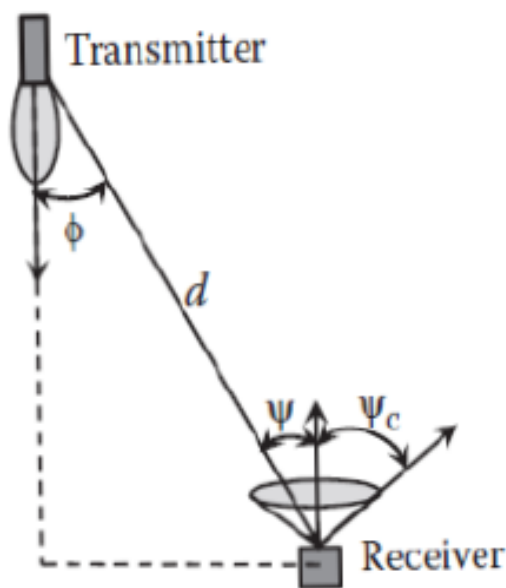
Η λαμβανόμενη τιμή συνεπώς γίνεται:

$$P_{r-los} = H_{los}(\mathbf{0})P_t$$

Στην σύνδεση LOS, όταν ο πομπός και ο δέκτης είναι ευθυγραμμισμένοι, η αύξηση του σήματος LOS δίνεται από:

$$H_{los}(m_l) = \frac{(m_l+1)}{2} H_{los}$$

Όπου το  $H_{los}$  αναφέρεται σε πομπό με Lambertian κατανομή με  $m_l=1$ .



Εικόνα 3.3: Πρότυπο διάδοσης LOS.

Σε συνδέσεις LOS μικρής απόστασης, η διασπορά πολλαπλών διαδρομών είναι σπάνιο πρόβλημα και το κανάλι LOS συχνά διαμορφώνεται ως γραμμική εξασθένιση και καθυστέρηση. Οι οπτικοί σύνδεσμοι LOS θεωρούνται ως επιλεκτικοί μη συχνοτικοί και η απώλεια διαδρομής εξαρτάται από το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη. Η απόκριση παλμών μπορεί να εκφραστεί ως:

$$h_{los}(t) = \frac{A_r(m_l + 1)}{2\pi d^2} \cos^{m_l}(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cos\psi \delta\left(t - \frac{d}{c}\right)$$

Όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό,  $\delta()$  είναι η συνάρτηση Dirac και  $\delta(t-d/c)$  αντιπροσωπεύει την καθυστέρηση μετάδοσης σήματος. Η έκφραση υποθέτει ότι  $\varphi < 90^\circ$  και  $\psi < \text{FOV}$  και  $d \gg \sqrt{A_r}$ .



### 3.4 Μοντέλο διάδοσης non-LOS

Για ένα μη προσανατολισμένο LOS και διάχυτες συνδέσεις, η απώλεια οπτικής διαδρομής είναι περισσότερο περίπλοκη να προβλεφθεί, δεδομένου ότι εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων, όπως διαστάσεις δωματίου, η ανακλαστικότητα του ανώτατου ορίου, τοίχοι και αντικείμενα εντός του δωματίου, και η θέση και ο προσανατολισμός του πομπού και του δέκτη, το μέγεθος του παραθύρου και το μέρος και άλλα φυσικά υλικά μέσα στο δωμάτιο.

Η ισχύς του δέκτη γενικά δίνεται ως:

$$P_{r-nlos} = (H_{los}(\mathbf{0}) + H_{nlos}(\mathbf{0}))P_t = (H_{los}(\mathbf{0}) + \sum H_{refl}(\mathbf{0}))P_t$$

όπου,  $H_{refl}(\mathbf{0})$  αντιπροσωπεύει την ανακλώμενη διαδρομή.

Τα χαρακτηριστικά αντανάκλασης της επιφάνειας των αντικειμένων μέσα σε ένα δωμάτιο εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες συμπεριλαμβανομένου, του μήκους κύματος του πομπού, την επιφάνεια του υλικού, τη γωνία της πρόσπτωσης  $\theta_i$  και η ακανόνιστη υφή της επιφάνειας σε σχέση με το μήκος κύματος.

Η τελευταία καθορίζει κυρίως το σχήμα της οπτικής του μοτίβου της ανάκλασης. Το κριτήριο του Rayleigh υιοθετήθηκε ως επί το πλείστον για τον προσδιορισμό της υφής μιας επιφάνειας. Αντίστοιχα με αυτό το κριτήριο, η επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ομαλή εάν το μέγιστο ύψος των επιφανειακών ανωμαλιών συμφωνεί με τα ακόλουθα:

$$h_{si} < \frac{\lambda}{8 \sinh(\theta_i)}$$

Για να προβλέψουμε την απώλεια της διαδρομής για το μη προσανατολισμένο LOS και τις διάχυτες συνδέσεις, είναι απαραίτητο να αναλύσουμε την κατανομή της οπτικής ισχύς για μια δεδομένη ρύθμιση.

Οι Gfeller και Barst μελέτησαν την ισχύ της κατανομής για τις διάχυτες συνδέσεις, βασίζοντας το μοντέλο τους μόνο σε μεμονωμένες αντανάκλασεις. Το έδειξαν αυτό χρησιμοποιώντας μια οπτική πηγή αποτελούμενη από πολλαπλά προσαρμοσμένα στοιχεία σε διαφορετικές κατευθύνσεις, μια πιο ομοιόμορφη κάλυψη μπορεί να επιτευχθεί σε μια ευρύτερη περιοχή, σε σύγκριση με μια ευρεία δέσμη οπτικής πηγής.

Έχουν αντιμετωπίσει τη βελτιστοποίηση της κατανομής της οπτικής ισχύς για διάχυτες και μη προσανατολισμένες LOS συνδέσεις, και έχουν προτείνει μια προδιαγραφή για το μοτίβο ακτινοβολίας του πομπού (ERP) της IEEE 802.11 στο υπέρυθρο πρότυπο φυσικού στρώματος. Για τις μη προσανατολισμένες LOS συνδέσεις, ως μια εναλλακτική λύση στην

προσαρμογή του ERP, έχει προταθεί ένα πλέγμα από πομπούς τοποθετημένους στο ανώτατο όριο προκειμένου να μειωθεί το δυναμικό εύρος του ισχύος σήματος.

Μαθηματικά, η κρουστική απόκριση του οπτικού ασύρματου καναλιού υπολογίζεται με την ενσωμάτωση της ισχύος όλων των παραγόντων που φθάνουν στο δέκτη μετά από πολλαπλή διάδοση. Το λαμβανόμενο σήμα στην περίπτωση των μη LOS συνδέσεων αποτελείται από διάφορα συστατικά που φθάνουν από διαφορετική διαδρομή, το μήκος διαδρομής αυτών των συστατικών διαφέρει ανάλογα με το σχεδιασμό του δωματίου, ως εκ τούτου υπάρχει διεύρυνση του παλμού.

Η κατανομή του κέρδους του καναλιού σε ντεσιμπέλ (dB) για τα LOS συστατικά ακολουθεί μια τροποποιημένη Γάμμα κατανομή, και το κέρδος του καναλιού σε dB για τα LOS κανάλια συμπεριλαμβανομένων όλων των ανακλάσεων ακολουθεί μια τροποποιημένη Rayleigh κατανομή για τις περισσότερες αποστάσεις πομπού-δέκτη. Η μέση τετραγωνική καθυστέρηση της ρίζας  $D_{rms}$  είναι μια παράμετρος η οποία χρησιμοποιείται συνήθως για να ποσοτικοποιήσει τις ιδιότητες διασποράς του χρόνου των καναλιών πολλαπλών διαδρομών, και ορίζεται ως η τετραγωνική ρίζα της δεύτερης κεντρικής ροπής του τετραγωνικού μεγέθους της κρουστικής απόκρισης του καναλιού η οποία μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη έκφραση:

$$D_{rms} = \left[ \frac{\int (t-\mu)^2 h^2(t) dt}{\int h^2(t) dt} \right]^{1/2}$$

Όπου η μέση καθυστέρηση  $\mu$  δίνεται από:

$$\mu = \frac{\int t h^2(t) dt}{\int h^2(t) dt}$$

Ενώ ο προσδιορισμός της κατανομής της οπτικής ισχύς σε ένα δωμάτιο είναι επαρκής για τους βασικούς υπολογισμούς του προϋπολογισμού ισχύος, δεν επιτρέπει την ακριβή πρόβλεψη της ποιής ισχύος εξαιτίας της πολλαπλής διάδοσης, δεδομένου ότι δε λαμβάνονται υπόψη πολλαπλές αντανακλάσεις. Αν και η οπτική ισχύς που σχετίζεται με δύο ή περισσότερες αντανακλάσεις είναι σχετικά μικρή, το σήμα φτάνει στο δέκτη πολύ αργότερα από αυτό που υφίσταται μόνο μια αντανάκλαση, και ως εκ τούτου δε μπορεί να αγνοηθεί λαμβάνοντας υπόψη τις υψηλές ταχύτητες των μη προσανατολισμένων LOS και των διάχυτων συνδέσεων. Προκειμένου να δημιουργηθεί μια κρουστική απόκριση η οποία περιλαμβάνει αντανακλάσεις υψηλότερης τάξης, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος ανίχνευσης ακτινών στον οποίο

υπολογίζεται η απώλεια διαδρομής και η καθυστέρηση χρόνου για κάθε διαδρομή που περιέχει ένα δεδομένο αριθμό αντανakλάσεων.

Ο αλγόριθμος αθροίζει όλες τις συνεισφορές για να δώσει μια συνολική κρουστική απόκριση. Οι μελετητές θεώρησαν κενά ορθογώνια δωμάτια και υπέθεσαν ότι ο οπτικός δέκτης δείχνει κατακόρυφα προς την οροφή. Με δεδομένη μια συγκεκριμένη μοναδική πηγή S και δέκτη R<sub>x</sub> σε ένα δωμάτιο, η κρουστική απόκριση μπορεί να γραφεί ως το άπειρο άθροισμα:

$$h_{nlos}(t, S, R_x) = \sum_{k=0}^{\infty} h_{nlos}^{(k)}(t, S, R_x)$$

όπου,  $h_{nlos}^{(k)}(t, S, R_x)$  είναι η κρουστική απόκριση εξαιτίας του φωτός που υφίσταται ακριβώς k αντανakλάσεις.

Για K πολλαπλές πηγές η παραπάνω εξίσωση μπορεί να τροποποιηθεί σε:

$$h_{nlos}(t, S, R_x) = \sum_i^K \sum_{k=0}^{\infty} h_{nlosK}^{(k)}(t, S, R_x)$$

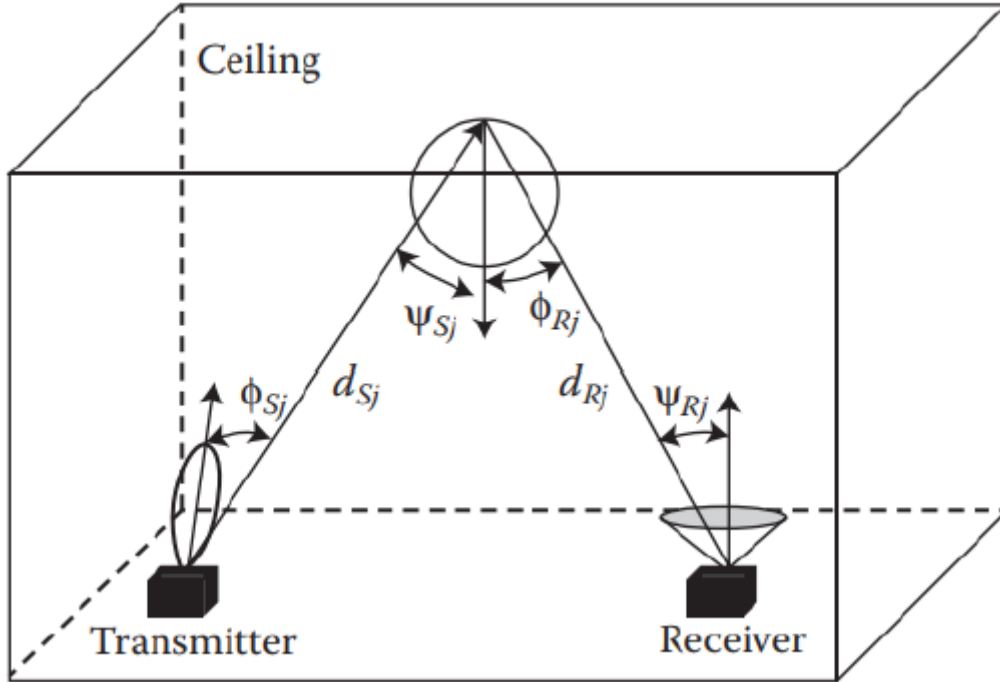
Η κρουστική απόκριση έπειτα από k αντανakλάσεις  $h^{(k)}(t, S, R_x)$  μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας ένα επαναλαμβανόμενο αλγόριθμο όπως:

$$h_{nlos}(t, S, R_x) = \frac{m_l+1}{2\pi} \sum_{j=1}^K \rho_j \cos^{m_i}(\varphi_j) \frac{\cos(\psi)}{d_{sj}^2} \text{rect}\left(\frac{2\psi}{\pi}\right) \times h_{nlos}^{(k-1)}\left(t - \frac{d_{sj}}{c}, S, R_x\right) \Delta A$$

όπου ΔA είναι η περιοχή των αντανakλαστικών στοιχείων, κ είναι ο συνολικός αριθμός των αντανakλώμενων στοιχείων μέσα στο δωμάτιο, ρ<sub>j</sub> είναι ο συντελεστής ανάκλασης του j, d<sub>sj</sub> είναι η απόσταση από το S στο j,  $h^{(k-1)}(t, S, R_x)$  είναι η κρουστική απόκριση τάξης k-1 μεταξύ του αντανakλαστικού j και R<sub>x</sub>. Καθώς  $\|h^{(k)}(t, S, R_x)\| \rightarrow 0, k \rightarrow \infty$ , η κρουστική απόκριση του καναλιού μπορεί να εκτιμηθεί λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα πρώτα  $\mathfrak{R}$ . Χρησιμοποιώντας επαναλαμβανόμενο αλγόριθμο ή επαναλαμβανόμενες μεθόδους και λαμβάνοντας υπόψη μόνο τον αριθμό των ανακλάσεων έως το 10, μπορεί κανείς να πάρει εξαιρετική προσέγγιση του καναλιού.

Για την αξιολόγηση των πρώτων διάχυτων αντανakλάσεων, οι επιφάνειες του δωματίου διαιρούνται με  $\mathfrak{R}$  αντανakλαστικά στοιχεία με περιοχή ΔA. Το κανάλι μπορεί να περιγράψει από δύο συνιστώσες: (α) στην πρώτη συνιστώσα, κάθε στοιχείο της επιφάνειας με περιοχή ΔA λαμβάνεται υπόψη ως δέκτης, και (β) κάθε στοιχείο στη συνέχεια θεωρείται ως πηγή που εκπέμπει εκ νέου το σήμα του φωτός που συλλέχθηκε μέσω της ανακλαστικότητας ρ<sub>j</sub>. Ως εκ τούτου, η κρουστική απόκριση του καναλιού μετά από μια ανάκλαση στην οροφή (εικόνα 3.4), μπορεί να προσεγγισθεί ως:

$$h^l_{nlos}(t, S, R_x) = \sum_{j=1}^{\mathfrak{R}} \frac{(m_l+1)\rho_j A_r \Delta A}{2\pi d_{sj}^2 d_{Rj}^2} \cos^{m_l}(\varphi_{sj}) \times \cos(\psi_{sj}) \cos(\psi_{Rj}) \delta\left(t - \frac{d_{sj}+d_{Rj}}{c}\right)$$



Εικόνα 3.4: Γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει το μοντέλο διάδοσης απλής αντανάκλασης.

### 3.5 Διασυμβολική παρεμβολή

Η διασυμβολική παρεμβολή (ISI) είναι μια μορφή παραμόρφωσης του ληφθέντος σήματος που εκδηλώνεται λόγω της χρονικής εξάπλωσης και έχει ως αποτέλεσμα την επικάλυψη των επιμέρους παλμών σε βαθμό τέτοιο ώστε ο δέκτης να μην μπορεί να διακρίνει αξιόπιστα μεταξύ των αλλαγών της κατάστασης του σήματος.

Γενικά τα φώτα που κατανέμονται μέσα σε ένα δωμάτιο και η ακτινοβολία είναι συνάρτηση του εξοπλισμού του φωτισμού. Στην επικοινωνία ορατού φωτός με χρήση LED, η υψηλά λαμβανόμενη ισχύς, η οποία δημιουργείται εξαιτίας της καθυστέρησης σήματος από οπτικούς δρόμους που διαφέρουν, δημιουργεί διασυμβολική παρεμβολή (ISI).

Αν θεωρήσουμε ένα NLOS κανάλι το οποίο δίνεται από την:

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

όπου το  $H(0)$  είναι η ενίσχυση του DC καναλιού, η λαμβανόμενη ισχύς λόγω της διασυμβολικής παρεμβολής  $P_{ISI}$  είναι:

$$P_{ISI} = \int_T \left( \sum_{i=1}^{LEDs} h_i(t) X(t) \right) dt$$

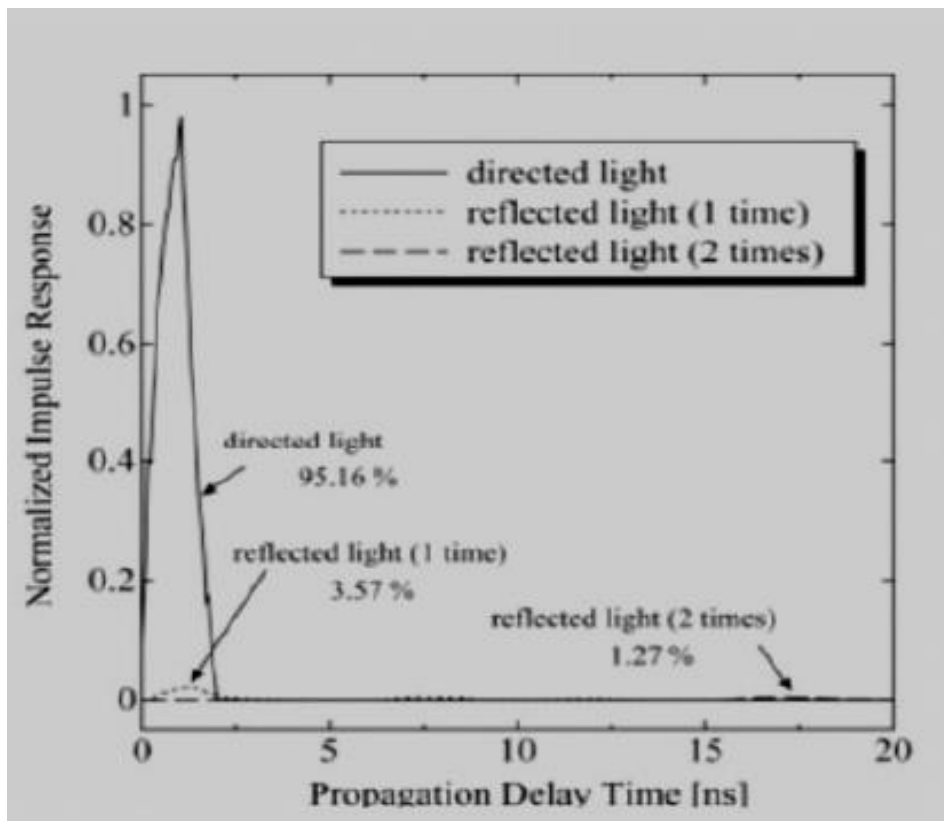
όπου  $h(t)$  είναι η κρουστική απόκριση και  $X(t)$  ο μεταδιδόμενος οπτικός παλμός.

### 3.6 Κρουστική απόκριση

Στα VLC συστήματα, ο εξοπλισμός φωτισμού εγκαθίσταται στην οροφή και έχει μεγάλη επιφάνεια κάλυψης. Έτσι το VLC σύστημα έχει συγκεκριμένη κρουστική απόκριση η οποία διαφέρει από την αντίστοιχη υπέρυθη επικοινωνία.

Η ιδανική κρουστική απόκριση σε ένα κανάλι LOS είναι ουσιαστικά μια χρονικά καθυστερημένη και κλιμακούμενη συνάρτηση δέλτα που αντιπροσωπεύει το πλάτος υποβιβασμού στο εκπεμπόμενο σήμα. Έτσι, η απώλεια διαδρομής γίνεται μια ζωτικής σημασίας παράμετρος, και θα πρέπει να προέρχεται από τις φωτομετρικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον για το χαρακτηρισμό της ικανότητας φωτισμού των LED.

Στην εικόνα 3.5 φαίνεται η κρουστική απόκριση του καναλιού σε μια γωνία ( $0 \times 0 \times 0.85$ ) ενός «δωματίου μοντέλου» ( $5 \times 5 \times 3$ ). Βλέπουμε τον ρυθμό του απευθείας και του ανακλώμενου φωτός (1η και 2η ανάκλαση) συναρτήσει του λαμβανόμενου φωτός. Η επιρροή του απευθείας φωτός είναι έντονη και η επίδοση του συστήματος εξαρτάται πολύ από αυτή.



Εικόνα 3.5: Η κρουστική απόκριση. Από το άμεσο φως (συνεχής γραμμή) και το ανακλώμενο φως (1<sup>η</sup> ανάκλαση διακεκομμένη γραμμή με τελείες, 2<sup>η</sup> ανάκλαση διακεκομμένη γραμμή με παύλες).

### 3.7 Θόρυβος στα συστήματα VLC

Στα συστήματα επικοινωνίας, θόρυβος είναι ένα λάθος ή μία ανεπιθύμητη τυχαία διαταραχή ενός χρήσιμου σήματος πληροφορίας σε ένα κανάλι επικοινωνίας. Ο θόρυβος είναι ένα άθροισμα των ανεπιθύμητων ή ενοχλητικών ενεργειών από φυσικές και μερικές φορές τεχνητές πηγές.

Ωστόσο, συνήθως διακρίνεται από τις παρεμβολές, (π.χ. cross-talk, σκόπιμες εμπλοκές ή άλλες ανεπιθύμητες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από συγκεκριμένους πομπούς), όπως για παράδειγμα στα μέτρα λόγου σήματος-προς-θόρυβο (SNR), σήματος-προς-παρεμβολή (SIR) και σήματος-προς-θόρυβο συν παρεμβολής (SNIR).

Επίσης τυπικά διακρίνεται από την παραμόρφωση, η οποία είναι μια ανεπιθύμητη συστηματική αλλοίωση της κυματομορφής του σήματος από τον εξοπλισμό επικοινωνίας. Σε ένα φορέα με διαμόρφωση ζώνης διέλευσης αναλογικού συστήματος επικοινωνίας, ένας ορισμένος φορέας-προς-θόρυβο (CNR), στην είσοδο του δέκτη ραδιοφώνου θα οδηγήσει σε μια ορισμένη αναλογία σήματος προς θόρυβο στο ανιχνευόμενο σήμα μηνύματος. Σε ένα σύστημα ψηφιακών επικοινωνιών, ένα ορισμένο  $E_b/N_0$ , (κανονικοποιημένο σήμα-

προς-θόρυβο) θα οδηγήσει σε ένα ορισμένο ποσοστό σφάλματος μετάδοσης δυαδικών ψηφίων (Bit Error Rate - BER).

Γενικά οι κυριότεροι τύποι θορύβου είναι:

1. Θερμικός θόρυβος (Thermal noise)
2. Θόρυβος βολής (Shot noise)
3. Θόρυβος τρεμοπαίγματος (Flicker noise)
4. Θόρυβος ριπής (Burst noise)
5. Θόρυβος χρόνου μεταφοράς (Transit-time noise)
6. Θόρυβος χιονοστιβάδας (Avalanche noise)

Στις ασύρματες επικοινωνίες ορατού φάσματος ο θόρυβος που επηρεάζει το μεταδιδόμενο σήμα εμφανίζεται σαν θόρυβος του δέκτη. Οι δύο κύριες πηγές θορύβου οφείλονται στη λήψη των ηλεκτρονίων στο δέκτη και στο θόρυβος βολής από το λαμβανόμενο DC φωτορεύμα.

Επιπλέον, ο θόρυβος σε ένα δέκτη μπορεί να περιγράφει είτε ως προσθετικός (additive) είτε ως εξαρτώμενος από σήμα (signal-dependent). Προσθετικός θόρυβος είναι μια πηγή θορύβου που είναι παρούσα είτε υπάρχει ένα σήμα στο δέκτη είτε όχι, ενώ θόρυβος που εξαρτάται από το σήμα είναι αυτός που παρατηρείται μόνο όταν ένα σήμα είναι παρόν στο δέκτη. Στα συστήματα VLC παρουσιάζεται κυρίως θερμικός θόρυβος και θόρυβος βολής.

### Θερμικός θόρυβος

Όπως συμβαίνει με όλα τα ηλεκτρονικά, ο θόρυβος παράγεται λόγω της τυχαίας κίνησης των μεταφορέων σε αντιστάσεις και ενεργές συσκευές. Μια σημαντική πηγή θορύβου είναι ο θερμικός θόρυβος (thermal noise) που οφείλεται στα ωμικά στοιχεία του προενισχυτή (preamplifier). Εάν μια χαμηλή αντίσταση χρησιμοποιηθεί στο εμπρόσθιο άκρο για να βελτιώσει την απόκριση της συχνότητας, μια υπερβολική ποσότητα θερμικού θορύβου προστίθεται στο σήμα του φωτορεύματος. Προενισχυτές διαντίστασης (transimpedance pre-amplifiers) παρέχουν χαμηλή αντίσταση front-end με αρνητική ανάδραση και αντιπροσωπεύουν ένα συμβιβασμό μεταξύ αυτών των περιορισμών.

Ο θερμικός θόρυβος παράγεται ανεξάρτητα του λαμβανόμενου σήματος (signal-independent noise) και μπορεί να μοντελοποιηθεί ως κατανομή Gauss (Gaussian noise). Αυτός ο θόρυβος διαμορφώνεται από μία συνάρτηση μεταφοράς και εξαρτάται από την τοπολογία του προενισχυτή όταν η ισχύς του θορύβου αναφέρεται στην είσοδο του ενισχυτή. Ως αποτέλεσμα, ο θόρυβος του κυκλώματος μοντελοποιείται ως Gaussian και, γενικά, μη λευκός (Gaussian Non-White Noise).

### Θόρυβος βολής

Στους εσωτερικούς χώρους σήμερα γίνεται χρήση μεγάλου αριθμού από διαφορετικές πηγές φωτός, όπως λαμπτήρες πυρακτώσεως με νήματα βολφραμίου, λαμπτήρες αλογόνου και υδραργύρου, λαμπτήρες φθορισμού με διαφορετικό χρώμα φωτός (οπτικά φάσματα) και, πιο πρόσφατα,, λαμπτήρες φθορισμού με συμβατικά στραγγαλιστικά πηνία (συμβατικά ballasts) και λαμπτήρες φθορισμού με ηλεκτρονικά στραγγαλιστικά πηνία (ηλεκτρονικά ballasts). Κάθε μία από αυτές τις πηγές φωτός παρουσιάζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από την άποψη δυνατοτήτων για να φωτίσει μια συγκεκριμένη περιοχή.

Για τον χαρακτηρισμό της ακτινοβολίας υποβάθρου (οπτική ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας) που παράγεται από το διάχυτο φως του περιβάλλοντος, λαμβάνονται υπόψη όλες οι παραπάνω πηγές φωτός και επιπλέον το φως από τον ήλιο. Ενώ η ακτινοβολία υποβάθρου που παράγεται από το φως του ήλιου μπορεί να θεωρηθεί σταθερή ή με αργές διακυμάνσεις στο χρόνο, οι περισσότερες από αυτές λόγω σκίασης, η ακτινοβολία που παράγεται από το τεχνητό φως εμφανίζει μεγάλες και γρήγορες διακυμάνσεις στο χρόνο.

Οι φυσικές (φως ημέρας, φεγγαρόφωτο) και τεχνητές πηγές φωτός (λαμπτήρες φθορισμού, λαμπτήρες πυρακτώσεως κ.α.) παράγουν ένα ορισμένο ποσό οπτικής πυκνότητας ρεύματος υποβάθρου ή ακτινοβολίας που μειώνει την απόδοση του οπτικού δέκτη. Το αποτέλεσμα αυτής της ακτινοβολίας υποβάθρου εκδηλώνονται σε δύο διαφορετικές μορφές: ως θόρυβος βολής (shot noise) που προκαλείται στην φωτοδίοδο του δέκτη από τη σταθερή ακτινοβολία υποβάθρου και ως παρεμβολή από τις μεταβολές στο χρόνο της ίδιας ακτινοβολίας. Ο θόρυβος είναι ευθέως ανάλογος προς την ποσότητα του φωτός που προσπίπτει επί του φωτοανιχνευτή συνεπώς είναι συνάρτηση της μέσης οπτικής ισχύος.

Κανονικά, ο θόρυβος βολής, μπορεί να θεωρηθεί Gaussian και σχεδόν λευκός. Η χρήση των σταθερών οπτικών φίλτρων μειώνει τον εκτός ζώνης θόρυβο του διάχυτου φωτός. Η σταθερή ακτινοβολία υποβάθρου που παράγεται από φυσικές και τεχνητές πηγές φωτός χαρακτηρίζεται συνήθως από ένα συνεχές ρεύμα που επάγεται στη φωτοδίοδο του δέκτη και είναι ευθέως ανάλογη στο ρεύμα αυτό. Το ρεύμα αυτό αναφέρεται ως ρεύμα του περιβάλλοντος θορύβου.

## **3.8 Τεχνικές αντιμετώπισης του θορύβου στα συστήματα VLC**

### **1. Φίλτρα**



Στην επεξεργασία σήματος, ένα φίλτρο είναι μια συσκευή ή μια διαδικασία που αφαιρεί από ένα σήμα κάποια ανεπιθύμητα στοιχεία ή χαρακτηριστικά. Το φιλτράρισμα αποτελεί μια κατηγορία της επεξεργασίας σήματος, το κυρίαρχο χαρακτηριστικό της οποίας είναι η πλήρης ή μερική καταστολή κάποιας πτυχής του σήματος. Τις περισσότερες φορές, αυτό σημαίνει την άρση ορισμένων συχνοτήτων, προκειμένου να υπάρξει καταστολή των σημάτων παρεμβολής και μείωση του θορύβου υποβάθρου. Οι συσχετισμοί μπορούν να αφαιρεθούν για ορισμένες συνιστώσες και όχι για άλλες. Το μειονέκτημα του φιλτραρίσματος είναι η απώλεια των πληροφοριών που συνδέονται με αυτό. Τα κυριότερα είδη των φίλτρων είναι τα εξής:

a) Ηλεκτρικά Φίλτρα

- Φίλτρα Διέλευσης Χαμηλών Συχνοτήτων
- Φίλτρα Διέλευσης Υψηλών Συχνοτήτων
- Φίλτρα Διέλευσης Ζώνης Συχνοτήτων

b) Οπτικά Φίλτρα

- Φίλτρα Μακράς Διόδου
- Φίλτρα Βραχείας Διόδου
- Φίλτρα Διέλευσης Ζώνης

Όπως αναφέραμε ο θερμικός θόρυβος στο σύστημα δημιουργείται λόγω της τυχαίας κίνησης των μεταφορέων στα διάφορα ωμικά στοιχεία του δέκτη (μοντελοποιείται σαν Gaussian) και συνεπώς εξαρτάται από αυτά. Είναι εύκολο έτσι να μειωθεί σε ένα βαθμό με την χρήση κατάλληλων ηλεκτρικών φίλτρων διότι δεν είναι μεταβαλλόμενος και μπορεί να προβλεφθεί. Το κόστος στο ληφθέν σήμα υπάρχει αλλά δεν είναι τόσο μεγάλο ώστε να επηρεάζει την επικοινωνία.

Από την άλλη, όπως είδαμε και στην ανάλυση για τον θόρυβο, η μέση οπτική ισχύς που προσπίπτει στον φωτοανιχνευτή, οφείλεται σε φυσικό και τεχνητό φως του περιβάλλοντος και προκαλεί πολύ υψηλά επίπεδα θορύβου βολής που περιορίζει την απόδοση των συστημάτων μεταφοράς. Επιπλέον, οι τεχνητές πηγές φωτός παράγουν ακτινοβολία μεταβλητού χρόνου, με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός οπτικού σήματος που παρεμβαίνει με το μεταδιδόμενο σήμα. Η παρεμβολή λόγω αυτού του σήματος είναι περιοδική. Οι επιδράσεις που δημιουργεί το διάχυτο φως μειώνονται καταφεύγοντας ταυτόχρονα και στους δύο τύπους φίλτρων, οπτικό και ηλεκτρικό. Ειδικότερα, η παρεμβολή που παράγεται από λαμπτήρες φθορισμού με ηλεκτρονικά ballasts επιβάλλει

πολύ μεγάλες οπτικές κυρώσεις ενέργειας για συστήματα που λειτουργούν σε ταχύτητες δεδομένων έως μερικές δεκάδες Mbps.

Η χρήση οπτικών φίλτρων μειώνει την ποσότητα της ανεπιθύμητης οπτικής ισχύος που φθάνει στο φωτοανιχνευτή. Το οπτικό φίλτρο μπορεί να είναι βραχυπερατό (Long Pass filter) ή ζωνοπερατό (Band Pass filter), όπως τα φίλτρα παρεμβολής ή διχρωϊκά φίλτρα). Τα διχρωϊκά οπτικά φίλτρα είναι πιο αποτελεσματικά, αλλά έχουν πολύ μεγάλο κόστος που καθιστά δύσκολη τη χρήση τους σε πρακτικά συστήματα.

Δεδομένου ότι το φάσμα ισχύος που παράγεται από τεχνητές πηγές φωτός επικεντρώνεται στις χαμηλές συχνότητες, ηλεκτρικά υψιπερατά HPF μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μειώσουν την ποινή ισχύος για τα συστήματα μετάδοσης. Η επιλογή της συχνότητας αποκοπής του φίλτρου είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ της μείωσης που μπορεί να επιτευχθεί για την παρεμβολή και του ποσού της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI), που έχει εισαχθεί. Η αποτελεσματικότητα των ηλεκτρικών φίλτρων διέλευσης υψηλών συχνοτήτων εξαρτάται από το ρυθμό των δεδομένων και από το είδος της παρεμβολής που είναι παρούσα.

Τα οπτικά φίλτρα χρησιμοποιούνται για να μειώσουν την επίδραση του φωτός του περιβάλλοντος, δημιουργώντας ένα οπτικό σύστημα στενής ζώνης (narrow-band) που επιτρέπει μόνο στο διαμορφωμένο μήκος κύματος από την πηγή να ανιχνευθεί. Στην περίπτωση του θορύβου από το φως του ήλιου στα συστήματα VLC η διαμορφωμένη ενέργεια καλύπτει ολόκληρο το ορατό φάσμα, έτσι το φιλτράρισμα θα μειώνει τόσο το φως του περιβάλλοντος θορύβου από το φως της ημέρας όσο και το επιθυμητό σήμα.

Ωστόσο, το φιλτράρισμα στο κίτρινο μέρος του φάσματος εκπομπής μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερα ποσοστά μετάδοσης δεδομένων. Αυτό συμβαίνει κατά κύριο λόγο όταν χρησιμοποιούμε λευκές LED φωσφόρου των οποίων το φάσμα δημιουργεί «κορυφή» στην «μπλε» περιοχή μεταξύ 400 και 500nm και συνεπώς δεν επηρεάζεται σε τόσο μεγάλο βαθμό από την απορρόφηση στο κίτρινο μέρος η οποία όμως επηρεάζει αρκετά το σήμα που προέρχεται από λάμπες πυρακτώσεως.

Η ποινή που επιβάλλεται στην οπτική ισχύ λόγω της παρεμβολής τεχνητού φωτός εξαρτάται επίσης από τον τύπο της διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Έχει αποδειχθεί ότι, για OOK- NRZ συστήματα διαμόρφωσης, η παρεμβολή που παράγεται από λαμπτήρες πυρακτώσεως και φθορισμού με συμβατικά ballasts μπορεί αποτελεσματικά να μετριαστεί με το συνδυασμό οπτικού φιλτραρίσματος και ηλεκτρικού φιλτραρίσματος διέλευσης υψηλών συχνοτήτων. Για L-PPM συστήματα, η ποινή που επάγεται από αυτούς τους δύο τύπους παρεμβολής είναι σημαντικά μικρή εάν χρησιμοποιείται ένας “μέγιστος - εκ- των-

υστέρων” (Maximum-A-Posteriori-MAP) ανιχνευτής. Ωστόσο, η παρεμβολή που παράγεται από λαμπτήρες φθορισμού με στερεός κατάστασης ballasts προκαλεί πολύ μεγάλες ποινές στην ισχύ ακόμη και όταν χρησιμοποιείται ηλεκτρικό υπεραυτό φίλτρο, τόσο σε OOK-NRZ και L-PPM συστήματα.

## **2. Άλλες τεχνικές ακύρωσης του θορύβου**

- Απόρριψη θορύβου με χρήση αισθητήρων φάσματος
- Αφαίρεση μέσω επεξεργασίας σήματος
- Προσαρμοστική ακύρωση ελάχιστη τάσης

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΓΚΡΙΣΗ VLC ΜΕ ΑΛΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ**

### **4.1 Σύγκριση με επικοινωνίες υπερέθρων IR**

Τα VLC συστήματα έχουν δύο σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των IR. Το ένα αφορά σε θέματα ασφάλειας και το άλλο αφορά στην ευκολία ανάπτυξης.

Οι περισσότερες από τις διόδους εκπομπής υπερέθρων, χρησιμοποιούν την περιοχή μήκους κύματος 800-960 nm. Η ακτινοβολία αυτών των μηκών κύματος, είναι επικίνδυνη σε περίπτωση άμεσης επαφής με τους οφθαλμούς (κίνδυνος αθερμικού αμφιβληστροειδούς, θερμική βλάβη του κερατοειδούς, καταρράκτης). Ως εκ τούτου, η ισχύς μετάδοσης για τις υπέρυθρες συσκευές περιορίζεται από τα πρότυπα ασφαλείας (βάσει της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (International Electrotechnical Commission-IEC), γεγονός που δεν συμβαίνει για τα συστήματα VLC που χρησιμοποιούν το ορατό φάσμα. Οι πομποί VLC είναι άμεσα διαθέσιμοι, λόγω χρήσης LEDs. Επιπλέον, τεχνολογίες όπως οι PLC, επιτρέπουν τη χρήση της υπάρχουσας υποδομής φωτισμού ως back-haul, σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις. Για νέες εγκαταστάσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν νέες τεχνολογίες όπως η Power over Ethernet (PoE).

Τέλος, συγκρίνοντας με την επικοινωνία υπερέθρων, οι επικοινωνίες VLC εσωτερικού χώρου μπορούν να χρησιμοποιήσουν υψηλότερη ισχύ ακτινοβολίας με υψηλότερη ποιότητα υπηρεσιών δεδομένου ότι το φως είναι ορατού φάσματος.

### **4.2 Σύγκριση με την επικοινωνία ραδιοσυχνοτήτων (RF)**

Παρόλο που οι επικοινωνίες RF και VLC χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα, έχουν πολύ διαφορετικές εγγενείς ιδιότητες. Το ορατό φως δεν παρεμβαίνει στις ηλεκτρονικές συσκευές, όπως κάνουν τα κύματα ραδιοσυχνοτήτων RF. Επομένως, η VLC μπορεί να είναι πιο κατάλληλη για εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές, όπως σε Νοσοκομεία, χημικά εργοστάσια και αεροπλάνα.

Όπως δείχνει και ο Πίνακας 4.1, το VLC προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία ως προς τη γωνία πρόσπτωσης και το πλάτος της δέσμης με το ίδιο ποσοστό υψηλής ακρίβειας. Όσον αφορά το φυσικό μέγεθος, ο πομποδέκτης VLC αναμένεται να είναι πολύ μικρότερος, καθώς χρειάζεται μόνο ένα φωτοφωρατή, ο οποίος μπορεί να είναι πολύ μικρός σε μέγεθος.

Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα τεχνολογίας RF πρέπει να διαθέτουν τη μονάδα πομποδέκτη και την κεραία, η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας. Επιπλέον, ορισμένοι περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η εκτίμηση μοντέλου καναλιού

σε πραγματικό χρόνο και η απόδοση κατά τη διάρκεια διαφορετικών σεναρίων φωτισμού και περιβάλλοντος. Λόγω του γεγονότος ότι το κύμα φωτός έχει υψηλότερη συχνότητα από το κύμα RF που χρησιμοποιείται σε συστήματα τεχνολογίας RF, το εύρος λειτουργίας (απόσταση) σε VLC θα είναι μικρότερο από αυτό στο RF, όπως αναμενόταν. Ωστόσο, τα συστήματα που χρησιμοποιούν τεχνολογία VLC είναι ανεπηρέαστα σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (ElectroMagnetic Interference - EMI), κάνουν χρήση αδειοδοτημένων ζωνών και παρουσιάζουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (εφόσον το VL χρησιμοποιείται ήδη για φωτισμό).

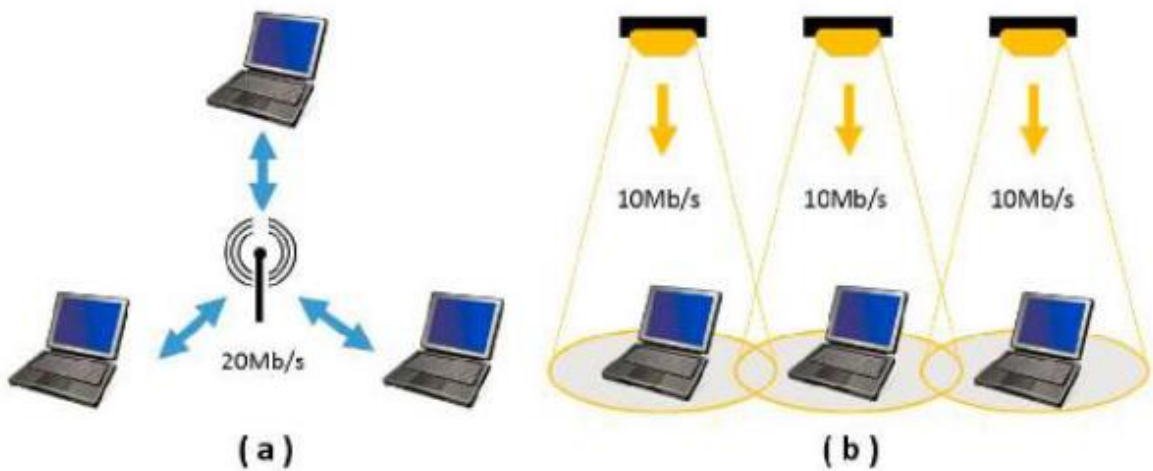
	VLC	RF
<b>Εύρος</b>	Χαμηλό (μέχρι τα 100 m)	Υψηλό (μέχρι το 1 km)
<b>Εξάρτηση από το περιβάλλον</b>	Ευαίσθητο	Μέτρια
<b>Περιβάλλοντας φωτισμός</b>	Ευαίσθητο	Δεν επηρεάζεται
<b>Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές</b>	Όχι	Ναι
<b>Άδεια για φάσμα</b>	Μη αδειοδοτημένο	Αδειοδοτημένο / Μη αδειοδοτημένο
<b>Κόστος</b>	Χαμηλό	Υψηλό
<b>Μέγεθος</b>	Μικρό	Μεγάλο
<b>Κατανάλωση ισχύος</b>	Χαμηλή	Υψηλή

Πίνακας 4.1: Σύγκριση τεχνολογιών VLC και RF που εξηγεί τους κυριότερους παράγοντες ενδιαφέροντος πίσω από υβριδικά δίκτυα RF/VLC.

Τα πλεονεκτήματα πίσω από τη χρήση VLC συσχετίζονται άμεσα με τα μειονεκτήματα των συστημάτων τεχνολογίας RF και τα συμπληρώνουν, αναδεικνύοντας όλο και περισσότερο την ανάγκη συνδυαστικής χρήσης τους (υβριδικά συστήματα τεχνολογίας VLC-RC). Ακολουθεί η περιγραφή των αδυναμιών του RF, που ουσιαστικά λύνονται με τη χρήση της VLC τεχνολογίας,:

- Πρόβλημα έλλειψης φάσματος RF: Η υποστηριζόμενη ζώνη για τις παραδοσιακές RF επικοινωνίες είναι στα 300KHz-300GHz. Μια αίτηση για πόρους ασύρματου φάσματος απαιτεί γενικά υψηλό τέλος αδειοδότησης και μεγάλη περίοδο αναμονής. Με την ταχεία ανάπτυξη των υπηρεσιών ασύρματων επικοινωνιών, οι παγκόσμιοι πόροι ασύρματου φάσματος είναι περιορισμένοι. Η VL τεχνολογία παρουσιάζει ένα τεράστιο εύρος ζώνης στα 400-790 THz. Έτσι, το ορατό εύρος φάσματος είναι 10.000

φορές μεγαλύτερο από αυτό ολόκληρου του ασύρματου φάσματος RF. Επιπλέον, δεν απαιτείται άδεια για τα VLC. Η εικόνα 4.1 συγκρίνει α) ένα κανάλι RF στο οποίο τρεις χρήστες μοιράζονται το εύρος ζώνης 20 Mb/s, β) ένα περιβάλλον με δυνατότητα VLC στο οποίο τρεις χρήστες χρησιμοποιούν μεμονωμένα κανάλια VLC των 10 Mb/s, παρέχοντας 10 Mb/s περισσότερο συνολικό εύρος ζώνης από το μεμονωμένο κανάλι RF. Ως συμπληρωματική προσέγγιση των υφιστάμενων ασύρματων λύσεων RF, το VLC είναι έτοιμο να ξεπεράσει το τοπικό ραδιοφάσμα και να καταστεί ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης για την επίλυση του προβλήματος "έλλειψης φάσματος".



Εικόνα 4.1: Χωρητικότητα ενός συστήματος, που χρησιμοποιεί τεχνολογία (a) RF και (b) VLC.

- Μειωμένη χωρητικότητα συστημάτων βασισμένων σε RF: Η τεχνολογία VLC προϋποθέτει υψηλότερα εύρη ζώνης επικοινωνίας χρησιμοποιώντας κύματα φωτός υψηλότερης συχνότητας για μεταφορά πληροφοριών. Ταυτόχρονα, λόγω της καλής κατευθυντικότητας της δέσμης VL και της μικρής περίθλασης, το VLC μπορεί να χρησιμοποιήσει διαφορετικές τεχνικές πολυπλεξίας για να επεκτείνει σημαντικά τη χωρητικότητα του συστήματος επικοινωνίας.
- Μικρή ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή: Το VLC δεν παράγει σχεδόν καθόλου ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο χώρο, γεγονός που παρέχει μια καλή λύση ασύρματης επικοινωνίας για περιβάλλοντα με συσκευές ευαίσθητες σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές ή όπου απαιτείται ζώνη σιγής.
- Απόρρητο σήματος: Λόγω του μεγάλου μήκους κύματος και της αρχιτεκτονικής της κεραίας, η επικοινωνία RF παρουσιάζει ασθενή κατευθυντικότητα και μπορεί εύκολα

να εντοπιστεί από μη επιθυμητούς δέκτες. Στο VLC, δεδομένου ότι το μήκος κύματος του φωτός είναι μικρό, το φως επηρεάζεται από την κατευθυντικότητα, εξασθενεί και δεν μπορεί να διεισδύσει στους τοίχους όταν διαδίδεται στο χώρο. Έτσι, το φως μπορεί να ληφθεί μόνο σε μια συγκεκριμένη περιοχή και διασφαλίζεται η εμπιστευτικότητα των μεταδιδόμενων πληροφοριών.

- Ενεργειακή απόδοση: Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές πηγές φωτός, τα LED παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση ηλεκτρο-οπτικής μετατροπής. Εφόσον τα LED μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας κατά τη διάρκεια που φωτίζουν, θα εξοικονομήσουν πολύ ενέργεια. Επομένως, έχει προταθεί η έννοια της ολοκληρωμένης επικοινωνίας φωτισμού. Επιπλέον, σε σύγκριση με τα δίκτυα RF φεμτοκυψελών, τα συστήματα που χρησιμοποιούν τεχνολογία VLC θα μπορούσαν να επιτύχουν ένα πολύ μεγάλο φασματικό κέρδος.
- Επιπτώσεις στην υγεία: Σε σύγκριση με τις επικοινωνίες υπέρυθρης ακτινοβολίας (Infrared Radiation - IR), μια μη σωστή εφαρμογή υπέρυθρων μπορεί να προκαλέσει βλάβη στο ανθρώπινο σώμα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, καθώς η IR είναι ένα είδος θερμικής ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, οι ισχυρές ακτινοβολίες IR μπορούν να προκαλέσουν εγκαύματα στο δέρμα ή να βλάψουν τον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού. Υπό κανονικές συνθήκες φωτισμού, η χρήση του VLC δεν αποτελεί κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία.
- Υποδομή "ευρείας διείσδυσης" (LED): Λόγω της σταδιακής ευρείας υιοθέτησης των LED ως τέταρτης γενιάς τεχνολογία φωτισμού, οι εγκαταστάσεις φωτισμού αντιπροσωπεύουν μια φυσική πλατφόρμα για το VLC. Το μόνο που χρειάζεται να προστεθεί είναι οι μονάδες επικοινωνίας στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις φωτισμού για τη λειτουργία VLC, συνεπώς το κόστος εγκατάστασης είναι πολύ χαμηλό. Επιπλέον, το ρεύμα οδηγεί και ελέγχει την ένταση φωτός των LED τα κοινά συστήματα που χρησιμοποιούν τεχνολογία VLC χρησιμοποιούν το σχήμα IM/DD. Όταν χρησιμοποιούνται τα LED για το VLC, η διασύνδεση των δικτύων VL μπορεί να επιτευχθεί μέσω της υπάρχουσας υποδομής γραμμής ισχύος. Επομένως, το VLC είναι συμβατό με τα έξυπνα δίκτυα ρεύματος.
- Χρόνος συμφωνίας (coherence time): Δεδομένου ότι το VLC επηρεάζεται σημαντικά λιγότερο από εξασθένιση πολλαπλών διαδρομών, ο χρόνος συγχρονισμού των καναλιών VLC είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερος από αυτόν των καναλιών RF. Έτσι, το VLC απαιτεί λιγότερο συχνή εκτίμηση καναλιού, ένα

χαρακτηριστικό που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για καταστάσεις που απαιτούν συνεχή και σταθερή σύνδεση. Επιπλέον, ο υψηλότερος χρόνος συγχρονισμού συνεπάγεται ότι το VLC είναι μια τεχνολογία ανεκτική σε σφάλματα.

Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι περισσότερο από το 70% της ασύρματης κίνησης προέρχεται από εσωτερικούς χώρους. Παρόλο που τα κύματα RF διεισδύουν στους τοίχους, η διάδοση του σήματος υποβαθμίζεται. Αφενός, η εξασθενημένη διάδοση περιορίζει τη ροή δεδομένων των χρηστών. Αφετέρου, εφόσον η μετάδοση δεν περιορίζεται αυστηρά στον επιδιωκόμενο χώρο, η ασφάλεια των συνδέσεων μπορεί να διακυβευτεί από την υποκλοπή κακόβουλων χρηστών. Η VLC παρέχει τις απαντήσεις και στα δύο προβλήματα. Δεδομένου ότι τα περισσότερα εσωτερικά περιβάλλοντα φωτίζονται, η VLC μπορεί να παρέχει την απαιτούμενη κάλυψη. Δεδομένου ότι το ορατό φως δεν μπορεί να διεισδύσει στους τοίχους, οι σύνδεσμοι μπορούν να παραμείνουν ασφαλείς.

Παρόλα αυτά, τα συστήματα VLC μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συμπληρωματικά των RF και όχι ως ανταγωνιστικός τρόπος επικοινωνίας. Για παράδειγμα, σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο που χρειάζεται να καλύψει μία μεγάλη περιοχή, όπου οι χρήστες μπορούν να περιφέρονται ελεύθερα εντός και εκτός ενός κτηρίου, παραμένοντας συνδεδεμένοι όλες τις ώρες, η RF επικοινωνία είναι η καλύτερη επιλογή. Εάν ένα τοπικό δίκτυο απαιτείται για να καλύψει μία σχετικά μικρή περιοχή, η υπηρεσία παρέχεται τοπικά σε ένα δωμάτιο, με υψηλές ταχύτητες διάδοσης (πχ για τηλεδιάσκεψη, ψηφιακή τηλεόραση), τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί η οπτική μετάδοση με σχεδόν απεριόριστο εύρος ζώνης. Ταυτόχρονα το φάσμα των RF μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές.

Επομένως και οι δύο τεχνολογίες VLC και RF μπορούν να συνυπάρχουν λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών τους για επικοινωνία και να αλληλοσυμπληρώνονται. Για παράδειγμα, το VLC είναι ιδανικό για μικρές αποστάσεις και το RF είναι ιδανικό για επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων. Το VLC είναι ιδανικό για εφαρμογή σε εσωτερικούς χώρους, ενώ το RF είναι ιδανικό για επικοινωνία σε εσωτερικό / εξωτερικό χώρο ανάλογα με τεχνολογίες όπως wifi, gsm, δορυφόρο κλπ. Είναι εντέλει συμπληρωματικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται μαζί για επικοινωνία δεδομένων.

### **4.3 Σύγκριση με μικροκυψέλες και ετερογενή δίκτυα (HetNets)**

Το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων υφίσταται χωρική επαναχρησιμοποίηση για την μεγαλύτερη δυνατή αύξηση της απόδοσης φάσματος. Νέες προσεγγίσεις όπως οι μικροκυψέλες και τα ετερογενή δίκτυα (Heterogeneous network – HetNets), θεωρούνται το μέλλον των κινητών επικοινωνιών.



Ένα HetNet είναι ένα ετερογενές δίκτυο που υποστηρίζει 3G ή 4G τεχνολογίες επικοινωνίας, back-haul και μικρότερης εμβέλειας επικοινωνίες, όπως το Wi-Fi τοπικού δικτύου. Λόγω της μείωσης του μεγέθους των κυψελών, μέχρι το 2007, η φασματική απόδοση του συστήματος αυξήθηκε κατά ένα παράγοντα 2700, σε σύγκριση με 50 χρόνια νωρίτερα. Λόγω της υψηλής κατευθυντικότητας και του ευκολότερου περιορισμού του ορατού φωτός, είναι δυνατή η χρήση μικρότερων κυψελών VLC (attocells), που παρέχουν εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη αύξηση χωρητικότητας. Ένα αποδοτικό HetNet, θα πρέπει να χρησιμοποιεί τον καταλληλότερο σύνδεσμο για κάθε συγκεκριμένη εργασία, π.χ. συνδέσεις οπτικών ινών για σύνδεση υψηλής ταχύτητας backhaul.

Οι συνδέσεις RF υποστηρίζουν την κινητικότητα, παρέχουν ευρεία κάλυψη και οι VLC μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν απαιτούνται υψηλά ποσοστά δεδομένων και ασφαλής επικοινωνία. Προς αυτή την κατεύθυνση, η VLC εξελίσσεται προς ένα νέο πρότυπο που ονομάζεται Li-Fi (Light Fidelity) για να συμπληρώσει τα ασύρματα δίκτυα Wi-Fi (Wireless Fidelity).

#### **4.4 Αδυναμίες των συστημάτων VLC**

Οι βασικές αδυναμίες που αποτελούν και τα μειονεκτήματα της χρήσης των VLC συστημάτων συνοψίζονται ως εξής:

- Μικρή εμβέλεια

Η τεχνολογία αυτή συνήθως λειτουργεί σε μικρές σχετικά αποστάσεις πομπού δέκτη. Για να αυξηθεί η απόσταση διαβίβασης, η ισχύς της πηγής πρέπει να αυξηθεί. Για να αυξηθεί η εμβέλεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί επικοινωνία αισθητήρα εικόνας (Image Sensor Communication), σε συνδυασμό με φακούς τηλεσκοπίου για να γίνει αντιληπτή η εμβέλεια μεγάλων αποστάσεων. Δυστυχώς αυτές οι βελτιώσεις εμβέλειας οδηγούν σε υπολογίσιμη αύξηση του κόστους.

- Ευαισθησία στις παρεμβολές

Τα συστήματα VLC είναι ευαίσθητα στις παρεμβολές από άλλες πηγές φωτός.

- Προβλήματα υλικού στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink)

Η επικοινωνία στην ανερχόμενη ζεύξη για το VLC αντιπροσωπεύει μια πρόκληση καθώς απαιτεί ενημέρωση του υλικού του χρήστη. Το σήμα που εκπέμπεται από το LED στη φωτοδίοδο στο κινητό τηλέφωνο επιλύει μόνο το πρόβλημα επικοινωνίας της κατερχόμενης ζεύξης (downlink) και το κινητό τηλέφωνο πρέπει να στείλει ένα σήμα πίσω

για να διασφαλιστεί ότι η ζεύξη επικοινωνίας ξεμπλοκάρει, αλλά ο σχεδιασμός της ζεύξης αντίστροφης επικοινωνίας είναι δύσκολος.

- Παρεμβολές και θόρυβος από άλλες πηγές φωτός ή μεταξύ κυψελών

Άλλες μη διαμορφωμένες πηγές τεχνητού φωτός και φυσικές πηγές φωτός λειτουργούν μερικές φορές στην ίδια φασματική ζώνη με τα συστήματα που χρησιμοποιούν τεχνολογία VLC. Εάν η πηγή φωτός περιβάλλοντος είναι αρκετά ισχυρή, θα αυξήσει την ένταση του θορύβου λήψης ή θα κορεστεί το άκρο λήψης και τα συστήματα που χρησιμοποιούν τεχνολογία VLC δε θα μπορούν να λειτουργήσουν σωστά.

- Ενσωμάτωση Επικοινωνίας και φωτισμού

Ως τεχνολογία ενσωμάτωσης επικοινωνίας και φωτισμού, το VLC εσωτερικού χώρου πρέπει να ικανοποιεί εις διπλούν τις απαιτήσεις του χρήστη για φωτισμό και επικοινωνία. Η μετάδοση πληροφοριών στο VLC βασίζεται στην μεταβολή της φωτεινής έντασης και μπορεί να εμφανιστεί το φαινόμενο flickering κατά την επικοινωνία, γεγονός που δεν είναι αποδεκτό στον καθημερινό φωτισμό και μπορεί να επηρεάσει σοβαρά την εμπειρία φωτισμού του χρήστη. Το VLC πρέπει να πληροί τις αντίστοιχες απαιτήσεις φωτισμού τόσο στις λειτουργίες ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του φωτισμού.

- Κινητικότητα τερματικού (χρήστη) και μετάβαση (handover)

Αν ο δέκτης ή ο πομπός είναι σε κίνηση, η λαμβανόμενη ισχύς στη συστοιχία του φωρατή θα αυξομειώνεται. Η μήτρα καναλιού θα πρέπει να ενημερώνεται με την πάροδο του χρόνου. Οι μηχανισμοί τύπου soft handover είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για την εξαγωγή αυτών των διακυμάνσεων και τη διατήρηση μιας πιο σταθερής σύνδεσης όταν η ανίχνευση φωτός μεταφέρεται από τον έναν φωτοφωρατή στον άλλον.

- Κάλυψη σήματος (ο υψηλός ρυθμός εξασθένησης του σήματος)

Στο VLC, τα μεγέθη των κυψελών είναι σημαντικά μικρότερα λόγω της υψηλής κατευθυντικότητας του φωτός και των μικρότερων αποστάσεων μετάδοσης, επομένως η περιοχή κάλυψης του σήματος είναι περιορισμένη. Αν αυξηθεί η γωνία δέσμης του πομπού, η ένταση του ανιχνευμένου σήματος θα μειωθεί σχετικά.

- Απώλεια της οπτικής επαφής της ζεύξης λόγω σκίασης

Καθώς το VLC δεν μπορεί να διεισδύσει στα εμπόδια, το VLC για εσωτερικούς χώρους χρειάζεται ζεύξεις οπτικής επαφής. Έτσι, η μετάδοση επηρεάζεται από τα αντικείμενα που εμποδίζουν λόγω της τυχαίας κίνησης των ανθρώπων σε ένα δωμάτιο. Ωστόσο, η οπτική επαφή για τους δέκτες συστημάτων φωτισμού είναι η αναμενόμενη τις περισσότερες φορές.

- Πρόσβαση δικτύου VLC στο Διαδίκτυο

Το σύστημα που χρησιμοποιεί τεχνολογία VLC για εσωτερικούς χώρους πρέπει να είναι συνδεδεμένο στο σταθμό βάσης για να επιτευχθεί η επικοινωνία. Το πιο πρακτικό πρόβλημα είναι η κατασκευή ενός ασύρματου δικτύου πρόσβασης VL αποτελούμενο από δεκάδες ή και εκατοντάδες σημεία πρόσβασης (access point) VL που κατανέμονται στο μέγιστο δυνατό βαθμό, καθώς είναι δύσκολο να εγκατασταθούν νέα καλώδια επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών σταθερών δικτύων και φώτων LED ή μεταξύ των φώτων LED.

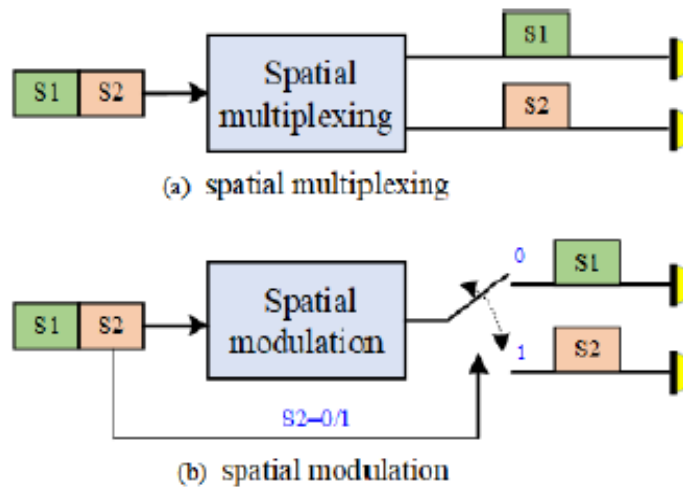
#### **4.5 Προηγμένες τεχνικές βελτίωσης της χωρητικότητας ενός συστήματος VLC**

Μέχρι στιγμής, έχουν παρουσιαστεί πολλές προηγμένες τεχνικές / σχέδια για τη βελτίωση της χωρητικότητας των συστημάτων με τεχνολογία VLC, όπως υψηλής ποιότητας micro LED, εξισορρόπηση πεδίου συχνοτήτων, OFDM και συστήματα πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων (Multiple Input Multiple Output – MIMO), τα οποία αναλύονται στα ως εξής:

1. Micro LED υψηλής ποιότητας: Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η χωρητικότητα των συστημάτων VLC περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το περιορισμένο εύρος ζώνης διαμόρφωσης των λευκών LED, οι ερευνητές εξέτασαν το νιτρίδιο του γαλλίου (GaN), AlInGaN ή μικροϋπολογιστές LED βασισμένους σε InGaN (ονομαζόμενοι και ως μLED), οι οποίοι θα μπορούσαν να επιτύχουν εύρος ζώνης διαμόρφωσης των 3 dB πάνω από τα 100 MHz.
2. Εξισορρόπηση πεδίου συχνότητας (Frequency Domain Equalization-FDE): Οι τεχνικές FDE μπορούν να αυξήσουν σημαντικά το εύρος ζώνης διαμόρφωσης των 3dB των εμπορικά λευκών LED, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε πομπούς είτε σε δέκτες. Διερευνήθηκαν πειραματικά σταθμισμένα σχέδια προ-εξισορρόπησης για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος αντισταθμίζοντας τη μείωση της συχνότητας των LED.
3. OFDM VLC: Η τεχνική OFDM έχει τη δυνατότητα να μειώσει την ενδοσυμβολική παρεμβολή (Inter Symbol Interference -ISI) μεταδίδοντας παράλληλες ροές δεδομένων σε ορθογώνιους υποφορείς (orthogonal subcarriers) και μπορεί να επιτύχει υψηλή φασματική αποτελεσματικότητα συνδυάζοντας τετραγωνικούς αστερισμούς διαμόρφωσης πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation-QAM), που έχει υιοθετηθεί ευρέως στα συστήματα τεχνολογίας VLC. Επιπλέον, η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης

που βασίζεται στο OFDM, δηλαδή η πολλαπλή πρόσβαση ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (OFDMA) μπορεί να παρέχει ευέλικτη κατανομή υποφορέα για να εγγυηθεί τις απαιτήσεις QoS της κάθε συσκευής.

4. **MIMO VLC:** Η μετάδοση MIMO είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος ενίσχυσης της χωρητικότητας του VLC, όπου το σύστημα εσωτερικού χώρου αποτελείται από πολλαπλούς πομπούς (λαμπτήρες LED) ως εισόδους και πολλαπλά στοιχεία δέκτη (φωτοφωρατές) ως εξόδους. Η χωρική πολυπλεξία είναι ένας δημοφιλής σχεδιασμός για τα συστήματα MIMO VLC, όπου τα διαφορετικά σήματα μεταδίδονται από διαφορετικούς λαμπτήρες LED, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2(a).

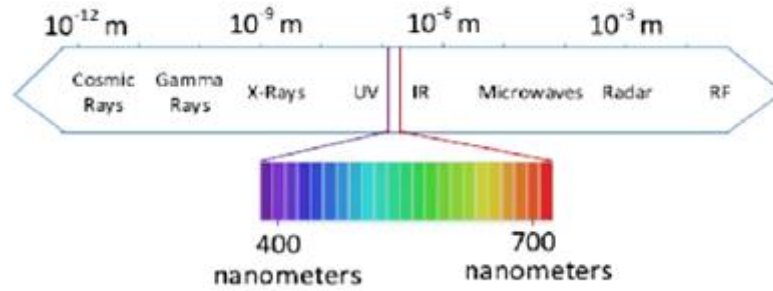


Εικόνα 4.2: Αναπαράσταση των δυο τρόπων μετάδοσης MIMO.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η διακαναλική παρεμβολή υπάρχει σε συστήματα MIMO VLC που βασίζονται σε χωρική πολυπλεξία, έχουν παρουσιαστεί οι τεχνικές, π.χ. προκωδικοποίησης, ανισορροπίας ισχύος και βελτιωμένου σχεδιασμού δέκτη για τον μετριασμό του. Επιπλέον, προτάθηκε μια τεχνική χωρικής διαμόρφωσης για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ καναλιών χρησιμοποιώντας μόνο μία λάμπα LED για τη μετάδοση σήματος σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2(b).

#### 4.6 Πλεονεκτήματα των συστημάτων VLC

Η τεχνολογία οπτικών επικοινωνιών (VLC), χρησιμοποιεί διόδους εκπομπής φωτός (LEDs) που εκπέμπουν φως σε μήκη κύματος φάσματος 380 nm-700 nm.



Εικόνα 4.3: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και περιοχή ορατού φωτός.

Τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών (VLC), χρησιμοποιώντας διόδους εκπομπής φωτός (LEDs) προσφέρουν την δυνατότητα ενός συμπληρωματικού συστήματος. Οι κύριοι λόγοι είναι οι εξής:

- Το εύρος ζώνης τους είναι απεριόριστο. Έτσι, η πιθανή χωρητικότητα δεδομένων των VLC είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από το τμήμα ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency RF) του φάσματος.
- Είναι δύσκολο να εγκατασταθούν νέα καλώδια στον εξοπλισμό φωτισμού οροφής, για τις VLC επικοινωνίες εσωτερικού χώρου. Οι επικοινωνίες ισχύος (Power Line Communication - PLC), επιτρέπουν τη χρήση ηλεκτρικών καλωδίων για επικοινωνία. Επιτρέπουν επίσης, τη χρήση των πριζών εξόδου για χρήση ως θύρες, μειώνοντας την ανάγκη εγκατάστασης νέων καλωδίων επικοινωνίας για τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών (VLC), τα οποία είναι δύσκολο να εγκατασταθούν στον ήδη υπάρχοντα εξοπλισμό. Οι προδιαγραφές (PLC) ενοποιήθηκαν σε δύο πρότυπα: IEEE 1901 και ITU-T G.9960/61 το 2009 και το 2010, αντίστοιχα. Δεδομένου ότι τα πρότυπα για το (VLC) και το (PLC) είναι πλήρη, υπάρχει ισχυρό κίνητρο για τη διερεύνηση της ενσωμάτωσης αυτών των τεχνολογιών. Έτσι, οι υπάρχουσες υποδομές ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εγκατάσταση των (VLC) συστημάτων.
- Οι πομποδέκτες είναι οικονομικοί και δεν υπάρχει ανάγκη αγοράς ακριβών μονάδων ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency-RF).
- Τα κύματα φωτός δεν διεισδύουν σε αδιαφανή αντικείμενα, συνεπώς από αυτά δεν μπορούν να υποκλαπούν πληροφορίες. Επομένως, με τα συστήματα (VLC) μεγιστοποιείται η ασφάλεια.
- Οι ορατού φωτός ακτινοβολίες, περιορισμένης έντασης δεν είναι επιβλαβείς για την υγεία. Έτσι, τα συστήματα αυτά προβλέπεται να χρησιμοποιηθούν σε νοσοκομεία και ιδιωτικά σπίτια. Επιπλέον, δεν υπάρχει παρεμβολή με συστήματα ραδιοσυχνοτήτων RF κι έτσι ευνοείται η χρήση τους σε αεροπλάνα.

- Οι λευκές ή έγχρωμες δίοδοι εκπομπής (LEDs) προβλέπεται να αντικαταστήσουν τις υψηλά ενεργειακές λάμπες φωτός σε ιδιωτικούς, επιχειρησιακούς χώρους και σε οδούς. Επίσης, αναμένεται να χρησιμοποιούνται ευρέως σε ειδικά φωτισμένους χώρους όπως μουσεία και περιοχές με μεγαλύτερες απαιτήσεις φωτισμού όπως σε εξωτερικούς χώρους, τρένα ή αεροπλάνα. Το κόστος τους καθίσταται μικρότερο. Οι δίοδοι (LEDs) που χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες (VLC) είναι συσκευές υψηλής απόδοσης. Χρησιμοποιούν τουλάχιστον 75% λιγότερη ενέργεια και έχουν διάρκεια ζωής 25 φορές μεγαλύτερη, από αυτή του συμβατικού φωτισμού πυρακτώσεως. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, η ευρεία χρήση των διόδων (LEDs) έως το 2027 μπορεί να εξοικονομήσει περίπου 348 TerraWatt/ώρα ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόκειται για ένα τεράστιο ποσό ενέργειας, που ισοδυναμεί με ετήσια ηλεκτρική παραγωγή, αντίστοιχη με αυτή 44 μεγάλων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Έτσι παρέχεται η δυνατότητα για ταυτόχρονη χρήση των διόδων (LEDs) για φωτισμό και επικοινωνία. Η ιδέα της ταυτόχρονης χρήσης των διόδων (LEDs) για φωτισμό και επικοινωνία, που ονομάζεται ilight, επανεμφανίστηκε μέσω των λευκών και έγχρωμων διόδων (LEDs) που παρέχουν ένα σημαντικό εύρος ζώνης διαμόρφωσης γύρω στα 20 MHz.

Όλα αυτά τα οφέλη ευνοούν την χρήση υψηλής φωτεινότητας (High-Brightness Light-emitting diodes - HB-LEDs) ως επικοινωνιακές συσκευές. Πρόσφατοι κανονισμοί υγείας περιορίζουν την απεριόριστη ισχύ όσον αφορά τα επίπεδα φωτισμού. Τα VLC συστήματα έχουν πλεονεκτήματα, που γίνονται πιο εμφανή όταν συνδυάζονται με εναλλακτικές τεχνολογίες επικοινωνίας.

#### **4.7 Σχήματα πολλαπλής πρόσβασης VLC**

Στο VLC, έχουν προταθεί διαφορετικές μέθοδοι πολλαπλής πρόσβασης που επιτρέπουν σε περισσότερους από δύο χρήστες / κόμβους να συνδεθούν στο ίδιο μέσο μετάδοσης και να μεταδοθούν μέσω αυτού όπως:

1. Ανίχνευση φορέα πολλαπλής πρόσβασης (Carrier Sense Multiple Access - CSMA): ένας χρήστης / κόμβος προσπαθεί πρώτα να προσδιορίσει αν μια άλλη μετάδοση βρίσκεται σε εξέλιξη προτού ρυθμίσει τη μετάδοσή της με τη χρήση μηχανισμού ανίχνευσης φορέα. Αν ο μηχανισμός ανίχνευσης φορέα ανιχνεύσει μια τρέχουσα μετάδοση, ο χρήστης / κόμβος περιμένει να τερματιστεί η τρέχουσα μετάδοση.
2. Ορθογώνια διαίρεση συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης (Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA): Η OFDMA είναι μια τροποποιημένη έκδοση

του OFDM όπου η πολλαπλή πρόσβαση επιτυγχάνεται με την εκχώρηση διαφορετικών υπο-φορέων σε διαφορετικούς χρήστες / κόμβους. Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση από πολλούς χρήστες / κόμβους.

3. Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (Code Division Multiple Access - CDMA): Το CDMA είναι ένα σχήμα πρόσβασης καναλιού όπου πολλοί χρήστες / κόμβοι μπορούν να στέλνουν δεδομένα ταυτόχρονα μέσω ενός καναλιού VLC. Αυτό επιτρέπει σε πολλούς χρήστες / κόμβους να μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων χωρίς πολλές παρεμβολές μεταξύ τους με τη χρήση ενός ειδικού σχήματος κωδικοποίησης όπου κάθε χρήστης / κόμβος έχει έναν ειδικό κωδικό.
4. Μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA): Στη NOMA, οι χρήστες / κόμβοι μοιράζονται ταυτόχρονα τους διαθέσιμους πόρους, που αφορούν το χρόνο και τη συχνότητα, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλές καθυστερήσεις και καλύτερη φασματική απόδοση. Τα συστήματα NOMA μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δύο τομείς, αναφορικά με την ισχύ ή τον κώδικα. Το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο είναι το NOMA στον πεδίο της ισχύος όπου διαφορετικά επίπεδα ισχύος εκχωρούνται σε διαφορετικούς χρήστες / κόμβους. Από την άλλη πλευρά, στο σχήμα NOMA με βάση τον κώδικα, η πολυπλεξία επιτυγχάνεται με τη χρήση αλληλουχιών διάδοσης παρόμοιας με την τεχνολογία CDMA.

Θα πρέπει να σημειωθεί επιπλέον ότι η μέθοδος πρόσβασης μπορεί να αποτελεί μέρος του πρωτοκόλλου πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Protocol-MAP) και του μηχανισμού ελέγχου (Control Mechanism-CM), ο οποίος είναι γνωστός ως έλεγχος μέσου πρόσβασης (Medium Access Control-MAC). Το MAC όπως έχουμε αναφέρει ασχολείται με ζητήματα όπως η εκχώρηση καναλιών σε διαφορετικούς χρήστες / κόμβους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ VLC

### 5.1 Εισαγωγή

Τα έμφυτα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του συστήματος VLC είναι το υψηλό εύρος ζώνης, είναι μη βλαβερά για την υγεία των ανθρώπων, έχουν χαμηλή κατανάλωση ισχύος και λειτουργούν σε μη αδειοδοτημένο κανάλι μετάδοσης. Αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν βοηθήσει τα συστήματα αυτά να βρουν πρακτική χρήση σε πολλές εφαρμογές σήμερα. Επιπρόσθετα οι εφαρμογές VLC βασισμένες στο φωτισμό των LEDs είναι πιο προσιτές στα περιβάλλοντα όπου τα φώτα είναι πάντα αναμμένα.

Η επέκταση του συστήματος είναι σχετικά εύκολη δεδομένου ότι τα στοιχεία μπορούν να παρασχεθούν από ένα τοπικό σημείο συνάθροισης στις συσκευές φωτισμού μέσω της υπάρχουσας υποδομής όπως τα καλώδια τροφοδοσίας. Εκτός από το συνδυασμό με τον εσωτερικό φωτισμό, το VLC μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άλλα σενάρια και να συνδυαστεί με άλλες τεχνολογίες.

Οι τεχνολογίες LED έχουν προσελκύσει όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια στην αγορά φωτισμού και τείνουν να αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές πηγές φωτός για εσωτερικούς χώρους λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής τους, της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, του ταχύτερου χρόνου εναλλαγής (switching) και της μεγαλύτερης αξιοπιστίας.

Ταυτόχρονα, η τεχνολογία VLC που βασίζεται σε λευκά LED αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για ασύρματα συστήματα επικοινωνίας εσωτερικού χώρου λόγω των πολλών σημαντικών πλεονεκτημάτων του, όπως το χαμηλό κόστος, το μεγάλο μη ρυθμιζόμενο εύρος ζώνης και η υψηλή ασφάλεια. Ως εκ τούτου, η τεχνολογία VLC ενδείκνυται για εφαρμογές σε σπίτια, σούπερ μάρκετ, νοσοκομεία, αεροπλάνα αλλά και στον τομέα της βιομηχανίας.

Έχει αποδειχθεί ότι τα συστήματα τεχνολογίας VLC έχουν τη δυνατότητα να επιτυγχάνουν ρυθμούς δεδομένων έως και αρκετά Gbs, ρυθμοί πολύ υψηλότεροι από αυτούς των συστημάτων με τεχνολογία RF (WiFi). Γι' αυτό το λόγο, εκτός από τη δυνατότητα φωτισμού, τα συστήματα LED με τεχνολογία VLC μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την υποστήριξη υψηλής ταχύτητας πρόσβασης στο διαδίκτυο σε εσωτερικούς χώρους, όπως σε γραφεία, αίθουσες διδασκαλίας, εργοστάσια, σπίτια κ.ο.κ. Εκτός από την ασύρματη επικοινωνία υψηλής ταχύτητας, η τεχνολογία VLC με LED έχει επίσης άλλες πιθανές εφαρμογές όπως θα αναλύσουμε στην συνέχεια.



## 5.2 Light Fidelity Li-Fi

Το 2011, ο Harald Haas ήταν ο πρώτος που όρισε τον όρο του Light Fidelity ή Li-Fi. Η τεχνολογία Li-Fi είναι ένα αμφίδρομο σύστημα επικοινωνιών υψηλής ταχύτητας που χρησιμοποιεί το ορατό φως και είναι ανάλογο του Wi-Fi το οποίο χρησιμοποιεί τη ραδιοσυχνότητα για την επικοινωνία. Τα συστήματα Wi-Fi αντιμετωπίζουν τεράστια προβλήματα παρεμβολών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι παρεμβολές των κινητών τηλεφώνων στα συστήματα πλοήγησης στα αεροσκάφη. Επομένως η τεχνολογία Li-Fi είναι μια καλή λύση στις περιοχές που είναι ευαίσθητες στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

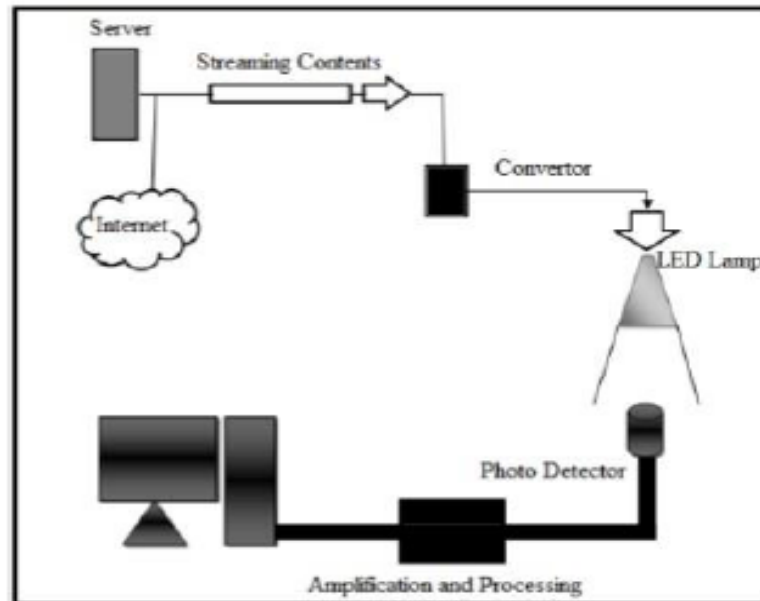
### 5.2.1 Αρχή λειτουργίας του Li-Fi

Η τεχνολογία Wi-Fi αντιμετωπίζει και άλλα προβλήματα εκτός από αυτό των παρεμβολών. Έχει χαμηλή λήψη δεδομένων και περιορισμένο αριθμό καναλιών. Για να υπερνικηθούν αυτοί οι περιορισμοί αναπτύχθηκε η τεχνολογία Li-Fi.

Η τεχνολογία Li-Fi είναι βασισμένη στην τεχνολογία VLC. Ο οπτικός μεταφορέας χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων και για το φωτισμό του χώρου. Μια ροή από 0 και 1 μπορεί να αναπαρασταθεί με την εναλλαγή των LEDs στον πομπό του Li-Fi και η κωδικοποίηση των bits είναι εφικτή από το ελεγχόμενο κύκλωμα. Στον δέκτη μια φωτοδίοδος ανιχνεύει το άναμμα και το σβήσιμο των LEDs και εξάγει μια ακολουθία από 0 και 1. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται σε nanosecond και έτσι το ανθρώπινο μάτι δεν μπορεί να το αντιληφθεί. Το ανθρώπινο μάτι μπορεί να ανιχνεύσει μόνο το συνεχές φως. Έτσι το ζήτημα ασφάλεια που υπάρχει στην τεχνολογία Wi-Fi επιλύεται επειδή κανένας δεν μπορεί να ανιχνεύσει το ρεύμα των bits εκτός του από τον δέκτη του συστήματος.

Στην εικόνα 5.1 φαίνεται ένα πλήρες σύστημα Li-Fi. Το ρεύμα των bits που έρχεται από το διαδίκτυο ή οποιονδήποτε κεντρικό υπολογιστή μπορεί να μετατραπεί σε φωτεινό σήμα με τη βοήθεια του μετατροπέα. Από το LED του πομπού τα δεδομένα διαβιβάζονται χρησιμοποιώντας το ορατό φως. Στο τέλος του δέκτη μια φωτοδίοδος είναι τοποθετημένη για να ανιχνεύει το φως από το άναμμα και το σβήσιμο των LEDs και το μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα που ενισχύεται και έπειτα είναι διαθέσιμο να χρησιμοποιηθεί από την αντίστοιχη συσκευή. Για να επιτύχει ψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων ο ανιχνευτής φωτός πρέπει να είναι πολύ ακριβής.

Στον πίνακα 5.1 γίνεται μια σύγκριση της αποδοτικότητας της τεχνολογίας Li-Fi με άλλες τεχνολογίες. Αυτή η σύγκριση είναι πολύ σημαντική για να πάρουμε μια σαφή ιδέα της αποδοτικότητας της Li-Fi.



Εικόνα 5.1: Πλήρες σύστημα Li-Fi.

Τεχνολογία	Ρυθμός Μετάδοσης
WiFi – IEEE 802.11n	150Mbps
Bluetooth	3Mbps
IrDA	4Mbps
LiFi	>1Gbps

Πίνακας 5.1: Αποδοτικότητα διαφόρων τεχνολογιών.

### 5.2.2 Διαμορφώσεις

Τεχνικές όπως οι PWM, PPM, OOK και PAM μπορούν να εφαρμοστούν σε μια σχετικά απλή τάση. Καθώς οι ταχύτητες διαμόρφωσης αυξάνονται, αυτές οι συγκεκριμένες τεχνικές διαμόρφωσης αρχίζουν να υποφέρουν από τις ανεπιθύμητες παρεμβολές μεταξύ των συμβόλων λόγω του εκλεκτικού οπτικού ασύρματου καναλιού συχνότητας. Ως εκ τούτου, απαιτείται μια πιο ελαστική τεχνική όπως η OFDM.

Η OFDM επιτρέπει την προσαρμοστική φόρτωση των bit και της ισχύς διαφορετικών υποζωνών συχνότητας σύμφωνα με τις ιδιότητες καναλιών επικοινωνίας. Αυτό οδηγεί στη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Τέτοιες καταστάσεις καναλιών εισάγονται από την απόκριση συχνότητας ενός Off the shelf LED, το οποίο έχει μέγιστο 3dB εύρος

ζώνης διαμόρφωσης μερικών δεκάδων MHz. Περαιτέρω οφέλη από αυτή τη διαμόρφωση συμπεριλαμβάνουν απλή εξίσωση με ισοσταθμιστές απλής πίεσης στον τομέα συχνοτήτων, καθώς και τη δυνατότητα αποφυγής παραμόρφωσης χαμηλής συχνότητας που προκαλείται από το τρεμοπαίξιμο της ακτινοβολίας και το φαινόμενο DC-wander σε ηλεκτρικά κυκλώματα.

Τα συμβατικά σήματα OFDM είναι πολύπλοκα και διπολικά. Επομένως, η τυποποιημένη τεχνική RF OFDM πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να καταστεί κατάλληλη για συστήματα IM/DD. Ένας απλός τρόπος για να αποκτηθεί ένα πραγματικό σήμα OFDM είναι να επιβάλλετε έναν περιορισμό της συμμετρίας Hermitian στα υποφέροντα στο πεδίο συχνοτήτων. Ωστόσο, το προκύπτον σήμα χρονικού πεδίου εξακολουθεί να είναι διπολικό. Ένας τρόπος απόκτησης ενός μονοπολικού σήματος είναι να εισαγάγει μια θετική πόλωση DC. Το προκύπτον σχήμα μονοπολικής διαμόρφωσης είναι γνωστή ως DCO-OFDM. Η προσθήκη του σταθερού επιπέδου πόλωσης οδηγεί σε σημαντική αύξηση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, αν οι πηγές φωτός χρησιμοποιούνται για φωτισμό την ίδια ώρα, η έξοδος φωτός ως αποτέλεσμα της πόλωσης DC δεν χάνεται καθώς χρησιμοποιείται για την εκπλήρωση της λειτουργίας φωτισμού.

Μόνο εάν δεν απαιτείται φωτισμός, όπως στην ανερχόμενη ζεύξη ενός συστήματος Li-Fi, η πόλωση DC μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ενεργειακή απόδοση. Ως εκ τούτου, οι ερευνητές έχουν καταβάλει σημαντικές προσπάθειες για το σχεδιασμό ενός καθεστώτος διαφοροποίησης βασισμένου σε OFDM το οποίο είναι καθαρά μονοπολικό. Ορισμένες γνωστές λύσεις περιλαμβάνουν: ασύμμετρη οπτική OFDM (ACO-OFDM), (PAM-DMT), flip-OFDM, μονοπολική OFDM (U-OFDM) και φασματική παραγοντοποιημένη οπτική OFDM (SFO-OFDM). Το γενικό μειονέκτημα όλων αυτών των τεχνικών είναι η απώλεια του 50% της φασματικής απόδοσης και των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων.

Από τη σκοπιά της δικτύωσης, η OFDM προσφέρει μια απλή εφαρμογή πολλαπλής πρόσβασης, καθώς οι υποφορείς μπορούν να διανεμηθούν σε διαφορετικούς χρήστες με αποτέλεσμα την πολλαπλή πρόσβαση ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (OFDMA). Τα πλεονεκτήματα του OFDM έχουν ήδη αναγνωριστεί και χρησιμοποιούνται σε συστήματα Wi-Fi IEEE 802.11. Επίσης, το OFDMA χρησιμοποιείται στο πρότυπο της 4ης γενιάς (4G) για τη μακροπρόθεσμη εξέλιξη (LTE) για κυψελοειδείς κινητές διαβιβάσεις. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή της OFDM σε οπτικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας θα επιτρέψει τη χρήση των ήδη καθιερωμένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας ανώτερου επιπέδου που χρησιμοποιούνται στα IEEE 802.11 και LTE.

### 5.2.3 Πολλαπλή πρόσβαση

Η απρόσκοπτη λύση οπτικής δικτύωσης μπορεί μόνο να υλοποιηθεί με ένα κατάλληλο σχήμα πολλαπλής πρόσβασης το οποίο επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες να μοιράζονται τους επικοινωνιακούς πόρους χωρίς οποιοδήποτε cross-talk. Τα σχήματα πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιούνται στην επικοινωνία των ραδιοσυχνοτήτων (RF) μπορούν να υιοθετηθούν από τις οπτικές επικοινωνίες εφόσον οι απαραίτητες τροποποιήσεις σχετίζονται με τη διαμόρφωση της έντασης και την άμεση ανίχνευση. Η διαμόρφωση OFDM έρχεται μαζί με τη φυσική επέκταση για την πολλαπλή πρόσβαση, την OFDMA. Τα σχήματα διαμόρφωσης απλού φέροντος όπως είναι η PPM και η PAM χρειάζονται επιπλέον τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης όπως είναι η FDMA (διαίρεση συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης), η TDMA (χρονική διαίρεση πολλαπλής πρόσβασης), ή την CDMA (κωδική διαίρεση πολλαπλής πρόσβασης).

Η OFDMA συγκρίνεται με τις TDMA και CDMA από την άποψη της απαίτησης ηλεκτρικής ισχύος σε ένα επίπεδο κανάλι διαλείψεων με προσθετικό λευκό Γκαουσιανό θόρυβο και μια θετικά άπειρη γραμμικά δυναμική περιοχή του πομπού. Η OFDM δεν έχει ληφθεί υπόψη, λόγω της στενής ομοιότητάς της με την OFDMA. Επιπλέον, λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης διαμόρφωσης του front-end στοιχείο, η FDMA δεν παρουσιάζει αποτελεσματική χρήση στο εύρος ζώνης της διαμόρφωσης του LED. Η CDMA αποδεικνύει την υψηλή απαίτηση ηλεκτρικής ενέργειας, αφού η χρήση μονοπολικών σημάτων δημιουργεί σημαντικές παρεμβολές μεταξύ συμβόλων. Η TDMA φαίνεται να ξεπερνά οριακά την OFDM σε αυτή τη ρύθμιση. Οι απαιτήσεις υψηλής ισχύος της OFDMA προέρχονται από την υψηλή στάθμη πόλωσης DC που απαιτείται για να ρυθμιστεί το σήμα OFDM εντός της θετικής δυναμικής περιοχής του LED.

Ωστόσο, σε ένα πρακτικό σενάριο VLC, όπου οι έννοιες της επικοινωνίας και του φωτισμού συνδυάζονται, οι διαφορές στην κατανάλωση ενέργειας μεταξύ OFDMA και TDMA θα μειώνονται. Η υπέρβαση της ισχύος της πόλωσης DC θα χρησιμοποιηθεί για σκοπούς φωτισμού. Επιπλέον τα συστήματα TDMA και CDMA αντιμετωπίζουν διαταραχές λόγω του θορύβου χαμηλής συχνότητας εξαιτίας της απομάκρυνσης DC σε ηλεκτρικά εξαρτήματα ή τρεμούλιασμα των πηγών φωτισμού καθώς και την σοβαρή παρεμβολή μεταξύ συμβόλων στο κανάλι διασκορπισμού και συχνότητας. Ως εκ τούτου, η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού των συστημάτων TDMA και CDMA αυξάνεται καθώς πρέπει να εφαρμοστούν οι κατάλληλες τεχνικές για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων.

Στις οπτικές ασύρματες επικοινωνίες, υπάρχει μια πρόσθετη εναλλακτική διάσταση για την επίτευξη πολλαπλής πρόσβασης. Αυτή η διάσταση είναι το χρώμα του LED και η αντίστοιχη τεχνική είναι η πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση μήκους κύματος, WDMA. Αυτό το σχέδιο μπορεί να μειώσει την πολυπλοκότητα της επεξεργασίας σήματος σε βάρος της αυξημένης πολυπλοκότητας του υλικού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε σημείο πρόσβασης απαιτεί πολλαπλές λυχνίες LED και φωτοδιόδους με φάσματα εκπομπής και ανίχνευσης στενής ζώνης. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπτικά φίλτρα στενής ζώνης. Ωστόσο, η μεταβολή του κεντρικού μήκους κύματος γενικά έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του εύρους ζώνης διαμόρφωσης, την απόδοση της οπτικής εκπομπής του LED και την ανταπόκριση της φωτοδιόδου. Αυτό αντιστοιχεί σε μια παραλλαγή του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) και χωρητικότητας στα διάφορα κανάλια πολλαπλής πρόσβασης, γεγονός που περιπλέκει τη δίκαιη κατανομή των πόρων επικοινωνίας σε πολλούς χρήστες.

### **5.3 Δικτύωση με τη χρήση τεχνολογίας Li-Fi Attocell**

Το οπτικό attocell όχι μόνο βελτιώνει την εσωτερική κάλυψη, αλλά καθώς δεν δημιουργεί πρόσθετες παρεμβολές, είναι σε θέση να ενισχύσει την ικανότητα των ασύρματων δικτύων RF. Τα attocells Li-Fi επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση πολύ πυκνού εύρους ζώνης λόγω των εγγενών ιδιοτήτων του φάσματος του ορατού φωτός. Η εικόνα 5.2 απεικονίζει την έννοια ενός Li-Fi δικτύου Attocell (LAC).

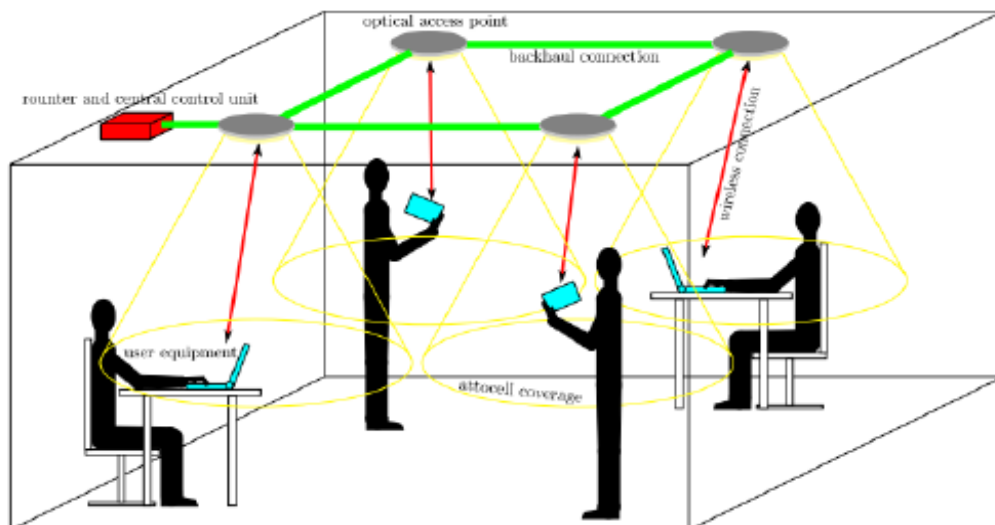
Το δωμάτιο φωτίζεται από ένα αριθμό φωτιστικών, τα οποία παρέχουν φωτισμό και οπτικό σημείο πρόσβασης στους χρήστες μέσα στο εύρος του φωτός. Ο φωτισμός μπορεί να ρυθμιστεί σε υψηλές ταχύτητες, μη ορατό στους επιβάτες του δωματίου, παρέχοντας μια οπτική κάτω ζεύξη. Η ισχύς και τα δεδομένα μπορούν να παρασχεθούν σε κάθε φωτιστικό εξοπλισμό χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, συμπεριλαμβανομένης της ισχύος μέσω Ethernet (PoE) και της επικοινωνίας γραμμής ισχύος (PLC). Μια οπτική άνω ζεύξη υλοποιείται χρησιμοποιώντας έναν πομπό στον εξοπλισμό χρήστη (UE), που συχνά χρησιμοποιεί μια πηγή IR (έτσι είναι αόρατη για τον χρήστη) και ένα δέκτη κοντά στο φωτιστικό. Κάθε ένα από αυτά τα φωτιστικά, τα οποία ταυτόχρονα λειτουργούν ως ασύρματα σημεία πρόσβασης (AP) Li-Fi, δημιουργούν μία εξαιρετικά μικρή κυψέλη (ένα attocell), η οποία μπορεί να παρέχει υψηλή πυκνότητα εύρους ζώνης λόγω του εξαιρετικά περιορισμένου φωτισμού από μια μεμονωμένη φωτεινή πηγή.

Η ισορροπία φωτιστικών που περιέχουν σημεία πρόσβασης και αυτά που παρέχουν μόνο φωτισμό καθορίζεται από την απαίτηση του δικτύου, αλλά ενδεχομένως όλα τα φωτιστικά

μπορούν να περιέχουν σημεία πρόσβασης. Σε σύγκριση με ένα ενιαίο ασύρματο σύστημα σημείων πρόσβασης hot-spot, τέτοια κυψελοειδή συστήματα μπορούν να καλύψουν μια πολύ μεγαλύτερη περιοχή και να επιτρέψουν τη σύνδεση πολλαπλών UEs ταυτόχρονα.

Στα κυψελοειδή δίκτυα χρησιμοποιείται πυκνή χωρική επαναχρησιμοποίηση των πόρων ασύρματης μετάδοσης για την επίτευξη πολύ υψηλής πυκνότητας δεδομένων-bit ανά δευτερόλεπτο ανά τετραγωνικό μέτρο (bps/m<sup>2</sup>). Συνεπώς, οι συνδέσεις που χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι σε γειτονικές κυψέλες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, η οποία είναι γνωστή ως παρεμβολή συν-καναλιού CCI. Η εικόνα 5.3 απεικονίζει τη CCI σε ένα οπτικό δίκτυο πλέγματος.

Οι προηγμένες τεχνικές μετριασμού CCI συχνά απαιτούν ότι αυτά τα πολλαπλά Li-Fi σημεία πρόσβασης λειτουργούν με τη βοήθεια ενός κεντρικού μηχανισμού ελέγχου, όπως το «hypervisor» εντός του διακομιστή ενός καθορισμένου δικτύου λογισμικού (SDN). Οι βασικές λειτουργίες του κεντρικού ελεγκτή είναι να προσαρμόζει τους πόρους ισχύος, συχνότητας, χρόνου και μήκους κύματος. Άλλες λειτουργίες του κεντρικού ελεγκτή περιλαμβάνουν επίτευξη πολλών χρηστών, και η διαδικασία μεταπομπής από κυψέλη σε κυψέλη όταν το τερματικό κινείται.

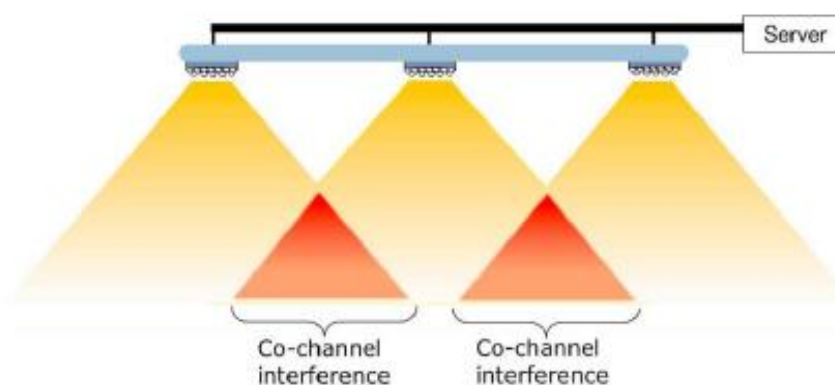


Εικόνα 5.2: Δίκτυο Li-Fi attocell. Τα φώτα στην οροφή λειτουργούν ως οπτικά σημεία πρόσβασης που σχηματίζουν ένα κινητό δίκτυο. Ένα ενιαίο οπτικό σημείο πρόσβασης μπορεί να επικοινωνεί ταυτόχρονα σε πολλαπλά τερματικά με αμίδρομο τρόπο. Το σύστημα υποστηρίζει την κινητικότητα. Όταν ένα τερματικό εγκαταλείπει την περιοχή κάλυψης ενός οπτικού σημείου πρόσβασης και εισέρχεται στην περιοχή κάλυψης του γειτονικού σημείου πρόσβασης ξεκινάει η παράδοση. Αυτό σημαίνει ότι η παροχή υπηρεσιών είναι απρόσκοπτη.

Τα δίκτυα Li-Fi attocell έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των υφιστάμενων τεχνολογιών.

Πρώτον, αντίθετα με τις κεραίες RF που κατευθύνονται σε όλες τις κατευθύνσεις, μια φωτεινή πηγή LED ακτινοβολεί την οπτική ισχύ κατευθείαν λόγω του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί το φως. Επομένως, η ακτινοβολία των σημάτων ορατού φωτός περιορίζεται φυσικά εντός μιας περιορισμένης περιοχής. Αντίθετα, τα συστήματα mm-wave των RF απαιτούν πολύπλοκες και δαπανηρές τεχνικές σχηματισμού δέσμης κεραίας για την επίτευξη του ίδιου στόχου.

Δεύτερον, τα δίκτυα Li-Fi attocell μπορούν να εφαρμοστούν τροποποιώντας τα υπάρχοντα συστήματα φωτισμού. Η οικοδόμηση ενός δικτύου μικρών κυψελών RF με την ίδια πυκνότητα σημείων πρόσβασης επιβάλλει τεράστιο κόστος υποδομής. Επιπλέον, οποιοδήποτε δίκτυο Li-Fi attocell, μπορεί να προσφέρει επιπλέον χωρητικότητα χωρίς παρεμβολές σε δίκτυα RF που μπορεί να υπάρχουν ήδη. Επομένως, τα δίκτυα Li-Fi attocell έχουν τη δυνατότητα να αυξήσουν τα κυψελοειδή συστήματα 5ης γενιάς (5G) με οικονομικά αποδοτικό τρόπο.



Εικόνα 5.3: Το CCI εμφανίζεται στην περιοχή όπου επικαλύπτεται το ίδιο φάσμα φωτός των γειτονικών σημείων πρόσβασης και όταν αυτά τα σημεία χρησιμοποιούν το ίδιο εύρος ζώνης διαμόρφωσης για κωδικοποίηση δεδομένων.

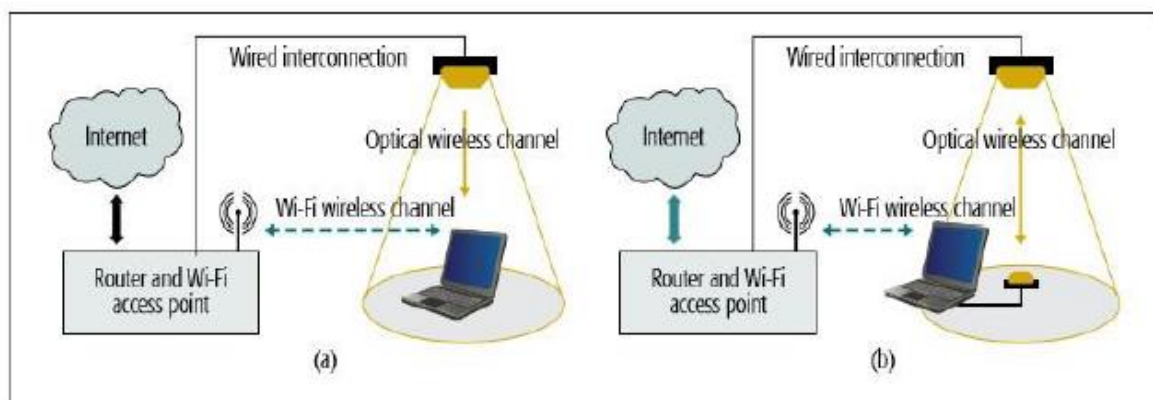
Η μετάβαση από συνδέσεις σημείο σε σημείο σε πλήρη ασύρματα δίκτυα που βασίζονται στο φως δημιουργεί διάφορες προκλήσεις. Μέσα σε κάθε κελί, μπορεί να υπάρχει ένας αριθμός χρηστών και ως εκ τούτου απαιτούνται πολλαπλά σημεία πρόσβασης. Θα πρέπει τότε να ληφθούν υπόψη οι παρεμβολές από τα σήματα που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία σε γειτονικά κελιά που πιθανόν να είναι και η σημαντικότερη βλάβη. Η παροχή μιας άνω ζεύξης (η ζεύξη επικοινωνίας από ένα UE σε ένα ή περισσότερα σημεία πρόσβασης) μπορεί επίσης να απαιτεί μια διαφορετική προσέγγιση από την κάτω ζεύξη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η φορητή συσκευή απαιτεί χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

και ότι μια ορατή πηγή φωτός στη συσκευή είναι πιθανό να αποσπά την προσοχή του χρήστη.

## 5.4 Συνύπαρξη Wi-Fi και Li-Fi σε εσωτερικούς χώρους

Υπάρχει μια πρωτοποριακή οργάνωση στην οποία συνυπάρχει ένα ενιαίο AP Wi-Fi και ένα ενιαίο AP Li-Fi.

Πιο κάτω συγκρίνονται τρία διαφορετικά συστήματα. Στο πρώτο σύστημα, το Wi-Fi χρησιμοποιείται μόνο για την σύνδεση με το διαδίκτυο. Το δεύτερο σύστημα είναι ένα υβριδικό σύστημα, παρόμοιο με το πρώτο, μόνο που η κάτω ζεύξη ενός από τους χρήστες συνδέεται μέσω μιας σύνδεσης Li-Fi. Στο τρίτο σύστημα, βλέπουμε ένα αθροιστικό σύστημα, στο οποίο ένας χρήστης συνδέεται με Wi-Fi και Li-Fi παράλληλα. Στην εικόνα 5.4 απεικονίζονται οι διαμορφώσεις του υβριδικού συστήματος και του αθροιστικού συστήματος.



Εικόνα 5.4: Διαμορφώσεις α) του υβριδικού συστήματος β) του αθροιστικού συστήματος.

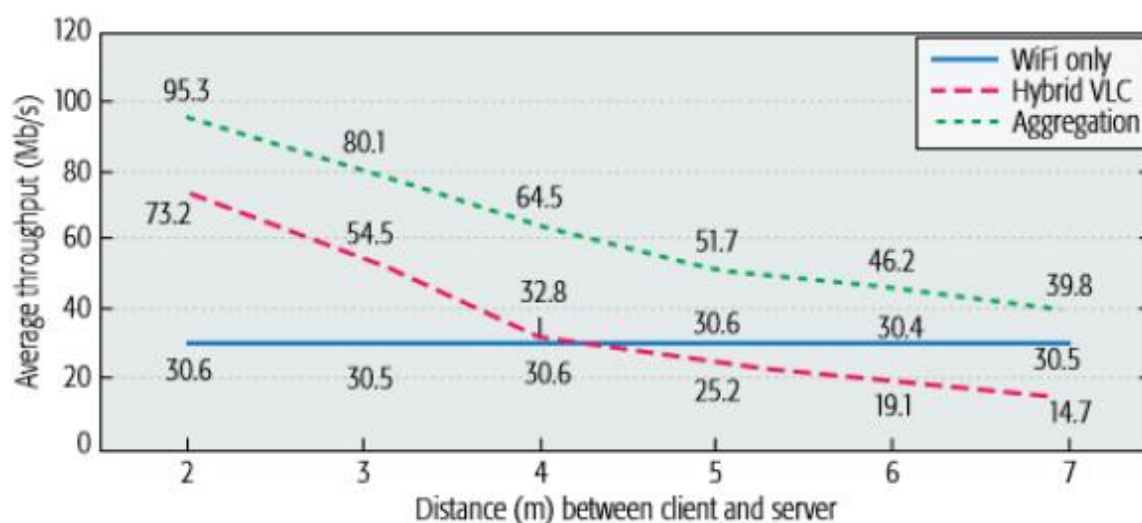
Στο υβριδικό σύστημα η ομοιοκατευθυνόμενη σύνδεση Li-Fi αξιοποιείται για να συμπληρώσει τη συμβατική κάτω ζεύξη του Wi-Fi, ενώ στο αθροιζόμενο σύστημα, οι αμφίδρομες συνδέσεις Wi-Fi και Li-Fi χρησιμοποιούνται πλήρως για να βελτιώσουν την επιτεύξιμη ρυθμοαπόδοση και για να παρέχουν γερή συνδεσιμότητα δικτύων.

Στην εικόνα 5.5 παρουσιάζεται η μέση ρυθμοαπόδοση των τριών συστημάτων σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των διεπαφών Wi-Fi και Li-Fi. Σε αυτή την οργάνωση οι διεπαφές του Li-Fi ευθυγραμμίζονται αυστηρά. Το υβριδικό σύστημα διπλασιάζει την ρυθμοαπόδοση κοντά στο AP Li-Fi αλλά μειώνεται γρήγορα όσο η απόσταση αυξάνεται. Η ρυθμοαπόδοση του Wi-Fi ξεπερνά αυτή του υβριδικού συστήματος όταν αυξάνεται η απόσταση σε περίπου 4,1 μ, επειδή όσο αυξάνεται η απόσταση η ικανότητα της κάτω ζεύξης του Li-Fi μειώνεται, έτσι που γίνεται ασήμαντη. Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε ότι



τα αποτελέσματα της ρυθμοαπόδοσης του υβριδικού συστήματος VLC εξαρτώνται μόνο από την ικανότητα της κάτω ζεύξης του Li-Fi.

Το αθροιζόμενο σύστημα τριπλασιάζει την επιτεύξιμη μέση ρυθμοαπόδοση με χαμηλότερη δέσμευση και είναι υψηλότερη από την μέση ρυθμοαπόδοση του συστήματος με μόνο Wi-Fi. Επομένως, η τεχνική συνάθροισης όχι μόνο ενισχύει το διαθέσιμο ενσωματωμένο εύρος ζώνης, αλλά παρέχει και την αξιόπιστη επικοινωνία δικτύων. Η Li-Fi προσφέρει πολύ καλύτερη απόδοση κοντά στο AP Li-Fi για τους μεμονωμένους χρήστες. Επίσης οι χρήστες Li-Fi και Wi-Fi μπορούν να εξυπηρετηθούν παράλληλα μέσα και έξω σε αυτή την περιορισμένη περιοχή κάλυψης.



Εικόνα 5.5: Ρυθμοαπόδοση vs απόσταση.

## 5.5 Ευφυή συστήματα μεταφοράς (ITS)

Το VLC εξετάζεται ευνοϊκά στα ITS όπου τα LEDs χρησιμοποιούνται στους δρόμους. Η τεχνολογία αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στα φώτα τροχαίας, για να υλοποιήσει εφαρμογές όπως όχημα με όχημα (V2V) και επικοινωνίες όχημα με επικοινωνίες υποδομής (V2I) και να στέλνονται πληροφορίες σχετικές με την τοποθεσία ή την ασφάλεια οδήγησης.

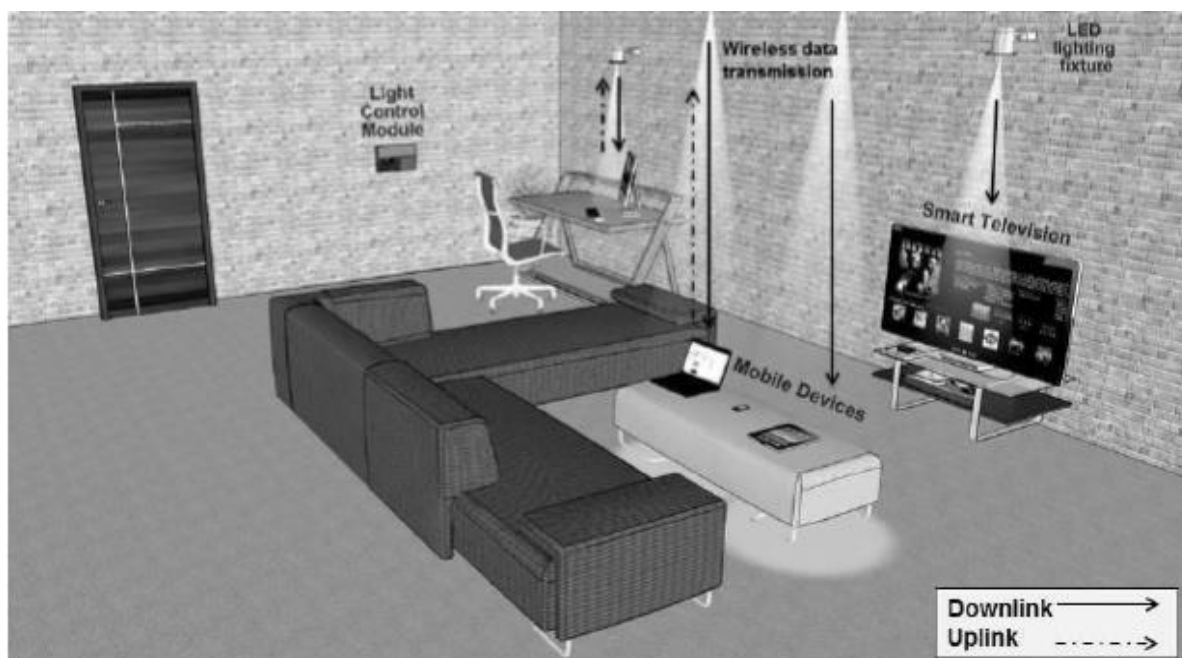
Οι αρχικές μελέτες έγιναν στην Ιαπωνία, μια χώρα η οποία κατέχει την πρωτιά στην υιοθέτηση νέων μεθόδων για τις ασύρματες επικοινωνίες. Ο κύριος λόγος που η V2V τεχνολογία δεν έχει υιοθετηθεί ακόμη είναι ότι υπάρχει πολύ χαμηλό κίνητρο για τους πρώτους χρήστες η οποίοι θα αγοράσουν ένα νέο όχημα με την τεχνολογία αυτή.

Η δυσκολία στις τεχνολογίες ITS είναι ότι ο δέκτης πρέπει να είναι σε θέση να ανιχνεύσει τον πομπό ενώ βρίσκεται σε κίνηση. Επιπλέον, οι αυξανόμενες αποστάσεις μεταξύ πομπού

και δέκτη και ο έντονος περιβαλλοντικός θόρυβος παίζουν καθοριστικό ρόλο στην μη υιοθέτηση της τεχνολογίας ITS.

Οι προτεινόμενες εφαρμογές για τα ITS είναι οι κάμερες υψηλής ταχύτητας για την υποδοχή, καθώς και οι αισθητήρες εικόνας. Οι κάμερες προτιμώνται δεδομένου ότι διευκολύνουν την ανίχνευση. Οι πληροφορίες παρουσιάζονται ως pixels στον πίνακα των LED στη συσκευή αποστολής σημάτων. Σε αυτά τα συστήματα, το εύρος ζώνης συστημάτων περιορίζεται από το ποσοστό πλαισίων (high speed frame rate) καμερών υψηλής ταχύτητας. Τα ποσοστά πλαισίων πρέπει να είναι τουλάχιστον δύο φορές της συχνότητας διαμόρφωσης του LED, και τα χαρακτηριστικά ποσοστά πλαισίων να είναι γύρω στα 1000 fps (frames per second), το οποίο περιορίζει τη συχνότητα διαμόρφωσης σε ~500 Hz.

Η εφαρμογή μπορεί να μην είναι εφικτή αυτήν την περίοδο για τον λόγο ότι οι υψηλής ταχύτητας κάμερες είναι ακριβές και η σύνθετη επεξεργασία εικόνας μπορεί να απαιτηθεί για την ανίχνευση και την αποδιαμόρφωση συσκευών αποστολής σημάτων. Με την ενσωμάτωση VLC στο σύστημα κυκλοφορίας πολλές χρήσιμες εφαρμογές μπορούν να επιτευχθούν όπως η προειδοποίηση και η αποφυγή σύγκρουσης, η αλλαγή παρόδων και βοήθεια/προειδοποίηση για τυχόν ατυχήματα. Ενδεικτικό παράδειγμα της συγκεκριμένης εφαρμογής φαίνεται στην εικόνα 5.6.

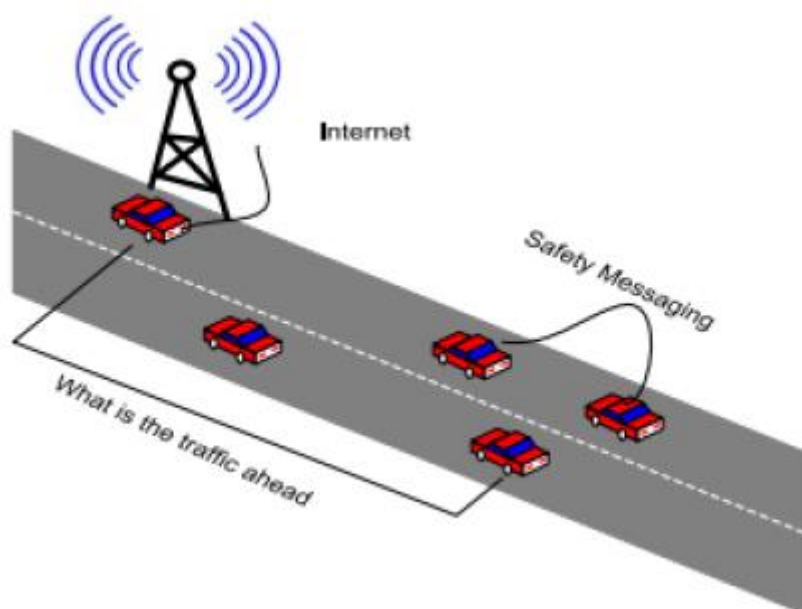


Εικόνα 5.6: Εσωτερικός φωτισμός ενσωματωμένος με VLC για έξυπνο οικιακό φωτισμό επόμενης γενιάς.

## 5.6 Vehicle to Vehicle (V2V)

Το VLC μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην τροχαία επικοινωνία με την χρησιμοποίηση των φαναριών των αυτοκινήτων και της ήδη υπάρχουσας υποδομής των φαναριών τροχαίας. Οι υψηλής προτεραιότητας εφαρμογές υποδεικνύονται από την Vehicle Safety Communications Project και περιλαμβάνουν μπροστινή προειδοποίηση σύγκρουσης, αισθητήρες σύγκρουσης, επείγοντα ηλεκτρονικά φώτα φρένων, προειδοποίηση εναλλαγής λωρίδας, ενδείξεις ταμπελών κλπ. Όλες αυτές οι προτεραιότητες απαιτούν αξιόπιστη προσβασιμότητα και χαμηλή καθυστέρηση στην επικοινωνία των αυτοκινήτων.

Μια υψηλή σε ταχύτητα ορατού φωτός επικοινωνία όπως το Li-Fi, μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτού του είδους εφαρμογές. Προτάθηκε ένα εξωτερικό VLC σύστημα που χρησιμοποιεί το Controller Area Network (CAN) όπου τα μπροστινά και τα πίσω φανάρια χρησιμοποιήθηκαν για την επικοινωνία του συστήματος όπως φαίνεται στην εικόνα 5.7.



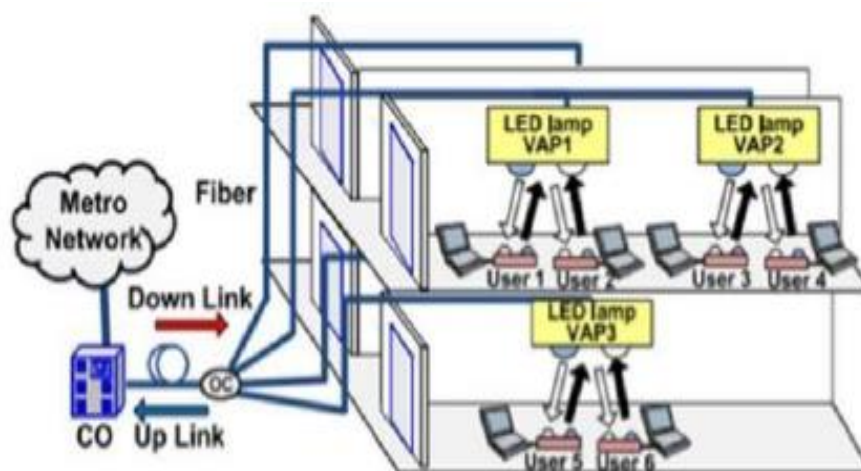
Εικόνα 5.7: Σύστημα VLC για επικοινωνία V2V.

## 5.7 Τοπικά ασύρματα δίκτυα (WLAN)

Για την δημιουργία LANs μπορούν να χρησιμοποιηθούν LEDs βασισμένα στην επικοινωνία ορατού φωτός. Η χρήση επικοινωνίας ορατού φωτός με LEDs παρέχει μια υπερβολικά υψηλή ταχύτητα πλήρως αμφίδρομης επικοινωνίας, τοπικού LAN βασισμένη στην τοπολογία αστερών και παρέχει μια ταχύτητα περισσότερη των 10 Gbs και εξετάζεται για τους ογκώδεις χρήστες.

Το σχηματικό διάγραμμα του τοπικού LAN υψηλής ταχύτητας παρουσιάζεται στην εικόνα 5.8. Ο λόγος για το σχέδιο του δικτύου που χρησιμοποιεί μια τοπολογία αστερών είναι να

παραχθεί η υποστήριξη για τους ογκώδεις χρήστες. Χρησιμοποιείται οπτική ίνα σε κάθε λαμπτήρα άμεσα όπως φαίνεται στην εικόνα 5.8. Το υβριδικό πρωτόκολλο πρόσβασης χρησιμοποιείται στο προτεινόμενο τοπικό LAN όπως η χρονική πολυπλεξία TDM για την αμφίδρομη μετάδοση και πολυπλεξία συχνότητας FDM για την άνω και κάτω ζεύξη αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα του προτεινόμενου τοπικού LAN αποκάλυψαν την πιθανή ισχύ προσφέροντας πρόσβαση υψηλής ταχύτητας στους ογκώδεις χρήστες. Το σύστημα φωτισμού χρησιμοποιήθηκε για την κάτω ζεύξη και το υπέρυθρο φως χρησιμοποιήθηκε για την άνω ζεύξη. Το ασύρματο τοπικό LAN VLC έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιείται μέσα σε κτήρια εταιριών και νοσοκομείων, τα οποία απαιτούν υψηλό επίπεδο ασφάλειας.



Εικόνα 5.8: Σχηματικό Διάγραμμα Δικτύου VLC.

## 5.8 Άλλες εφαρμογές

### Εσωτερικός φωτισμός

Όπως και οι ιδρυτές του GPS (Global Positioning Systems) δεν μπορούσαν να υπολογίσουν ποτέ την τεράστια εμβέλεια των εφαρμογών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, το σενάριο μπορεί να ισχύει και για το Visible Light Positioning (VLP). Η ακριβής εσωτερική τοποθέτηση είναι μια ζήτηση σε αρκετά καταστήματα όπου έχουν εφαρμόσει τον LED φωτισμό όπως το λιανικό εμπόριο και οι αγορές επιχειρήσεων.

Οι έμποροι λιανικής πώλησης, τα εμπορικά κέντρα και οι υπεραγορές ενδιαφέρονται για να υιοθετήσουν αυτή την τεχνολογία γιατί έχει τη δυνατότητα να αυξήσει κατά πολύ τα έσοδα όλων των εμπλεκόμενων στο κατάστημα αλυσίδας εφοδιασμού προϊόντων. Σε διάφορα εσωτερικά περιβάλλοντα, δεν υπάρχουν σήματα GPS και το ραδιόφωνο αποτυγχάνει λόγω της πλούσιας πολλαπλής διάδοσης, ενώ ο τεχνητός φωτισμός είναι πανταχού παρόν.

Με τα WLEDs να φωτίζονται σε εσωτερικούς χώρους, η υποδομή, μαζί με το VLC μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εντοπισμό. Η υπηρεσία τοποθεσίας είναι παρόμοια με τις

προτεινόμενες εφαρμογές VLC σε θέατρα, όπου μπορεί να υπάρχουν δεδομένα VLC για να βοηθήσουν τους συμμετέχοντες στο κάθισμα τους.

### Έξυπνος φωτισμός

Αυτά τα συστήματα συνεργάζονται και ελέγχουν το φωτισμό σε ένα διάστημα για να εξυπηρετήσουν ανάγκες των χρηστών, καθώς εξοικονομούν ενέργεια. Τα ευφυή συστήματα φωτισμού διαμορφώνουν αποτελεσματικά ένα Wireless Sensor Network (WSN), για να ελέγξει τους παράγοντες όπως την ελαφριά ένταση, τον χρωματισμό και ελέγχου φωτισμού κατά την εξασθένιση.

Τα LEDs έχουν υψηλότερη ευελιξία για τις ευφυείς λύσεις φωτισμού, λόγω της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, του ελέγχου χρώματος από τα Multi-chip LEDs, της εξασθένισης και των VLC. Διάφορα συστήματα έχουν προταθεί για το συνδυασμό VLC και του ευφυούς φωτισμού. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν το να ανάψουν τα φώτα σε μια ορισμένη περιοχή μόνο όταν απαιτείται, το χαμηλό φως για τους κινηματογράφους κλπ.

### Νοσοκομεία

Στα νοσοκομεία, οι ευαίσθητες περιοχές που έχουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα (όπως τα σαρωτές MRI) είναι πολύ πιθανό να ανταλλάχουν με τα VLC επειδή δεν θα επηρεάζουν τα μηχανήματα που χρησιμοποιούν ραδιοκύματα. Επίσης με την χρήση των VLC οι γιατροί και οι νοσηλευτές θα μπορούν να κρατούν πληροφορίες σχετικά με τους ασθενείς ή τους γιατρούς λόγω του ότι το φως δεν μπορεί να φύγει από τους τοίχους και δεν θα μπορούν να κλαπούν ευαίσθητες πληροφορίες. Ακόμα μπορεί να γίνει εφαρμογή και για τους ασθενείς, έτσι ώστε να μην επηρεάζονται από τα ραδιοκύματα.

Το περιβάλλον των νοσοκομείων παρέχει τον ιδανικό χώρο για την ανάπτυξη του συστήματος VLC. Έχει άπλετο φως σε όλους τους χώρους και σε κοντινές σχετικά αποστάσεις. Η αντικατάσταση των συστημάτων φωτισμού με συστήματα Li-Fi θα δώσει στα νοσοκομεία μια σημαντική εξοικονόμηση πόρων, ασφάλεια ευαίσθητων προσωπικών δεδομένων ασθενών και ιατρών καθώς και εξάλειψη των παρεμβολών που υπάρχουν με τα συστήματα ραδιοσυχνότητας.

### Αεροπλάνα

Τα πολιτικά αεροσκάφη επίσης, παρέχουν ένα υποσχόμενο τομέα ανάπτυξης για εφαρμογές VLC. Όπως όλοι γνωρίζουμε η χρήση κινητού τηλεφώνου στις πτήσεις των αεροσκαφών απαγορεύονται λόγω των παρεμβολών που προκαλούν τα ραδιοκύματα στα ηλεκτρονικά συστήματα του αεροπλάνου. Όμως αν σκεφτούμε το περιβάλλον των

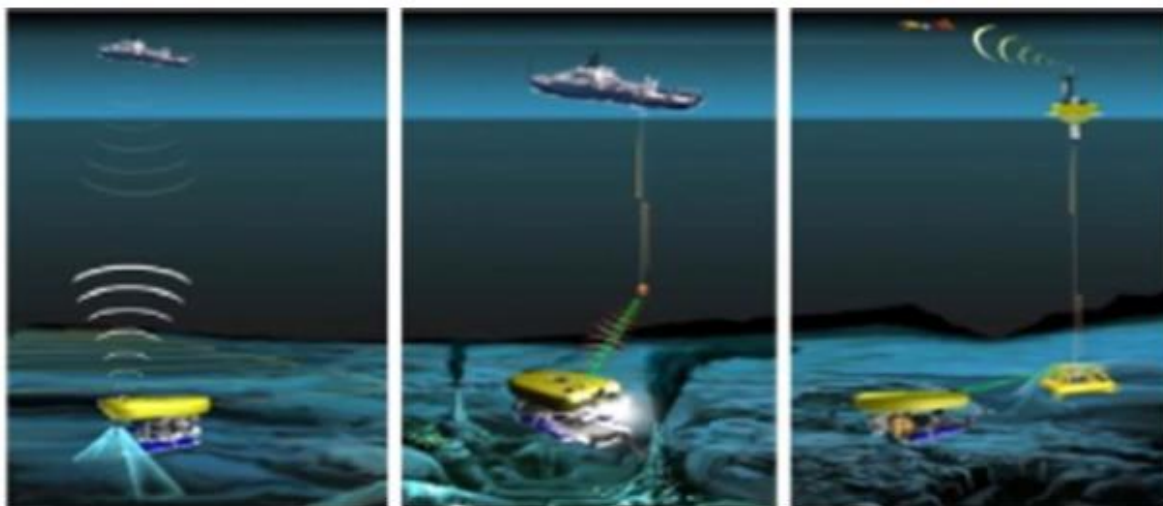
αεροσκαφών και τις δυνατότητες των συστημάτων VLC μπορούμε εύκολα να καταλάβουμε ότι η χρήση διαδικτύου στις πτήσεις δεν είναι κάτι ουτοπικό.

Κάθε επιβάτης διαθέτει πάνω από το κάθισμά του ατομικό φως το οποίο μπορεί να χρησιμοποιήσει κατά επιλογή. Αν αντικατασταθεί το συγκεκριμένο φως με ένα σύστημα Li-Fi τότε ο κάθε επιβάτης θα μπορεί μέσω του κινητού τηλεφώνου του να έχει σύνδεση στο διαδίκτυο. Το παράδειγμα των αεροσκαφών δεν περιλαμβάνει καθόλου ζητήματα μεταπομπών και κινητικότητας αφού οι χρήστες είναι στάσιμοι.

### Υποβρύχιες εφαρμογές

Το πρόβλημα που εξετάζεται είναι η βαθιά υποβρύχια επικοινωνία. Οι παραδοσιακές μέθοδοι όπως οι ραδιοσυχνότητες περιορίζουν τη μετάδοση στοιχείων υποβρύχια από την άποψη της χαμηλής ταχύτητας και των αδύνατων σημάτων. Εάν η υποβρύχια επικοινωνία εφαρμόζεται στους δύτες μεγάλων θαλασσίων βαθών γίνεται ακόμη πιο περιορισμένη. Η υπάρχουσα τεχνολογία που επιτρέπει την ακουστική επικοινωνία υποβρύχια για τους δύτες μεγάλων θαλασσίων βαθών περιορίζεται ακόμα. Αυτό είναι λόγω του λαρυγγικού ήχου που βγαίνει από τις συσκευές ή τη δυσχέρεια της χρησιμοποίησης των συσκευών.

Ο στόχος της έρευνας είναι να εξεταστούν οι διάφορες μέθοδοι υποβρύχιας χρησιμοποίησης οπτικής ελαφριάς μεθόδου επικοινωνίας και ανίχνευσης και διορθώσεων λάθους. Τα ραδιοκύματα δεν ταξιδεύουν καλά στη θάλασσα λόγω αγωγιμότητας του νερού. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα συστήματα VLC στις υποβρύχιες επικοινωνίες. Η Un Tethered Remotely Operated Vehicle (UTROV) είναι μια άλλη εφαρμογή των VLC στις υποβρύχιες επικοινωνίες όπως φαίνεται στην εικόνα 5.9. Οι διάφορες λειτουργίες του UTROV περιλαμβάνουν παρατηρητήριο συντήρησης των ωκεανών και ευκαιρία ανάπτυξης των πλοίων.



Εικόνα 5.9: Λειτουργία του UTROV.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μελλοντικά η τεχνολογία VLC θα κατέχει σημαντική θέση στο τομέα των τηλεπικοινωνιών.

Αρχικά, ωστόσο, η τεχνολογία VLC εμφανίζει συγκεκριμένες αδυναμίες όπως κάθε τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Η σημαντικότερη από τις αδυναμίες βρίσκεται στην ανάπτυξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας σε εξωτερικούς χώρους. Η επιτυχημένη εφαρμογή σε εξωτερικούς χώρους καθορίζεται από εξωγενείς παράγοντες που πολλές φορές δεν μπορούμε να περιορίσουμε όπως είναι οι συνθήκες της ατμόσφαιρας, η ορατότητα. Αδυναμία επίσης της τεχνολογίας αποτελεί το πρόβλημα του uploading. Κυρίως η τεχνολογία VLC χρησιμοποιείται για download λόγω της πολύ μεγάλης ταχύτητας που μπορεί να δεχθεί.

Από την άλλη πλευρά τα πλεονεκτήματα είναι σημαντικά και αναφέρονται σε πολλά σημεία της συγκεκριμένης εργασίας. Οι υπάρχουσες μελέτες έχουν δείξει ότι η τεχνολογία VLC μπορεί να παρέχει υψηλούς ρυθμούς δεδομένων για τις εσωτερικές εφαρμογές. Επιπλέον, η τεχνολογία VLC είναι μια μέθοδος η οποία υπόσχεται πολλά στην αυξανόμενη ανάγκη για ασύρματη επικοινωνία και ρυθμούς μετάδοσης. Η τεχνολογία Li-Fi η οποία στηρίζεται στην VLC είναι 250 φορές γρηγορότερη από αυτή του Wi-Fi η οποία χρησιμοποιεί τις ραδιοσυχνότητες για την επικοινωνία.

Η τεχνολογία της επικοινωνίας μέσω του ορατού φωτός-VLC είναι ένας τομέας καινοτομίας και έρευνας. Ο πολύ μικρός χρόνος εμφάνισης της συγκεκριμένης τεχνολογίας δεν την έχει αφήσει να ερευνηθεί και να αναπτυχθεί σε ικανοποιητικό βαθμό. Λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων τους τα συστήματα VLC, με την τεχνολογία τους, θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στις ασύρματες επικοινωνίες τα επόμενα χρόνια.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] S. Hranilovic, *Wireless Optical Communication Systems*, Berlin, 2005.
- [2] C.G. Lee, *Visible Light Communication, Advanced Trends in Wireless Communications*, 2011.
- [3] D. O'brien, *Visible light communications: Challenges and potential*, IEEE Photonics Conference (IPC), 2011.
- [4] K. Sindhubala & B. Vijayalakshmi, *Design and implementation of visible light communication system in indoor environment*, 2006.
- [5] H. Yang, *Visible light communication systems supporting wireless data access and indoor positioning applications*, Nanyang Technological University, Singapore, 2020.
- [6] T. Komine & M. Nakagama, *Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights*, IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004.
- [7] F. R. Gfeller & U. Bapst, *Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation*, Proceedings of the IEEE, 1979.
- [8] K. Lee, H. Park, & J. R. Barry, *Indoor channel characteristics for visible light communications*, IEEE Commun. Lett., 2011.
- [9] E. F. Schubert, T. Gessmann και J. K. Kim, *Light Emmiting Diodes*, Wiley Online Library, 2005.
- [10] A. Mostafa and L. Lampe, *Physical-layer security for visible light communication channels*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015.
- [11] A. Suban, P. Prabu, R. Manikandan & M. Pradeep, *Performance enhancement of data communication through visible light communication using on off keying*, 2013.
- [12] E. Telatar, *Capacity of multi-antenna Gaussian channels*, European Transactions on Telecommunications, 1999.
- [13] S. Gour, S. Murarka & S. Kumar, *Review on reduction of optical background noise in light emitting diode (LED) optical wireless communication systems*, J. Emerg. Technol. Adv. Eng. 4, 2014.
- [14] K. Lacanette, *A Basic Introduction to Filters, Active-Passive, and Switched-Capacitor*, National Semiconductor Application, 2010.
- [15] N. Fernando, Y. Hong & E. Viterbo, *Flip-OFDM for Optical Wireless Communications*, Information Theory Workshop (ITW), 2011.
- [16] I. Hen, *MIMO architecture for wireless communication*, Intel Technology Journal, 2006.



- [17] A. Sarkar, S. Agarwal & A. Nath, Li-Fi technology: data transmission through visible light, *Computer. Sci. Manag.*, 2013.
- [18] Z. Chen & H. Haas, Physical layer security for optical attocell networks, *IEEE Int. Conf. on Communications (ICC)*, 2017.
- [19] X. Wu, M. Safari, & H. Haas, Access point selection for hybrid Li- Fi and Wi-Fi networks, *IEEE Trans. Commun.*, 2017.
- [20] N. Kumar, N. Lourenco, D. Terra, L. Alves & R. L. Aguiar, Visible light communications in intelligent transportation systems, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2012.
- [21] S. Okada, T. Yendo, T. Yamazato, T. Fujii, M. Tanimoto & Y. Kimura, On-vehicle receiver for distant visible light road-to-vehicle communication, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2009.
- [22] M. Akanegawa, Y. Tanaka & M. Nakagawa, Basic study on traffic information system using led traffic lights, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2001.
- [23] S. Bhardwaj, T. Ozcelebi & J. Lukkien, Smart lighting using led luminaries, *8th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops)*, 2010.