

ΕΣΠΑ 2007-2013, Ε.Π. «ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ»  
ΔΡΑΣΗ «ΑΡΙΣΤΕΙΑ II»

«Σύμφωνα Ασύρματα Οπτικά Συστήματα ως  
Δομικά Στοιχεία για την Υλοποίηση Δικτύων  
Οικίας και Επαγγελματικών Χώρων Επόμενης  
Γενιάς, (COWS)»

Κωδικός Έργου : 3525

**COWS**

Παραδοτέο:	Π2.2
Τίτλος:	Σχεδιασμός Οπτικών Ασύρματων Συστημάτων Σύμφωνης Φώρασης
Ημερομηνία:	30/04/2015
Επιμέρους Δράση:	ΠΕ2
Υπεύθυνος Σύνταξης:	Θωμάς Καμαλάκης
Ομάδα Εργασίας:	Θωμάς Καμαλάκης, Δαλάκας Βασίλειος, Παναγιώτης Κανάκης, Κατερίνα Μαργαρίτη, Αντώνης Μπόγρης
Είδος:	Τεχνική Αναφορά



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# 1. Περιεχόμενα

1. Περιεχόμενα.....	2
2. Σκοπός του παραδοτέου.....	3
3. Απαιτήσεις χρήστη.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4. Υπάρχουσα κατάσταση οικιακών δικτύων (state-of-the-art).....	9
4.1 Ethernet.....	10
4.2 PowerLine Communications (PLC).....	11
4.3 Wifi ή IEEE 802.11.....	13
4.4 Ultra Wide Band.....	14
4.5 Radio 60GHz.....	15
4.6 Οπτικές Τεχνολογίες.....	16
4.6.1 Οπτική Ίνα στο σπίτι.....	16
4.6.2 Οπτικά Ασύρματα Συστήματα.....	16
4.6.3 Προοπτική ενός Οπτικού Οικιακού Δικτύου.....	21
4.7 Σύμφωνη Φώραση στις Οπτικές Επικοινωνίες.....	23
5. Πρότυπα Ασφαλείας.....	25
6. Σχεδιασμός του πομποδέκτη.....	28
6.1 Κάλυψη του συστήματος.....	28
6.2 Οπτικά στοιχεία του πομπού.....	30
6.3 Εκπομπή από οπτική ίνα.....	33
6.4 Οπτικά στοιχεία του δέκτη.....	36
6.5 Σύζευξη του φωτός στην οπτική ίνα του δέκτη.....	38
6.6 Υπολογισμός του θορύβου περιβάλλοντος.....	42
6.7 Υπολογισμός του συνολικού SNR για τον ομόδυνο δέκτη.....	45
6.8 Υπολογισμός του τελικού εύρους της δέσμης.....	46
6.9 Διαδικασία Σχεδιασμού.....	47
6.10 Παράμετροι του Συστήματος.....	50
7. Αναφορές.....	53

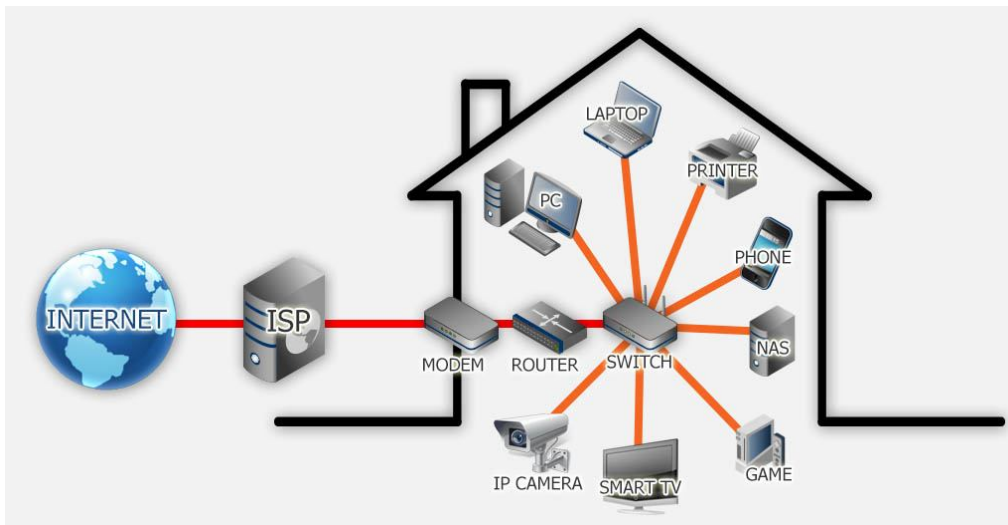
## **2. Σκοπός του παραδοτέου**

Το εν λόγω παραδοτέο πρόκειται να περιγράψει τις διαφορετικές εναλλακτικές τεχνολογίες και ιδιαίτερα τις οπτικές που πρόκειται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των μελλοντικών οικιακών δικτύων, δίνοντας παράλληλα έμφαση στις υπηρεσίες που θα παρέχονται. Σε αυτό το πλαίσιο διερευνάται η περίπτωση της σύμφωνης φώρασης στα οπτικά ασύρματα συστήματα, αναλύονται οι προδιαγραφές και περιορισμοί ασφαλείας οφθαλμού και του δέρματος και εν τέλει παρουσιάζεται ο προτεινόμενος σχεδιασμός του οπτικού συστήματος, που θα χρησιμοποιηθεί στο σύστημα COWS στο πλαίσιο του παρόντος έργου.

### 3. Απαιτήσεις για τα τοπικά δίκτυα νέας γενιάς

Τα τελευταία χρόνια έχει εμφανιστεί μια επιτακτική ανάγκη για την υποστήριξη ευρυζωνικών υπηρεσιών τόσο στον οικιακό όσο και στον εργασιακό χώρο. Προς αυτήν την κατεύθυνση, έχει σημειωθεί μεγάλη πρόοδος σε τεχνολογίες που προσφέρουν ένα υψηλό εύρος ζώνης. Αυτό έχει προκαλέσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην εξέλιξη των δικτύων μέσα στο σπίτι και πολλά πρότυπα έχουν αναπτυχθεί για τη διασύνδεση των αντίστοιχων συσκευών.

Η οικιακή δικτύωση αποτελεί ουσιαστικά τη σύνδεση εκείνων των δικτυακών στοιχείων που επεξεργάζονται, διαχειρίζονται, μεταφέρουν και αποθηκεύουν πληροφορίες με στόχο την διασύνδεση και επικοινωνία των διαφόρων ηλεκτρονικών οικιακών συσκευών είτε μέσα στο σπίτι είτε στο χώρο εργασίας. Στην Εικόνα 1, που ακολουθεί, παρουσιάζεται ένα τυπικό οικιακό δίκτυο, όπου ποικίλες συσκευές συνδέονται μέσω ενός κεντρικού δρομολογητή.



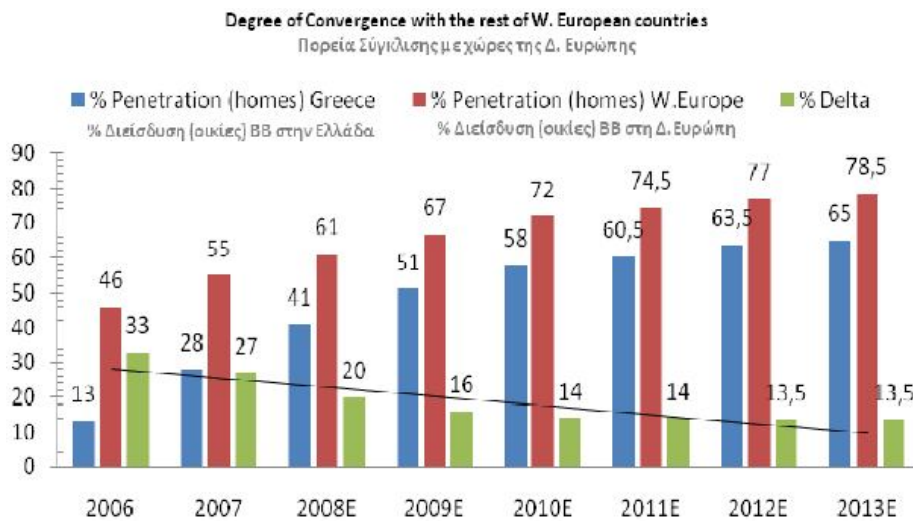
Εικόνα 1: Οικιακό Δίκτυο

Όσον αφορά την κατάσταση στην Ελλάδα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2, με την πάροδο των χρόνων η χρήση των οικιακών ευρυζωνικών υπηρεσιών έχει σημειώσει σημαντική άνοδο. Παράλληλα, τα τελευταία χρόνια ο ρυθμός εισχώρησης της ευρυζωνικότητας στην καθημερινή ζωή του Έλληνα καταναλωτή έχει αυξηθεί σημαντικά σε σχέση με τα πρώτα χρόνια υιοθέτησής τους.



Εικόνα 2: Διείσδυση και Πλήθος Ευρυζωνικών συνδέσεων στην Ελλάδα (Πηγή: Παρατηρητήριο Κοινωνία της Πληροφορίας)

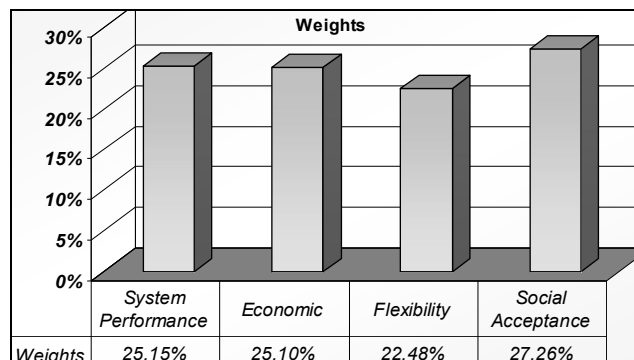
Συγκριτικά με τις υπόλοιπες χώρες της Δυτικής Ευρώπης, αξίζει να σημειωθεί ότι μειώνεται σημαντικά η διαφορά του βαθμού διείσδυσης της ευρυζωνικότητας στην Ελλάδα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Ευρυζωνική Σύγκλιση της Ελλάδας με τη Δυτική Ευρώπη (Πηγή: Υπουργείο Μεταφορών και Επικοινωνιών)

Δεδομένης της ολοένα και αυξανόμενης ανάγκης για παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών και υποστήριξη της δικτύωσης των ηλεκτρονικών υπολογιστών στο σπίτι, εκτός από την μεταφορά απλών δεδομένων, θα πρέπει να παρέχεται η δυνατότητα μεταφοράς μουσικής, εικόνας και βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD - High Definition). Τα σύγχρονα σπίτια έχουν εξοπλισθεί με ψηφιακές συσκευές ψυχαγωγίας όπως ψηφιακές βιντεοκάμερες, συσκευές παραγωγής MP3, DVD players κ.α. Το οικιακό δίκτυο θα πρέπει να υποστηρίζει πέντε ειδών υπηρεσίες: δεδομένων, τηλεφωνίας, ήχου, βίντεο και τηλεμετρία. Το οικιακό δίκτυο που θα εγκατασταθεί πρέπει, παράλληλα, να υποστηρίζει την αποτελεσματική επικοινωνία και μεταφορά δεδομένων όλων αυτών των κατηγοριών μεταξύ όλων των συσκευών και των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Επιπλέον, το οικιακό δίκτυο πρέπει να παρέχει την δυνατότητα να μοιράζεται το Internet υψηλών ταχυτήτων σε όλους τους δικτυωμένους υπολογιστές καθώς και να παρέχεται η δυνατότητα αποθήκευσης και δημιουργίας αντιγράφων ασφαλείας σε δίσκους που θα είναι διαθέσιμοι σε όλους τους δικτυωμένους υπολογιστές μέσα στο σπίτι.

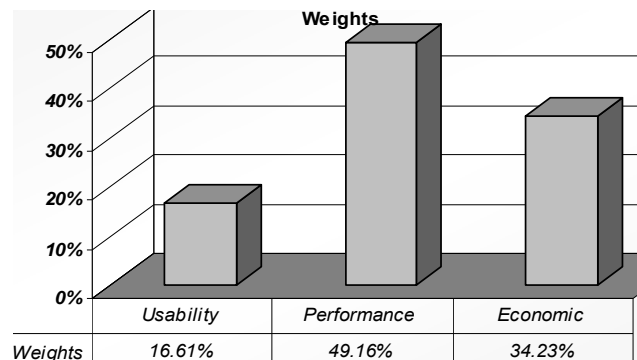
Η αξιολόγηση των κριτηρίων και των επιμέρους παραγόντων που ενδέχεται να επηρεάσουν την ανάπτυξη του μελλοντικού οικιακού δικτύου, όσον αφορά την υιοθέτησή του από τον τελικό καταναλωτή έχει πραγματοποιηθεί στην [1]. Τα αποτελέσματα που αφορούν τα ειδικά βάρη των κριτηρίων, παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί. Με ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρατηρείται ότι σύμφωνα με τη γνώμη των ειδικών, όλα τα κριτήρια έχουν λίγο ή πολύ το ίδιο περίπου βάρος (~25%), γεγονός που υποδεικνύει ότι κατά μέσο όρο τα εν λόγω κριτήρια παρουσιάζουν τον ίδιο συντελεστή βαρύτητας στην ανάπτυξη των μελλοντικών οικιακών δικτύων. Η εικόνα δείχνει ότι τα οικιακά δίκτυα θα πρέπει να σχεδιαστούν, έτσι ώστε να εκπληρώσουν μια σειρά από διαφορετικά και ενδεχομένως αντιφατικά μεταξύ τους κριτήρια.



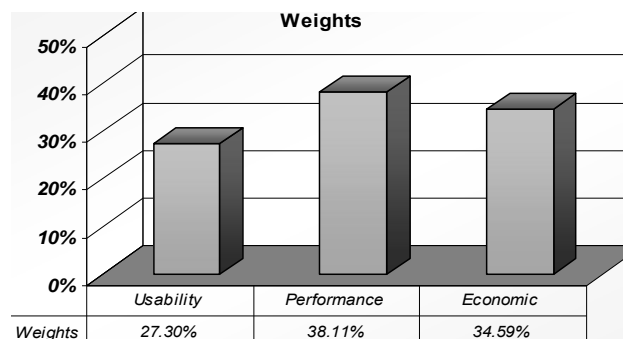
Εικόνα 4: Βάρη κριτηρίων που επηρεάζουν την ανάπτυξη του οικιακού δικτύου

Παράλληλα, οι εικόνες που ακολουθούν απεικονίζουν τα βάρη των κριτηρίων, που λαμβάνονται τόσο για την τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (high definition television - HDTV) όσο και για το VoIP. Οι ειδικοί

φαίνεται να πιστεύουν ότι η απόδοση είναι το πιο σημαντικό ζήτημα σε αμφότερες τις περιπτώσεις, ειδικά για την HDTV, όπου το αντίστοιχο βάρος είναι 49%. Αυτό δεν προκαλεί έκπληξη, δεδομένου ότι το κίνητρο πίσω από την υιοθέτηση της HDTV είναι η υψηλή της ευκρίνεια. Οι οικονομικές πτυχές ακολουθούν, καθώς οι πιθανοί αγοραστές θα ενδιαφερθούν πολύ για το κόστος των υπηρεσιών, ενώ τα ζητήματα ευχρηστίας φαίνεται να είναι δευτερεύοντα σε σχέση με τα υπόλοιπα κριτήρια, ιδιαίτερα στην HDTV.

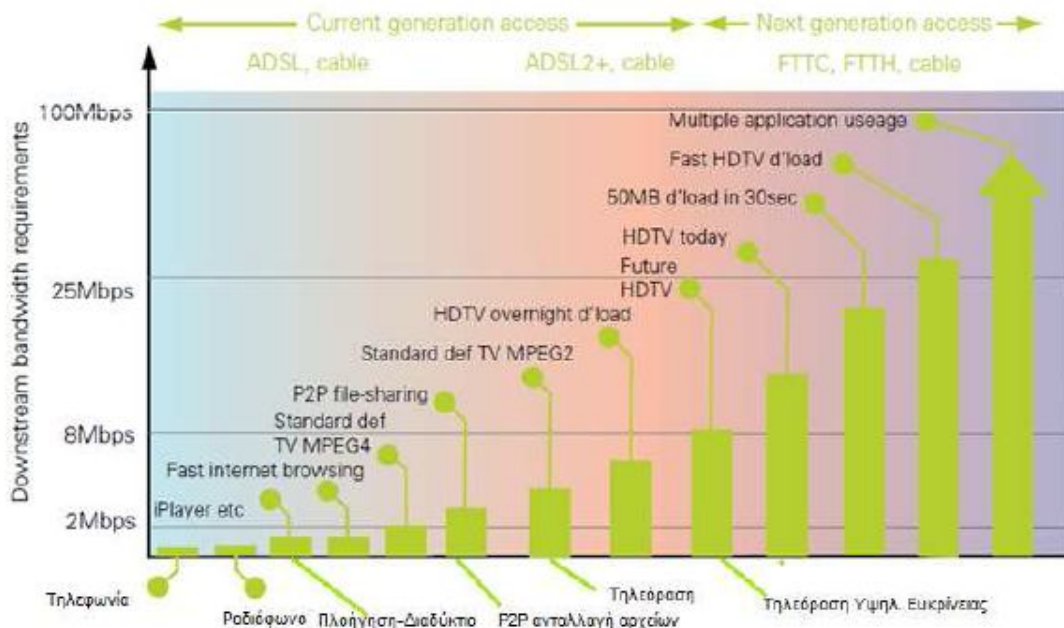


Εικόνα 5: Βάρη κριτηρίων στην περίπτωση του HDTV



Εικόνα 6: Βάρη κριτηρίων στην περίπτωση του VoIP

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7, η εισαγωγή νέων δικτυακών υπηρεσιών, όπως το τρισδιάστατο βίντεο κατά απαίτηση, (3D VoD - 3D Video on Demand), η HDTV, το βίντεο υψηλής ευκρίνειας, η τηλεπαρουσία (Telepresence), τα τρισδιάστατα παιχνίδια (3D Gaming), οι εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας (Virtual Reality) και ηλεκτρονικής Υγείας (e-Health) έχουν αυξήσει τις απαιτήσεις για όλο και μεγαλύτερο εύρος ζώνης καθώς και μεγαλύτερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Παράλληλα, η έλευση του 4K βίντεο, ανάλυσης δηλαδή 4000 pixels, δε θα μπορεί να υποστηριχτεί, εκτός και εάν ταχύτητες της τάξης των Gigabit είναι διαθέσιμες στο δίκτυο πρόσβασης. Η τάση αντικατάστασης της δικτυακής υποδομής οικιακής πρόσβασης, που βασίζεται στο χαλκό, από την πολλά υποσχόμενη τεχνολογία ίνα στο σπίτι (FTTH - Fiber-to-the-home), με ρυθμούς στο δίκτυο πρόσβασης δυνητικά  $\geq 1\text{Gb/s}$ , είναι έντονα εμφανής τα τελευταία χρόνια. Η κατανομή τέτοιων υψηλών ρυθμών δεδομένων στο οικιακό δίκτυο αποτελεί τεχνολογική πρόκληση. Δεδομένων των υψηλών επιδόσεων των οπτικών επικοινωνιακών συστημάτων στα δίκτυα μεγάλων αποστάσεων και στα δίκτυα μητροπολιτικής περιοχής, οι οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα οικιακά δίκτυα. Τα συστήματα οπτικής ίνας, είτε κλασικής είτε πλαστικής (POF – Plastic Optical Fiber), χαμηλού εύρους ζώνης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σπίτι ή στο γραφείο για να διασφαλίσουν την αποφυγή των συμφορήσεων στις οικιακές υπηρεσίες από σημείο σε σημείο (end-to-end). Παραδοσιακά, στην εγκατάσταση δικτύων, για παράδειγμα, σε εταιρικά ή ακαδημαϊκά περιβάλλοντα, παρουσιάζεται ανάγκη για δέκα φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα από εκείνη των σημείων πρόσβασης στο υπόλοιπο της τηλεπικοινωνιακής υποδομής. Δεδομένου ότι η τεχνολογία FTTH υπόσχεται συμμετρική πρόσβαση δεδομένων της τάξης τουλάχιστον των 100 Mbit/s ανά νοικοκυριό, τα συστήματα οικιακών δικτύων πρέπει να υποστηρίζουν μεταφορά δεδομένων της τάξης των gigabit/δευτερόλεπτο.



Εικόνα 7: Νέες Τηλεπικοινωνιακές Ανάγκες (Πηγή: Υπουργείο Μεταφορών και Επικοινωνιών)

Ωστόσο, ενώ οι ρυθμοί στο δίκτυο πρόσβασης ενδέχεται να αυξηθούν εξαιτίας του FTTH μέχρι και 1Gb/s ο διαμοιρασμός αυτής της πληροφορίας είναι πολύ δύσκολος μέσα στο σπίτι. Αποτελεί, λοιπόν, επιτακτική ανάγκη η διοχέτευση τέτοιων υψηλών ταχυτήτων από το δίκτυο πρόσβασης στο εσωτερικό οικιακό δίκτυο.

Πλήθος διαφορετικών προσεγγίσεων έχουν αναπτυχθεί, ενώ οι αυξανόμενες απαιτήσεις των καταναλωτών δημιουργούν καθημερινά καινούργια δεδομένα και προδιαγραφές. Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες οικιακής δικτύωσης παρέχοντας τις ακόλουθες τεχνολογίες διασύνδεσης:

- με εγκατάσταση νέας καλωδίωσης
- με χρήση της υπάρχουσας καλωδίωσης
- με ασύρματη δικτύωση

Όσον αφορά στην εγκατάσταση νέας καλωδίωσης, τέτοιου είδους τεχνολογίες είναι το Ethernet. Τη χρήση της υπάρχουσας καλωδίωσης, χρησιμοποιούν οι τεχνολογίες επικοινωνίας μέσω γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος (PowerLine). Σε αντίθεση με τις προηγούμενες κατηγορίες, ασύρματη δικτύωση απαιτούν οι τεχνολογίες ασύρματη αξιοπιστία (WiFi - wireless fidelity), τα δίκτυα εξαιρετικά ευρείας ζώνης (UWB - Ultra Wide Band) και οι ασύρματες επικοινωνίες με φέρον στα 60 GHz (60GHz-radio).

Είναι, λοιπόν, γεγονός ότι τα συστήματα οικιακής δικτύωσης πρόκειται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην επίτευξη παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών από άκρο σε άκρο (peer-to-peer), δίνοντας ώθηση στη διεξόδου του μελλοντικού διαδικτύου. Η ζήτηση για τα οικιακά δίκτυα με ταχύτητες της τάξης των gigabit οδηγείται από τις αναδυόμενες υπηρεσίες του μελλοντικού διαδικτύου στα δίκτυα πρόσβασης υψηλών ταχυτήτων και από τον ταχέως αυξανόμενο αριθμό των συσκευών που επικοινωνούν μέσα στο σπίτι. Τα τρέχοντα οικιακά δίκτυα υποφέρουν από το γεγονός ότι πολλές συσκευές περιορίζονται σε ρυθμούς μετάδοσης στην περίπτωση των ασύρματων συνδέσεων ή απαιτούν την εγκατάσταση επιπλέον καλωδίωσης για την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών. Έτσι για τα υφιστάμενα οικιακά δίκτυα εμφανίζεται ο κίνδυνος της συμφόρησης όταν τροφοδοτούνται με υψηλής ταχύτητας οπτικά δίκτυα πρόσβασης, τα οποία προσφέρουν 100 megabit ανά δευτερόλεπτο ή περισσότερο συμμετρική πρόσβαση. Το μελλοντικό Διαδίκτυο φαίνεται, λοιπόν, ότι θα προσφέρει εξαιρετικά υψηλό εύρος ζώνης στα δίκτυα κορμού και πρόσβασης. Τα οικιακά δίκτυα διαδραματίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση των πλεονεκτημάτων αυτού του υψηλού εύρους ζώνης παρέχοντας παράλληλα στους χρήστες κρίσιμη πρόσβαση στην υποδομή της τερματικής συσκευής μέσα στο σπίτι ή στο γραφείο. Η επέκταση της πρόσβασης στον οικιακό ή εργασιακό χώρο και σε μεμονωμένες συσκευές είναι ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί αποτελεσματικά το μελλοντικό οικιακό δίκτυο. Τα μελλοντικά οικιακά δίκτυα πρέπει να εμπλουτίσουν τις ζωές των χρηστών με νέα δεδομένα και πρωτόγνωρες εμπειρίες, όπως για παράδειγμα μέσω των διαδραστικών τρόπων ψυχαγωγίας. Επιπλέον, τα

οικιακά δίκτυα θα πρέπει επίσης να στηρίζουν τους πολίτες στη διατήρηση της ανεξαρτησίας τους, ακόμα και στις μεγαλύτερες ηλικίες, για παράδειγμα προσφέροντας απομακρυσμένη ιατρική υποστήριξη και επιτρέποντάς τους να επικοινωνούν με την οικογένειά τους για να μειώσουν οποιαδήποτε αίσθηση απομόνωσης που μπορεί να έχουν. Εν ολίγοις, οι χρήστες πρέπει να έχουν την ικανότητα να ελέγχουν το εικονικό, καθώς και το φυσικό τους περιβάλλον μέσω των οικιακών δικτύων. Είναι βεβαίως κατανοητό ότι οι χρήστες θα απαιτήσουν τέτοια δίκτυα να είναι εύκολα στην εγκατάσταση, χωρίς καλώδια, και αρκετά εύκολα στη χρήση, έτσι ώστε να αποτελέσουν μια επιπλέον βασική χρηστική ανάγκη, όπως το ηλεκτρικό ρεύμα και το νερό.

Δεδομένων των πολλών απαιτήσεων και λειτουργιών που πρέπει να υποστηρίζονται από τα οικιακά δίκτυα επόμενης γενιάς, το ενδιαφέρον πέραν από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες στρέφεται κυρίως στις οπτικές τεχνολογίες. Συγκεκριμένα, οι οπτικές ίνες και οι οπτικές ασύρματες τεχνολογίες προβλέπεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των μελλοντικών οικιακών δικτύων. Τέτοιου είδους τεχνολογίες είναι οι επικοινωνίες ορατού φωτός (VLC - Visible Light Communications), το IrDA (Infrared Data Association) που χρησιμοποιεί την υπέρυθρη ακτινοβολία για μετάδοση, καθώς και το υπέρυθρο (IR - Infrared). Στο εσωτερικό των καινούργιων κτιρίων, τα συστήματα που βασίζονται σε οπτική ίνα (είτε κλασική είτε πλαστική) ενδέχεται να παρέχουν την απόλυτη λύση όσον αφορά το εύρος ζώνης και την εμβέλεια. Ωστόσο, κάποιος πρέπει επίσης να λάβει υπόψη ότι οι οπτικές τεχνολογίες έρχονται αντιμέτωπες με ένα διαφορετικό σύνολο απαιτήσεων όταν αναπτύσσονται στο εσωτερικό των κτιρίων των ενδεχομένων πελατών. Για παράδειγμα, σε υφιστάμενα κτίρια, οι κάτοικοι θα είναι πρόθυμοι να αποφύγουν εγκαταστάσεις νέων καλωδίων, που συνοδεύονται από αυξημένο κόστος και πρόσθετες εργασίες.



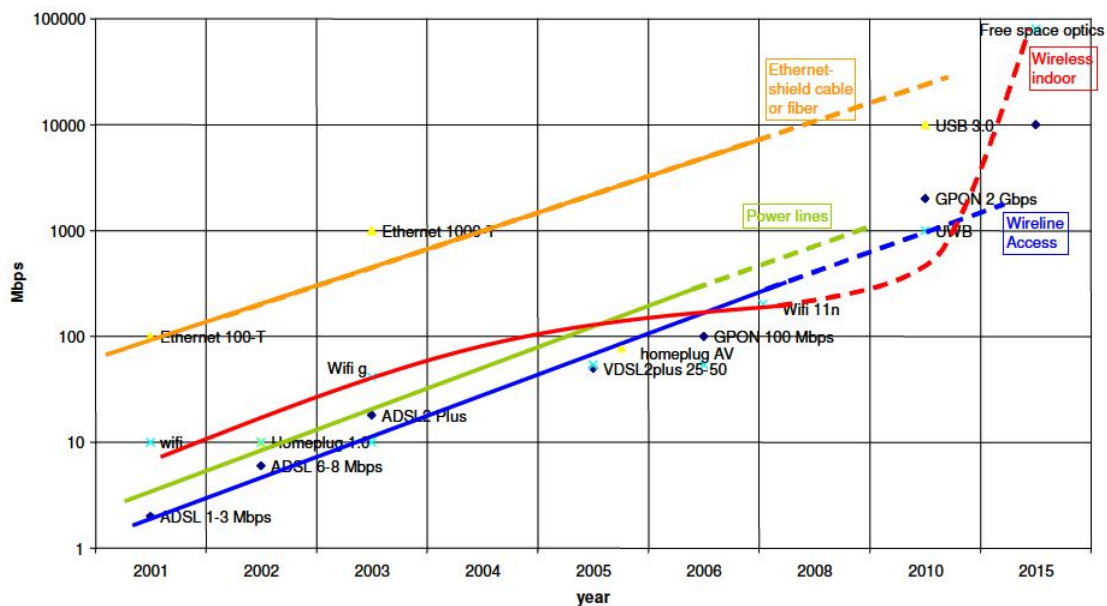
## 4. Υπάρχουσα κατάσταση τοπικών δικτύων (state-of-the-art)

Αξίζει να σημειωθεί, ότι το Internet υψηλής ταχύτητας έχει αναγνωριστεί ως ένας από τους 8 πυλώνες για την Ψηφιακή Ευρώπη του 2020, όπως αναφέρεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Οι υπηρεσίες που περιλαμβάνουν από την τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας μέχρι και τις τηλεδιασκέψεις σχεδιάζεται να χρησιμοποιηθούν βασισμένες σε πολύ ταχύτερη πρόσβαση στο Διαδίκτυο από αυτήν που είναι προς το παρόν διαθέσιμη στην Ευρώπη. Η Ευρώπη προκειμένου να ανταγωνιστεί με άλλες χώρες του κόσμου, όπως η Νότια Κορέα και η Ιαπωνία, έχει ως στόχο την επίτευξη ταχυτήτων downstream της τάξης των 30 Mbps για όλους τους πολίτες της και τουλάχιστον το 50% των συνδέσεων στο Διαδίκτυο  $\geq 100$  Mbps για όλα τα ευρωπαϊκά νοικοκυριά μέχρι το 2020. Σε αυτή την κατεύθυνση, ανάμεσα στις προγραμματισμένες ενέργειες της Ευρωπαϊκής Επιτροπής είναι η υιοθέτηση της ευρυζωνικής επικοινωνίας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η χρηματοδότηση για ευρυζωνικές υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας, καθώς και η διευκόλυνση των ευρυζωνικών επενδύσεων από τα κράτη μέλη. Για την είσοδο σε αυτή τη νέα εποχή του Διαδικτύου υψηλής ταχύτητας οι ευρυζωνικές και ασύρματες τεχνολογίες πρόκειται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο. Δεν αποτελεί καμία έκπληξη το γεγονός ότι κατά την πρώτη συνέλευση για την ψηφιακή ατζέντα του 2020 [2], δύο από τις συνεδριάσεις που έλαβαν χώρα ήταν αφιερωμένες σε αυτές τις τεχνολογίες. Πιο συγκεκριμένα, το «φάσμα για ασύρματη καινοτομία στην Ευρώπη» [3] και η «χρηματοδότηση και διευκόλυνση των ευρυζωνικών έργων» κέρδισαν την προσοχή των παρευρισκόμενων [4].

Η Εικόνα 9 που ακολουθεί παρουσιάζει την εξέλιξη των ασύρματων και ενσύρματων τεχνολογιών μετάδοσης δεδομένων τόσο στο δίκτυο πρόσβασης όσο και στο οικιακό δίκτυο. Είναι εμφανές ότι η ταχύτητα της τάξης των Gbps μπορεί να υποστηριχθεί χρησιμοποιώντας οπτικές FTTH τεχνολογίες πρόσβασης, όπως τα GPON (passive optical networks) [5],[6]. Επιπλέον, σύμφωνα με την εικόνα τα ασύρματα ραδιοσυστήματα, όπως το 802.11n και τα δίκτυα υπερευρείας ζώνης (UWB) δεν μπορούν να επιτύχουν συνδεσιμότητα της τάξης των Gbps στις εγκαταστάσεις του πελάτη. Παράλληλα, οι ενσύρματες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων πολύτροπης ή πλαστικής οπτικής ίνας, τα PLC και το Ethernet πάνω από χαλκό (Unshielded Twisted Pair - UTP), ενδέχεται να οδηγήσουν στην εγκατάσταση νέων καλωδίων, γεγονός μη επιθυμητό στα ήδη υπάρχοντα οικιακά περιβάλλοντα τόσο για λόγους πρακτικούς όσο και αισθητικούς. Επιπρόσθετα, παρέχουν περιορισμένη κινητικότητα στον τελικό χρήστη σε σχέση με τις ασύρματες τεχνολογίες. Οι εναλλακτικές που βασίζονται στην οπτική ίνα παρέχουν πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων [7] αλλά η ανάγκη της εξαρχής εγκατάστασης στα ήδη υπάρχοντα κτίρια αυξάνει το κόστος και διαταράζει το περιβάλλον του οικιακού χρήστη. Αυτό ισχύει και για την περίπτωση του UTP Ethernet που λειτουργεί σε χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων για μικρές αποστάσεις. Τα συστήματα PLC [8] μπορεί να χρησιμοποιούν τα υπάρχοντα καλώδια ρεύματος, αλλά περιορίζονται σε ρυθμούς δεδομένων κάτω από 1Gb/s. Οι ασύρματες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί σήμερα περιλαμβάνουν τα συστήματα 60GHz [9] καθώς και τα συστήματα της τάξης των terahertz systems [10]. Τα συστήματα 60GHz έχουν το πλεονέκτημα της χρήσης του μη αδειοδοτημένου ραδιοφάσματος στην περιοχή 57-64GHz. Οι πομποδέκτες χαμηλής ισχύος των 60GHz λειτουργούν στα 3.5Gb/s σε μια τυπική πλατφόρμα CMOS [9]. Παρόμοιοι ρυθμοί δεδομένων μπορούν να επιτευχθούν στο φάσμα των THz χρησιμοποιώντας [10]. Και τα δύο συστήματα βασίζονται στην απευθείας οπτική επαφή ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη, σε αντίθεση με τα 802.11x δίκτυα.

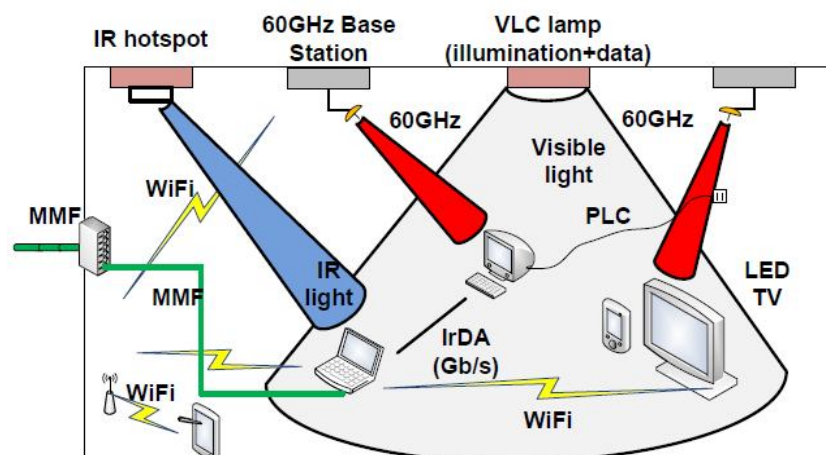
Μια άλλη εναλλακτική λύση είναι η χρήση οπτικών ασύρματων τεχνολογιών, που στην ουσία σχετίζονται με την μετάδοση σημάτων φωτός άμεσα στον αέρα, χωρίς κανένα μέσο κυματοδότησης, όπως γίνεται στην περίπτωση των ενσύρματων συστημάτων οπτικών ινών. Δεδομένου ότι το υπέρυθρο φάσμα επικοινωνίας είναι πρακτικά απεριόριστο, είναι δυνατόν να επιτευχθεί το όραμα ενός πλήθους οπτικών ασύρματων συστημάτων που λειτουργούν στο ίδιο δωμάτιο μεταδίδοντας σε διαφορετικό μήκος κύματος. Εκτός από το τεράστιο διαθέσιμο φάσμα και τις μεγάλες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, τα οπτικά ασύρματα συστήματα παρουσιάζουν μηδενικές παρεμβολές με τα υφιστάμενα συστήματα ραδιοεπικοινωνιών και δεδομένης της τήρησης των απαιτούμενων προφυλάξεων για τους οφθαλμούς, τα οπτικά ασύρματα είναι γνωστό ότι έχουν αμελητέες βιολογικές αλληλεπιδράσεις, σε αντίθεση με την THz ακτινοβολία ή τα 60GHz, όπου αυτό εξακολουθεί να παραμένει ένα πολυσυζητημένο θέμα. Οι οπτικές ασύρματες συνδέσεις εξωτερικού χώρου, (πρόκειται για τα συστήματα που είναι γνωστά ως free space optics –FSO) διατίθενται

ήδη στο εμπόριο και μπορεί να υποστηρίξει συνδεσιμότητα >1Gb/s. Σε εσωτερικούς χώρους, οπτικά ασύρματα συστήματα εξετάζονται επίσης για την υψηλή συνδεσιμότητα εύρους ζώνης.



Εικόνα 8: Η εξέλιξη των τεχνολογιών πρόσβασης (Πηγή: Orange Labs white paper)

Δεδομένου ότι η εκάστοτε τεχνολογική λύση διέπεται από τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, είναι πολύ πιθανό τα μελλοντικά δίκτυα οικιακού ή εργασιακού χώρου να αποτελούνται από υβριδικές λύσεις, όπως για παράδειγμα αποτυπώνει η παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 9: Υβριδικό Οικιακό Δίκτυο

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφούν οι υπάρχουσες τεχνολογίες που είτε έχουν ήδη εγκατασταθεί στο οικιακό δίκτυο, είτε αποτελούν πραγματική πρόκληση για την μετέπειτα εγκατάστασή τους, δεδομένων των αναγκών των μελλοντικών οικιακών δικτύων.

## 4.1 Ethernet

Το Ethernet είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο ενσύρματης τοπικής δικτύωσης υπολογιστών. Το 1985 το Ethernet έγινε αποδεκτό επίσημα από τον οργανισμό του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers) ως το πρότυπο 802.3 για ενσύρματα τοπικά δίκτυα (LAN - Local Area Networks). Σημαντικό ρόλο στην οικιακή δικτύωση παρουσιάζει η δυνατότητα μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της Ethernet καλωδίωσης εκτός από τη μετάδοση δεδομένων (POE - power over ethernet).

Η αρχική έκδοση του Ethernet υποστηρίζει ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων 10Mbps, η επόμενη έκδοση η 100Base-T μέχρι 100Mbps και η νεότερη έκδοση, η Gigabit Ethernet φτάνει σε ταχύτητες τα 100 Gbps. Πιο συγκεκριμένα, οι διάφορες εκδόσεις Ethernet περιγράφονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 1: Εκδόσεις Ethernet

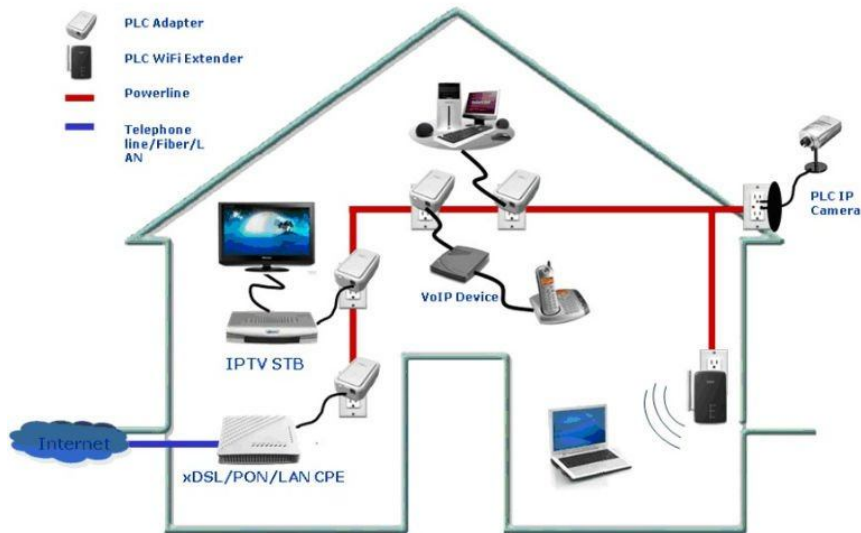
Έκδοση	Περιγραφή
Ethernet (10Mbps)	Τα 10Mbps είναι επαρκή για το μοίρασμα μιας DSL σύνδεσης και την μεταφορά πολυμεσικών αρχείων με ελάχιστη καθυστέρηση. Μέγιστη απόσταση 100m.
Fast Ethernet (100 Mbps)	Προσφέρει δυνατότητες γρήγορης επεξεργασίας απαιτητικών εφαρμογών. Με το Fast Ethernet μπορούν να καλυφθούν αποστάσεις μέχρι και 40km ανάλογα με τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται.
Gigabit Ethernet-GbE (1 Gbps)	Τα 1000Mbps υπόσχονται υψηλές ταχύτητες ανεβάζοντας όμως λίγο το κόστος. Για τις συνδέσεις με χαλκό έχει επικρατήσει το πρότυπο 1000BASE-T. Το αντίστοιχο πρότυπο για τις οπτικές ίνες είναι τα 1000BASE-FX. Με το 1GbE μπορούν να καλυφθούν αποστάσεις μέχρι και 70km ανάλογα με τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται.
10 Gigabit Ethernet (10 Gbps)	Το 10GbE αναφέρεται σε διάφορες τεχνολογίες για τη μετάδοση των πλαισίων Ethernet με ταχύτητα 10 gigabits ανά δευτερόλεπτο, το πρώτο που ορίζεται από το πρότυπο IEEE 802.3ae -2002. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα πρότυπα Ethernet, το 10 gigabit Ethernet ορίζει μόνο full duplex συνδέσεις (μετάδοση δεδομένων σε δύο κατευθύνσεις ταυτόχρονα) σημείο σε σημείο οι οποίες συνήθως συνδέονται με τους δρομολογητές του δικτύου. Με το 10GbE μπορούν να καλυφθούν αποστάσεις μέχρι και 80km ανάλογα με τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται.
40-100 Gigabit Ethernet (40-100 Gbps)	Αυτά τα πρότυπα Ethernet αναπτύχθηκαν από την ομάδα IEEE P802.3ba Ethernet Task Force, το Νοέμβριο του 2007. Σκοπός του παρόντος έργου είναι να επεκταθεί το 802.3 πρωτόκολλο λειτουργίας σε ταχύτητες 40 Gbps και 100 Gbps, ώστε να παρέχουν μια σημαντική αύξηση του εύρους ζώνης, διατηρώντας παράλληλα τη μέγιστη συμβατότητα με το πρωτόκολλο 802.3. Είναι η πρώτη φορά που η IEEE προσφέρει δύο ταχύτητες κάτω από μία καθορισμένη ετικέτα. Ο λόγος για αυτό είναι η κάλυψη ευρέος φάσματος αναγκών, όπως οι ανάγκες των μικρότερων τοπικών εξυπηρετητών (40GbE) καθώς και των εξαιρετικά μεγάλου μεγέθους διακομιστών Διαδικτύου (100GbE). Με το 40-100GbE μπορούν να καλυφθούν αποστάσεις μέχρι και 40km ανάλογα με τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται.

## 4.2 PowerLine Communications (PLC)

Το σημαντικότερο όφελος της επικοινωνίας μέσω γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος (PLC - Power Line Communications) είναι ότι οι χρήστες μπορούν εύκολα να δημιουργήσουν ένα δίκτυο χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα ηλεκτρική καλωδίωση ενός σπιτιού ως μέσο επικοινωνίας με δυνατότητα για ρυθμούς μετάδοσης εκατοντάδων Mb/s [11]. Δεν υπάρχει καμία ανάγκη για τη διάνοιξη οπών σε τοίχους ή στην οροφή παρα μόνο να αγοράσουν έναν ειδικό προσαρμογέα. Ως εκ τούτου, η εγκατάσταση είναι γρήγορη, εύκολη και σχετικά ανέξοδη. Ο προσαρμογέας τοποθετείται σε μια πρίζα και στη συνέχεια συνδέεται μέσω συστρεμμένου ζεύγους καλωδίων κατηγορίας 5 (CAT5 - category 5 cable) με τον δρομολογητή του σπιτιού. Στη συνέχεια, επιπρόσθετοι προσαρμογείς μπορούν να συνδεθούν σε οποιαδήποτε μπρίζα ηλεκτρικού ρεύματος για να δώσουν άμεση δικτύωση και πρόσβαση στο Internet σε μια συσκευή με έξοδο/είσοδο Ethernet. Ωστόσο, οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει το κανάλι της γραμμής του ηλεκτρικού ρεύματος εμποδίζουν την επίτευξη ταχυτήτων της τάξης των Gb/s [12]. Πιο συγκεκριμένα, το γεγονός ότι το οικιακό ηλεκτρικό δίκτυο έχει σχεδιασθεί για μετάδοση σε συχνότητες 50-60Hz περιορίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης του καναλιού PLC στην περιοχή των 2-30MHz, όπου η ισχύς του θορύβου διατηρείται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Σε αυτές τις συχνότητες τα καλώδια ηλεκτρικής ισχύος παρουσιάζουν «διαρροές», που σημαίνει ότι ένα μέρος της ισχύος του σήματος υψηλής συχνότητας χάνεται υπό τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Επιπλέον, η παρεμβολή από συσκευές που λειτουργούν στην ίδια περιοχή

συχνοτήτων, ο θόρυβος από συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς και η συχνοτική εξάρτηση του καναλιού υποβαθμίζουν σημαντικά την ποιότητα της επικοινωνίας. Το 2009 αναφέρθηκε ένα PLC σύστημα με εύρος ζώνης που φθάνει τα 100MHz με χρήση καταλλήλων τεχνικών πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου (MIMO – Multiple Input Multiple Output) [13].

Μια τυπική περίπτωση ενσωμάτωσης PLC στα οικιακά δίκτυα παρουσιάζεται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: PLC στα οικιακά δίκτυα

Τα δύο επικρατέστερα πρότυπα για τα συστήματα PLC είναι το HomePlug AV και το IEEE P1901, τα οποία σήμερα έχουν ενσωματωθεί στο IEEE P1905 CHDN (Converged Digital Home Networking) [14]. Το HomePlug AV [11] ορίστηκε από την HomePlug Powerline Alliance και υποστηρίζει ρυθμούς έως 200Mbps, ενώ το IEEE P1901 παρέχει ταχύτητες μετάδοσης 450Mbps [14]. Στόχος του IEEE P1905 είναι η ανάπτυξη ενός οικιακού δικτύου εσωτερικού χώρου, στο οποίο να συνυπάρχουν διάφορες τεχνολογίες δικτύωσης, όπως το P1901, το IEEE 802.11 και το Ethernet (IEEE 802.3) [15].

Η HomePlug Powerline Alliance ιδρύθηκε το 2000, ο στόχος της ήταν να δημιουργήσει ένα πρότυπο που θα επιτρέπουν στα προϊόντα να χρησιμοποιούν την υφιστάμενη ηλεκτρική καλωδίωση για να επικοινωνούν μεταξύ τους και να συνδεθούν στο Internet. Προς αυτόν τον σκοπό, αξιολόγησε αρκετές τεχνολογίες και προτάσεις και στη συνέχεια ανέπτυξε το HomePlug 1.0 με 14 Mbit/s, το οποίο εγκρίθηκε και δημοσιεύθηκε τον Ιούνιο του 2001. Το 2005 δημοσίευσε το HomePlug AV [11], το οποίο αύξησε τους ρυθμούς δεδομένων από 14 έως 200 Mbits. Το Συμβούλιο ενέκρινε και δημοσίευσε το HomePlug Access BPL το 2007 και το HomePlug Green PHY τον Ιούνιο του 2010. Οι τρεις μεγαλύτερες προδιαγραφές που δημοσιεύει η HomePlug (HomePlug AV, HomePlug Green PHY και AV2 στα 600Mbps) είναι συμβατές με το IEEE 1901 και η HomePlug Powerline Alliance θα είναι ο οργανισμός πιστοποίησης για τα προϊόντα IEEE 1901.

Η UPA (Universal Powerline Association), είναι μια εμπορική ένωση που καλύπτει όλες τις αγορές και όλες τις εφαρμογές επικοινωνίας με γραμμές ρεύματος. Η UPA αποσκοπεί στην προώθηση της ανάπτυξης της τεχνολογίας αυτής με τα πιστοποιημένα προϊόντα που συμμορφώνονται με τα συμφωνηθέντα χαρακτηριστικά.

“G.hn” είναι η κοινή ονομασία για ένα οικιακό δίκτυο που αναπτύσσεται στο πλαίσιο της ITU-T και προωθείται από το HomeGrid forum, καθώς και διάφορους άλλους οργανισμούς. Υποστηρίζει τη δικτύωση μέσω του ηλεκτρικού δικτύου με τηλεφωνικές γραμμές και ομοαξονικά καλώδια με ταχύτητες δεδομένων έως και 1 Gbit/s. Η σύσταση ITU G.9960, η οποία έλαβε έγκριση στις 9 Οκτώβρη 2009, καθορίζει το φυσικό επίπεδο και την αρχιτεκτονική της G.hn. Το επίπεδο διασύνδεσης δεδομένων (data link layer) (σύσταση G.9961) εγκρίθηκε στις 11 Ιουνίου του 2010. Η εργασία έγινε στον ITU-T Τομέα Τυποποίησης Τηλεπικοινωνιών, όπου πάνω από 20 εταιρείες συμμετείχαν τακτικά, καθώς και μερικές από τις κορυφαίες εταιρείες τεχνολογίας οικιακής δικτύωσης.

Μπορεί τα ηλεκτρικά καλώδια να είναι ένα σύνθετο μέσο μετάδοσης, αλλά υπάρχουν δύο χαρακτηριστικά των γραμμών ηλεκτροδότησης που είναι ιδιαίτερος ελκυστικά:

- Δεν υπάρχει ανάγκη υλικού για την μετατροπή RF (radiofrequency, ραδιοσυχνότητα) όπως χρειάζεται στα ασύρματα δίκτυα, είναι δηλαδή βασικής ζώνης (baseband).
- Η πληθώρα πριζών βασικής ζώνης για την χρήση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σε ένα σπίτι κάνει την χρήση ενός τέτοιου οικιακού δικτύου δυνατή από οποιοδήποτε σημείο του σπιτιού θελήσει ο χρήστης.

Η πρόοδος στην τεχνολογία διαμόρφωσης και στην επεξεργασία ψηφιακού σήματος καθώς και στον έλεγχο των λαθών ελαχιστοποίησε τους περιορισμούς που παρουσίαζαν τα κανάλια και η υψηλή ταχύτητα μετάδοσης ψηφιακού σήματος μέσω των γραμμών ηλεκτροδότησης είναι πλέον δυνατή με τη χρήση γεφυρών ή προσαρμογών HomePlug. Έτσι τα πρωτοκόλλα που αναπτύχθηκαν, υποστηρίζουν πλέον επικοινωνία μέσω των καλωδιώσεων του ηλεκτρικού ρεύματος, σε ταχύτητες μετάδοσης συγκρίσιμες με αυτές ενός δικτύου Ethernet ή ασύρματου δικτύου, προδιαγραφών 802.11b.

Η τεχνολογία HomePlug περιλαμβάνει αξιόπιστες και ασφαλείς μεθόδους για να προσαρμόζεται η μετάδοση μέσω των ηλεκτρικών γραμμών, έτσι ώστε σε τυπικά κανάλια μετάδοσης να επιτυγχάνεται υψηλός ρυθμός μετάδοσης ενώ σε δύσκολες περιπτώσεις να αντιστέκεται σε παρεμβολές. Τα δεδομένα μπορεί να είναι απλά, δεδομένα ήχου και βίντεο, ακόμα και των προγραμμάτων τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας και να μεταφέρονται σε όλους τους χώρους του σπιτιού.

### 4.3 Wifi ή IEEE 802.11

Το πρότυπο 802.11 [17] είναι μια οικογένεια προτύπων της IEEE για ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN - Wireless Local Area Network, WLAN) που είχαν ως σκοπό να επεκτείνουν το ενσύρματο 802.3 (Ethernet). Η Wi-Fi Alliance είναι ένας οργανισμός ανεξάρτητος από τον IEEE και παρέχει την πιστοποίηση για τα προϊόντα που υπακούν τις προδιαγραφές του 802.11.

Ο όρος WiFi (Wireless Fidelity), κατά την ορολογία HiFi (High Fidelity), η οποία αφορά την αναπαραγωγή ήχου, χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τις συσκευές που βασίζονται στην προδιαγραφή IEEE 802.11 b/g/n και εκπέμπουν σε συχνότητες 2,4GHz. Ωστόσο το WiFi (ασύρματη πιστότητα) έχει επικρατήσει και ως όρος αναφερόμενος συνολικά στα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Συνήθεις εφαρμογές του είναι η παροχή ασύρματων δυνατοτήτων πρόσβασης στο Internet, τηλεφωνίας μέσω διαδικτύου (VoIP – Voice over IP) και διασύνδεσης μεταξύ ηλεκτρονικών συσκευών όπως τηλεοράσεις, ψηφιακές κάμερες, DVD Player και ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές το 802.11 βρίσκει εφαρμογές ασύρματης μετάδοσης, όπως π.χ. στη μεταφορά φωτογραφιών από ψηφιακές κάμερες σε υπολογιστές για περαιτέρω επεξεργασία και εκτύπωση, αν και σε αυτόν τον τομέα έχει υποσκελιστεί από το πρωτόκολλο Bluetooth για τα πολύ μικρότερης εμβέλειας ασύρματα προσωπικά δίκτυα.

Τα πρωτόκολλα IEEE 802.11 που έχουν αναπτυχθεί έως τώρα παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 2: Πρωτόκολλα IEEE 802.11

Έκδοση	Ημ/νία	Ζώνη συχνότητων	Επιτρεπόμενες MIMO ροές δεδομένων	Ονομαστικός ρυθμός μετάδοσης	Μέθοδοι μετάδοσης	Εμβέλεια εσωτερικών χώρων
802.11	1997	2.4 GHz	1	2 Mbit/s	IR / FHSS / DSSS <sup>1</sup>	~20 m
802.11b	1999	2.4 GHz	1	11 Mbit/s	DSSS	~38 m

<sup>1</sup> Direct-sequence spread spectrum, Διαμόρφωση με διασπορά φάσματος άμεσης ακολουθίας

802.11a	1999	5 GHz	1	54 Mbit/s	OFDM <sup>2</sup>	~35 m
802.11g	2003	2.4 GHz	1	54 Mbit/s	OFDM /DSSS	~38 m
802.11n	2009	2.4and/or5 GHz	4	135 Mbit/s	OFDM	~70 m
802.11ad	2012	60 GHz	1	6,75Gb/s	Single Carrier, OFDM, Low-Power Single Carrier	

Το 802.11n είναι μια επαναστατική τεχνολογία που δίνει τη δυνατότητα στα Wi-Fi δίκτυα να κάνουν περισσότερα, πιο γρήγορα, σε μια ευρύτερη περιοχή. Είναι ένα πρότυπο ασύρματης δικτύωσης που χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες για να αυξήσει τον ρυθμό των δεδομένων. Πρόκειται για μια τροποποίηση του προτύπου ασύρματης δικτύωσης IEEE 802.11-2007. Σκοπός του είναι η βελτίωση της απόδοσης του δικτύου πάνω από τα δύο προηγούμενα πρότυπα 802.11a και 802.11g, με σημαντική αύξηση του μέγιστου ρυθμού των δεδομένων από 54 Mbit/s σε 600 Mbit/s σε πλάτος καναλιού 40 MHz. Μπορεί να λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων είτε των 5 GHz, είτε των 2,4 GHz, αν είναι γνωστό ότι δεν θα παρεμβάλλεται με οποιοδήποτε άλλο 802.11 ή μη (όπως το Bluetooth) σύστημα που χρησιμοποιεί τις ίδιες συχνότητες.

Το IEEE 802.11ad είναι ένα δημοσιευμένο πρότυπο που έχει ήδη μια σημαντική ώθηση από τους κατασκευαστές hardware. Τον Ιούλιο του 2012 οι Marvell και Wilocity ανακοίνωσαν μια νέα εταιρική σχέση, για να φέρουν μια νέα tri-band λύση Wi-Fi στην αγορά.

#### 4.4 Ultra Wide Band

Το Ultra-wideband είναι μια τεχνολογία για τη μετάδοση πληροφοριών σε ένα μεγάλο εύρος ζώνης μετάδοσης (>500MHz) που θα πρέπει υπό τις κατάλληλες προϋποθέσεις να έχει τη δυνατότητα διαμοιρασμού του φάσματος από κοινού με άλλους χρήστες [18]. Η τεχνολογία υπερευρείας ζώνης φέρνει την ευκολία και την ευκινησία των ασύρματων επικοινωνιών στις συνδέσεις συσκευών υψηλής ταχύτητας. Τα ραδιοκύματα υπερευρείας ζώνης προβλέπεται να διαδραματίσουν έναν επαναστατικό ρόλο στο μέλλον των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Το μεγάλο ενδιαφέρον για τις UWB επικοινωνίες πυροδοτήθηκε από τους κυβερνώντες της Ομοσπονδιακής Επιτροπής Επικοινωνιών (FCC - Federal Communications Commission), το Φεβρουάριο του 2002, όταν ενέκριναν την ελεύθερη εμπορική εκμετάλλευση της UWB τεχνολογίας υπό έναν αυστηρό έλεγχο της ισχύος σε φάσμα 7500 MHz, που καταλαμβάνει τη ζώνη συχνοτήτων από 3,1GHz ως 10,6GHz [19].

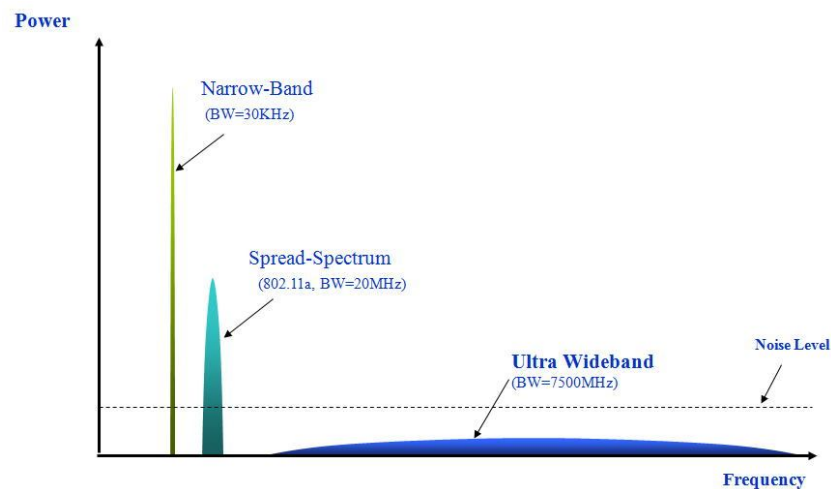
Σχεδιασμένη για χαμηλής ισχύος και μικρής εμβέλειας ασύρματα δίκτυα WPANs, η τεχνολογία υπερευρείας ζώνης είναι η κύρια τεχνολογία για την απελευθέρωση των ηλεκτρονικών συσκευών από τα καλώδια, επιτρέποντας παράλληλα την ασύρματη σύνδεση πολλών συσκευών για μετάδοση βίντεο, ήχου και άλλων δεδομένων υψηλού εύρους ζώνης.

Η μικρής εμβέλειας τεχνολογία UWB συμπληρώνει άλλες τεχνολογίες μεγαλύτερης εμβέλειας, όπως WiFi, Wimax, και των κυψελωτών δικτύων επικοινωνιών ευρείας ζώνης. Ο συνδυασμός ευρύτερου φάσματος και χαμηλότερης ισχύος βελτιώνει την ταχύτητα και μειώνει τις παρεμβολές με άλλα ασύρματα φάσματα. Χρησιμοποιείται για την αναμετάδοση δεδομένων από μια συσκευή υποδοχής σε άλλες συσκευές σε κοντινή περιοχή ως 10 μέτρων. Οι ασύρματες μεταδόσεις υπερευρείας ζώνης μπορούν και πρέπει να λειτουργήσουν στην περιοχή συχνοτήτων από 3,1GHz ως και 10,6GHz, με την περιορισμένη ισχύ εκομπής των -41dBm/MHz. Η FCC και η ITU-R ορίζουν ως UWB τη μετάδοση από μια κεραία σήματος με εύρος ζώνης μεγαλύτερο από 500 MHz ή 20% της κεντρικής συχνότητας [20].

<sup>2</sup> Orthogonal frequency-division multiplexing, Ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας



Τα περισσότερα συστήματα στενής ζώνης καταλαμβάνουν λιγότερο εύρος ζώνης μικρότερο από το 10% της κεντρικής συχνότητας λειτουργίας και εκπέμπουν σε πολύ υψηλότερα επίπεδα ενέργειας. Τα συστήματα υπερευρείας ζώνης διαφέρουν σημαντικά από τα συμβατικά συστήματα στενής ζώνης συχνοτήτων (RF) και τις τεχνολογίες εξαπλωμένου φάσματος (Spread Spectrum), όπως το Bluetooth και το 802.11a/b/g. Ο πομπός υπερευρείας ζώνης λειτουργεί στέλνοντας δεσεκατομμύρια παλμών σε ένα πολύ ευρύ φάσμα συχνοτήτων αρκετών GHz. Ο αντίστοιχος δέκτης μεταφράζει τους παλμούς σε δεδομένα χρησιμοποιώντας μια γνωστή παλμοσειρά που εκπέμπεται από τον πομπό. Τα συστήματα υπερευρείας ζώνης εκπέμπουν παλμούς πολύ μικρής διάρκειας συμπιεσμένους στο χρόνο, αντί για ημιτονοειδείς κυματομορφές συμπιεσμένες στη συχνότητα. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάγραμμα της ισχύος εκπομπής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τα διάφορα είδη τεχνολογιών στενού εύρους ζώνης (NB - narrowband), μεγάλου εύρους ζώνης (WB - wideband) και UWB[21]. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα είναι εμφανής η διαφορά ανάμεσα σε ένα σήμα στενής ζώνης και ένα υπερευρείας ζώνης. Το εύρος ζώνης του σήματος UWB είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του σήματος στενής ζώνης, με αποτέλεσμα το σήμα UWB να μπορεί να λειτουργήσει σε ευρύτερες συχνότητες.



Εικόνα 11: Ισχύς εκπομπής για τα NB, WB και UWB

Σύμφωνα με όσα συζητήθηκαν παραπάνω, είναι γεγονός ότι η τεχνολογία υπερευρείας ζώνης προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη λύση στο πρόβλημα του ανεπαρκούς ραδιοφάσματος επιτρέποντας σε νέες υπηρεσίες να συμβιώνουν με τα ήδη υπάρχοντα ραδιοσυστήματα με ελάχιστη ή καθόλου μεταξύ τους παρεμβολή. Αυτή η συνύπαρξη έχει το πλεονέκτημα να αποφεύγονται τα ακριβά αντίτιμα που πρέπει να καταβάλλουν οι πάροχοι των άλλων υπηρεσιών, για να εξασφαλίσουν την άδεια εκπομπής στο ραδιοφάσμα.

#### 4.5 Radio 60GHz

Στο πλαίσιο της μεγαλύτερης ευελιξίας στην κατανομή του φάσματος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μία από τις ευκαιρίες που προσέφερε η FCC είναι και η εκμετάλλευση του μη αδειοδοτημένου φάσματος των 7GHz σε συχνότητες περίπου 60 GHz (57-64 GHz) [22]. Το γεγονός αυτό εισάγει νέες ευκαιρίες για την ασύρματη συνδεσιμότητα και ενεργοποιεί υψηλούς ρυθμούς δεδομένων σε εφαρμογές, όπως η πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Ωστόσο, η υπερβολικά υψηλή απώλεια ισχύος στα 60 GHz, που παρατηρείται λόγω της απορρόφησης οξυγόνου, εμποδίζει τις επικοινωνίες σε αποστάσεις μεγαλύτερες από μερικά χιλιόμετρα. Το γεγονός αυτό βέβαια, μπορεί να παρέχει μεγαλύτερη ασφάλεια στα μικρής εμβέλειας δίκτυα WPANs. Επιπλέον, λόγω της απορρόφησης οξυγόνου, οι κανονισμοί της FCC επιτρέπουν ισοδύναμη ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύ (EIRP - Equivalent Isotropically Radiated Power), μέχρι 40 dBm, σημαντικά υψηλότερη από τις αντίστοιχες τιμές των WLAN/WPAN προτύπων. Παράλληλα, το διευρυμένο εύρος ζώνης και η υψηλή επιτρεπτή ισχύ εκπομπής στα 60 GHz επιτρέπει ασύρματη μετάδοση πολλαπλών Gigabit ανά δευτερόλεπτο για εσωτερικές αποστάσεις ~10m.

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά 60GHz σε σχέση με UWB, 802.11n

	Εύρος Ζώνης	Ενεργός Ισχύς Εκπομπής	Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης

UWB	520 MHz	0,4mW	80 Mbps
802.11n	40 MHz	60mW	1100 Mbps
60GHz	2.500 MHz	8.000mW	25000 Mbps

Σύμφωνα με τον νόμο του Shannon, που δίνεται από την εξίσωση **Error! Reference source not found.**, ο μέγιστος δυνατός ρυθμός δεδομένων  $C$  αυξάνεται με την αύξηση του εύρους ζώνης του καναλιού  $B$  και της ενεργούς ισχύος εκπομπής.

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1)$$

Στην (1),  $S/N$  είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο. Όπως φαίνεται λοιπόν στον παραπάνω πίνακα η τεχνολογία 60 GHz είναι σε θέση να επιτύχει 80 φορές το μέγιστο δυνατό ρυθμό δεδομένων του 802.11n και 200 φορές μεγαλύτερο από το UWB. Ένα άλλο πλεονέκτημα που προκύπτει από την ιδιότητα αυτή είναι το γεγονός ότι τα 60 GHz ραδιοκύματα απαιτούν λιγότερο περίπλοκη διαμόρφωση για τα συστήματα με σχεδιασμό χαμηλού κόστους. Για παράδειγμα, στα 60 GHz η απαιτούμενη φασματική απόδοση για την επίτευξη 1 Gigabit ανά δευτερόλεπτο είναι μόνο 0,4 bits/Hz, ενώ το 802.11n θα κληθεί να υποστηρίξει 25 bits/Hz. Παράλληλα με την αύξηση της απαιτούμενης φασματικής απόδοσης αυξάνονται και η δυσκολία καθώς και το κόστος σχεδιασμού του αντίστοιχου συστήματος. Επίσης, παρατηρείται εξαιρετικά μεγάλη ενεργός ισχύς εκπομπής στα 60 GHz σε σχέση με τα UWB και το IEEE802.11n. Αυτό εξηγείται λόγω της απορρόφησης οξυγόνου που συμβαίνει σε αυτές τις συχνότητες. Για αυτό το λόγο, σε πολλές χώρες ανά τον κόσμο επιτρέπεται ενεργός ισότροπη ισχύς εκπομπής δεκάδων και εκατοντάδων Watts για ασύρματες επικοινωνίες σε αυτή τη ζώνη. Το εκτεταμένο εύρος ζώνης και η υψηλή ενεργός ισχύς εκπομπής επιτρέπουν ασύρματες επικοινωνίες πολλών Gigabit.

## 4.6 Οπτικές Τεχνολογίες

### 4.6.1 Οπτική Ίνα στο σπίτι

Όπως προαναφέρθηκε παραπάνω, η αρχιτεκτονική FTTH αποτελεί σημαντική πρόκληση προσφέροντας ρυθμούς της τάξης των Gigabit στο δίκτυο πρόσβασης. Ωστόσο, διερευνώντας την προοπτική διαμοιρασμού αυτών των ταχυτήτων στο εσωτερικό των οικιακών ή εργασιακών χώρων, οι οπτικές ίνες φαίνεται να αποτελούν μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική τεχνολογία και για την οικιακή δικτύωση [23].

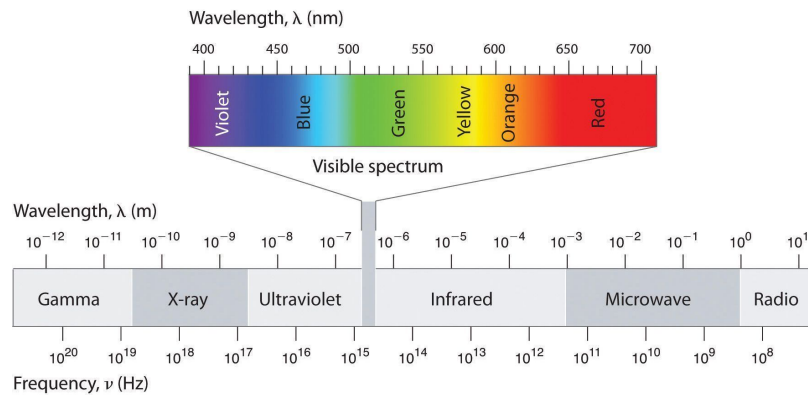
Οι οπτικές ίνες, είτε συμβατικές είτε πλαστικές είναι δυνατό να προσφέρουν στον μελλοντικό χρήστη ένα εύρωστο ευρυζωνικό δίκτυο που θα ικανοποιεί ποικίλες ανάγκες και υπηρεσίες πολυμέσων παρέχοντας υψηλές ταχύτητες. Τέτοιες υπηρεσίες περιλαμβάνουν αλληλεπιδραστικές υπηρεσίες βίντεο, διαδίκτυο υψηλής ταχύτητας, δορυφορική τηλεόραση κα. Οι υπηρεσίες βίντεο εξασφαλίζονται μέσα στο σύστημα οπτικής δικτύωσης από τη σύνδεση με την καλωδιακή τηλεόραση ή με μια δορυφορική σύνδεση. Στο σπίτι, το οπτικό σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό χρησιμοποιώντας έναν οπτικοηλεκτρονικό μετατροπέα (OEC - optical electrical converter). Ο μετατροπέας κατόπιν διαχωρίζει το σήμα σε υπηρεσίες που χρειάζεται ο χρήστης.

### 4.6.2 Οπτικά Ασύρματα Συστήματα

Η οπτική ασύρματη τεχνολογία (OW - Optical Wireless) παρέχει ποικίλες δυνατότητες μετάδοσης, επιτρέποντας στα οπτικά σήματα να διαδίδονται απευθείας στον ελεύθερο χώρο και έτσι να αποφευχθούν οι περιορισμοί που προκύπτουν από τη χρήση καλωδίων[24]. Τα ασύρματα οπτικά συστήματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας της οπτικής πηγής που χρησιμοποιούν: στα υπέρυθρα [25] και στα συστήματα ορατού φωτός [26]. Η τελευταία προαναφερθείσα τεχνολογία, γνωστή και ως επικοινωνίες ορατού φωτός (VLC) βασίζεται στις διόδους εκπομπής λευκού φωτός (LEDs - light emitting diodes), οι οποίες χρησιμοποιούνται για να παρέχουν φωτισμό και επικοινωνία ταυτόχρονα. Οι οπτικές πηγές των συστημάτων IR εκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία, ενώ των VLC ορατή, δηλαδή ακτινοβολία αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι. Τέτοιου είδους συστήματα ήδη εφαρμόζονται ευρέως σε εξωτερικές ζεύξεις σημείου σε σημείο στα δίκτυα πρόσβασης [27]. Ωστόσο, εκτός από τις επικοινωνίες στον



εξωτερικό χώρο, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον στις εφαρμογές εσωτερικού χώρου τόσο στο υπέρυθρο όσο και στο ορατό μέρος του φάσματος. Η ορατή (375-780nm) και η υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (780nm-300μm) παρουσιάζονται στην Εικόνα 12 που ακολουθεί.



Εικόνα 12: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα των ασύρματων οπτικών τεχνολογιών περιλαμβάνεται το σχεδόν απεριόριστο διαθέσιμο εύρος ζώνης σε συνδυασμό με την ασφάλεια που παρέχει (εφόσον το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε αυτές τις συχνότητες δεν μπορεί να διαπεράσει μέσα από τους τοίχους), καθώς και η περιορισμένη παρέμβαση στις οικιακές συσκευές και τα συμβατικά συστήματα ραδιοεπικοινωνίας. Επιπλέον, υπό την προϋπόθεση ότι πληρούνται ορισμένοι κανονισμοί ασφαλείας οφθαλμών, σχετικά με την ισχύ εκπομπής, για τους οπτικούς πομποδέκτες, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε αυτά τα μήκη κύματος είναι ασφαλής, δεδομένου ότι η ανθρωπότητα έχει εκτεθεί σε αυτήν για αιώνες, λόγω του ήλιου. Πομποδέκτες πολλών Gigabits έχουν ήδη αναπτυχθεί και διατίθενται στο εμπόριο για τα συστήματα οπτικών ινών. Ωστόσο, δεδομένου ότι το θέμα του κόστους είναι υψίστης σημασίας για τις προσδοκίες του πελάτη, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί εξοπλισμός με χαμηλό κόστος.

### A. IrDA

Η ίδρυση της IrDA, το 1993, είχε ως σκοπό τον σχεδιασμό ενός προτύπου διαλειτουργικότητας και επικοινωνίας μεταξύ δύο ασύρματων σταθμών με υπέρυθρη ακτίνα [28]. Σήμερα υπάρχει η δυνατότητα μετάδοσης και δεδομένων σε μία σχετικά μικρή απόσταση με περιορισμένες όμως δυνατότητες. Επειδή αυτή η τεχνολογία είναι φθηνή, έχει εφαρμοστεί σε όλα τα είδη των προσωπικών συσκευών, όπως τα ρολόγια, PDAs, τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές, ακόμα και ασύρματα ποντίκια και πληκτρολόγια. Ωστόσο, έχει εκτοπιστεί από τις ασύρματες τεχνολογίες όπως WiFi και Bluetooth, μιας και δεν χρειάζονται άμεση οπτική επαφή.

Σήμερα χρησιμοποιούνται μήκη κύματος στην περιοχή των 900nm, ενώ εξελίσσονται προϊόντα με μήκη κύματος 1550nm. Ενσωματώνονται σε φορητές κυρίως συσκευές με σκοπό να προσφέρουν δυνατότητες δικτύωσης μικρής εμβέλειας και ταχύτητας μετάδοσης. Επιπλέον, έχουν εφαρμογή για αξιόπιστη σύνδεση περιορισμένου αριθμού κόμβων (2 έως 4) και σε καμία περίπτωση δεν αποτελούν σοβαρή λύση στην δημιουργία ενός ολοκληρωμένου και πλήρως δικτυωμένου σπιτιού.

Υπάρχουν τέσσερις τύποι υπέρυθρης επικοινωνίας σύμφωνα με το πρότυπο IrDA:

- Serial Infrared (SIR)
- Medium Infrared (MIR)
- Fast Infrared (FIR)
- Very Fast Infrared (VFIR)

Το SIR είναι το πρώτο πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε και έχει ρυθμό μετάδοσης 115Kbps, το MIR 1,1 Mbps, ενώ τα άλλα δύο βελτιώνουν κατά πολύ την ταχύτητα με την οποία μεταδίδονται τα δεδομένα

(4Mbps το FIR και 16Mbps το VFIR). Το γνωστότερο όλων είναι το FIR, που ενσωματώνεται και ως πρότυπο στα λειτουργικά συστήματα της Microsoft από τα Windows 98 κι έπειτα. Το Μάρτιο του 2009 εκδόθηκε το Giga-IR, το οποίο υιοθετώντας την τεχνική μεταγωγής κλειδώματος πλάτους (ASK – Amplitude Shift Keying), υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης 512Mb/s και 1Gb/s. Τα συστήματα αυτά προορίζονται για εφαρμογές, όπου απαιτείται πολύ υψηλής ταχύτητας μετάδοση δεδομένων, όπως η πρόσβαση σε υπηρεσίες HDTV, 3D Gaming κ.α.

Ο οργανισμός IrDA καθορίζει τρία πρότυπα:

- IrDA-Data
- IrDA-Control
- Air

Στα παραπάνω πρότυπα περιλαμβάνονται τα πρωτόκολλα προδιαγραφής φυσικού επιπέδου για μετάδοση με υπέρυθρη ακτινοβολία (IrPHY - Infrared Physical Layer Specification), πρόσβασης για μετάδοση με υπέρυθρη ακτινοβολία (IrLAP - Infrared Link Access Protocol), τοπικού δικτύου που χρησιμοποιεί υπέρυθρη ακτινοβολία (IrLAN - Infrared Local Area Network), διαχείρισης της σύνδεσης για μετάδοση υπέρυθρης ακτινοβολίας (IrLMP - Infrared Link Management Protocol), μετάδοσης με υπέρυθρη ακτινοβολία (IrCOMM - Infrared Communications Protocol), μεταφοράς (Tiny TP - Tiny Transport Protocol), επικοινωνίας με τη χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας για την ανταλλαγή δυαδικών αντικειμένων μεταξύ των συσκευών (IrOBEX - Infrared Object Exchange), μετάδοσης υψηλής ταχύτητας με τη χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας (IrSimple - Infrared Simple) και γρήγορης μετάδοσης ψηφιακών εικόνων σε τηλεοράσεις και εκτυπωτές με τη χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας (IrSimpleShot - Infrared SimpleShot), καθένα από τα οποία έχει τα δικά του χαρακτηριστικά.

Το IrSimple είναι το πρωτόκολλο το οποίο έχει επιτύχει πολύ υψηλές ταχύτητες στα συστήματα IrDA, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, για παράδειγμα, στην ασύρματη μετάδοση εικόνας σε μια τηλεόραση από ένα κινητό τηλέφωνο ή μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, καθώς και σε ασύρματη μετάδοση δεδομένων μεταξύ κινητών τηλεφώνων σε υψηλή ταχύτητα. Το IrSimple αναδεικνύεται ως ένα δημοφιλές πρωτόκολλο ασύρματης εκτύπωσης για τον εκτυπωτή, κινητό τηλέφωνο, φωτογραφική μηχανή.

Το τελευταίο πρωτόκολλο IrSimpleShot έχει ως στόχο να επιτρέψει στα εκατομμύρια των IrDA τηλεφώνων, με φωτογραφική μηχανή, την ασύρματη μεταφορά εικόνων σε εκτυπωτές και τηλεόραση με επίπεδο πάνελ.

## **B. Άλλα Οπτικά Υπέρυθρα Συστήματα**

Οποιοδήποτε οπτικό ασύρματο σύστημα περιλαμβάνει έναν πομπό, ο οποίος εκπέμπει διαμορφωμένη οπτική ακτινοβολία. Το φως διαδίδεται στη συνέχεια μέσω του καναλιού και ένας οπτικός δέκτης ανιχνεύει τη διαμορφωμένη ακτινοβολία και ανακτά τα αρχικά δεδομένα. Τα υπέρυθρα IR [25] οπτικά ασύρματα συστήματα χρησιμοποιούν έναν αριθμό διαφορετικών τοπολογιών, και η διαθέσιμη απόδοση εξαρτάται από τον πολλαπλασιασμό που χρησιμοποιείται και τον τύπο του συστήματος. Βασική διαφορά τους με το IrDa είναι η εμβέλεια που παρέχουν, δεδομένου ότι το IrDA αποτελεί οπτική ασύρματη τεχνολογία μικρής εμβέλειας (short reach). Οι βασικοί τύποι ενός IR συστήματος εμπίπτουν στα συστήματα απευθείας οπτικής επαφής (LOS - Line of Sight) και στα συστήματα που δεν απαιτούν την ύπαρξη απευθείας οπτικής επαφής (Non LOS - Line of Sight) μεταξύ πομπού και δέκτη.

### **Συστήματα Χωρίς Οπτική Επαφή**

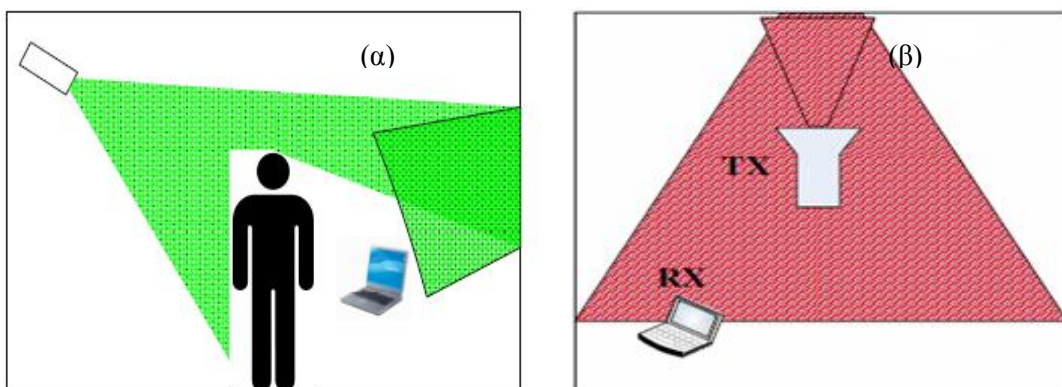
Τα συστήματα Non LOS δεν απαιτούν την ύπαρξη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη. Ο πομπός κατά κανόνα βρίσκεται τοποθετημένος σε κάποιο ύψος από το δάπεδο και στέλνει μια οπτική δέσμη με κατεύθυνση συνήθως στην οροφή του χώρου, όπου είναι εγκατεστημένο το σύστημα, αλλά και σε άλλες κατευθύνσεις στο χώρο. Ο δέκτης είναι και αυτός προσανατολισμένος προς τα πάνω. Το οπτικό σήμα που εκπέμπει ο πομπός ανακλάται είτε στην οροφή είτε στους περιβάλλοντες τοίχους και επιφάνειες, διαχέεται ομοιόμορφα στο χώρο και τελικά προσπίπτει στην επιφάνεια του δέκτη εξασθενημένο, αφού έχει υποστεί ανακλάσεις σε τοίχους και σε άλλα εμπόδια που παρεμβάλλονται στο χώρο. Συνεπώς, δεν απαιτείται

προσεκτική τοποθέτηση και ακριβής προσανατολισμός πομπού και δέκτη. Τα συστήματα αυτά διαφοροποιούνται ανάλογα με το εύρος της δέσμης εκπομπής και της γωνίας θέασης του δέκτη.

Η πιο διαδεδομένη διάταξη Non LOS είναι η τοπολογία διάχυσης (Diffuse), στην οποία ο πομπός εκπέμπει μια ευρεία οπτική δέσμη και το δέκτης διαθέτει ευρεία γωνία θέασης. Τα συστήματα διάχυσης προσφέρουν στους χρήστες δυνατότητα, αλλά παρουσιάζουν αυξημένες απώλειες διάδοσης. Σύμφωνα με τα συστήματα που λειτουργούν σε τοπολογία διάχυσης, μια πηγή εκπέμπει με σχετικά ευρεία γωνία θέασης και η ακτινοβολία σκεδάζεται από τις εσωτερικές επιφάνειες του χώρου, όπως άλλωστε και το φως από τις λάμπες. Αυτό δημιουργεί ένα μεγάλο αριθμό διαδρομών από την πηγή στο δέκτη, το οποίο καθιστά το σύστημα λειτουργικό ακόμα και εάν μία από αυτές εμποδιστεί. Ωστόσο, οι απώλειες διαδρομής είναι υψηλές και οι πολλαπλές διαδρομές δημιουργούν παρεμβολή μεταξύ των συμβόλων (ISI - intersymbol interference). Στα συστήματα ραδιοσυχνότητας είναι δυνατόν να ξεπεραστούν οι παρεμβολές ISI χρησιμοποιώντας τεχνικές πολλών φερόντων και επεξεργασίας σήματος, αλλά η πολύ υψηλή απώλεια διάδοσης στα αμιγώς διάχυτα κανάλια, καθιστά μάλλον δύσκολο ότι οι ρυθμοί δεδομένων των 1Gbit/s θα μπορέσουν να επιτευχθούν στο εγγύς μέλλον.

Το πρώτο ασύρματο οπτικό σύστημα, που προτάθηκε από τους Gfeller και Bapst [29], ήταν ένα υπέρυθρο σύστημα διάχυσης που λειτουργούσε στα 950nm και παρείχε ρυθμό μετάδοσης ίσο με 1Mb/s. Το ταχύτερο υπέρυθρο σύστημα διάχυσης παρείχε ρυθμό 50Mb/s και προτάθηκε από τους Marsh και Kahn [30].

Η εικόνα που ακολουθεί αντικατοπτρίζει δύο περιπτώσεις ενός τυπικού συστήματος διάχυσης μέσα στο οικιακό δίκτυο. Στην (α) περίπτωση ο πομπός τοποθετείται στο ταβάνι και το σήμα ανακλάται στους γύρω τοίχους και επιφάνειες, ενώ στην περίπτωση (β) ο πομπός τοποθετείται σε ένα ύψος από το πάτωμα και το σήμα ανακλάται στην οροφή.

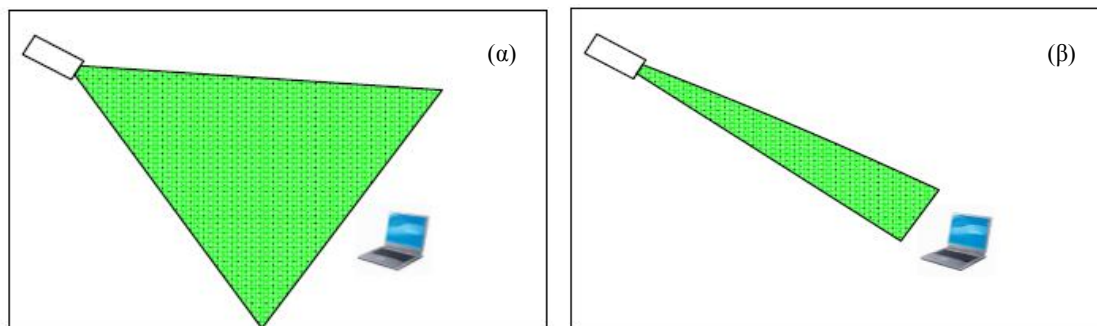


Εικόνα 13: Σύστημα Διάχυσης

### Συστήματα Απευθείας Οπτικής Επαφής

Από την άλλη, τα συστήματα απευθείας οπτικής επαφής (LOS) δεν επηρεάζονται από παράγοντες του καναλιού μετάδοσης, εκτός από γεωμετρικές απώλειες. Παράλληλα, σε αυτά τα συστήματα παρατηρείται περιορισμένη ISI. Αυτό συμβαίνει γιατί λαμβάνεται υπόψη μόνο το σήμα που εκπέμπει η πηγή και φτάνει απευθείας στο δέκτη χωρίς να έχει υποστεί ανακλάσεις. Οι γεωμετρικές απώλειες και η γωνία θέασης του πομπού και του δέκτη καθορίζουν τον ισολογισμό ισχύος, τον διαθέσιμο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, και σε γενικές γραμμές όσο πιο στενό είναι το οπτικό πεδίο τόσο υψηλότερος ρυθμός δεδομένων επιτυγχάνεται. Ο πομπός κατά κανόνα είναι τοποθετημένος στην οροφή του χώρου, όπου είναι εγκατεστημένο το σύστημα και εκπέμπει μια δέσμη ακτινοβολίας, η οποία μπορεί να στοχεύει είτε προς το δέκτη είτε γενικά προς τα κάτω. Ο δέκτης βρίσκεται συνήθως σε κάποιο ύψος από το δάπεδο και στοχεύει είτε προς τον πομπό είτε προς τα πάνω. Σε περίπτωση που παρεμβάλλεται κάποιο εμπόδιο η σύνδεση δεν είναι εφικτή.

Τα LOS συστήματα χωρίζονται σε ευρείας (WLOS - Wide LOS) και στενής δέσμης (NLOS - Narrow LOS), τα οποία παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 14: (α) Σύστημα WLOS, (β) Σύστημα NLOS

Σε ένα σύστημα NLOS, ο πομπός εκπέμπει μια πολύ στενή οπτική δέσμη προσανατολισμένη στο δέκτη. Το εύρος των γωνιών μέσα στο οποίο ο δέκτης λαμβάνει ακτινοβολία είναι επίσης πολύ στενό με αποτέλεσμα να απαιτείται ακριβής προσανατολισμός μεταξύ του πομπού και του δέκτη, αλλά και να ελαχιστοποιείται ο λαμβανόμενος περιβαλλοντικός θόρυβος ενισχύοντας την ευαισθησία του δέκτη. Μια τέτοια διάταξη δεν ικανοποιεί την απαίτηση για κινητικότητα και για αυτό δεν ενδείκνυται για ασύρματες εφαρμογές, εκτός εάν χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με κατάλληλο μηχανισμό ανίχνευσης ή στην περίπτωση κυβελωτών δικτύων για τη δημιουργία περιοχών κάλυψης μέσα σε ένα χώρο. Αντίθετα, στα WLOS συστήματα οι απαιτήσεις για την ακριβή τοποθέτηση του πομπού και του δέκτη είναι περισσότερο ανεκτικές, εφόσον η οπτική δέσμη είναι αρκετά ευρεία, γεγονός που επεκτείνει την περιοχή κάλυψης και υποστηρίζει κινητικότητα στους χρήστες.

### Γ. Επικοινωνίες Ορατού Φωτός

Οι επικοινωνίες ορατού φωτός (VLC) χρησιμοποιούν λαμπτήρες φωτισμού για τη μετάδοση πληροφοριών [31]. Στη θέση του πομπού μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε πηγή φωτός, η οποία πρέπει να μπορεί να «αναβοσβήνει» πολύ γρήγορα, ώστε να επιτυγχάνεται η υψίστη μεταδόση δεδομένων. Για το σκοπό αυτό, οι περισσότερες προσεγγίσεις χρησιμοποιούν λευκές LEDs υψηλής ισχύος αν και υπάρχουν κάποιες προσπάθειες με λάμπες φθορισμού [31]. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως είναι ακατάλληλοι για τα συστήματα VLC, λόγω της αδυναμίας τους να «αναβοσβήνουν» με πολύ υψηλή συχνότητα.

Τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην κατασκευή διόδων εκπομπής φωτός διαφορετικών χρωμάτων εκπομπής και μεγαλύτερης αποδοτικότητας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν προσελκύσει στην ερευνητική κοινότητα οι λευκές LEDs, δηλαδή οι LEDs που εκπέμπουν στην ορατή περιοχή του οπτικού φάσματος. Οι λευκές LEDs έχουν χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και μικρότερο μέγεθος από τις συμβατικές τεχνητές πηγές φωτός, όπως οι λαμπτήρες φθορισμού και πυρακτώσεως, τις οποίες τείνουν να αντικαταστήσουν [32]. Επιπρόσθετα, δύναται να διαμορφωθούν κατάλληλα, ώστε να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και για τη μετάδοση πληροφορίας. Η πρωτοποριακή ιδέα για τη χρήση των λευκών LEDs, εκτός από πηγές φωτισμού, και ως πομπούς ασύρματων οπτικών συστημάτων ανήκει στην ερευνητική ομάδα του Nakagawa [33].

Το 2003 ιδρύθηκε η κοινοπραξία VLCC (Visible Light Communications Consortium) [34] στην Ιαπωνία, με σκοπό την εισαγωγή προτύπων για οπτικές ασύρματες επικοινωνίες ορατού φωτός. Συμμετείχαν οι εταιρείες Sony, Samsung, Toshiba, Sharp, Nitto Denko και Tamura. Το 2007 οι δραστηριότητες της VLCC οδήγησαν στην έκδοση των προτύπων JEITA CP-1221 και JEITA CP-1222 από την JEITA (Japan Electronics & Information Technology Industries Association).

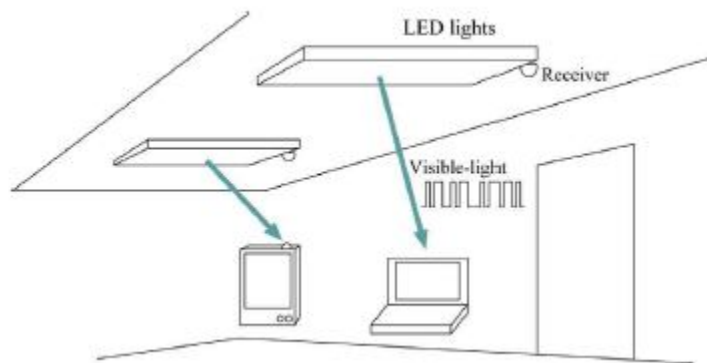
Αξίζει να σημειωθεί ότι η εργασία της Ιαπωνικής κοινοπραξίας VLC έχει δημιουργήσει εκτεταμένο ενδιαφέρον στην ερευνητική κοινότητα, οδηγώντας στο σχηματισμό μιας ομάδας μελέτης IEEE για την προτυποποίηση των VLC [35]. Η συγκεκριμένη προσέγγιση του VLC έγκειται στο γεγονός ότι οι πηγές μπορούν να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα τόσο για φωτισμό όσο και για μετάδοση δεδομένων. Τα VLC συστήματα μπορούν να παρέχουν μετάδοση πληροφοριών σε (ημι-) κοινόχρηστους χώρους (γραφεία, αεροδρόμια, τρένα, σιδηροδρομικούς σταθμούς, συνέδρια κ.α.), ή μεταδόσεις κάτω καναλιού υψηλής ταχύτητας σε κινητές συσκευές (PDA, τηλέφωνο, κ.α), καθώς και σε άλλες συσκευές. Η χρήση των LEDs

για σήματα κυκλοφορίας και λαμπτήρες αυτοκινήτων προσφέρει τη δυνατότητα χρήσης των VLC στον τομέα των ευφών συστημάτων κυκλοφορίας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πηγές LED μπορούν να διαμορφωθούν σε υψηλή ταχύτητα, σε σύγκριση με τις πηγές φωτισμού, και προβλέπεται να χρησιμοποιηθούν ευρέως σε εφαρμογές γενικού φωτισμού. Ωστόσο, το τυπικό εύρος ζώνης διαμόρφωσης των συσκευών αυτών είναι λίγα MHz. Το εύρος ζώνης της λευκής συνιστώσας των LED φωσφορισμού (~ 2 MHz) είναι πολύ μικρότερο από το εύρος ζώνης της μπλε συνιστώσας (~15–20 MHz, ανάλογα με τον τύπο LED) [36], [37].

Η μετάδοση σε υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, πάνω από ένα διαθέσιμο στενό εύρος ζώνης διαμόρφωσης, αποτελεί πραγματική πρόκληση στο πλαίσιο των επικοινωνιών ορατού φωτός. Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για τη βελτίωση του εύρους ζώνης, συμπεριλαμβανομένης της προεξίσωσης της LED [36], την εκ των υστέρων εξισορρόπηση στο δέκτη [38], ή το συνδυασμό αυτών των τεχνικών. Μια άλλη προσέγγιση για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων πάνω από ένα περιορισμένο εύρος ζώνης είναι να χρησιμοποιούνται περισσότερο περίπλοκα σχήματα διαμόρφωσης, όπου πολλαπλά bits μπορούν να μεταφέρονται από κάθε μεταδιδόμενο σύμβολο. Στο [39] έχει αναφερθεί υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, έως και 231 Mb/s, πάνω από το εύρος ζώνης της μπλε περιοχής του ορατού φάσματος (blue channel bandwidth).

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα σύστημα VLC με τη χρήση LED λευκού φωτός για τις ανάγκες του οικιακού δικτύου.



Εικόνα 15: Σύστημα VLC με τη χρήση λευκών LEDs σε εσωτερικό χώρο

#### 4.6.3 Προοπτική ενός Οπτικού Οικιακού Δικτύου

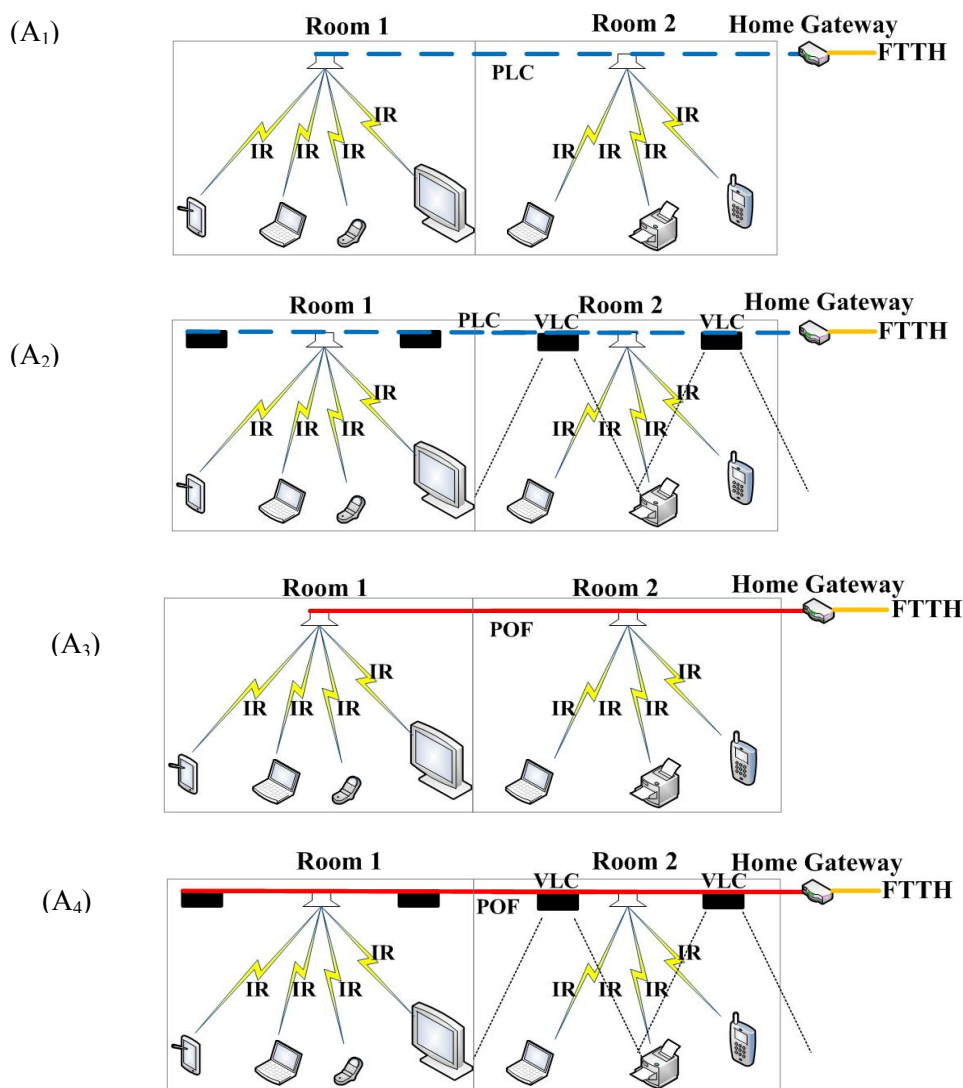
Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, φαίνεται ότι οι οπτικές ασύρματες τεχνολογίες δύναται να αποτελέσουν μια βιώσιμη επιλογή για τη διευκόλυνση της παροχής πολλών ευρυζωνικών υπηρεσιών, όπως η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας και οι Web 2.0 εφαρμογές [40], συμπεριλαμβανομένης της ανταλλαγής περιεχομένου, online gaming κλπ, στα μελλοντικά οικιακά δίκτυα. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα ασύρματης ραδιοεπικοινωνίας, υπάρχουν διάφορα ζητήματα που αφορούν την ανάπτυξη των οπτικών ασύρματων τεχνολογιών και παραμένουν ασαφή. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η επιλογή του οικιακού δικτύου κορμού, δηλαδή του τμήματος του δικτύου που συνδέει τους οπτικούς σταθμούς βάσης στον οικιακό δρομολογητή (gateway). Το δίκτυο κορμού θα πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίξει συνδεσιμότητα της τάξης των Gb/s, διαφορετικά οι ρυθμοί δεδομένων που παρέχονται από τους οπτικούς σταθμούς βάσης (hotspots) δε θα χρησιμοποιηθούν με αποτελεσματικό τρόπο. Η τεχνολογία PLC μπορεί να προσφέρει μια ενδιαφέρουσα λύση [41]. Εναλλακτικά, η οπτική ίνα, είτε κλασική είτε πλαστικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διασύνδεση των σταθμών βάσεων. Ένα άλλο ζήτημα που πρέπει να επιλυθεί είναι ποια τεχνολογία θα χρησιμοποιηθεί στο ίδιο το σύστημα για ασύρματες συνδέσεις. Θα πρέπει να στηριζόμαστε σε IR ή VLC ή και τα δύο;

Τα παραπάνω ζητήματα περιπλέκονται από το γεγονός ότι η διείσδυση της τεχνολογίας εξαρτάται από ένα συνδυασμό οικονομικών, κοινωνικών και σχετιζόμενων με την απόδοση κριτηρίων. Πρόσφατη ερευνητική εργασία [43] προσπάθησε να εξερενήσει αυτό το σύνθετο πρόβλημα, με την ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού οδικού χάρτη βασιζόμενου στις πολυκριτηριακές διαδικασίες λήψης απόφασης. Για το



σκοπό αυτό αξιολογήθηκαν τέσσερα εναλλακτικά σενάρια ανάπτυξης οπτικών τεχνολογιών στο πλαίσιο της δικτύωσης στο μελλοντικό οικιακό δίκτυο.

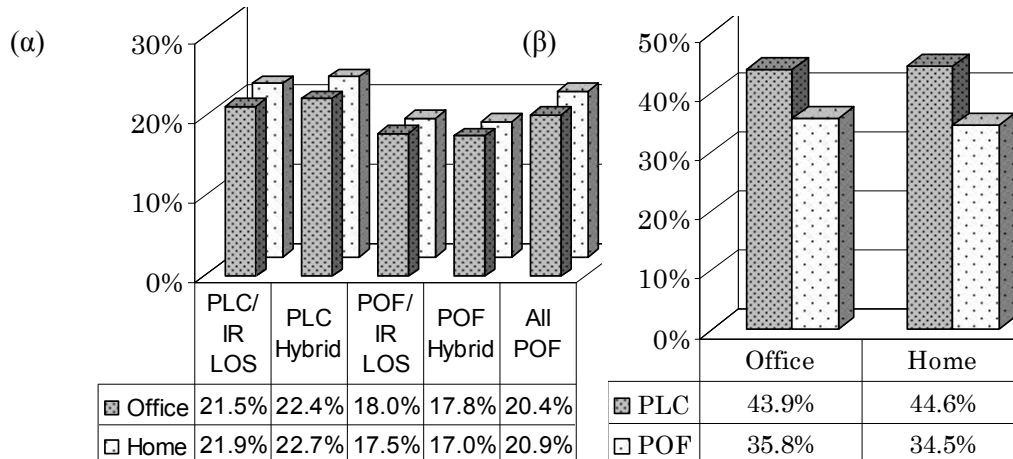
Το πρώτο ( $A_1$ ) βασίζεται σε αμφίδρομες IR, LOS συνδέσεις με ένα δίκτυο κορμού PLC. Το δεύτερο σενάριο ( $A_2$ ) είναι παρόμοιο με το  $A_1$  με την εξαίρεση ότι οι VLC λαμπτήρες παρέχουν συνδεσιμότητα κάτω καναλιού, ενισχύοντας την κάλυψη του συνολικού συστήματος. Τα VLC και IR υποσυστήματα μπορούν να συνδυαστούν σε ένα υψηλότερο επίπεδο δικτύου, όπως το στρώμα MAC [44], δημιουργώντας έτσι ένα υβριδικό σύστημα. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτό το σενάριο, το VLC χρησιμοποιείται μόνο για δεδομένα κάτω καναλιού. Οι άλλες δύο αρχιτεκτονικές  $A_3$  και  $A_4$  είναι παρόμοιες με τις  $A_1$  και  $A_2$  αντίστοιχα, εκτός από το ότι η πλαστική οπτική ίνα (POF) χρησιμοποιείται στο δίκτυο κορμού αντί του PLC. Οι αρχιτεκτονικές  $A_1$  και  $A_2$  έχουν το πλεονέκτημα της συμβατότητας με τις προσεγγίσεις που δεν απαιτούν την εγκατάσταση νέων καλωδίων. Τόσο τα PLC και όσο και τα POF αναμένεται να επιτύχουν συνδέσεις της τάξης των Gb/s στο εγγύς μέλλον. Ωστόσο, οι παραπάνω ενσύρματες εναλλακτικές λύσεις δεν είναι ακόμη εμπορικά διαθέσιμες, αλλά έχουν επιτυχώς επιδειχθεί στο εργαστήριο. Η πέμπτη εναλλακτική λύση ( $A_5$ ), είναι να επεκτείνει τις POF συνδέσεις μέχρι τα τερματικά των χρηστών [45]. Σε αυτό το σενάριο δεν προβλέπονται ασύρματες συνδέσεις. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα προαναφερθέντα εναλλακτικά σενάρια  $A_1$ - $A_4$  για την προοπτική του οπτικού οικιακού δικτύου.



Εικόνα 16: Εναλλακτικές Λύσεις για το μελλοντικό Οπτικό Οικιακό Δίκτυο

Σύμφωνα με την προαναφερθείσα ερευνητική εργασία αξιολογήθηκαν οι παραπάνω εναλλακτικές λύσεις τόσο για το σενάριο του οικιακού όσο και του εργασιακού δικτύου. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 17, το ενδιαφέρον έγκυται στο γεγονός ότι τα σενάρια τόσο στο γραφείο όσο και στο σπίτι είναι παρόμοια, με μικρές μόνο διαφορές στις προτεραιότητες των εναλλακτικών λύσεων. Η αρχιτεκτονική με υβριδικά

VLC/hotspots IR σε συνδυασμό με ένα PLC δίκτυο κορμού έρχεται πρώτη και ακολουθείται με μικρή διαφορά από την αρχιτεκτονική PLC/IR. Το σενάριο all-POF, όπου δεν χρησιμοποιούνται ασύρματες συνδέσεις, έρχεται τρίτο, απεικονίζοντας τις δυνατότητες των πλαστικών ινών στην ανάπτυξη των οικιακών δικτύων, ιδίως μακροπρόθεσμα. Τα υβριδικά POF και OW σχηματίζουν μία τρίτη κατηγορία εναλλακτικών λύσεων. Η Εικόνα 17 δείχνει ότι η προοπτική ενός οπτικού δικτύου δεν είναι ακόμη απολύτως σαφής και τα πλεονεκτήματα των OW αρχιτεκτονικών (χωρίς πρόσθετα καλώδια για τη σύνδεση των τερματικών σταθμών, κινητικότητα κλπ) έχουν κάπως επισκιαστεί από το επίπεδο της τεχνολογικής ωριμότητας για αυτές τις λύσεις.



Εικόνα 17: (α) Προτεραιότητες εναλλακτικών λύσεων για τα σενάρια στο σπίτι και στο γραφείο, (β) Αθροιστικές προτεραιότητες για PLC και POF

Τα αποτελέσματα είναι περισσότερο καθοριστικά για την τεχνολογία του δικτύου κορμού στην περίπτωση των ασύρματων συνδέσεων εντός των δωματίων. Οι προτεραιότητες για PLC και POF υπολογίζονται στην Εικόνα 17 (β) και οι PLC επικοινωνίες φαίνεται να αξιολογούνται καλύτερα από τις πλαστικές ίνες για τη διαχείριση της κίνησης στο δίκτυο κορμού. Άλλωστε, το PLC επιτρέπει την γρήγορη ανάπτυξη του δικτύου κορμού, με ρυθμούς δεδομένων που μπορεί να φτάσουν τελικά το 1 Gb/s. Αξίζει να αναφερθεί ότι το IEEE P1901 [46] είναι μια ομάδα εργασίας της IEEE με σκοπό την ανάπτυξη του παγκόσμιου προτύπου για PLC υψηλών ταχυτήτων. Η προδιαγραφή HomePlugAV2 που αποτελούσε την προοπτική της επόμενης γενιάς για τη γραμμή HomePlug έχει πλέον τεθεί σε λειτουργία περίπου στα 600 Mb/s. Η μετάδοση Gb/s πάνω σε PLC έχει επίσης προσεγγιστεί στο πλαίσιο του έργου OMEGA [47].

#### 4.7 Σύμφωνη Φώραση στις Οπτικές Επικοινωνίες

Σύμφωνα με την ανασκόπηση των τεχνολογιών οικιακής δικτύωσης που πραγματοποιήθηκε στα προηγούμενα υποκεφάλαια είναι εμφανές ότι μόνο τα οπτικά ασύρματα συστήματα προσφέρουν τα πλεονεκτήματα του πολύ μεγάλου ρυθμού σύνδεσης (που μπορεί να ξεπεράσει ακόμα και τα 10Gb/s) ενώ παράλληλα δεν έχουν καμία αλληλεπίδραση τόσο με υπάρχοντα ραδιοσυστήματα όσο και με βιολογικούς ιστούς, σε αντίθεση με τις προηγούμενες ασύρματες τεχνολογίες των οποίων οι βιολογικές επιδράσεις είναι ένα θέμα που δεν έχει ακόμα απαντηθεί. Εξαιτίας του μικρού μήκους κύματος, όλα τα παραπάνω συστήματα απαιτούν την ύπαρξη οπτικής επαφής μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Σε ένα τυπικό οικιακό ή επαγγελματικό χώρο, η ύπαρξη οπτικής επαφής συχνά δεν είναι εγγυημένη εξαιτίας των εμποδίων κινητών ή μη όπως έπιπλα, κινούμενο προσωπικό, κτλ.

Η σύμφωνη φώραση βασίζεται στην μίξη του οπτικού σήματος με ένα σήμα τοπικού οπτικού ταλαντωτή με σκοπό να έχουμε κέρδος ισχύος στο δέκτη. Η σύμφωνη φώραση έχει κατά καιρούς γίνει αντικείμενο εξέτασης σε ενσύρματα οπτικά συστήματα μετάδοσης με σκοπό την βελτίωση της φασματικής απόδοσης. Στο χώρο των οπτικών ασύρματων συστημάτων η σύμφωνη φώραση έχει προταθεί στην περίπτωση όπου υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού/δέκτη. Σε αντίθεση επίσης με τα κλασικά οπτικά συστήματα άμεσης φώρασης, το σύμφωνο οπτικό κανάλι έχει πολλές ομοιότητες με το ασύρματο ραδιοκανάλι και ιδιαίτερα μπορεί να ευνοήσει τεχνικές MIMO με σκοπό την περαιτέρω αύξηση του διαθέσιμου ρυθμού μετάδοσης. Δεδομένου ωστόσο ότι το διάχυτο κανάλι είναι από την φύση του επιλεκτικό στη συχνότητα εξαιτίας της πολυδιάσπασης, θα πρέπει να εξεταστούν και τρόποι αντιστάθμισης πιθανής αλληλοπαρεμβολής συμβόλων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η τεχνική ορθογώνιας διαμόρφωσης στο πεδίο των συχνοτήτων (orthogonal frequency domain multiplexing - OFDM) ως ένας αποτελεσματικός τρόπος αντιστάθμισης και μείωσης των επιπτώσεων του καναλιού.

Ο σχεδιασμός του ασύρματου συστήματος πομποδέκτη που θα χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο της σύμφωνης φάρασης αναλύεται στη συνέχεια στο Κεφάλαιο 6.



## 5. Πρότυπα Ασφαλείας

Η συμμόρφωση των πομπών laser με πρότυπα ασφαλείας έγκειται στον ασφαλή σχεδιασμό, στη χρήση και την εφαρμογή τους προκειμένου να μειωθούν τα ατυχήματα, ιδιαίτερα εκείνα που σχετίζονται με τον τραυματισμό των οφθαλμών. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ακόμα και μια μικρή ποσότητα εκπεμπόμενου φωτός μπορεί να οδηγήσει σε μόνιμες βλάβες των οφθαλμών, η πώληση και η χρήση των lasers υπόκειται σε διάφορους κανονισμούς.

Τα lasers μέτριας και υψηλής ισχύος είναι συνήθως επικίνδυνα επειδή ενδέχεται να κάψουν τον αμφιβληστροειδή του ματιού ή ακόμα και να προκαλέσουν εγκαύματα στο δέρμα. Προκειμένου να ελεγχθεί ο κίνδυνος ενός επικείμενου τραυματισμού, τα διάφορα πρότυπα, για παράδειγμα το ANSI Z136 στις Ηνωμένες Πολιτείες και το IEC 60825 διεθνώς, καθορίζουν κατηγορίες laser ανάλογα με την ισχύ και το μήκος κύματος. Αυτοί οι κανονισμοί καθορίζουν επίσης τα απαιτούμενα μέτρα ασφαλείας, όπως η σήμανση των lasers με ειδικές προειδοποιήσεις καθώς και η χρήση ειδικών γυαλιών ασφαλείας κατά τη διάρκεια λειτουργίας του laser.

Ο πίνακας που ακολουθεί συνοψίζει τις διάφορες παθολογικές βλάβες που προκαλούνται από τα lasers για διαφορετικά μήκη κύματος, χωρίς να περιλαμβάνουν τους τραυματισμούς εξαιτίας των παλμικών lasers.

Πίνακας 4: Παθολογικές βλάβες ανάλογα με το μήκος κύματος των lasers

Wavelength range	Pathological effect
180–315 nm (UV-B, UV-C)	φωτοκερατίτιδα (φλεγμονή του κερατοειδούς, ισοδύναμη με ηλιακό έγκαυμα)
315–400 nm (UV-A)	φωτοχημικός καταρράκτης (θόλωση του φακού του ματιού)
400–780 nm (visible)	φωτοχημική βλάβη στον αμφιβληστροειδή, έγκαυμα αμφιβληστροειδούς
780–1400 nm (near-IR)	καταρράκτης, έγκαυμα αμφιβληστροειδούς
1.4–3.0μm (IR)	υδατικό φωτοβολίδα (πρωτεΐνη στο υδατοειδές υγρό), καταρράκτης, έγκαυμα του κερατοειδούς
3.0 μm–1 mm	διάσπαση του αιματοοφθαλμικού φράγματος με επακόλουθη διαρροή των πρωτεϊνών στον πρόσθιο μέρος του οφθαλμού, έγκαυμα του κερατοειδούς

Αξίζει να σημειωθεί ότι το δέρμα είναι συνήθως λιγότερο ευαίσθητο στο εκπεμπόμενο φως του laser σε σχέση με τον οφθαλμό, αλλά η υπερβολική έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία από οποιαδήποτε πηγή (laser ή μη) μπορεί να προκαλέσει βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες επιπτώσεις παρόμοιες με το ηλιακό έγκαυμα, ενώ τα ορατά και υπέρυθρα μήκη κύματος είναι συνήθως επιβλαβή εξαιτίας της θερμικής βλάβης.

Η κατηγοριοποίηση ενός laser βασίζεται στο επιτρεπτό όριο εκπομπής AEL (Acceptable Emission Limit) που καθορίζεται για κάθε κατηγορία. Αναλυτικότερα, οι κατηγορίες για το laser παρουσιάζονται ως εξής:

- Κατηγορία 1: είναι ασφαλές για όλες της συνθήκης κανονικής χρήσης.
- Κατηγορία 1M: είναι ασφαλές για όλες της συνθήκης χρήσης εκτός από την περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται οπτικοί φακοί, όπως τα μικροσκόπια και τα τηλεσκόπια.
- Κατηγορία 2: είναι ασφαλές επειδή η αντανάκλαση του κερατοειδούς θα περιορίσει την έκθεση του οφθαλμού στο laser για λιγότερο από 0.25 δευτερόλεπτα. Αφορά μόνο τα lasers ορατού φωτός (400–700 nm).
- Κατηγορία 2M: είναι ασφαλές επειδή η αντανάκλαση του κερατοειδούς δεν είναι εμφανής μέσω των οπτικών οργάνων.
- Κατηγορία 3R: θεωρείται ασφαλές εάν χρησιμοποιηθεί προσεκτικά με περιορισμένη προβολή της δέσμης.

- Κατηγορία 3B: είναι επικίνδυνη, επειδή ο οφθαλμός εκτίθεται άμεσα, αλλά οι διάχυτες ανακλάσεις όπως εκείνες σε χαρτί ή σε άλλες λείες ματ επιφάνειες δεν είναι επιβλαβείς.
- Κατηγορία 4: είναι η υψηλότερη και πιο επικίνδυνη κατηγορία laser, η οποία περιλαμβάνει όλα τα lasers που υπερβαίνουν το AEL της κατηγορίας 3B.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι ισχύς των συνεχών κυματομορφών (cw power) του σήματος για τις κατηγορίες 1, 2, 3R και 3B σύμφωνα με το πρότυπο EN 60825-1:2007.



Εικόνα 18: Κατηγοριοποίηση των lasers σύμφωνα με τη μέγιστη επιτρεπόμενη cw ισχύς σε σχέση με το μήκος κύματος

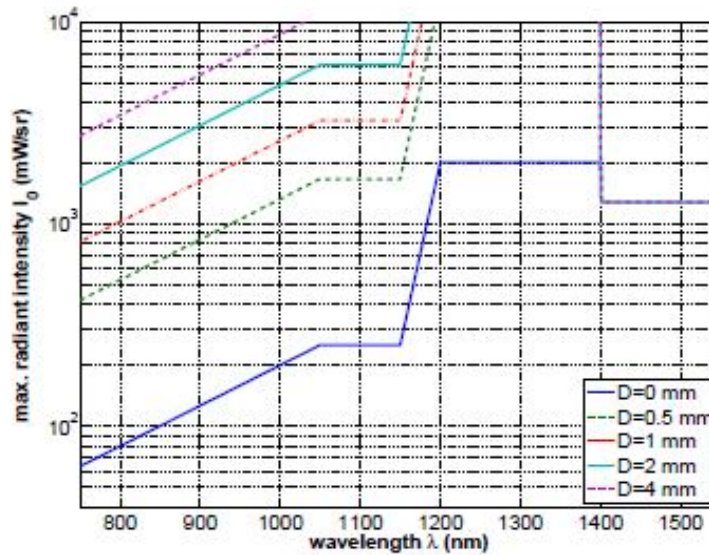
Στο ασύρματο οπτικό σύστημα που πρόκειται να αναπτυχθεί στο πλαίσιο του παρόντος έργου χρησιμοποιείται το laser SFL1550P της Thorlabs που εκπέμπει στα 1550nm με ισχύ 30mW για ρεύμα 180mA [49]. Ωστόσο, η ισχύς εν τέλει που μπορεί να φθάσει σε γυμνό οφθαλμό μέσω του ελεύθερου χώρου ανέρχεται στα 0,6mW ύστερα από τις απώλειες που προέρχονται από τον polarization controller και τον collimator που συνδέονται με τον οπτικό πομπό. Λαμβάνοντας υπόψη την κατηγοριοποίηση, που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 18, είναι εμφανές ότι ο πομπός τελικά εμπίπτει στην πρώτη κατηγορία (κατηγορία 1) για την προστασία των οφθαλμών, σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας που χρησιμοποιείται στο παρόν έργο.

Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί ότι οι οπτικές πηγές αυτής της κατηγορίας ταξινομούνται σύμφωνα με το μήκος κύματος και τη γωνιακή υποτέμνουσα  $\alpha$ , η οποία δίδεται από τον τύπο:

$$\tan(\alpha / 2) = \frac{D}{2d_{\text{measure}}} \quad (2)$$

όπου,  $D$  είναι η διάμετρος της πηγής και  $d_{\text{measure}}=100\text{mm}$ .

Η γωνιακή υποτέμνουσα καθώς και το μήκος κύματος καθορίζουν το αποδεκτό όριο εκπομπής AEL, που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις ειδικές συνθήκες ελέγχου που καθορίζονται στο πρότυπο IEC 60825-1:2007 edition 2. Το AEL και οι συνθήκες ελέγχου μπορούν να εκφραστούν ως η επιτρεπόμενη ακτινοβολία της πηγής (EIRP-ισοδύναμη ισοτροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς). Η εικόνα που ακολουθεί απεικονίζει την επιτρεπόμενη ακτινοβολία για διαφορετικές τιμές της διαμέτρου της πηγής.



Εικόνα 19: Επιτρεπόμενη ακτινοβολία της πηγής για διαφορετικές τιμές του D

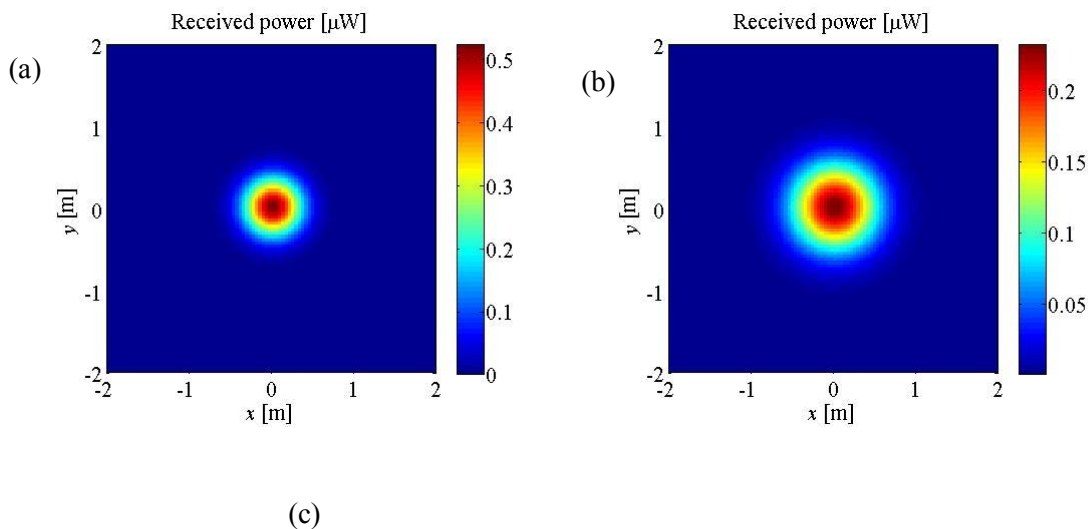
Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα, είναι εμφανές ότι αυξάνοντας το μέγεθος της διαμέτρου της πηγής, για παράδειγμα στην περίπτωση χρήσης ενός μέσου διάχυσης, παρατηρείται μια σημαντική αύξηση της ακτινοβολούμενης ισχύος για μήκη κύματος μικρότερα των 1400nm. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα 1500nm, μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπει και το laser που χρησιμοποιείται στο πλαίσιο του παρόντος ερευνητικού έργου, δεν σημειώνεται καμία αύξηση. Πράγματι για μήκη κύματος μικρότερα των 1400nm η διάμετρος της πηγής διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, ενώ για μεγαλύτερα των 1400nm η ακτινοβολούμενη ισχύς είναι ανεξάρτητη της διαμέτρου. Τα δεδομένα της παρούσας εικόνας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθοριστεί ο τύπος της πηγής έτσι ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις για συγκεκριμένο μήκος κύματος.

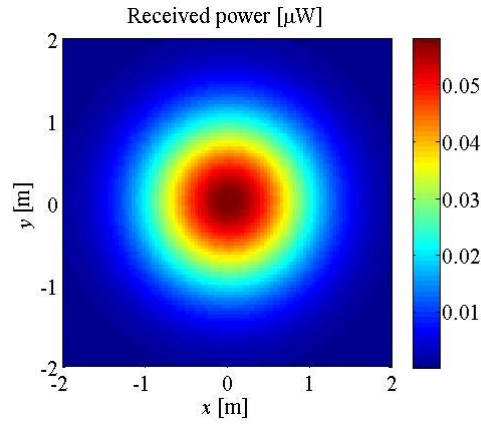
## 6. Σχεδιασμός του πομποδέκτη

Ο σχεδιασμός του οπτικού πομπού περιλαμβάνει α) την επιλογή του laser εκπομπής, β) την επιλογή του τρόπου και του τύπου διαμόρφωσης καθώς και γ) τα οπτικά στοιχεία του δέκτη. Σε αντίθεση με τα κλασικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα, οι οπτικές τεχνολογίες – πόσο δε μάλλον οι τεχνολογίες σύμφωνης φάρασης παρουσιάζουν αρκετές ιδιαιτερότητες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό του συστήματος. Ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου θέλουμε να επιτύχουμε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, θα πρέπει να προσέξουμε να μην θέσουμε παράλογες απαιτήσεις σε ότι αφορά και τα ηλεκτρονικά μέρη του συστήματος. Στο δέκτη ιδιαίτερη σημασία έχουν τα χαρακτηριστικά του τοπικού ταλαντωτή κυρίως και πάλι όσο αφορά την ισχύ και το εύρος γραμμής. Στα παρακάτω χρησιμοποιούμε το μοντέλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του Π1.2 ώστε να προσδιορίσουμε τις επιθυμητές τιμές των εν λόγω παραμέτρων καθώς και διάφορων άλλων πτυχών της διαδικασίας σχεδίασης του συστήματος

### 6.1 Κάλυψη του συστήματος

Σύμφωνα και με όσα έχουμε δείξει στο Π2.1 [50], από άποψη επιδόσεων του συστήματος δύο είναι οι βασικές παράμετροι που μας απασχολούν στο laser εκπομπής: α) η ισχύς εκπομπής και β) το εύρος γραμμής που καθορίζει και τον θόρυβο φάσης. Όσο αφορά την ισχύ εκπομπής θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι απαιτήσεις είναι μάλλον χαμηλές καθότι όπως έχουμε δει [50]. Ωστόσο θα πρέπει να τονιστεί ότι η ισχύς εκπομπής είναι συνάρτηση και της κάλυψης που επιθυμούμε να έχουμε στο χώρο όπου υπάρχουν τα τερματικά του χρήστη. Στην Εικόνα 20 δείχνουμε την ισχύ που υπολογίζουμε στο επίπεδο του δέκτη για ισχύ εκπομπής  $P_T=2\text{mW}$  που θεωρείται σχετικά μικρή ισχύς εκπομπής για την περίπτωση ενός ημιαγωγικού laser που χρησιμοποιείται στις οπτικές επικοινωνίες για διάφορα αρχικά εύρη δέσμης  $w_0$  θεωρώντας ότι ο πομπός βρίσκεται σε ύψος 3m από το επίπεδο του δέκτη. Επίσης θεωρούμε ότι ο πομπός είναι προσανατολισμένος κάθετα προς τα κάτω  $\mathbf{n}_T=(0,0,-1)$  ενώ ο δέκτης είναι προσανατολισμένος κάθετα προς τα κάτω,  $\mathbf{n}_R=(0,0,1)$ . Θεωρούμε ότι η επιφάνεια του δέκτη είναι ίση με  $A_R=1\text{cm}^2$ . Παρατηρούμε ότι ανάλογα με το αρχικό εύρος  $w_0$  πετυχαίνουμε διαφορετικές περιπτώσεις κάλυψης. Έτσι στην περίπτωση όπου  $w_0=3\mu\text{m}$ , δηλαδή η απόκλιση της δέσμης είναι  $\theta_b=\tan^{-1}(\lambda/\pi/w_0)\cong 9.3^\circ$  τότε η δέσμη παρουσιάζει μικρή σχετικά διεύρυνση και επομένως έχουμε μεν υψηλή ισχύ λήψης αλλά περιορισμένη κάλυψη εφόσον η ισχύς λήψης είναι μη μηδενική μόνο όταν η απόσταση από το κέντρο του δωματίου είναι μικρή. Στην Εικόνα 20 (b) δείχνουμε την ισχύ στο επίπεδο του δέκτη όταν το αρχικό εύρος της δέσμης είναι  $w_0=2\mu\text{m}$  που αντιστοιχεί σε μία απόκλιση  $\theta_b\cong 14^\circ$ . Παρατηρούμε ότι η ισχύς κορυφής έχει πέσει στο μισό αλλά η περιοχή όπου η ισχύς λήψης έχει μη μηδενικές τιμές έχει αυξηθεί σημαντικά. Ακόμα πιο διευρυμένη είναι η δέσμη στην περίπτωση όπου  $w_0=1\mu\text{m}$  η οποία και αντιστοιχεί σε  $\theta_b\cong 26^\circ$ .





Εικόνα 20: Ισχύς λήψης στο επίπεδο του δέκτη για διάφορες τιμές του αρχικού πλάτους για a)  $w_0=3\mu\text{m}$ , b)  $w_0=2\mu\text{m}$  και c)  $w_0=1\mu\text{m}$ .

Στη συνέχεια έχει ενδιαφέρον να υπολογίσουμε το πηλίκο σήμα-προς-θόρυβο SNR στο δέκτη. Αν υποθέσουμε ότι χρησιμοποιούμε διαμόρφωση τεσσάρων επιπέδων ( $M=4$ ), π.χ. QPSK τότε το πηλίκο σήμα προς θόρυβο απουσία θορύβου φάσης και θερμικού θορύβου μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\text{SNR}_b = \frac{2RP_R P_{LO}}{\sigma_{SH}^2 \log_2 M} \quad (3)$$

όπου  $R$  είναι η αποκρισιμότητα του δέκτη,  $P_{LO}$  είναι η ισχύς του τοπικού ταλαντωτή και  $\sigma_{SH}^2$  είναι η ισχύς του θορύβου βολής που προσεγγίζεται από την σχέση,

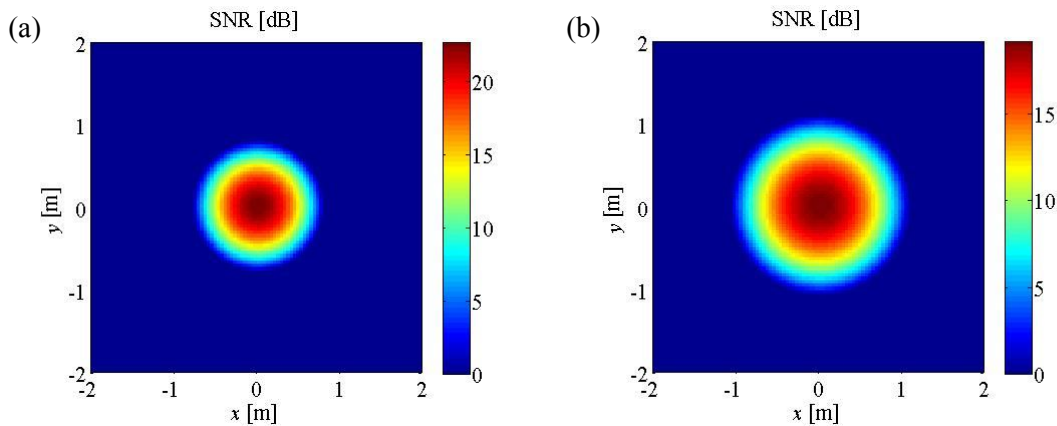
$$\sigma_{SH}^2 \cong 2qRP_n B \quad (4)$$

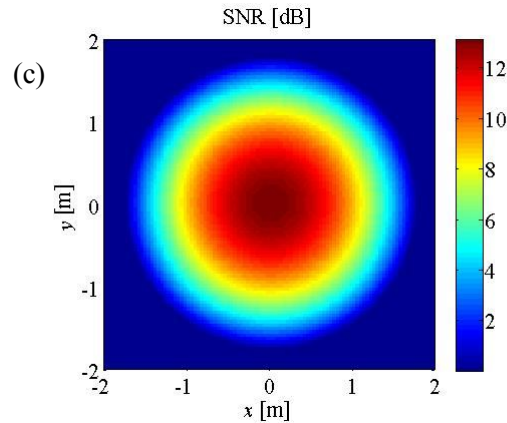
όπου  $P_n$  είναι η οπτική ισχύς που προσπίπτει εξαιτίας του θορύβου του περιβάλλοντος η οποία υπολογίζεται από την σχέση

$$P_n = p_n \Delta \lambda A_R \quad (5)$$

όπου  $A_R$  είναι η ενεργός επιφάνεια του δέκτη,  $\Delta \lambda$  το εύρος του οπτικού φίλτρου που χρησιμοποιούμε και  $p_n$  η φωτεινότητα του περιβάλλοντος χώρου.

δείχνουμε το πηλίκο σήμα προς θόρυβο στο δέκτη όπως προκύπτει από την (3). Σύμφωνα με όσα είδαμε και στο Π2.1 θεωρούμε ότι για το QPSK αποδεκτές τιμές του  $\text{SNR}_b$  είναι μεγαλύτερες από 8dB. Για τις παραμέτρους που αφορούν τον θόρυβο βολής αναφερόμαστε στον σχετικό πίνακα στο Π2.1. και θεωρούμε το εύρος οπτικού φίλτρου δέκτη  $\Delta \lambda$  ίσο με 5nm, την επιφάνεια δέκτη  $A_R=1\text{cm}^2$  και την φωτεινότητα του χώρου ίση με  $1\text{mW/nm/cm}^2$  ενώ το εύρος ζώνης θεωρείται ίσο με  $B=1\text{GHz}$ . Από τα διαγράμματα στην Εικόνα 21 υπολογίζουμε ότι η διάμετρος του κύκλου  $D_{cov}$  που περιέχει τα σημεία τα οποία έχουν  $\text{SNR}_b$  μεγαλύτερο από 8dB είναι  $D_{cov}=1.24\text{m}$  στην περίπτωση όπου  $w_0=3\mu\text{m}$ ,  $D_{cov}=1.58\text{m}$  στην περίπτωση όπου  $w_0=2\mu\text{m}$  και  $D_{cov}=1.98\text{m}$  στην περίπτωση όπου  $w_0=1\mu\text{m}$ .

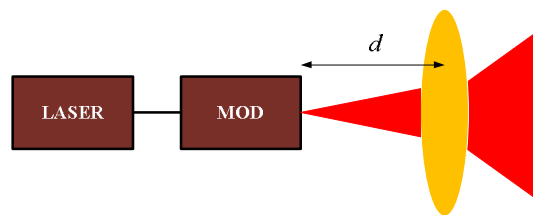




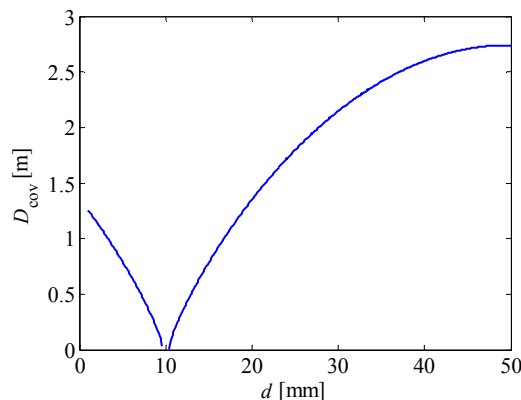
Εικόνα 21: Πηλίκo σήμα προς θόρυβο στο επίπεδο του δέκτη για διάφορες τιμές του αρχικού πλάτους για a)  $w_0=3\mu\text{m}$ , b)  $w_0=2\mu\text{m}$  και c)  $w_0=1\mu\text{m}$ .

## 6.2 Οπτικά στοιχεία του πομπού

Τα παραπάνω διαγράμματα έχουν προκύψει χωρίς να θεωρούμε κάποιου είδους οπτικά στοιχεία στον πομπό. Ωστόσο όπως συζητήσαμε και στο Π1.1 [52] μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε συστήματα φακών τα οποία να εστιάσουν ή να αυξήσουν την απόκλιση της δέσμης. Αρχικά μπορούμε να θεωρήσουμε έναν απλό φακό σε απόσταση  $d$  από την έξοδο του διαμορφωτή όπως δείχνει η Εικόνα 22. Στην Εικόνα 23 δείχνουμε την διάμετρο  $D_{\text{cov}}$  που προκύπτει από τους υπολογισμούς του  $\text{SNR}_b$  για διάφορες τιμές του  $d$  θεωρώντας ότι η εστιακή απόσταση του φακού είναι  $f=1\text{cm}$ .



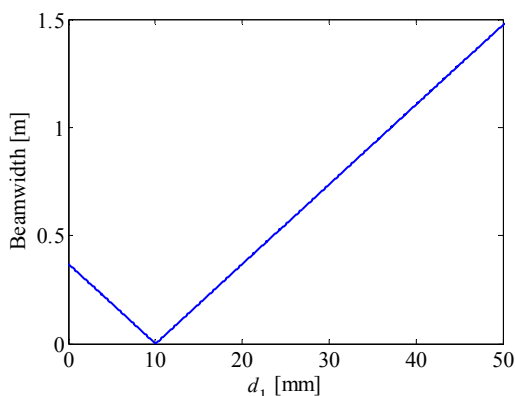
Εικόνα 22: Χρήση ενός φακού για την μεταβολή της απόκλισης της οπτικής δέσμης.



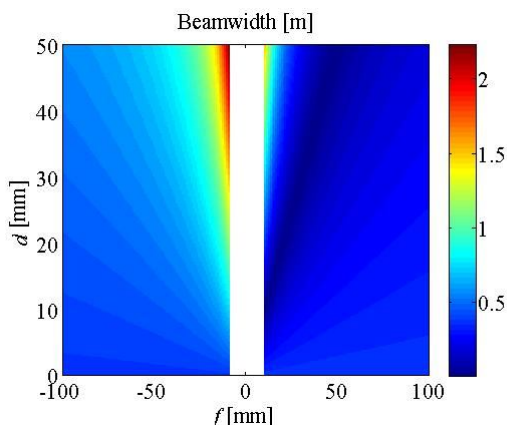
Εικόνα 23: Κάλυψη του συστήματος σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ πηγής και φακού.

Έχει ενδιαφέρον να διερευνήσουμε την επίδραση και της εστιακής απόστασης  $f$  του φακού. Στην περίπτωση αυτή ο υπολογισμός του  $D_{\text{cov}}$  δεν είναι πρακτικός δεδομένου ότι ο αριθμός των υπολογισμών πρέπει να

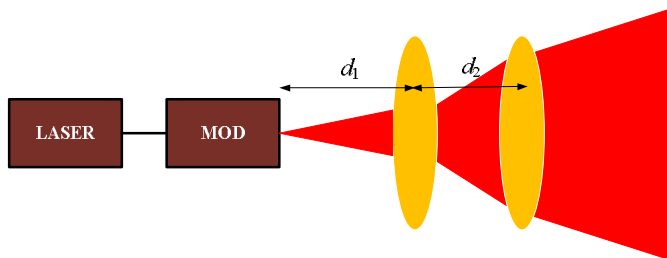
επαναληφθεί για όλους τους διαφορετικούς συνδυασμούς του  $f$  και  $d$ . Είναι πιο εύκολο να υπολογίσουμε το εύρος της δέσμης  $w(L)$  σύμφωνα και με την θεωρία που παρουσιάσαμε στο Π1.1. Αρχικά στην Εικόνα 24 έχουμε παραστήσει γραφικά το εύρος της δέσμης  $w(L)$  στην περίπτωση όπου έχουμε έναν φακό τον οποίο μετακινούμε στο διάστημα  $0 \leq d \leq 5\text{cm}$  χωρίς να μεταβάλλουμε την εστιακή απόσταση του φακού. Παρατηρούμε ότι η κάλυψη  $D_{\text{cov}}$  και το εύρος της δέσμης  $w(L)$  έχουν παρόμοια συμπεριφορά, κάτι που φυσικά είναι αναμενόμενο επειδή στην περίπτωση όπου η ισχύς λήψης είναι αρκετή η κάλυψη του συστήματος εξαρτάται κυρίως από το άνοιγμα της δέσμης στο επίπεδο του δέκτη. Στην Εικόνα 25 δείχνουμε το εύρος της δέσμης για διάφορους συνδυασμούς του  $d$  και του  $f$ . Είναι φανερό ότι για την επίτευξη του μεγαλύτερου δυνατού εύρους στον δέκτη θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε έναν φακό με όσο το δυνατόν μικρότερη εστιακή απόσταση και σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απόσταση από τον πομπό.



Εικόνα 24: Εύρος δέσμης που αντιστοιχεί στην Εικόνα 23

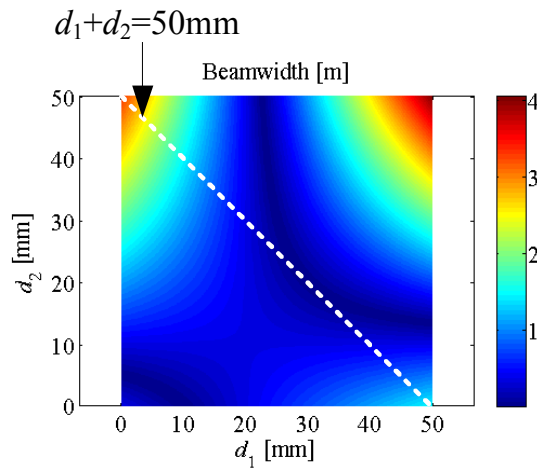


Εικόνα 25: Εύρος δέσμης για διάφορες τιμές του  $d$  και του  $f$ .



Εικόνα 26: Χρήση δύο φακών για την μεταβολή της απόκλισης της οπτικής δέσμης.





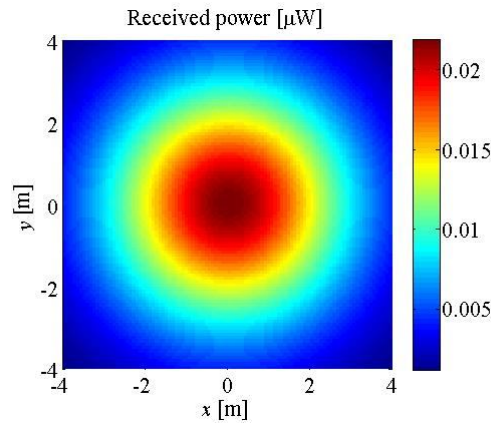
Εικόνα 27: Εύρος δέσμης όταν χρησιμοποιούνται δύο φακοί

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η εστιακή απόσταση πολλών εμπορικά διαθέσιμων φακών δεν μπορεί εύκολα να γίνει μικρότερη από μερικά mm. Επίσης από ότι καθίσταται φανερό στο Στην Εικόνα 25 είναι επιθυμητό να χρησιμοποιήσουμε φακούς με αρνητικό  $f$  επειδή από την κατασκευή τους έχουν την ιδιότητα να αυξάνουν την απόκλιση της δέσμης.

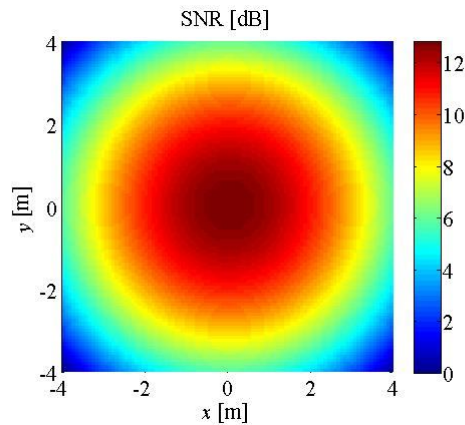
Θα μπορούσαμε επίσης να θεωρήσουμε πιο πολύπλοκα συστήματα φακών, π.χ. με χρήση 2 φακών σε σειρά όπως δείχνει και η Εικόνα 26. Στην Εικόνα 27 έχουμε παραστήσει το εύρος της δέσμης για διάφορους συνδυασμούς των αποστάσεων των φακών  $d_1$  και  $d_2$  θεωρώντας ότι η εστιακή απόσταση είναι  $f=1\text{cm}$ . Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή μπορούμε να έχουμε σημαντική αύξηση του εύρους της δέσμης η οποία μεγιστοποιείται για  $d_1=d_2=50\text{mm}$  όπου  $w(L)\cong 4\text{m}$ . Ωστόσο θα πρέπει να σημειωθεί ότι το εν λόγω οπτικό σύστημα έχει μήκος  $d_1+d_2=100\text{mm}$  και είναι πιο ογκώδες από το σύστημα του ενός φακού το οποίο έχει μήκος το πολύ μέχρι 50mm όπως φαίνεται στην Εικόνα 24. Επομένως αν επιθυμούμε να συγκρίνουμε τις επιδόσεις για τις ίδιες διαστάσεις θα πρέπει να κινηθούμε κάτω από την διακεκομμένη γραμμή στην Εικόνα 27 από όπου φαίνεται καθαρά ότι η βέλτιστη διαρρύθμιση είναι να τοποθετήσουμε τον ένα φακό πολύ κοντά στο πομπό και τον δεύτερο στην μέγιστη δυνατή απόσταση. Στην περίπτωση αυτή πετυχαίνουμε ένα τελικό εύρος δέσμης ίσο με  $w(L)\cong 3.3\text{m}$  που είναι σχεδόν διπλάσιο από το αυτό που πετυχαίνουμε με το σύστημα του απλού φακού στην Εικόνα 24.

Στην Εικόνα 28 και στην Εικόνα 29 δείχνουμε την ισχύ εκπομπής και το πηλίκο σήμα-προς-θόρυβο στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούμε δύο φακούς στην βέλτιστη διαρρύθμιση τους όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο θεωρώντας ότι η αρχική δέσμη έχει εύρος  $w_0=3\mu\text{m}$ . Για να εκμεταλλευτούμε καλύτερα το μεγαλύτερο εύρος της δέσμης θα πρέπει να εκπέμπουμε μεγαλύτερη ισχύ και να χρησιμοποιήσουμε ισχυρότερο τοπικό ταλαντωτή. Στα διαγράμματα έχουμε υποθέσει ότι  $P_T=10\text{mW}$  και  $P_{LO}=5\text{mW}$ . Παρατηρούμε πως σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν χρησιμοποιείται κανένα οπτικό σύστημα στο (a) πετυχαίνουμε πολύ μεγαλύτερη κάλυψη η οποία είναι περίπου ίση με  $D_{cov}=4.4\text{m}$ . Προκύπτει επομένως ότι με χρήση κατάλληλων οπτικών στοιχείων μπορούμε να επιτύχουμε τριπλασιασμό της κάλυψης του συστήματος και να βελτιώσουμε σημαντικά τις ανάγκες ευθυγράμμισης του πομπού και του δέκτη.





Εικόνα 28: Ισχύς λήψης στο επίπεδο του δέκτη στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούμε την βέλτιστη διαρρύθμιση δύο φακών με θετικό  $f$ .



Εικόνα 29: Πηλίκιο σήμα-προς-θόρυβο στο επίπεδο του δέκτη στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούμε την βέλτιστη διαρρύθμιση δύο φακών με θετικό  $f$ .

### 6.3 Εκπομπή από οπτική ίνα

Επειδή πολλές φορές οι διαμορφωτές που υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμοι είναι προσαρμοσμένοι σε οπτική ίνα (fiber pigtailed) έχει ενδιαφέρον να αναλύσουμε την κάλυψη του συστήματος στην περίπτωση αυτή. Ο τρόπος διάδοσης μίας μονότροπης οπτικής ίνας μπορεί να προσεγγιστεί πολύ καλά από μία Gaussian κατανομή [53] και επομένως η θεωρία που έχουμε αναπτύξει στα πλαίσια του Π1.1. μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση αυτή αφού βέβαια υπολογίσουμε το κατάλληλο αρχικό εύρος  $w_0$  της οπτικής δέσμης όταν αυτή εξέρχεται από την οπτική ίνα. Σύμφωνα με την θεωρία που παρουσιάζεται στην [53], για μία μονότροπη ή πολύτροπη ίνα με βηματικό δείκτη διάθλασης, μπορούμε να προσεγγίσουμε το  $w_0$  ως εξής [54]:

$$\frac{w_0}{a} \cong A + \frac{B}{V^{3/2}} + \frac{C}{V^6} \quad (6)$$

όπου

$$A \cong 0.65 \quad (7)$$

$$B \cong 1.619 \quad (8)$$

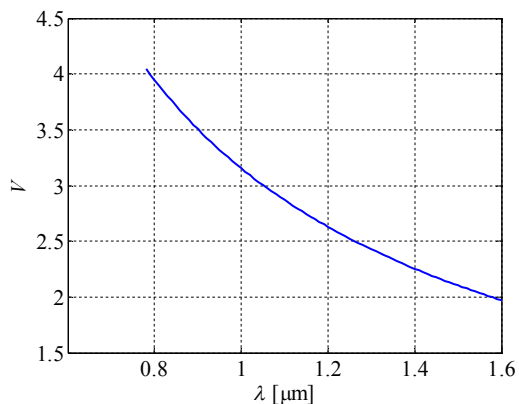
$$C \cong 2.879 \quad (9)$$

ενώ η παράμετρος κανονικοποιημένης συχνότητας  $V$  δίνεται από την σχέση,

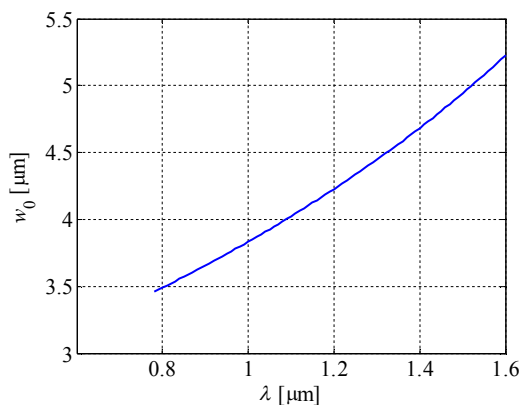
$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \cong \frac{2\pi a n_1}{\lambda} \sqrt{2\Delta} \quad (10)$$

όπου  $a$  είναι η ακτίνα της ίνας  $n_1$  και  $n_2$  είναι οι δείκτες διάθλασης του πυρήνα και του μανδύα της ίνας ενώ με  $\Delta$  συμβολίζουμε την σχετική διαφορά μεταξύ των δεικτών διάθλασης,

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \tag{11}$$

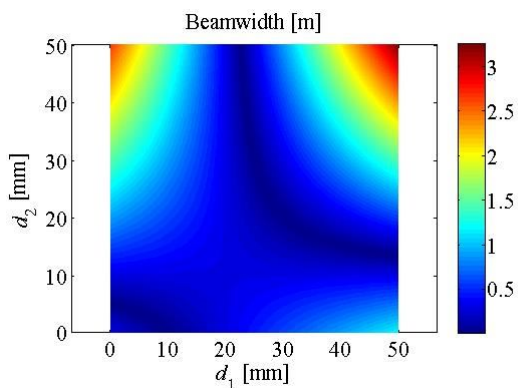


Εικόνα 30: Η παράμετρος της κανονικοποιημένης συχνότητας σε συνάρτηση με το μήκος κύματος για μία ίνα SMF-28.



Εικόνα 31: Το αρχικό μήκος της δέσμης σε συνάρτηση με το μήκος κύματος για μία ίνα SMF-28.

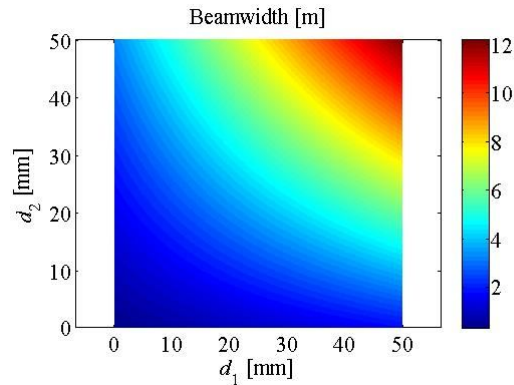
Στην Εικόνα 30 και στην Εικόνα 31 δείχνουμε την μεταβολή της παραμέτρου κανονικοποιημένης συχνότητας  $V$  και του εύρους  $w_0$  της Gaussian κατανομής που προσεγγίζει τον τρόπο διάδοσης μίας οπτικής ίνας SMF-28 που αποτελεί από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μονότροπες οπτικές ίνες. Παρατηρούμε ότι στο μήκος κύματος  $\lambda=1550\text{nm}$  η οπτική δέσμη έχει εύρος περίπου  $w_0 \cong 5\mu\text{m}$ .



Εικόνα 32: Εύρος δέσμης στην περίπτωση  $w_0=5\mu\text{m}$ , όταν χρησιμοποιούνται δύο φακοί με θετικό  $f$

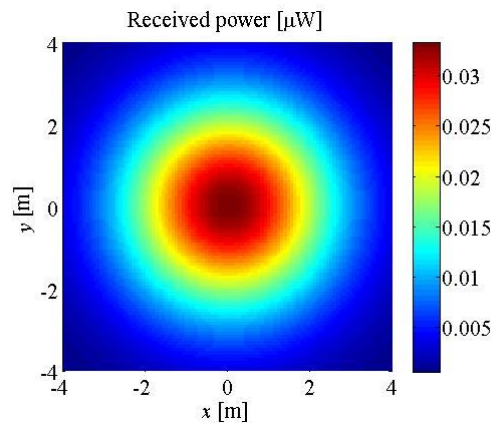
Στην περίπτωση αυτή είναι φανερό ότι οι διαστάσεις του οπτικού συστήματος που χρειάζονται για να πετύχουμε ικανή κάλυψη θα είναι σημαντικά πιο μεγάλες εξαιτίας του μεγαλύτερου  $w_0$  και επομένως έχει

ιδιαίτερη σημασία να χρησιμοποιήσουμε το κατάλληλο είδος φακού. Για να δούμε την διαφορά που επιτυγχάνουμε στο εύρος της δέσμης στην περίπτωση ενός συστήματος δύο φακών με θετικό  $f=1\text{cm}$  (Εικόνα 32) και το στο και ενός συστήματος με αρνητικό  $f=-1\text{cm}$  (Εικόνα 33).

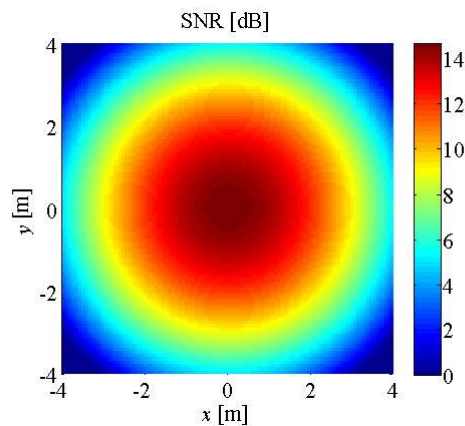


Εικόνα 33: Εύρος δέσμης στην περίπτωση  $w_0=5\mu\text{m}$ , όταν χρησιμοποιούνται δύο φακοί με αρνητικό  $f$

Είναι φανερό ότι στην δεύτερη περίπτωση επιτυγχάνουμε πολύ καλύτερα αποτελέσματα από ότι στην πρώτη καθώς η ακτίνα δεν χρειάζεται να εστιαστεί εντός του οπτικού συστήματος και στην συνέχεια να διευρυνθεί. Επομένως στις περιπτώσεις όπου το φως εξέρχεται από μία οπτική ίνα, είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται αποκλίνοντες φακοί με αρνητικό  $f$  ώστε το μέγεθος του οπτικού συστήματος να μην είναι μεγάλο.



Εικόνα 34: Ισχύς στο επίπεδο του δέκτη στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται δύο αποκλίνοντες φακοί με  $f=-1\text{cm}$  που απέχουν 25cm μεταξύ τους και από την πηγή.

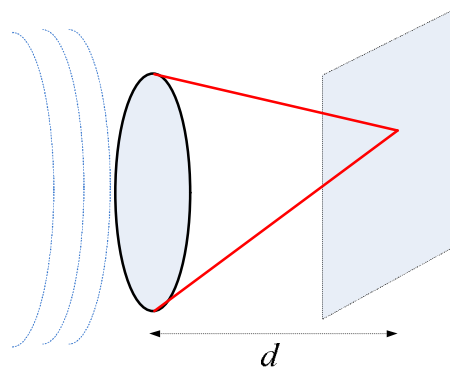


Εικόνα 35: Πηλίκo σήμα-προς-θόρυβο στο επίπεδο του δέκτη στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται δύο αποκλίνοντες φακοί με  $f=-1\text{cm}$  που απέχουν 30cm μεταξύ τους και από την πηγή.

Στην Εικόνα 34 και στην Εικόνα 35 δείχνουμε την ισχύ εκπομπής και το πηλίκο σήμα-προς-θόρυβο στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούμε δύο φακούς που απέχουν μεταξύ τους απόσταση 15cm και ο πρώτος φακός βρίσκεται σε απόσταση 25cm από την πηγή ( $d_1=d_2=25\text{cm}$ ). Η αρχική δέσμη έχει εύρος  $w_0=5\mu\text{m}$ . Παρατηρούμε πως πετυχαίνουμε ακόμα μεγαλύτερη κάλυψη η οποία είναι περίπου ίση με  $D_{\text{cov}}\cong 6\text{m}$ . Στην περίπτωση αυτή έχουμε θεωρήσει  $P_T=10\text{mW}$  και  $P_{\text{LO}}=5\text{mW}$  για να επιτύχουμε ικανοποιητικό  $\text{SNR}_b$ . Παρά το γεγονός επομένως ότι η δέσμη μας έχει πολύ μεγαλύτερο  $w_0$ , η χρήση φακών με αρνητικό  $f$  μπορεί να αυξήσει σημαντικά την κάλυψη του συστήματος.

## 6.4 Οπτικά στοιχεία του δέκτη

Τα οπτικά στοιχεία που χρησιμοποιούμε στον δέκτη είναι κατά κανόνα πιο απλά πάντα βέβαια όταν βέβαια υπάρχει οπτική επαφή και δεν χρειάζεται να κάνουμε κάποια επιπλέον διόρθωση φάσης στην περίπτωση της διάχυτης ακτινοβολίας. Όταν έχουμε οπτική επαφή αρκεί να χρησιμοποιήσουμε έναν συγκλίνοντα φακό ( $f>0$ ) και να εστιάσουμε το προσπίπτον πεδίο στο δέκτη. Η Εικόνα 36 συνοψίζει την λειτουργία του φακού στο δέκτη.



Εικόνα 36: Ο φακός του δέκτη

Όπως είδαμε στο Π1.1 το πώς το φως εστιάζεται από τον φακό στο δέκτη καθορίζεται από τον μετασχηματισμό Fourier. Έχει ενδιαφέρον να επαναλάβουμε την ανάλυση, αυτή την φορά για απόσταση  $d$  που μπορεί να είναι διαφορετική από την εστιακή απόσταση του φακού  $f$ . Το προσπίπτον πεδίο  $u_R(x,y)$  αναλύεται ως εξής:

$$u_R(x,y) \cong A \exp\left(-jk \frac{x^2 + y^2}{2L}\right) \quad (12)$$

όπου το πεδίο  $A$  είναι το πλάτος του πεδίου που θεωρείται σταθερό πάνω στην επιφάνεια του φακού επειδή βρισκόμαστε αρκετά μακριά από την πηγή. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολικές συντεταγμένες ( $\rho, \varphi$ ) για να γράψουμε το προσπίπτον πεδίο

$$u_R(\rho) \cong A \Psi(\rho) \exp\left(-jk \frac{\rho^2}{2L}\right) \quad (13)$$

όπου έχουμε προσθέσει την συνάρτηση  $\Psi(\rho)$  η οποία είναι ίση με 1 για  $|\rho| \leq R$  και μηδέν διαφορετικά και όπου  $R$  είναι η ακτίνα του φακού. Με την προσθήκη της συνάρτησης  $\Psi(\rho)$  η (13) ισχύει πλέον σε κάθε σημείο στο χώρο. Ο φακός προσδίδει επιπλέον φάση  $jk\rho^2/(2f)$  στο κύμα ενώ στην συνέχεια το κύμα διαδίδεται απόσταση  $d$ . Σύμφωνα και με όσα είδαμε στο Π1.1, το κύμα σε απόσταση  $d$  από τον φακό δίνεται από την σχέση:

$$u_F(x,y) = \frac{j}{\lambda d} \int_{-\infty}^{+\infty} dx_1 \int_{-\infty}^{+\infty} dy_1 u_R(\rho_1) \exp\left(j \frac{k\rho_1^2}{2f}\right) \exp\left(-\frac{jk}{2d} \left[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2\right]\right) \quad (14)$$

Πραγματοποιώντας την ολοκλήρωση στις πολικές συντεταγμένες έχουμε:

$$u_F(\rho) = \frac{jA}{\lambda s} \exp\left(j \frac{k\rho^2}{2s}\right) \int_0^R d\rho_1 \rho_1 \int_0^{2\pi} d\phi_1 \exp\left(-\frac{jk\rho\rho_1}{s} \cos(\phi - \phi_1)\right) \quad (15)$$

όπου έχουμε αντικαταστήσει

$$\frac{1}{s} = \frac{1}{f} - \frac{1}{L} \quad (16)$$

και έχουμε θεωρήσει ότι  $d=s$ . Δεδομένου ότι [55]:

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\phi e^{ja \cos \phi} = J_0(a) \quad (17)$$

θα έχουμε

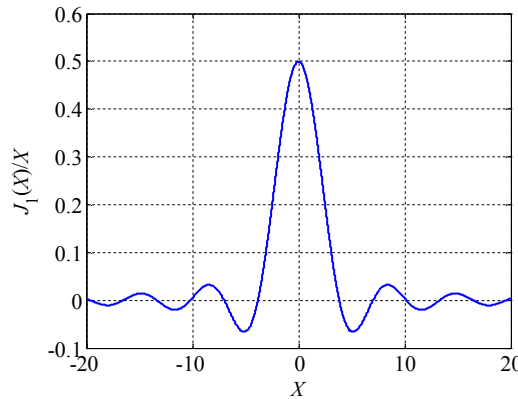
$$u_F(\rho) = \frac{j2\pi A}{\lambda s} \exp\left(-j \frac{k\rho^2}{2s}\right) \int_0^R d\rho_1 \rho_1 J_0\left(\frac{k\rho_1\rho}{s}\right) \quad (18)$$

Το ολοκλήρωμα υπολογίζεται εύκολα δεδομένου ότι [55],

$$\int_0^b x J_0(ax) dx = \frac{bJ_1(ab)}{a} \quad (19)$$

οπότε

$$u_F(\rho) = \frac{j2\pi AR^2}{\lambda s} \frac{\lambda s}{2\pi R\rho} J_1\left(\frac{2\pi R\rho}{\lambda s}\right) \exp\left(-j \frac{2\pi\rho^2}{2\lambda s}\right) \quad (20)$$



Εικόνα 37: Η συνάρτηση  $J_1(X)/X$ .

Στην Εικόνα 37 απεικονίζουμε γραφικά την συνάρτηση  $J_1(X)/X$  η οποία σύμφωνα με την (20) περιγράφει την κατανομή του πεδίου σε απόσταση  $d=s$  από τον φακό. Παρατηρούμε ότι ο πρώτος μηδενισμός του πεδίου συμβαίνει στο  $X \cong X_0 = 3.83$ . Επομένως το πεδίο βρίσκεται περιορισμένο στην περιοχή που καθορίζεται από την συνθήκη,  $2\pi R\rho/(\lambda s) \leq X_0$  ή ισοδύναμα  $\rho/\lambda \leq sX_0/(2\pi R) \cong 0.6s/R$ . Επομένως το πεδίο βρίσκεται περιορισμένο εντός ενός κύκλου με διάμετρο  $\cong (1.2s/R)\lambda = (2.4s/D)\lambda$  όπου  $D$  είναι η διάμετρος του φακού. Δεδομένου ότι η εστιακή απόσταση  $f$  είναι πολύ μικρότερη από την απόσταση που χωρίζει τον πομπό και τον δέκτη  $L$ ,  $L \gg f$  έπεται από την (16) ότι  $s \cong f$  και επομένως η διάμετρος στην οποία περιορίζεται το πεδίο ταυτίζεται με την ακτίνα Airy ,

$$D_a \cong 2.4 \frac{f}{D} \lambda = 2.4F\lambda \quad (21)$$

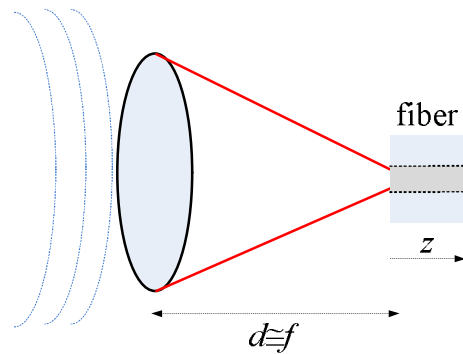
όπου  $F$  είναι ο αριθμός- $F$  του φακού που ορίζεται από το πηλίκο της εστιακής απόστασης προς της διάμετρο του φακού. Η (21) έχει μία σημαντική επίπτωση στην επιλογή του φακού. Αν επιθυμούμε να εστιάσουμε το φως σε μία μονότροπη οπτική ίνα τότε η διάμετρος  $D_a$  θα πρέπει να είναι συγκρίσιμη με την διάμετρο της

οπτικής ίνας  $D_f$ . Στην περίπτωση της ίνας SMF-28 έχουμε  $D_f \approx 8\mu\text{m}$  οπότε στο μήκος κύματος  $\lambda=1550\text{nm}$  θα πρέπει να έχουμε  $F \approx 1.3$ .

Παρατηρούμε ότι η (18) υπονοεί ότι το πεδίο περιέχει και μία παραβολική μεταβολή φάσης  $k\rho^2/(2s)$  η οποία μεγιστοποιείται στην άκρη του δίσκου Airy, δηλαδή για  $\rho=D_a/2$ . Στο σημείο εκείνο θα έχουμε  $\phi_{\max} = \pi D_a^2 / (2\lambda s)$ . Στην περίπτωση μας και αν υποθέσουμε ότι  $D_a \approx 8\mu\text{m}$  θα έχουμε  $\phi_{\max} \approx 0.002\pi$  κάτι που υπονοεί ότι η φάση μπορεί να θεωρηθεί σταθερή εντός του δίσκου Airy και δεν δημιουργεί προβλήματα κατά την σύζευξη της ακτινοβολίας με την οπτική ίνα.

Όσο αφορά το μέγεθος του φακού λήψης, ίσως το κύριο κριτήριο απόδοσης είναι το πηλίκο σήμα-προς-θόρυβο  $\text{SNR}_b$  που επιτυγχάνουμε. Συγκεκριμένα, αν επιλέξουμε μικρών διαστάσεων φακό τότε θα έχουμε χαμηλή ισχύ σήματος και θορύβου βολής, ωστόσο ο θερμικός θόρυβος ο οποίος δεν εξαρτάται από το σήμα μπορεί τελικά να οδηγήσει σε μείωση του  $\text{SNR}_b$ . Ωστόσο θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι το ασύμφωνο ή το μερικώς ασύμφωνο φως δεν μπορεί εύκολα να συζευχθεί με μία μονότροπη οπτική ίνα επειδή θα πρέπει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο να ταιριάζει με τον βασικό τρόπο διάδοσης της. Για τον σωστό υπολογισμό του  $\text{SNR}_b$  επομένως θα πρέπει να λάβουμε υπόψη το ποσοστό του φωτός περιβάλλοντος που τελικά εισέρχεται στο εσωτερικό της οπτικής ίνας. Οι εν λόγω υπολογισμοί και το πώς αυτοί επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος εξετάζεται στην επόμενη ενότητα.

## 6.5 Σύζευξη του φωτός στην οπτική ίνα του δέκτη.



Εικόνα 38: Εστίαση φωτός σε μία μονότροπη οπτική ίνα

Στην Εικόνα 38 δείχνουμε ένα οπτικό σύστημα που εστιάζει την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε μία οπτική ίνα. Η φύση της ακτινοβολίας παίζει ιδιαίτερο ρόλο στον υπολογισμό της ισχύος που τελικά εισέρχεται στην οπτική ίνα. Η ισχύς αυτή καθορίζεται από το πόσο καλά προσαρμόζεται το πεδίο  $E_F(x,y)$  που εστιάζεται από τον φακό στην είσοδο της οπτικής ίνας με τον πεδίο του τρόπου διάδοσης της οπτικής ίνας  $E_0(x,y)$ . Στην περίπτωση της σύμφωνης ακτινοβολίας που προέρχεται για παράδειγμα από μία πηγή laser είναι δυνατό να εισάγουμε ένα ικανοποιητικό κλάσμα της οπτικής ισχύος μέσα στην ίνα επειδή το πεδίο στο επίπεδο του φακού έχει καλά καθορισμένη φάση και σχεδόν ομοιόμορφη ένταση. Αντίθετα στην περίπτωση του ασύμφωνου ή του μερικώς σύμφωνου φωτός είναι πολύ πιο δύσκολο να έχουμε ικανοποιητική σύζευξη. Από τηλεπικοινωνιακής σκοπιάς, η παραπάνω παρατήρηση έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς πρακτικά σημαίνει ότι το φως που προέρχεται από το φωτισμό του περιβάλλοντος δεν μπορεί να συζευχθεί στην οπτική ίνα και επομένως ο αντίστοιχος θόρυβος shot θα είναι σημαντικά μικρότερος στο δέκτη.

Για να υπολογίσουμε την ισχύ του σήματος και του θορύβου που εισάγονται στην οπτική ίνα όταν αυτή χρησιμοποιείται στον δέκτη χρησιμοποιούμε την θεωρία των στοχαστικών δεσμών σύμφωνα με την οποία η δέσμη στο επίπεδο του φακού περιγράφεται από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του πεδίου,

$$W_{pq}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle E_p(\mathbf{r}_1) E_q^*(\mathbf{r}_1) \rangle \quad (22)$$

όπου  $p$  και  $q$  μπορεί να συμβολίζουν είτε το  $x$  είτε το  $y$ . Σύμφωνα με το μοντέλο Gauss-Schell [57] μπορούμε να προσεγγίσουμε την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης βάσει τη σχέσης [58],

$$W_{pq}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = A_p A_q B_{pq} \exp\left(-\frac{r_1^2 + r_2^2}{4\sigma^2} - \frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|^2}{2\delta^2}\right) \quad (23)$$

όπου τα πλάτη  $A_p$  και  $A_q$  καθορίζονται από την μέση οπτική ισχύ του πεδίου, το  $B_{pq}$  καθορίζει το επίπεδο συσχέτισης των  $x$  και  $y$  πολώσεων, το  $\sigma$  συσχετίζεται με το μέσο εύρος της δέσμης ενώ το καθορίζει το  $\delta$  σχετίζεται με το μήκος συσχέτισης της. Ο συντελεστής  $B_{xy}$  και το  $\delta$  καθορίζουν το επίπεδο συνοχής της προσπίπτουσας δέσμης. Για παράδειγμα για μία σύμφωνη δέσμη με καλά καθορισμένη πόλωση αναμένουμε  $B_{xy} \cong 0$  οπότε δεν έχουμε σημαντικές μεταβολές στην πόλωση της και  $\delta \rightarrow \infty$  οπότε η δέσμη είναι πολύ μεγάλη χωρική συμφωνία. Το προσπίπτον πεδίο  $\mathbf{E}=(E_x, E_y)$  εστιάζεται από τον φακό και μέρος του διεγείρει τον τρόπο διάδοσης της οπτικής ίνας  $\mathbf{E}_0(x, y)$ . Ισοδύναμα θα μπορούσαμε να διαδώσουμε τον τρόπο διάδοσης προς τα πίσω για να λάβουμε ένα ισοδύναμο πεδίο  $\mathbf{E}_1(x, y)=(F_x, F_y)$  το οποίο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να μελετήσουμε τη σύζευξη του πεδίου  $\mathbf{E}=(E_x, E_y)$ . Ο συντελεστής διέγερσης για την  $x$ -πόλωση και την  $y$ -πόλωση γράφεται ως εξής:

$$C_x = \int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy E_x(x, y) F_x(x, y) = \int d\mathbf{r} E_x F_x \quad (24)$$

$$C_y = \int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy E_y(x, y) F_y(x, y) = \int d\mathbf{r} E_y F_y \quad (25)$$

όπου το ολοκλήρωμα στο τρίτο μέρος των εξισώσεων για συντομία εννοούμε ολοκλήρωση σε όλο το χώρο. Θεωρούμε ότι ο τρόπος διάδοσης είναι κανονικοποιημένος έτσι ώστε [58],

$$\int d\mathbf{r} |F_x(\mathbf{r})|^2 = \int d\mathbf{r} |F_y(\mathbf{r})|^2 = 1 \quad (26)$$

Η μέση ισχύς σε κάθε πόλωση δίνεται από τις σχέσεις

$$P_x = \langle |C_x|^2 \rangle = \int d\mathbf{r}_1 \int d\mathbf{r}_2 W_{xx}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) F_x(\mathbf{r}_1) F_x^*(\mathbf{r}_2) A(\mathbf{r}_1) A(\mathbf{r}_2) \quad (27)$$

$$P_y = \langle |C_y|^2 \rangle = \int d\mathbf{r}_1 \int d\mathbf{r}_2 W_{yy}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) F_y(\mathbf{r}_1) F_y^*(\mathbf{r}_2) A(\mathbf{r}_1) A(\mathbf{r}_2) \quad (28)$$

όπου η συνάρτηση  $A(\mathbf{r})$  περιγράφει την επιφάνεια του φακού,

$$A(\mathbf{r}) = A(x, y) = \begin{cases} 1, & x^2 + y^2 \leq \frac{1}{4} D^2 \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (29)$$

Η προσπίπτουσα ισχύς  $P_i$  στον φακό δίνεται από την σχέση:

$$P_i = P_x + P_y \quad (30)$$

όπου

$$P_x = \int d\mathbf{r} A^2(\mathbf{r}) W_{xx}(\mathbf{r}, \mathbf{r}) \quad (31)$$

$$P_y = \int d\mathbf{r} A^2(\mathbf{r}) W_{yy}(\mathbf{r}, \mathbf{r}) \quad (32)$$

Για να υπολογίσουμε πιο εύκολα τα ολοκληρώματα μπορούμε να προσεγγίσουμε τον τρόπο διάδοσης με μία Gaussian κατανομή, δηλαδή:

$$F_x(\mathbf{r}) = F_y(\mathbf{r}) \cong \frac{1}{w_A} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left(-\frac{r^2}{w_A^2}\right) \quad (33)$$

όπου το εύρος  $w_A$  σχετίζεται με το εύρος  $w$  του τρόπου της ίνας με την σχέση:

$$w_A = \frac{\lambda f}{\pi w} \quad (34)$$

ενώ ο φακός προσεγγίζεται από ένα Gaussian άνοιγμα με πλάτος  $W=D(1/8)^{1/2}$  [59],

$$A(\mathbf{r}) \cong \frac{1}{W} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left(-\frac{r^2}{W^2}\right) \quad (35)$$

Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να δείξουμε ότι η ισχύς που εισέρχεται στην οπτική ίνα για την  $x$ -πόλωση και την  $y$ -πόλωση δίνεται από την σχέση:

$$P_x = \frac{4A_x^2 B_{xx}}{(w_A W)^2} \left[ \frac{1}{u^4} - \frac{1}{4\delta^4} \right]^{-1} \quad (36)$$

$$P_y = \frac{4A_y^2 B_{yy}}{(w_A W)^2} \left[ \frac{1}{u^4} - \frac{1}{4\delta^4} \right]^{-1} \quad (37)$$

όπου

$$\frac{1}{u^2} = \frac{1}{4\sigma^2} + \frac{1}{W^2} + \frac{1}{w_A^2} + \frac{1}{2\delta^2} \quad (38)$$

ενώ η προσπίπτουσα ισχύς δίνεται από την σχέση:

$$P_{ix} = \frac{4A_x^2 B_{xx} \sigma_0^2}{W^2} \quad (39)$$

$$P_{iy} = \frac{4A_y^2 B_{yy} \sigma_0^2}{W^2} \quad (40)$$

όπου

$$\frac{1}{\sigma_0^2} = \frac{1}{\sigma^2} + \frac{4}{W^2} \quad (41)$$

Για να υπολογίσουμε το ποσοστό σύζευξης  $\eta$  χρησιμοποιούμε την σχέση:

$$\eta = \frac{P_x + P_y}{P_{ix} + P_{iy}} = \frac{1}{w_A^2 \sigma_0^2} \left( \frac{1}{u^4} - \frac{1}{4\delta^4} \right)^{-1} \quad (42)$$

όπου έχουμε υποθέσει ότι

$$A_x^2 B_{xx} = A_y^2 B_{yy} \quad (43)$$

δηλαδή ότι η προσπίπτουσα ισχύ είναι ίση και για τις δύο πολώσεις,

$$P_{ix} = P_{iy} = \frac{P_i}{2} \quad (44)$$

Στην περίπτωση απόλυτα σύμφωνης ακτινοβολίας θα έχουμε  $\delta \rightarrow \infty$  οπότε

$$\eta = \frac{\frac{4}{w_A^2} \left( \frac{1}{4\sigma^2} + \frac{1}{W^2} \right)}{\left( \frac{1}{4\sigma^2} + \frac{1}{W^2} + \frac{1}{w_A^2} \right)^2} \quad (45)$$

Αν θέσουμε  $\alpha = 1/W^2 + 1/(4\sigma^2)$  και  $\beta = 1/w_A^2$  τότε θα έχουμε  $\eta = 4\alpha\beta/(\alpha+\beta)^2$  η οποία μεγιστοποιείται για  $\alpha=\beta$  οπότε έχουμε και  $\eta=1$ . Δηλαδή οι διαστάσεις του βέλτιστου φακού καθορίζονται από την σχέση:

$$\frac{1}{4\sigma^2} + \frac{1}{W^2} = \frac{1}{w_A^2} \quad (46)$$

η οποία στην περίπτωση όπου η μεταβολές της ισχύος της δέσμης δεν είναι σημαντικές πάνω στο άνοιγμα ( $\sigma \rightarrow \infty$ ) συνεπάγεται ότι  $w_A = W$  οπότε θα έχουμε από την (34),



$$F = \frac{f}{D} = \frac{\pi w}{\lambda \sqrt{8}} \quad (47)$$

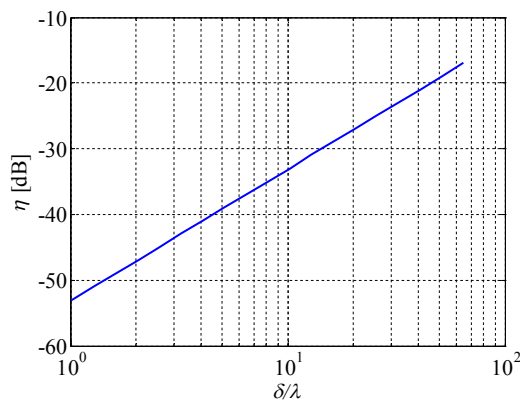
η οποία δίνει την βέλτιστη παράμετρος  $F$  για την οποία πετυχαίνουμε την καλύτερη δυνατή σύζευξη του φωτός. Στην περίπτωση της ίνας που θεωρήσαμε στην προηγούμενη παράγραφο θα έχουμε  $w \cong 5 \mu\text{m}$  για  $\lambda \cong 1550 \text{nm}$  οπότε καταλήγουμε σε  $F \cong 4$ .

Στη συνέχεια θεωρούμε την σύζευξη του φωτός του περιβάλλοντος στο εσωτερικό της οπτικής ίνας. Το περιβάλλον φως είναι ασύμφωνο και επομένως χαρακτηρίζεται από μικρό  $\delta$ . Στην περίπτωση του ηλιακού φωτός το μήκος συνοχής έχει υπολογιστεί της τάξης των μερικών δεκάδων μήκων κύματος [60] ενώ στην περίπτωση των διόδων LED που χρησιμοποιούνται για φωτισμό, το μήκος συνοχής είναι της τάξης των μερικών μήκων κύματος [61]. Οι τηλεπικοινωνιακές LED έχουν μήκος συνοχής συγκρίσιμο με αυτό του ηλιακού φωτός [62]. Στην περίπτωση  $W = w_A$ ,  $\sigma \rightarrow \infty$  θα έχουμε

$$\eta = \frac{\frac{4}{W^4}}{\left(\frac{2}{W^2} + \frac{1}{2\delta^2}\right)^2 - \frac{1}{4\delta^4}} \quad (48)$$

όπου για  $\delta \ll W$  μπορούμε να κάνουμε την προσέγγιση,  $(2/W^2 + 1/(2\delta^2))^2 \cong 1/(4\delta^4) + 2/(W^2\delta^2)$  οπότε θα έχουμε:

$$\eta \cong 2 \frac{\delta^2}{W^2} = 16 \frac{\delta^2}{D^2} \quad (49)$$



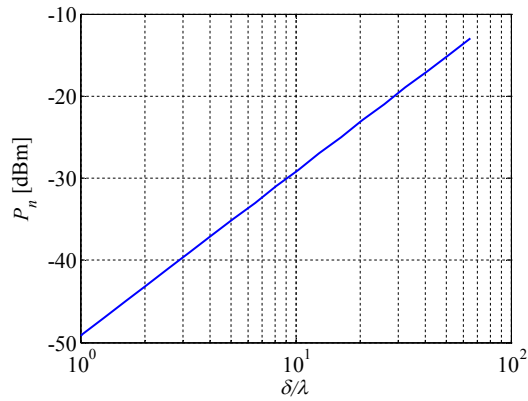
Εικόνα 39: Απώλειες σύζευξης όπως αυτή προσεγγίζεται από την (49).

Στην Εικόνα 39 παραθέτουμε τις τιμές που υπολογίζουμε το ποσοστό σύζευξης  $\eta$  σύμφωνα με την (49) για διάφορους λόγους του πηλίκου  $\delta/\lambda$  για μία επιφάνεια φακού  $A_R = \pi D^2/4 = 1 \text{cm}^2$  θεωρώντας ότι το μήκος κύματος είναι  $\lambda = 1550 \text{nm}$ . Παρατηρούμε ότι οι τιμές του  $\eta$  είναι αρκετά χαμηλές ακόμα και όταν το  $\delta$  είναι της τάξης των μερικών δεκάδων  $\lambda$ .

Όσο αφορά την ισχύ που εισέρχεται στην οπτική ίνα από τον φωτισμό του περιβάλλοντος είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι όταν  $D/\delta \gg 1$ , δηλαδή η διάμετρος του φακού είναι πολύ μεγαλύτερες από το μήκος συνοχής, θα έχουμε:

$$P_n = \eta p_n \Delta \lambda A_R \cong 4\pi \delta^2 \eta p_n \Delta \lambda \quad (50)$$

δηλαδή η ισχύς θα είναι ανεξάρτητη των διαστάσεων του φακού.

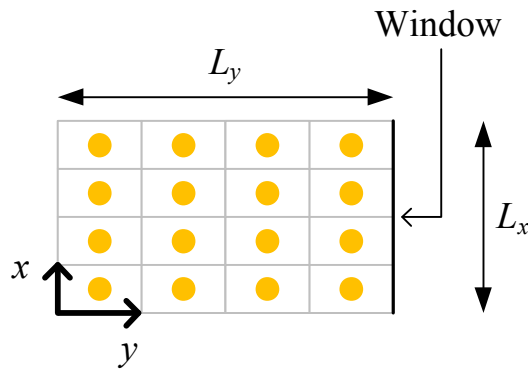


Εικόνα 40: Ισχύς που εισέρχεται στην οπτική ίνα από τον φωτισμό του περιβάλλοντος.

Στην Εικόνα 41 έχουμε παραστήσει γραφικά την ισχύ που εισέρχεται στην οπτική ίνα και προέρχεται από τον φωτισμό του περιβάλλοντος, έχοντας θεωρήσει ότι  $\Delta\lambda=40\text{nm}$  και  $p_n=1\text{mW}/\text{cm}^2/\text{nm}$ . Παρατηρούμε ότι ακόμα και για μεγάλα  $\delta/\lambda$  η ισχύς αυτή παραμένει μικρότερη των  $-10\text{dBm}$  και επομένως στην περίπτωση που εστιάζουμε το φως σε μία οπτική ίνα ο θόρυβος shot θα οφείλεται κυρίως στον τοπικό ταλαντωτή και όχι στον φως του περιβάλλοντος.

### 6.6 Υπολογισμός του θορύβου περιβάλλοντος

Δεδομένων και των όσων αναλύσαμε παραπάνω είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε το συνολικό SNR του συστήματος που θα μας καθοδηγήσει στον σχεδιασμό του συστήματος. Καταρχήν θα πρέπει να υπολογίσουμε την ισχύ του περιβάλλοντος θορύβου. Για το σκοπό αυτό θεωρούμε ένα δωμάτιο  $5\text{m} \times 7.5\text{m} \times 3.5\text{m}$  το οποίο έχει τοποθετημένες  $4 \times 4$  λάμπες φωτισμού, οι οποίες είναι τοποθετημένες στο ταβάνι όπως δείχνει η Εικόνα 41.



Εικόνα 41: Τοποθέτηση φωτιστικών στο δωμάτιο που θεωρούμε στους υπολογισμούς μας.

Το είδος του λαμπτήρα που χρησιμοποιούμε παίζει σημαντικό ρόλο στα φασματικά χαρακτηριστικά της ιδιαίτερα στο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ο Πίνακας 5 συνοψίζει τις φασματικές πυκνότητες ισχύος  $s_{\text{lamp}}$  σε δύο διαφορετικά μήκη κύματος τα οποία λαμβάνουμε υπόψη μας κατά τον σχεδιασμό της ζεύξης.

Πίνακας 5: Πηγές φωτός

Λαμπτήρες πυρακτώσεως ή αλογόνου [100W]	
$s_{\text{lamp}} (\lambda=780\text{nm})$	$0.04\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$
$s_{\text{lamp}} (\lambda=1550\text{nm})$	$0.03\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$

Λαμπτήρες φθορισμού [100W]	
$s_{\text{lamp}} (\lambda=780\text{nm})$	0.01 W/m <sup>2</sup> /nm
$s_{\text{lamp}} (\lambda=1550\text{nm})$	-
Λαμπτήρες LED	
$s_{\text{lamp}} (\lambda=780\text{nm})$	-
$s_{\text{lamp}} (\lambda=1550\text{nm})$	-
Ηλιακό φως	
$s_{\text{sun}} (\lambda=780\text{nm})$	0.8 W/m <sup>2</sup> /nm
$s_{\text{sun}} (\lambda=1550\text{nm})$	0.2 W/m <sup>2</sup> /nm

Για να υπολογίσουμε την φασματική πυκνότητα ισχύος  $p_n$  του περιβάλλοντος θα πρέπει να λάβουμε υπόψη και τα παράθυρα του δωματίου τα οποία δέχονται το φως το ηλίου και το διαχέουν μέσα στο δωμάτιο. Στην ουσία αντιμετωπίζουμε το κάθε παράθυρο ως ένα μεγάλο αριθμό από Lambertian φωτεινές πηγές. Ο τύπος ο οποίος καθορίζει το  $p_n$  στην ουσία αθροίζει την συνεισφορά της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τους λαμπτήρες φωτισμού και τα παράθυρα του δωματίου [63]:

$$p_n(\mathbf{r}) = p_{\text{sun}} \sum_i \int_{W_i} d\mathbf{r}_1 \frac{\cos\phi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)}{\pi |\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|^2} \cos\theta(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) + p_{\text{lamp}} \frac{\nu+1}{2\pi} \sum_{\mu} \frac{\cos^{\nu} \phi_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_{\mu})}{\pi |\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\mu}|^2} \cos\theta(\mathbf{r}, \mathbf{r}_{\mu}) \quad (51)$$

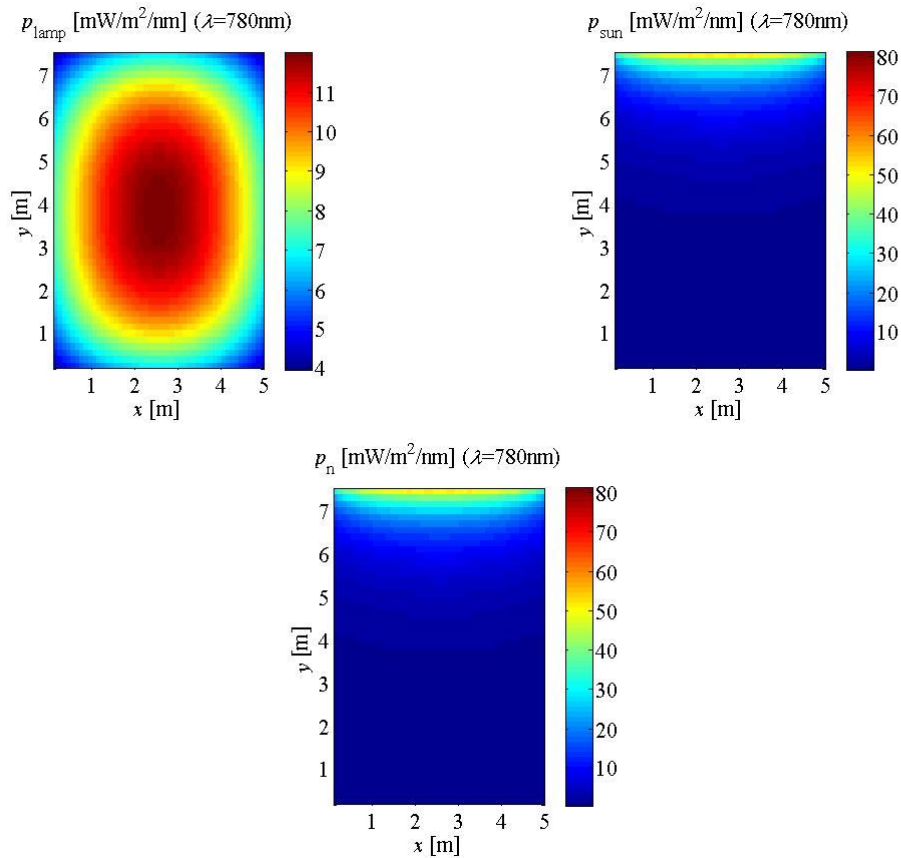
όπου

$$\cos\phi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = \frac{\mathbf{n}_w \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_1)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|} \quad (52)$$

$$\cos\phi_{\mu}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_{\mu}) = \frac{\mathbf{n}_{\mu} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\mu})}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\mu}|} \quad (53)$$

$$\cos\theta(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = \frac{\mathbf{n}_R \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_1)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|} \quad (54)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις  $s_{\text{lamp}}$  είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος που εκπέμπουν οι λαμπτήρες φωτισμού του δωματίου. Τυπικές τιμές της αναφέρει ο Πίνακας 5 για διάφορα είδη λαμπτήρων. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως και αλογόνου έχουν αρκετά ευρύ φάσμα εκπομπής τόσο στα μικρά μήκη κύματος ( $\lambda=780\text{nm}$ ) όσο και σε μεγαλύτερα μήκη κύματος ( $\lambda=1550\text{nm}$ ). Οι λαμπτήρες φθορισμού εκπέμπουν αμελητέα ισχύ κοντά στο  $\lambda=1550\text{nm}$  ενώ οι λαμπτήρες LED θεωρούμε ότι εκπέμπουν αμελητέα ισχύ και στις δύο περιοχές μηκών κύματος. Επίσης με  $s_{\text{sun}}$  συμβολίζουμε την φασματική πυκνότητα ισχύος του ηλιακού φωτός. Ο Πίνακας 5 αναφέρει τυπικές τιμές του  $p_{\text{sun}}$  στα δύο μήκη κύματος που μας ενδιαφέρουν [65]. Στην (51) με  $\nu$  συμβολίζουμε την τάξη του Lambertian διαγράμματος που για τους περισσότερους λαμπτήρες είναι  $\nu=2$  ενώ με  $W_i$  συμβολίζουμε την επιφάνεια του  $i$ -οστού παραθύρου, με  $\mathbf{r}_{\mu}$  και  $\mathbf{n}_{\mu}$  την θέση και τον προσανατολισμό του  $\mu$ -οστού λαμπτήρα και με  $\mathbf{n}_R$  τον προσανατολισμό του δέκτη.



Εικόνα 42: Υπολογισμός του  $p_n$  στην περίπτωση των λαμπτήρων αλογόνου για  $\lambda=780\text{nm}$ .

Πίνακας 6: Τιμές του  $p_n$

Περίπτωση	$p_n$ (Avg) [mW/m <sup>2</sup> /nm]	$p_n$ (Max) [mW/m <sup>2</sup> /nm]	$p_n$ (Min) [mW/m <sup>2</sup> /nm]
$\lambda=780\text{nm}$			
Λαμπτήρες πυρακτώσεως	15	87	4
Λαμπτήρες Φθορισμού	9	82	1
Λαμπτήρες LED	7	80	1
$\lambda=1550\text{nm}$			
Λαμπτήρες πυρακτώσεως	4	21	1
Λαμπτήρες Φθορισμού	2	20	0.4
Λαμπτήρες LED	2	20	0.4

Στην Εικόνα 42 δείχνουμε την τιμή του  $p_n$  που υπολογίζουμε από την (51) στην περίπτωση των λαμπτήρων αλογόνου για  $\lambda=780\text{nm}$ . Είναι προφανές από το σχήμα, ότι το  $p_n$  οφείλεται κυρίως στο ηλιακό φως. Ο Πίνακας 6 συνοψίζει τις ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές του  $p_n$  για τις διάφορες πηγές φωτισμού που θεωρήσαμε στα δύο μήκη κύματος που αναφέραμε. Παρατηρούμε ότι το  $p_n$  κυμαίνεται σε τιμές το πολύ μέχρι  $80\text{mW/m}^2/\text{nm}$  κάτι που σημαίνει ότι ένας υπέρυθρος δέκτης με επιφάνεια  $1\text{cm}^2$  στην περιοχή των  $700\text{nm}-1800\text{nm}$  μπορεί να προσλάβει μέχρι και  $\cong 8\text{mW}$  αν θεωρήσουμε ότι το  $p_n$  δεν μεταβάλλεται σε αυτήν την φασματική περιοχή. Στην πράξη βέβαια αυτή η ισχύς θα είναι πολύ μικρότερη καθότι όπως δείχνει και ο Πίνακας 6 το  $p_n$  μεταβάλλεται σημαντικά με το μήκος κύματος. Επίσης η χρήση ενός οπτικού φίλτρου μπορεί να μειώσει σημαντικά την ισχύ του περιβάλλοντος φωτός που λαμβάνει ο δέκτης όπως θα δούμε και παρακάτω.

## 6.7 Υπολογισμός του συνολικού SNR για τον ομόδυνο δέκτη

Στην ενότητα αυτή θα υπολογίσουμε το πηλίκο σήμα-προς-θόρυβο στην περίπτωση της ομόδυνης φάρασης για έναν πιο ρεαλιστικό δέκτη που χρησιμοποιεί ποικιλομορφία φάσης. Όπως είδαμε στο Π1.2 [51] απουσία του θορύβου φάσης το σήμα στο αυτόν ισούται με:

$$i_I = \frac{R\sqrt{P_{LO}P_R}}{2}e_I + n_I \quad (55)$$

$$i_Q = \frac{R\sqrt{P_{LO}P_R}}{2}e_Q + n_Q \quad (56)$$

Η συνιστώσα του θορύβου έχει ισχύ,

$$\langle n_I^2 \rangle = \langle n_Q^2 \rangle \cong qR(P_{LO} + p_n \Delta \lambda A_{\text{eff}})B + \frac{1}{2}S_{\text{TH}}B \quad (57)$$

όπου  $S_{\text{TH}}/2$  είναι η φασματική πυκνότητα του θερμικού θορύβου σε κάθε έξοδο του δέκτη,  $A_{\text{eff}}$  είναι η ενεργός επιφάνεια του δέκτη και η οποία ισούται με την επιφάνεια του συστήματος εστίασης  $A_R$  της δέσμης στην περίπτωση όπου δεν χρησιμοποιείται οπτική ίνα. Όταν χρησιμοποιούμε οπτική ίνα, είδαμε ότι η επιφάνεια αυτή θα πρέπει να ισούται με  $4\pi\delta^2$  όπου  $\delta$  το μήκος συνοχής του περιβάλλοντος φωτός στην περίπτωση όπου  $\delta^2 \ll A_R^2$ . Η μέση ισχύς το σήματος δίνεται από την σχέση:

$$P_I = \langle i_I^2 \rangle = \frac{1}{4}R^2P_{LO}P_R \langle e_I^2 \rangle \quad (58)$$

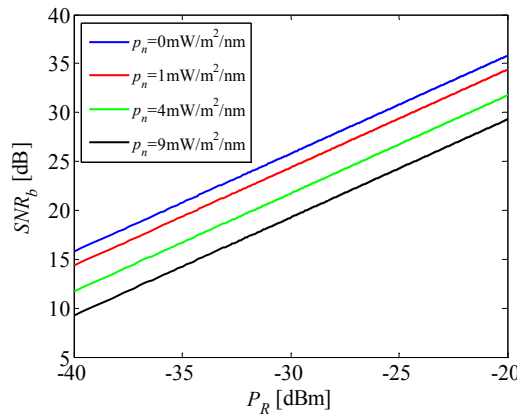
$$P_Q = \langle i_Q^2 \rangle = \frac{1}{4}R^2P_{LO}P_R \langle e_Q^2 \rangle \quad (59)$$

Σημειώνεται ότι με  $P_R$  έχουμε συμβολίσει την ισχύ που λαμβάνουμε από το *αδιαμόρφωτο* laser. Το πηλίκο σήμα προς θόρυβο ανά *σύμβολο* μπορεί να οριστεί ως:

$$\text{SNR} = \frac{\langle i_I^2 \rangle + \langle i_Q^2 \rangle}{\langle n_I^2 \rangle + \langle n_Q^2 \rangle} = \frac{\frac{1}{4}R^2P_{LO}P_R [\langle e_Q^2 \rangle + \langle e_I^2 \rangle]}{2qR(P_{LO} + p_n \Delta \lambda A_{\text{eff}})B + S_{\text{TH}}B} \quad (60)$$

Στην περίπτωση της διαμόρφωσης PSK θα έχουμε  $\langle e_I^2 \rangle + \langle e_Q^2 \rangle = 1$  οπότε

$$\text{SNR} = \frac{\frac{1}{4}RP_{LO}P_R}{2q(P_{LO} + p_n \Delta \lambda A_{\text{eff}})B + S_{\text{TH}}B} \quad (61)$$



Εικόνα 43: Υπολογισμός του  $\text{SNR}_b$  στην περίπτωση του QPSK σε συνάρτηση με την ισχύ λήψης  $P_R$ .

Στην Εικόνα 43 έχουμε παραστήσει γραφικά το πηλίκο σήμα-προς-θόρυβο ανά bit  $\text{SNR}_b$  στην περίπτωση του QPSK χρησιμοποιώντας την σχέση (61) και το γεγονός ότι  $\text{SNR}_b = \text{SNR}/\log_2 M$  όπου  $M=4$  για την περίπτωση του QPSK. Ο υπολογισμός έχει πραγματοποιηθεί θεωρώντας ότι το ηλεκτρονικό εύρος ζώνης του δέκτη είναι  $B=1\text{GHz}$ , η ισχύς του τοπικού ταλαντωτή είναι  $P_{LO}=1\text{mW}$  η επιφάνεια του δέκτη είναι  $A_{\text{eff}}=A_R=100\text{cm}^2$  ενώ το εύρος ζώνης του οπτικού φίλτρου είναι  $\Delta\lambda=40\text{nm}$ . Παρατηρούμε την επίπτωση που

έχει η φασματική πυκνότητα ισχύος  $p_n$  στον υπολογισμό του ηθλικού  $\text{SNR}_b$ . Για παράδειγμα ακόμα και για μία τιμή του  $p_n$  της τάξης των  $9\text{mW}/\text{m}^2/\text{nm}$  που αντιπροσωπεύει την μέση τιμή του  $p_n$  στην περίπτωση όπου έχουμε λαμπτήρες φθορισμού και εκπέμπουμε στα  $\lambda=780\text{nm}$ , έχουμε μία μείωση περίπου  $6\text{dB}$  στο επιτεύξιμο  $\text{SNR}_b$  εξαιτίας του φωτός περιβάλλοντος. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η τιμή  $p_n=0$  αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούμε λαμπτήρες LED και στο δωμάτιο δεν εισέρχεται ηλιακό φως ή χρησιμοποιούμε οπτική ίνα στο δέκτη οπότε όπως είδαμε στην ενότητα 6.5, η ακτινοβολία που καταλήγει στον δέκτη είναι πολύ μικρότερη.

Το βέλτιστο  $\text{SNR}$  επιτυγχάνεται όταν  $P_{\text{LO}} \rightarrow \infty$  οπότε στην περίπτωση αυτή λαμβάνουμε:

$$\text{SNR}_{\text{opt}} = \frac{RP_R}{8qB} \quad (62)$$

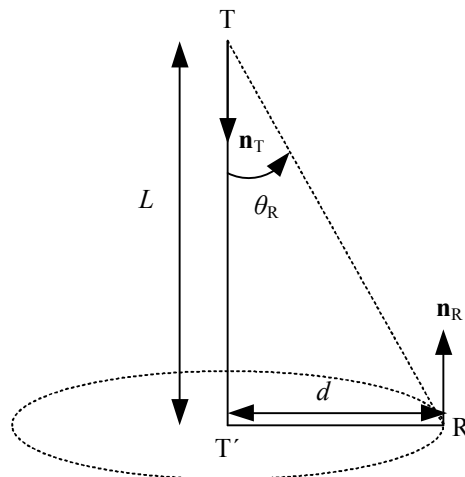
Στην περίπτωση που εξετάζουμε και για  $P_R = -40\text{dBm}$  βρίσκουμε ότι  $\text{SNR}_{\text{opt}} \cong 19\text{dB}$  και επομένως στην περίπτωση του QPSK το αντίστοιχο του  $\text{SNR}_b$  ισούται με  $16\text{dB}$  που είναι πολύ κοντά στην τιμή που λαμβάνουμε για  $p_n=0$  στην Εικόνα 43. Επομένως αντιλαμβανόμαστε την μικρή συνεισφορά του θερμικού θορύβου στην ομόδυνη φώραση.

## 6.8 Υπολογισμός του τελικού εύρους της δέσμης

Πριν υπολογίσουμε τις απαιτήσεις για την ισχύ εκπομπής και την ισχύ του τοπικού ταλαντωτή είναι ενδιαφέρον να καταλήξουμε σε μία έκφραση για την εξασθένιση του καναλιού  $H$  η οποία ορίζεται ως το ηθλίο της ισχύος λήψης προς την ισχύ εκπομπής,  $H = P_R/P_T$ . Δεδομένου ότι η δέσμη παραμένει Gaussian αφού περάσει από τα οπτικά στοιχεία του πομπού, τότε σύμφωνα και με όσα είδαμε στο Π1.1 [52] θα έχουμε:

$$P_R \cong \frac{2P_T A_R \cos \theta_R}{\pi w^2(L)} \exp\left(-2 \frac{d^2}{w^2(L)}\right) \quad (63)$$

όπου  $L$  είναι η οριζόντια απόσταση του δέκτη από τον πομπό ενώ  $d$  είναι η οριζόντια απόσταση του δέκτη από την προβολή του πομπού πάνω στο επίπεδο του δέκτη όπως δείχνει η Εικόνα 44.



Εικόνα 44: Βοηθητικό σχήμα για τον υπολογισμό της εξασθένισης του καναλιού

Από τη γεωμετρία του σχήματος είναι εύκολο να αντιληφθούμε ότι

$$P_R \cong \frac{2P_T A_R}{\pi w^2(L)} \frac{L}{\sqrt{d^2 + L^2}} \exp\left(-2 \frac{d^2}{w^2(L)}\right) \quad (64)$$

Η μέγιστη ισχύς λαμβάνεται για  $d=0$ , οπότε

$$P_{R,\text{max}} = \frac{2P_T A_R}{\pi w^2(L)} \quad (65)$$

Κατά τον σχεδιασμό του συστήματος θα πρέπει να βρούμε το κατάλληλο τελικό εύρος της δέσμης που αφενώς προσφέρει ικανοποιητική ισχύ  $P_{R,\max}$  και από την άλλη εξασφαλίζει ότι σε μία προδιαγραμμένη απόσταση  $d=d_0$  η ισχύς δεν έχει πέσει γίνει μικρότερη από ένα ποσοστό  $K$  της  $P_{R,\max}$ ,

$$\frac{P_R(d_0)}{P_{R,\max}} = \frac{L}{\sqrt{d_0^2 + L^2}} \exp\left(-\frac{2d_0^2}{w^2(L)}\right) = K \quad (66)$$

Από την (66) εύκολα υπολογίζουμε το επιθυμητό εύρος  $w(L)$ ,

$$w(L) = d_0 \sqrt{2} \left( \ln \frac{L}{K \sqrt{d_0^2 + L^2}} \right)^{-1/2} \quad (67)$$

Για παράδειγμα αν θέσουμε  $K_{\text{dB}}=-5\text{dB}$  τότε  $K \approx 0.31$ ,  $L=3\text{m}$  και  $d_0=2\text{m}$  τότε θα έχουμε  $w(L) \approx 2.9\text{m}$ . Στην περίπτωση αυτή θα έχουμε  $P_{R,\max}/P_T/A_R = 2/\pi/w^2(L) \approx 0.077\text{m}^{-2}$ . Επομένως για μία ισχύ εκπομπής  $1\text{mW}$  και μία επιφάνεια λήψης  $A_R=100\text{cm}^2$ , η ισχύς κορυφής στο επίπεδο του δέκτη θα είναι  $0.77\mu\text{W}$ . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με την (62) το βέλτιστο SNR είναι απευθείας ανάλογο του  $P_R$  και επομένως το εύρος που υπολογίζουμε από την (67) εξασφαλίζει ότι και το SNR σε απόσταση  $d=d_0$  θα έχει μειωθεί κατά ένα παράγοντα  $K$ .

## 6.9 Διαδικασία Σχεδιασμού

Στην παρούσα ενότητα βασιζόμαστε στις προηγούμενες ενότητες ώστε να πραγματοποιήσουμε την διαδικασία σχεδιασμού του συστήματος. Επιλέγουμε την διαμόρφωση QPSK η οποία όπως είδαμε στο Π2.1 [50] απαιτεί ένα  $\text{SNR}_b \approx 8\text{dB}$  για να λειτουργήσει με ικανοποιητική πιθανότητα σφάλματος bit ακόμα και παρουσία θορύβου φάσης αρκεί να εφαρμόσουμε τεχνικές ανάκτησης της φάσης. Ας υποθέσουμε επομένως ότι επιθυμούμε το μέγιστο SNR στο επίπεδο του δέκτη να είναι  $30\text{dB}$  και να έχουμε το πολύ  $K_{\text{dB}}=10\text{dB}$  μεταβολή στο επίπεδο του δέκτη σε μία απόσταση  $d_0=2\text{m}$ . Επίσης λαμβάνουμε το ηλεκτρικό εύρος ζώνης ίσο με  $B=1\text{GHz}$  που στην περίπτωση του QPSK αντιστοιχεί σε έναν ρυθμό  $R_b=2\text{Gb/s}$  [66]. Αρχικά κάνουμε την υπόθεση ότι η ισχύς εκπομπής είναι  $P_T=1\text{mW}$  η οποία είναι σχετικά χαμηλή ισχύς για τα σύγχρονα ημιαγωγικά laser. Απουσία του θερμικού θορύβου και της ακτινοβολίας περιβάλλοντος, το βέλτιστο SNR δίνεται από την (62). Το μέγιστο SNR στο επίπεδο του δέκτη δίνεται από την σχέση:

$$\text{SNR}_{\max} = \frac{R P_{R,\max}}{8qB} = \frac{2P_T}{\pi w^2(L)} \frac{R A_R}{8qB} \quad (68)$$

από την οποία προκύπτει ότι

$$P_T A_R = \frac{4q\pi B d_0^2 \text{SNR}_{\max}}{R} \left( \ln \frac{L}{K \sqrt{d_0^2 + L^2}} \right)^{-1} \quad (69)$$

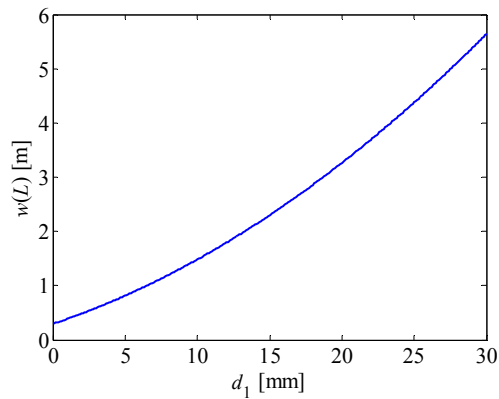
Αντικαθιστώντας  $L=3\text{m}$  και  $d_0=2\text{m}$ , βρίσκουμε  $P_T A_R = 7.5\mu\text{W} \times \text{m}^2$  κάτι που υπονοεί ότι για ισχύ εκπομπής  $1\text{mW}$  χρειαζόμαστε μία επιφάνεια δέκτη  $A_R = 75\text{cm}^2$  για να επιτύχουμε το SNR που έχουμε προδιαγράψει. Το εύρος της δέσμης το οποίο υπολογίζουμε είναι ίσο με  $w(L) \approx 1.94\text{m}$ .

Για να σχεδιάσουμε τα οπτικά στοιχεία του πομπού θεωρούμε ένα σύστημα δύο φακών όπως στην με διαδοχικές αποστάσεις  $d_1=d_2$  και εστιακή απόσταση  $f=1\text{cm}$ . Στην Εικόνα 45 έχουμε παραστήσει γραφικά το εύρος της δέσμης  $w(L)$  για διάφορες τιμές της απόστασης  $d_1=d_2$  θεωρώντας ότι το αρχικό εύρος της δέσμης στον πομπό είναι  $w=5\mu\text{m}$  ενώ το μήκος κύματος είναι  $\lambda=1550\text{nm}$ . Παρατηρούμε ότι το επιθυμητό εύρος δέσμης επιτυγχάνεται για  $d_1=d_2=12.9\text{mm}$ . Μία ακόμα ενδιαφέρουσα παράμετρος είναι το εύρος της δέσμης στον πομπό: βάσει της θεωρίας των πινάκων ABCD που παρουσιάσαμε στο Π1.1, βρίσκουμε ότι το εύρος της δέσμης καθώς εξέρχεται από τον δεύτερο φακό στον πομπό ( $L=0$ ) είναι ίσο με  $w_L=4.2\text{mm}$  κάτι που υποδηλώνει ότι οι φακοί του πομπού δεν χρειάζεται να έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από  $4 \times w_L \approx 16.8\text{mm}$ .

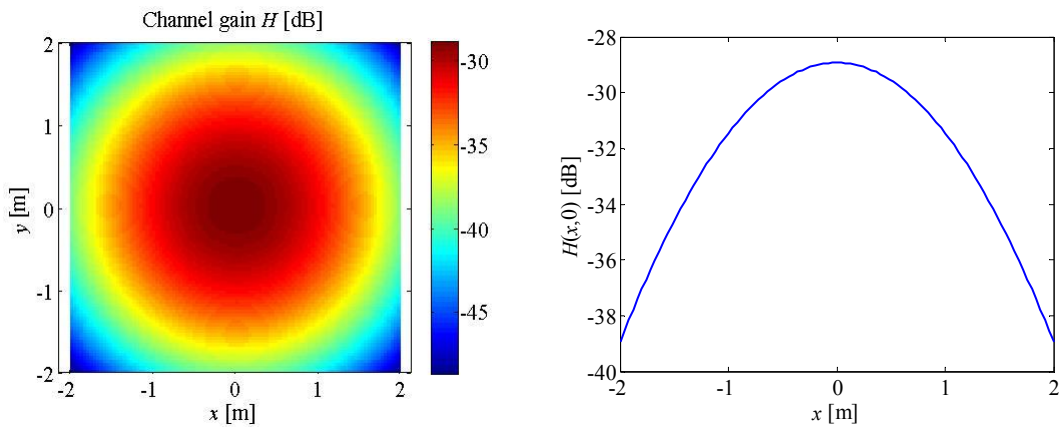
Στην Εικόνα 46 έχουμε παραστήσει γραφικά το κέρδος του καναλιού  $H=P_R/P_T$  στο επίπεδο του δέκτη ( $z=L$ ). Παρατηρούμε ότι σε απόσταση  $\rho=d_0=2\text{m}$  το κέρδος έχει μειωθεί ακριβώς κατά  $-10\text{dB}$  όπως άλλωστε συνεπάγεται και η επιλογή του να επιλέξουμε το συγκεκριμένο εύρος δέσμης στο επίπεδο  $w(L)$  σύμφωνα και



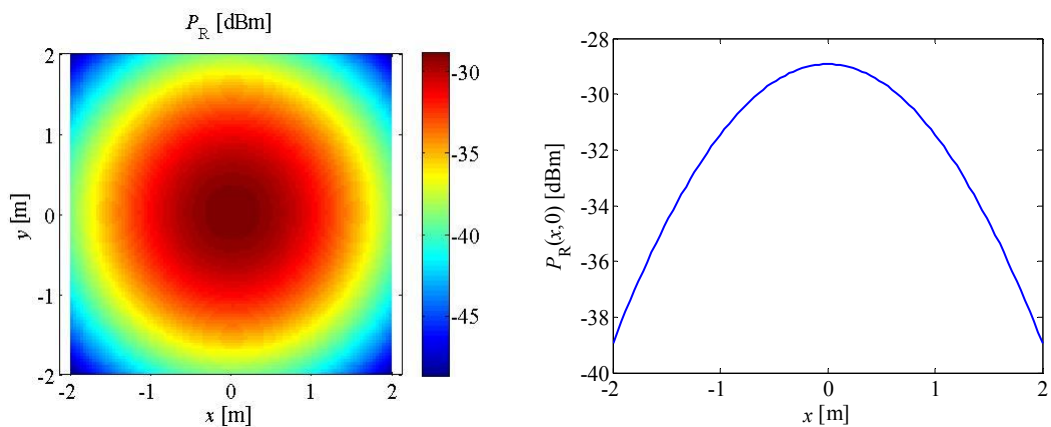
με την (67). Επίσης στην Εικόνα 47 δείχνουμε την ισχύ λήψης  $P_R$  στο επίπεδο του δέκτη η οποία παρουσιάζει την ίδια μεταβολή με το  $H$ . Στην Εικόνα 48 έχουμε παραστήσει γραφικά το πηλίκο σήμα-προς-θόρυβο SNR ανά σύμβολο από όπου φαίνεται καθαρά ότι αυτό μεταβάλλεται μεταξύ 20 και 30dB όπως ακριβώς είχαμε προδιαγράψει.



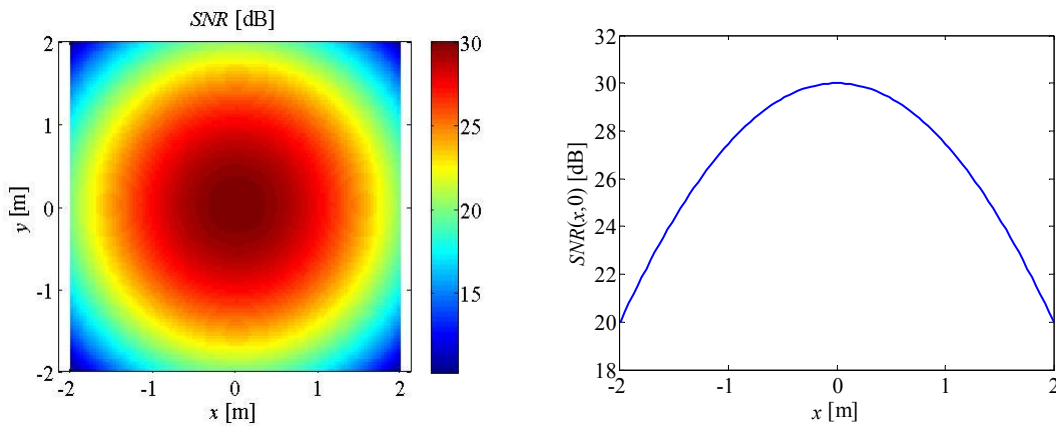
Εικόνα 45: Εύρος τελικής δέσμης σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ των δύο φακών.



Εικόνα 46: Συντελεστής  $H$  του καναλιού στην περίπτωση όπου έχουμε απαιτήσει  $d_0=2m$ .

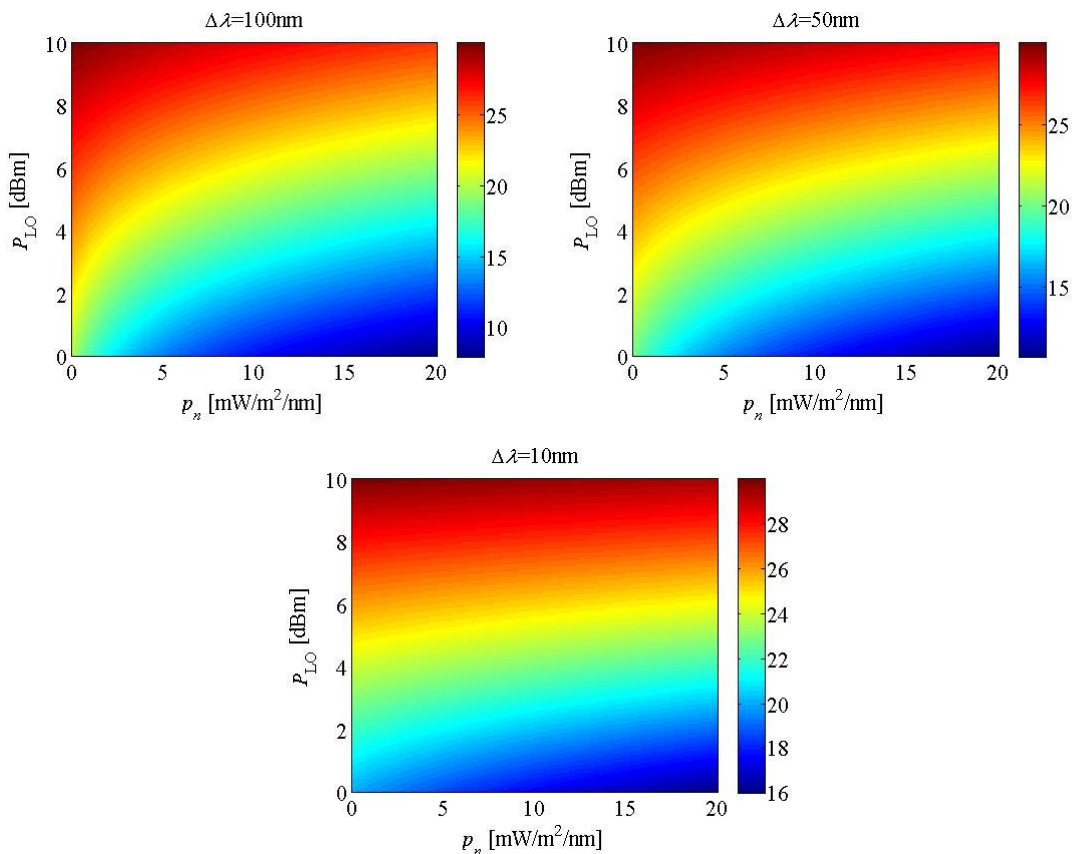


Εικόνα 47: Ισχύς στο επίπεδο του δέκτη στην περίπτωση όπου έχουμε απαιτήσει  $d_0=2m$ .



Εικόνα 48: SNR ανά σύμβολο στο επίπεδο του δέκτη στην περίπτωση όπου έχουμε απαιτήσει  $d_0=2m$ .

Στη συνέχεια πρέπει να λάβουμε υπόψη μας την επίδραση του θερμικού θορύβου και του θορύβου περιβάλλοντος ώστε να επιλέξουμε κατάλληλα την ισχύ του τοπικού ταλαντωτή  $P_{LO}$  και την ισχύ εκπομπής  $P_T$  ώστε να πετυχαίνουμε ένα το κατάλληλο SNR. Για το σκοπό αυτό υπολογίζουμε ξανά το SNR βάσει της σχέσης (61) θεωρώντας ότι παράλληλα με την ισχύ του τοπικού ταλαντωτή μεταβάλλουμε και την ισχύ εκπομπής  $P_T$  έτσι ώστε  $P_T=P_{LO}$  ενώ η φασματική πυκνότητα του θερμικού θορύβου λαμβάνεται ίση με  $S_{TH}=10^{-23} A^2/Hz$ . Στην Εικόνα 49 έχουμε παραστήσει γραφικά το SNR ανά σύμβολο που υπολογίζουμε για διάφορες τιμές του  $p_n$  για τρία διαφορετικά φασματικά εύρη του οπτικού φίλτρου του δέκτη.



Εικόνα 49: SNR ανά σύμβολο σε απόσταση  $d_0=2m$  λαμβάνοντας υπόψη το θερμικό θόρυβο και το θόρυβο του περιβάλλοντος.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειώσουμε την μεγάλη σημασία που έχει η καταστολή του θορύβου περιβάλλοντος είτε χρησιμοποιώντας ένα οπτικό φίλτρο με μικρό  $\Delta\lambda$  είτε χρησιμοποιώντας οπτική ίνα μετά τον φακό του δέκτη.

## 6.10 Παράμετροι του Συστήματος

Στην παρούσα ενότητα συνοψίζουμε τα βασικά χαρακτηριστικά του πομποδέκτη και πως καταλήγουμε σε αυτά. Επίσης αναφέρουμε τις παραμέτρους του καναλιού που παίζουν ρόλο στην διαδικασία του σχεδιασμού.

Πίνακας 7: Παράμετροι σχεδιασμού του συστήματος

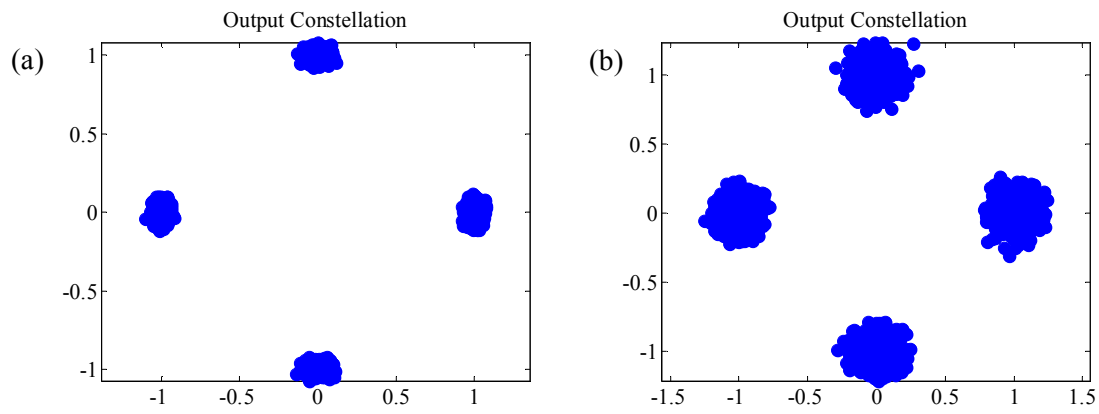
Διαρρόθμιση χώρου		
Χαρακτηριστικό	Τιμή	Παρατηρήσεις
Μήκος δωματίου	5m	Καθορίζουν την κατανομή του ηλιακού φωτός και του φωτός από τις λάμπες εντός του δωματίου
Πλάτος δωματίου	7.5m	
Ύψος δωματίου	3m	
Θέση πομπού $\mathbf{r}_T$	[2.5, 3.75 3.5]	Θεωρείται στο κέντρο του ταβανιού του δωματίου
Θέση δέκτη $\mathbf{r}_R$	$[x_R y_R 0.5]$	Θεωρείται σε ύψος μισό μέτρο από τον πομπό
Πλήθος παραθύρων	1	Παίζει ρόλο στον υπολογισμό της φασματικής ισχύος του ηλιακού φωτός $p_{\text{sun}}$
Θέση παραθύρου	Στο επίπεδο $y=7.5$	
Προσανατολισμός πομπού $\mathbf{n}_T$	[0, 0, -1]	Ο πομπός είναι προσανατολισμένος κάθετα προς τα κάτω
Προσανατολισμός πομπού $\mathbf{n}_R$	[0, 0, 1]	Ο δέκτης είναι προσανατολισμένος κάθετα προς τα πάνω
Συνθήκες Φωτισμού		
Χαρακτηριστικό	Τιμή	Παρατηρήσεις
Είδος λαμπτήρων του δωματίου	Αλογόνου, Φωσφορισμού, LED	Καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το φάσμα εκπομπής
Φασματική πυκνότητα εκπομπής λαμπτήρων $p_{\text{lamp}}$	Μερικές δεκάδες $\text{mW/nm/m}^2$	Εξαρτάται από το είδος του λαμπτήρα
Φασματική πυκνότητα του ηλιακού φωτός $p_{\text{sun}}$	Μερικές εκατοντάδες $\text{mW/nm/m}^2$	Εξαρτάται από το μήκος κύματος. Υπάρχει σημαντική εκπομπή και κοντά στο $\lambda=1550\text{nm}$
Φασματική πυκνότητα περιβάλλοντος φωτός στο δέκτη $p_n$	μερικά $\text{mW/nm/m}^2$	Μετρείται πειραματικά ή υπολογίζεται μέσω της (51)
Παράμετροι πομπού		
Χαρακτηριστικό	Τιμή	Παρατηρήσεις
Ισχύς εκπομπής $P_T$	$\geq 1\text{mW}$ $\leq 40\text{mW}$	Δεν μπορεί να ξεπερνά τις μερικές δεκάδες $\text{mW}$ στην περίπτωση ημιαγωγικών laser με μικρό εύρος γραμμής. Καθορίζεται από την Εικόνα 49 έτσι ώστε να επιτύχουμε το επιθυμητό SNR
Μήκος κύματος	$\lambda=780\text{nm}$ ή $\lambda=1550\text{nm}$	Η επιλογή του μήκους κύματος καθορίζεται από το κόστος, τις επιθυμητές συνθήκες φωτισμού και τα πρότυπα ασφαλείας.
Εύρος γραμμής $\Delta\nu_T$	$\geq 100\text{kHz}$	Θα πρέπει να επιλεγεί πολύ μικρότερο από τον ρυθμό συμβόλων
Διαμόρφωση	Εξωτερική QPSK	Η εξωτερική διαμόρφωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υλοποιηθούν σχήματα διαμόρφωσης όπως το QPSK και το DQPSK

Εύρος δέσμης $w_0$	$\sim 5\mu\text{m}$	Καθορίζεται από την οπτική ίνα στην έξοδο του διαμορφωτή αν αυτός είναι fiber-coupled.
Πλήθος φακών πομπού	2	Ο καθορισμός των παραμέτρων του οπτικού συστήματος του δέκτη στηρίζεται στα όσα αναλύθηκαν στην ενότητα 6.2 και 6.9
Απόσταση μεταξύ φακών $d_i$	$\sim 13\text{mm}$	
Διάμετρος φακών	$\sim 20\text{mm}$	
Εστιακή απόσταση φακών	$f=-1\text{cm}$	

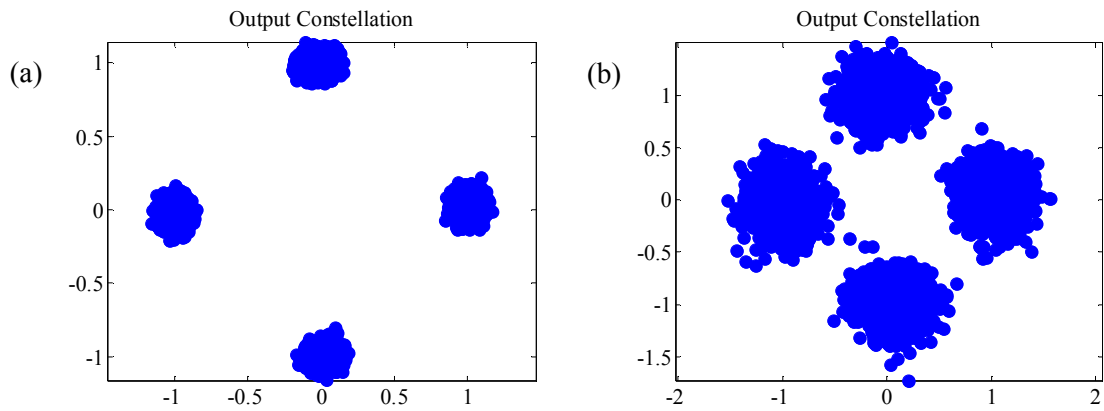
### Παράμετροι δέκτη

Χαρακτηριστικό	Τιμή	Παρατηρήσεις
Ισχύς τοπικού ταλαντωτή $P_{LO}$	$\geq 1\text{mW}$ $\leq 40\text{mW}$	Δεν μπορεί να ξεπερνά τις μερικές δεκάδες mW στην περίπτωση ημιαγωγικών laser με μικρό εύρος γραμμής. Καθορίζεται από την Εικόνα 49 έτσι ώστε να επιτύχουμε το επιθυμητό SNR
Εύρος γραμμής $\Delta\nu_R$	$\geq 100\text{kHz}$	Θα πρέπει να επιλεγεί πολύ μικρότερο από τον ρυθμό συμβόλων
Αποκρισιμότητα δέκτη $R$	$\cong 0.6\text{A/W}$ ( $\lambda=780\text{nm}$ ) $\cong 1\text{A/W}$ ( $\lambda=1550\text{nm}$ )	Καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά των φωτοδιόδων του δέκτη
Φασματική πυκνότητα θερμικού θορύβου $S_{TH}$	$\sim 10^{-23}\text{A}^2/\text{Hz}$	Εξαρτάται από τον σχεδιασμό του ενισχυτή όπως είδαμε στο Π1.1 [52]
Φασματική πυκνότητα θορύβου βολής $S_{SH}$	$\sim 10^{-22}\text{A}^2/\text{Hz}$	Εξαρτάται τις συνθήκες φωτισμού όπως δείξαμε στο Π1.1 [52]
Εύρος ζώνης δέκτη $B$	$\sim 1\text{GHz}$	Στην περίπτωση του QPSK αντιστοιχεί σε ένα ρυθμό $\sim 2\text{Gb/s}$
Εύρος ζώνης οπτικού φίλτρου $\Delta\lambda$	$\geq 10\text{nm}$	Στο εμπόριο κυκλοφορούν διηλεκτρικά φίλτρα με σχετικά μικρό κόστος και φασματικά εύρος μερικών nm
Ελάχιστο ηχητικό σήμα-προς-θόρυβο ανά bit $\text{SNR}_b$	8dB	Προκύπτει από την ευαισθησία του θορύβου φάσης όπως είδαμε στο Π2.1 [50]
Ελάχιστο ηχητικό σήμα-προς-θόρυβο ανά σύμβολο $\text{SNR}$	11dB	$\text{SNR}=\log_2 M \times \text{SNR}_b$ όπου $M$ είναι η τάξη διαμόρφωσης.
Επιφάνεια φακού λήψης $A_R$	$\sim 75\text{cm}^2$	Καθορίζεται από την (69)
Αριθμός $F_R$ του φακού του δέκτη	$\sim 1.3$	Καθορίζεται από την (21)
Διάμετρος φακού λήψης $D_R$	$\sim 10\text{cm}$	$= (4A_R/\pi)^{1/2}$
Εστιακή απόσταση $f_R$	$\sim 13\text{cm}$	$F_R D_R$

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο του συστήματος που παρουσιάσαμε στο Π2.1 [50] υπολογίσαμε τις επιδόσεις του συστήματος θεωρώντας τις παραμέτρους που αναφέρει ο Πίνακας 7. Στην Εικόνα 50 (a) και (b) δείχνουμε το διάγραμμα αστερισμού στο δέκτη όταν  $\mathbf{r}_R=[0 \ 0 \ 0]$  και  $\mathbf{r}_R=[0 \ 2\text{m} \ 0]$  αντίστοιχα. Χρησιμοποιούμε  $10^4$  bit και αρχικά αγνοούμε το θόρυβο που προέρχεται από τον θόρυβο του περιβάλλοντος ( $p_n=0$ ). Το είδος διαμόρφωσης που χρησιμοποιούμε είναι QPSK ενώ οι τιμές του SNR ανά σύμβολο που υπολογίζουμε στις προσομοιώσεις είναι 29.83dB και 19.75dB αντίστοιχα που είναι πολύ κοντά στις τιμές που προδιαγράψαμε στην ενότητα 6.9. Στην Εικόνα 51 δείχνουμε τον αστερισμό στην περίπτωση όπου  $p_n=10\text{mW}/\text{m}^2/\text{nm}$  και  $\Delta\lambda=50\text{nm}$ . Το αντίστοιχα SNR είναι τώρα 20.1dB και 13.1dB αντίστοιχα. Επαληθεύουμε επομένως την σημαντική επίδραση του περιβάλλοντος φωτός στις επιδόσεις του δέκτη που μπορεί να εισάγει ποινή ισχύος αρκετών dB στην περίπτωση όπου δεν πραγματοποιείται σύζευξη σε οπτική ίνα και το οπτικό φίλτρο έχει μεγάλο εύρος ζώνης.



Εικόνα 50: Διαγράμματα συμβόλων για  $p_n=0$  θεωρώντας ότι ο δέκτης είναι τοποθετημένος στο σημείο α)  $\mathbf{r}_R=[0 \ 0 \ 0]$  και β)  $\mathbf{r}_R=[0 \ 2m \ 0]$



Εικόνα 51: Διαγράμματα συμβόλων για  $p_n=10\text{mW/m}^2/\text{nm}$  θεωρώντας ότι ο δέκτης είναι τοποθετημένος στο σημείο α)  $\mathbf{r}_R=[0 \ 0 \ 0]$  και β)  $\mathbf{r}_R=[0 \ 2m \ 0]$

## 7. Αναφορές

- [1] "Evaluation of Technological and Socio-Economic Issues Affecting the Deployment of Home Networks: Evidence from the ICT-OMEGA project", G. Dede, D. Varoutas, T. Kamalakis, R. G. Fuentetaja, J.P. Javaudin, *Netnomics: Economic Research and Electronic Networking* (Springer), Volume 11, Number 2, Pages 181-200, 2010
- [2] [http://ec.europa.eu/information\\_society/digital-agenda/daa/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/information_society/digital-agenda/daa/index_en.htm)
- [3] [http://ec.europa.eu/information\\_society/events/cf/daa11/item-display.cfm?id=5998](http://ec.europa.eu/information_society/events/cf/daa11/item-display.cfm?id=5998)
- [4] [http://ec.europa.eu/information\\_society/events/cf/daa11/item-display.cfm?id=5986](http://ec.europa.eu/information_society/events/cf/daa11/item-display.cfm?id=5986)
- [5] Lee et al *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol 24, pp 4568-4583 (2006).
- [6] Rokkas et al, *OSA Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 2, pp. 1042-1051 (2010).
- [7] Yang et al, *IEEE J. Lightwave Technology, Journal of*, vol.28, pp.352-359 (2010)
- [8] Majumder et al, *IEEE Potentials*, vol.23, pp. 4- 8 (2004)
- [9] Juntunen et al, *IEEE Microwave Theory and Techniques*, vol.58, no.2, pp.348-355 (2010).
- [10] Baldwin et al, *Electron. Lett.* Vol. 48, Issue 10, p.536 (2012).
- [11] K. H. Afkhamie, S. Katar, L. Yonge, & R. Newman, "An overview of the upcoming HomePlug AV standard," *Power Line Communications and Its Applications, IEEE International Symposium on*, pp. 400-404, April 2005.
- [12] A. M. Tonello, P. Siohan, A. Zeddani, X. & Mongaboure, "Challenges for 1 Gbps power line communications in home networks," *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC (2008). IEEE 19th International Symposium on*, pp. 1-6, September 2008.
- [13] R. Hashmat, P. Pagani, A. Zeddani, T. Chonavel, "MIMO communications for inhome PLC networks: Measurements and results up to 100 MHz," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC 2010), IEEE International Symposium on*, pp. 120-124, March 2010.
- [14] *IEEE std. P1905, Standard for a Convergent Digital Home Network for Heterogeneous Technologies*, IEEE, 2011.
- [15] *IEEE std. P1901, Broadband over Power Line Networks*, IEEE, 2009.
- [16] *IEEE std. 802.3, CSMA/CD (Ethernet) Access Method*, IEEE, 1998.
- [17] "IEEE 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications". (2012 revision). IEEE-SA. 5 April 2012. doi:10.1109/IEEESTD.2012.6178212.
- [18] C.C.Chong, Y.E.Kim, S.K.Yong, S.S.Lee, "Statistical characterization of the UWB propagation channel in indoor residential environment", *Wiley J. Wireless Commun. Mobile Computing*, vol.5, no.5, pp.503-512, Aug. 2005.
- [19] A.F.Molisch, "Ultrawideband Propagation Channels-Theory, Measurements and Modeling", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.54, no.5, pp. 1528-1545, Sep. 2005.
- [20] A.F.Molisch, D.Cassioli, C.C.Chong, S. Emami, A. Fort, B. Kannan, J. Karedal, J. Kunisch, H.G. Schantz, K.Siwia, and M.Z. Win. "A Comprehensive Standardized Model for UWB Propagation Channels", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol.54, no.11, pp.3151-3166, 2006.
- [21] J. Karedal, S. Wyne, P. Almers, F. Tufvesson, and A.F. Molisch, "A Measurement-Based Statistical Model for Industrial Ultra-Wideband Channels", *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol.6, no.8, pp.3028- 3037, Aug. 2007
- [22] C. H. Doan, S. Emami, D. A. Sobel, A. M. Niknejad, and R. W. Brodersen, "Berkeley Wireless Research Center Design Considerations for 60 GHz CMOS Radios," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 12, December 2004
- [23] <http://www.iec.org>, "Fiber to the Home", The Engineering Consortium, Web ProForum Tutorials
- [24] D. O'Brien, M. Katz, "Optical wireless communications within fourth-generation wireless systems," *Journal of Optical Networking*, vol. 4, pp. 312-322, 2005.
- [25] J.M. Kahn, W.J. Krause, J.B. Carruthers, "Experimental characterization of non-directed indoor infrared channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, pp. 1613-1623, 1995.
- [26] T. Komine, M. Nakagawa, "Integrated system of white LED visible-light communication and power-line communication," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 49, pp. 71- 79, 2003.
- [27] T. Rokkas, T. Kamalakis, D. Katsianis, D. Varoutas and T. Sphicopoulos, "Business Prospects of Wide-Scale Deployment of Free Space Optical Technology as a Last-Mile Solution: A Techno-Economic Evaluation," *IEEE/OSA Journal of Optical Networking*, vol. 6, 860-87, 2007.
- [28] [www.irda.org](http://www.irda.org)
- [29] ICT-OMEGA Deliverable D4.2b, Physical Layer Design and Specification, February 2010. Available at: [http://www.ict-omega.eu/fileadmin/documents/deliverables/Omega\\_D4.2b.pdf](http://www.ict-omega.eu/fileadmin/documents/deliverables/Omega_D4.2b.pdf)
- [30] G. W. Marsh, J. M. Kahn, "Performance evaluation of experimental 50-Mb/s diffuse infrared wireless link using on-off keying with decision-feedback equalization," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 44, no. 11, pp. 1496-1504, 1996.

- [31] G. Ntogari, T. Kamalakis, J. Walewski, T. Sphicopoulos, "Combining Illumination Dimming Based on Pulse-Width Modulation With Visible-Light Communications Based on Discrete Multitone," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 3, no. 1, pp. 56-65, 2011.
- [32] S. Kobayashi, H. Makino, X. Liu, J. Kudo, Y. Maeda, "Fluorescent light communication: a study of waveform characteristics and decoding methods," *ISPSJ SIG technical reports*, vol.8, no. 116, pp. 101-108, 2006.
- [33] M. G. Craford, "LEDs challenge the incandescents," *Circuits and Devices Magazine, IEEE*, vol. 8, no. 5, pp. 24-29, 1992.
- [34] Y. Tanaka, S. Haruyama, M. Nakagawa, "Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links," *Proc. Int. Symp. On Personal Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC 00)*, vol. 2, pp. 1325-1329, 2000.
- [35] <http://www.vlcc.net>
- [36] S. Haruyama, "Japan's Visible Light Communications Consortium and its standardization activities," *IEEE 802 Interim Meeting*, Taipei, January 2008.
- [37] HG. Le-Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, and Y. Oh, "High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, pp. 1243-1245, 2008.
- [38] J. Grubor, K.-D. Langer, S. C. J. Lee, T. Koonen, and J. W. Walewski, "Wireless high-speed data transmission with phosphorescent white-light LEDs," in *Proc. ECOC 2007*, 2007.
- [39] H. Le-Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, and Y. Oh, "100-Mb/s NRZ Visible light communications using a postequalized white LED," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, pp. 1063-1065, 2009.
- [40] J. Vucic, C. Kottke, S. Nerreter, A. Büttner, K.-D. Langer, and J. W. Walewski, "White light wireless transmission at 200+ Mb/s net data rate by use of discrete-multitone modulation," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, pp. 1511-1513, 2009.
- [41] Tim. O'reilly, "What is web 2.0," O'Reilly Media, Inc., 2009.
- [42] A. Maiga, J.Y. Baudais and J. F. Hélar, "Very High Bit Rate Power Line Communications For Home Networks," *IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications*, Dresden, Germany, 2009.
- [43] "Prospects of Optical Wireless Technologies for Home Networking", G. Dede, T. Kamalakis, D. Varoutas, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 3, no. 11, pp. 850-859, 2011.
- [44] J. P. Javaudin, M. Bellec, P. Jaffré, A. Foglar, O. Hoffmann, O. Isson, "Inter-MAC Concept for Gigabit Home Networks," *PIMRC 2009*, Tokyo, Japan, 2009
- [45] I. Mollers, D. Jager, R. Gaudino, A. Nocivelli, H. Kragl, O. Ziemann, N. Weber, T. Koonen, C. Lezzi, A. Bluschke, S. Randel, "Plastic optical fiber technology for reliable home networking: overview and results of the EU project pof-all," *IEEE Communications Magazine* vol. 47, pp. 58-68, 2009.
- [46] J.P. Faure, "The IEEE P1901 project: broadband over power lines," *International Conference on Consumer Electronics*, Digest of Technical Papers, 2006.
- [47] A. Maiga, J.Y. Baudais and J. F. Hélar, "Very High Bit Rate Power Line Communications For Home Networks," *IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications*, Dresden, Germany, 2009.
- [48] IEC 60825-1:2007. Safety of laser products —Part 1: Equipment classification and requirements. ISBN 978 0 580 53563 5.
- [49] <http://www.thorlabs.de/thorproduct.cfm?partnumber=SFL1550P>
- [50] «Σχήματα Κωδικοποίησης και Διαμόρφωσης Οπτικών Ασύρματων Συστημάτων Σύμφωνης Φόρασης», παραδοτέο Π2.1. του προγράμματος «Σύμφωνα Ασύρματα Οπτικά Συστήματα ως Δομικά Στοιχεία για την Υλοποίηση Δικτύων Οικίας και Επαγγελματικών Χώρων Επόμενης Γενιάς, (COWS)»
- [51] «Εργαλείο προσομοίωσης καναλιού και διαύλου», παραδοτέο Π1.2 του προγράμματος «Σύμφωνα Ασύρματα Οπτικά Συστήματα ως Δομικά Στοιχεία για την Υλοποίηση Δικτύων Οικίας και Επαγγελματικών Χώρων Επόμενης Γενιάς, (COWS)»
- [52] «Λεπτομέρειες μοντελοποίησης οπτικού σύμφωνου καναλιού με εργαλεία ανοιχτού λογισμικού», παραδοτέο Π1.1 του προγράμματος «Σύμφωνα Ασύρματα Οπτικά Συστήματα ως Δομικά Στοιχεία για την Υλοποίηση Δικτύων Οικίας και Επαγγελματικών Χώρων Επόμενης Γενιάς, (COWS)»
- [53] D. Marcuse, "Gaussian approximation of the fundamental modes of graded-index fibers," *J. Opt. Soc. Am.* 68, 103-109 (1978)
- [54] John A. Buck, "Fundamentals of Optical Fibers", 2nd Edition, John Wiley and Sons, 2004.
- [55] Abramowitz, Milton; Stegun, Irene A., eds., *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, New York: Dover Publications (1972).
- [56] E. Wolf, "Introduction to the Theory of Coherence and Polarization of Light", Cambridge University Press, 2007.
- [57] F. Gori, M. Santarsiero, G. Piquero, R. Borghi, A. Mondello, R. Simon, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 3 (2001).



- 
- [58] M. Salem and G. P. Agrawal, "Effects of coherence and polarization on the coupling of stochastic electromagnetic beams into optical fibers," *J. Opt. Soc. Am. A* 26, 2452-2458 (2009)
- [59] L. C. Andrews, R. L. Phillips, and C. Y. Hopen, "Laser Beam Scintillation with Applications", SPIE Press, 2001.
- [60] S. Divitt and L. Novotny, "Spatial coherence of sunlight and its implications for light management in photovoltaics," *Optica* 2, 95-103 (2015)
- [61] C. Tsai, K. Tien, H. Lin, C. Lin, M. Chen, K. Chang, and C. Wu, "Analysis of Coherence Length of Organic Light Emitting Diodes," in *Frontiers in Optics 2007/Laser Science XXIII/Organic Materials and Devices for Displays and Energy Conversion*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2007), paper OWA6.
- [62] R. C. Coutinho, D. R. Selviah, R. F. Oulton, J. W. Gray, P. N. Stavrinou, H. D. Griffiths, and G. Parry, "Variable Numerical-Aperture Temporal-Coherence Measurement of Resonant-Cavity LEDs," *J. Lightwave Technol.* 21, 149- (2003)
- [63] Carruther, J.B.; Kahn, J.M., "Angle diversity for nondirected wireless infrared communication," *Communications, IEEE Transactions on* , vol.48, no.6, pp.960,969, Jun 2000
- [64] Djahani, P.; Kahn, J.M., "Analysis of infrared wireless links employing multibeam transmitters and imaging diversity receivers," *Communications, IEEE Transactions on* , vol.48, no.12, pp.2077,2088, Dec 2000
- [65] Thuillier, G.; Hersé, M.; Labs, D.; Foujols, T.; Peetermans, W.; Gillotay, D.; Simon, P. C.; Mandel, H., "The Solar Spectral Irradiance from 200 to 2400 nm as Measured by the SOLSPEC Spectrometer from the Atlas and Eureka Missions", *Solar Physics*, v. 214, Issue 1, p. 1-22 (2003).
- [66] J. Proakis and M. Salehi *Digital Communications*, McGraw-Hill 5th Edition (2007).