



Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεματικής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΚΩΝ. ΣΤΡΑΤΟΓΛΟΥ

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ RAY
TRACING**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Καμαλάκης Θ., Επίκουρος Καθηγητής

ΜΕΛΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Νικολαΐδου Μ., Καθηγήτρια

Δαλάκας Β., Καθηγητής

Αθήνα 2015

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Θωμά Καμαλάκη, για την διαρκή καθοδήγηση και συνεχή υποστήριξη που μου έδειξε κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επιπροσθέτως, ευχαριστώ τον κύριο Βασίλειο Δαλάκα και την κυρία Μάρα Νικολαΐδου, μέλη της τριμελούς επιτροπής, για την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια, του φίλους και την κοπέλα μου που ήταν συνεχώς δίπλα μου σε αυτό τον δύσκολο αγώνα.

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Abstract	5
Εισαγωγή	6
Οι ασύρματες επικοινωνίες σήμερα.....	7
Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	11
Οπτικά συστήματα επικοινωνίας	13
LED (Light Emitting Diode)	16
Laser.....	18
Ray Tracing.....	20
Impulse response.....	21
Ορισμός ερευνητικού προβλήματος	22
Ανάλυση έρευνας.....	22
Περιγραφή μοντέλου	23
Lambertian κατανομή	27
Τομή ακτίνας με επίπεδο	29
Η προσομοίωση	31
Αποτελέσματα.....	32
Επίλογος.....	38
Πίνακας Σχημάτων	39
Πίνακας Εικόνων	40
Βιβλιογραφία	41

Περίληψη

Οι οπτικές ίνες, μια καινούρια τεχνολογία για την εποχή μας, γίνονται ολοένα και αυξανόμενος στόχος επιστημονικών ερευνών με σκοπό την ευρεία χρήση τους. Μελετώνται και σχεδιάζονται μοντέλα με σκοπό την καλύτερη κατανόησή και περιγραφή τους.

Η διπλωματική αυτή εργασία ασχολείται με την ασύρματη διάδοση ενός υπέρυθρου σήματος σε έναν εσωτερικό χώρο όπου φτάνουν οπτικές ίνες. Στο πρώτο κομμάτι αυτής της έρευνας θα αναλυθούν τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για την χρήση των οπτικών ινών σε εσωτερικό χώρο καθώς και βασικές έννοιες και τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνησή της. Στο δεύτερο κομμάτι θα προταθεί ένα νέο μοντέλο ασύρματης διάδοσης σήματος σε εσωτερικό χώρο και θα περιγραφεί η χρήση του.

Λέξεις κλειδιά: Ασύρματα, οπτικά συστήματα, υπέρυθρες, δίοδος LED, laser, ray tracing, κρουστική απόκριση, Lambertian κατανομή, μοντελοποίηση, προσομοίωση

Abstract

Optical fibers are a new technology nowadays and are becoming an increasingly valuable target of scientific researches. New models are designed and studied to help their better description and understanding.

This study deals with the propagation of a wireless infrared signal inside a predefined internal space where the signal arrives via optical cables. At the first chapter of this study we will analyze technologies that are developed for the use of optical fibers indoors while we will also explain some basic concepts and technologies used during its preparation. At the second chapter we will propose a new model of wireless signal propagation and describe its use.

Keywords: Wireless, optical systems, infrared, LED diode, laser, ray tracing, impulse response, Lambertian distribution, modeling, simulation

Εισαγωγή

Οι οπτικές επικοινωνίες αποτελούν μια νέα τεχνολογία για τη σύγχρονη εποχή. Με σταθερό ρυθμό εισέρχονται ολοένα και περισσότερο στην καθημερινότητά μας. Έτσι, ολοένα και περισσότερες έρευνες ασχολούνται με την πιο ευρεία χρήση των οπτικών ινών για τον σχεδιασμό μοντέλων που θα περιγράψουν καλύτερα ένα ολοκληρωμένο σύστημα ινών (Moretto, Colin, 2013), αλλά και πως εξωτερικοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν το σήμα και να εισάγουν θόρυβο στο σύστημα (Margariti, Kamalakis, 2014). Παρά την συνεχή ενασχόληση με τα συστήματα αυτά, υπάρχουν ακόμα πολλά στοιχεία για την πλήρη κατανόηση και χρήση των οπτικών ινών. Ένα τέτοιο κομμάτι θα προσπαθήσει να καλύψει η έρευνα αυτή με το να μελετήσει την ασύρματη διάδοση ενός σήματος από οπτική ίνα σε έναν εσωτερικό χώρο και την αλληλεπίδρασή του με τυχόν αντικείμενα του χώρου, καθώς και τι αποτελέσματα φέρει αυτή η αλληλεπίδραση στο σήμα που τελικά λαμβάνουμε.

Οι ασύρματες επικοινωνίες σήμερα

Η ζήτηση για ασύρματες επικοινωνίες υψηλής ταχύτητας αυξάνεται καθώς οι φορητοί υπολογιστές και τα υπολογιστικά συστήματα γίνονται όλο και πιο ισχυρά και διαδεδομένα. Οι υπέρυθρες ακτίνες αποτελούν μια αρκετά ελκυστική επιλογή για πολλές εφαρμογές. Τα πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνουν τη διαθεσιμότητα ενός μεγάλου εύρους ζώνης που δεν ελέγχεται παγκοσμίως και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί, προστασία από υποκλοπές, την ικανότητα να πετύχει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, χαμηλή πολυπλοκότητα επεξεργασίας σήματος και δυνητικά πολύ χαμηλό κόστος. Οι υπέρυθρες ακτίνες για επικοινωνίες εσωτερικού χώρου, μικρών αποστάσεων προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Οι πομποί και οι ανιχνευτές υπέρυθρων ακτίνων, οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλή ταχύτητα, είναι διαθέσιμοι σε πολύ χαμηλό κόστος. Η υπέρυθρη φασματική περιοχή προσφέρει σχεδόν απεριόριστο εύρος ζώνης το οποίο δεν ελέγχεται παγκοσμίως. Το υπέρυθρο και το ορατό φως είναι κοντά σε μήκος κύματος και εμφανίζουν ποιοτικά παρόμοια συμπεριφορά. Και τα δύο απορροφώνται από σκοτεινά αντικείμενα, ανακλώνται διάχυτα από ανοιχτόχρωμα αντικείμενα και ανακλώνται κατευθυντικά από γυαλιστερές επιφάνειες. Και οι δύο τύποι του φωτός περνούν μέσα από το γυαλί, αλλά όχι μέσα από τοίχους ή άλλα αδιαφανή εμπόδια, έτσι ώστε οι υπέρυθρες εκπομπές να περιορίζονται στην αίθουσα από την οποία δημιουργήθηκαν. Αυτός ο περιορισμός του σήματος καθιστά εύκολο το να προστατευτούν οι μεταδόσεις από υποκλοπές, ενώ παράλληλα αποτρέπει τις παρεμβολές μεταξύ συνδέσμων που λειτουργούν σε διαφορετικά δωμάτια. Με αυτό τον τρόπο, τα ασύρματα υπέρυθρα τοπικά δίκτυα μπορούν να επιτύχουν μία υψηλή συνολική χωρητικότητα και ο σχεδιασμός τους μπορεί να απλοποιηθεί, δεδομένου ότι μεταδόσεις που γίνονται σε διαφορετικά δωμάτια δεν χρειάζεται να συντονίζονται (Kahn, Barry , 1997).

Παρόλα αυτά, οι ασύρματες υπέρυθρες επικοινωνίες έχουν και τα μειονεκτήματά τους. Επειδή οι υπέρυθρες ακτίνες δεν μπορούν να διαπεράσουν τους τοίχους, η επικοινωνία από το ένα δωμάτιο στο άλλο απαιτεί την εγκατάσταση σημείων πρόσβασης για τις υπέρυθρες, τα οποία θα διασυνδέονται μέσω ενός ενσύρματου δικτύου. Σε πολλούς εσωτερικούς χώρους υπάρχει έντονος θόρυβος από το περιβάλλον, ο οποίος προκύπτει από την ηλιακή ακτινοβολία, τον φωτισμό πυρακτώσεως και τον φωτισμό φθορισμού, γεγονός που εισάγει τον θόρυβο σε έναν δέκτη υπέρυθρων ακτίνων (Kahn, Barry , 1997). Όσο γίνεται πιο έντονος ο θόρυβος του περιβάλλοντος,

τόσο μειώνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR ή Signal To Noise Ratio) στην είσοδο του δέκτη, περιορίζοντας με αυτό τον τρόπο την μέγιστη εμβέλεια και τον ρυθμό μετάδοσης (Marsh, Kahn, 1996). Συχνά, οι υπέρυθρες συνδέσεις πρέπει να χρησιμοποιούν σχετικά υψηλά επίπεδα ισχύος μετάδοσης και να λειτουργούν σε ένα σχετικά περιορισμένο εύρος. Ενώ η στάθμη ισχύος του πομπού συνήθως μπορεί να αυξηθεί χωρίς τον φόβο παρεμβολής με άλλους χρήστες, η ισχύς του πομπού μπορεί να είναι περιορισμένη από ανησυχίες για μεγάλη κατανάλωση ισχύος και ασφάλεια των ματιών, ιδιαίτερα σε φορητούς πομπούς (Kahn, Barry , 1997).

Οι υπέρυθρες επικοινωνίες προτιμώνται για εφαρμογές μικρής εμβέλειας στις οποίες πρέπει να μεγιστοποιηθεί ο ρυθμός των bit ανά σύνδεσμο και η συνολική χωρητικότητα του συστήματος, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί το κόστος, απαιτείται μία διεθνής συμβατότητα ή πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η πολυπλοκότητα της επεξεργασίας του σήματος στον δέκτη.

Τα σύγχρονα ασύρματα οικιακά δίκτυα καλούνται να διαχειριστούν τη διακίνηση ολοένα και μεγαλύτερης ποσότητας πληροφορίας με ολοένα και μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης και όλα αυτά με το χαμηλότερο δυνατό κόστος (Ντόγαρη , 2011). Ως επικοινωνία ορίζεται γενικά η μεταφορά της πληροφορίας από ένα σημείο σε ένα άλλο (Marsh, Kahn, 1996). Σε ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα το σήμα που περιέχει την πληροφορία σχηματίζει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα το οποίο θα διαδοθεί μέσω του αέρα και, εν τέλει, ο δέκτης θα λάβει και θα ανακτήσει με την βοήθεια της αποδιαμόρφωσης. Ο γενικός σκοπός ενός ασύρματου οπτικού δικτύου είναι να μεταφερθεί η πληροφορία ανέπαφη από την πηγή στον δέκτη. Ένα ασύρματο οπτικό σύστημα αποτελείται από την πηγή, τον πομπό, το μέσο διάδοσης, τον δέκτη, το κανάλι και τον αποδέκτη. Από αυτά τα στοιχεία, ο πομπός, το κανάλι διάδοσης και ο δέκτης είναι κοινά για όλα τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Το κανάλι διάδοσης είναι το φυσικό μονοπάτι το οποίο ακολουθεί η πληροφορία καθώς μεταδίδεται στο σύστημα από τον πομπό στον δέκτη και μπορεί να έχει διάφορες μορφές. Όταν ασχολούμαστε με ασύρματες μεταδόσεις σήματος, το κανάλι συνήθως είναι η ατμόσφαιρα. Στις ενσύρματες επικοινωνίες από την άλλη, το φυσικό μέσο μπορεί να είναι ένα καλώδιο ή μια οπτική ίνα. Ανάλογα με το φυσικό περιβάλλον και το μέσο μετάδοσης τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ενός καναλιού διάδοσης, όπως είναι το εύρος ζώνης, ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει, η καθυστέρηση που εισάγει, το κόστος και η ευαισθησία στο θόρυβο, διαφέρουν και επηρεάζουν κατά ένα μεγάλο βαθμό την επιλογή της βέλτιστης τεχνικής

μετάδοσης. Ο πομπός και ο δέκτης του συστήματος είναι σχεδιασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις και τους περιορισμούς που εισάγει στο σύστημα το κάθε κανάλι διάδοσης (Ντόγαρη , 2011).

Η ακρίβεια και η αξιοπιστία είναι δυο πολύ βασικά χαρακτηριστικά για τα δίκτυα οπτικών ινών σε εσωτερικό χώρο (Moretto, Colin, 2013). Παρόλα αυτά, οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σήμερα δεν μας παρέχουν αρκετή ακρίβεια όσων αφορά τα στοιχεία αυτά. Αυτό οφείλεται κυρίως στην σκέδαση των ακτίνων, στον θόρυβο φάσης που εισάγεται από τα laser (Margariti, Kamalakis, 2014), παρεμβολές από φυσικό φως καθώς και διασπορά πολυδιόδευσης(multipath). Όλες οι έρευνες που μελετώνται ασχολούνται με τη σύμφωνη (coherent) διάδοση του σήματος στον χώρο, δηλαδή ότι η πηγή στέλνει σήματα με διαφορετική φάση και πάντα την ίδια συχνότητα. Όσο αυξάνεται, όμως, ο ρυθμός με τον οποίο μεταδίδονται τα σήματα τόσο μεγαλύτερη ανάγκη υπάρχει για ακρίβεια κάνοντας παράλληλα δύσκολη την αντιστάθμιση της διασποράς. Μία λύση σε αυτό το πρόβλημα έχει προταθεί με την δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο χρησιμοποιεί την τεχνική του CO-OFDM (Coherent Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) (Shieh, Bao, Tang, 2008). Το OFDM χρησιμοποιείται ευρέως, μιας και προσφέρει πολύ καλή εκτίμηση της χρωματικής διασποράς και της διασποράς πόλωσης, βοηθώντας στον περιορισμό τους, αλλά και στην εξάλειψη των παρεμβολών μεταξύ των σημάτων. Το μεγάλο μειονέκτημα ενός OFDM συστήματος είναι πως υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των τιμών της μέσης και της μέγιστης ισχύς με αποτέλεσμα το μοντέλο που προτείνεται να είναι πολύ ευαίσθητο στην μη-γραμμικότητα που δημιουργείται σε μία οπτική ίνα. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με το να γεμίσει μερικώς ο φορέας του καναλιού στο οποίο διαδίδεται το σήμα. Με αυτό τον τρόπο έγινε και η πρώτη προσπάθεια να μετριάσει ο θόρυβος μη-γραμμικής φάσης μέσω του δέκτη με τη βοήθεια ψηφιακής επεξεργασίας του σήματος σε ένα CO-OFDM σύστημα (Shieh, Bao, Tang, 2008). Για τους υπολογισμούς στα περισσότερα συστήματα οπτικών ινών χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος τροποποιημένων Monte Carlo επαναλήψεων, μιας και χρειάζεται ξεκάθαρα λιγότερο υπολογιστικό χρόνο (Gonzalez et al. 2011).

Σε όλα τα ασύρματα συστήματα, σε περίπτωση που δεν υπάρχει μονάχα η απευθείας διαδρομή μεταξύ του πομπού και του δέκτη, το εκπεμπόμενο κύμα φθάνει στο δέκτη έχοντας ακολουθήσει πολλές διαφορετικές διαδρομές και αφού έχει υποστεί ανακλάσεις σε φυσικά εμπόδια που συναντάει κατά τη διάδοσή του. Όταν το κύμα προσπίπτει σε μια επιφάνεια, ένα μέρος της ισχύος του απορροφάται από την επιφάνεια πρόσπτωσης ενώ το υπόλοιπο ανακλάται. Το υλικό της

επιφάνειας στην οποία συμβαίνει αυτό καθορίζει το ποσοστό τις ισχύος που θα απορροφηθεί ή θα ανακλαστεί καθώς και την γωνία με την οποία θα ανακλαστεί το κύμα. Οπότε, ανάλογα με το μονοπάτι που ακολούθησε ένα σήμα θα έχει διαφορετική απόσταση που διένυσε και θα εμφανίζει διαφορετική εξασθένηση, φάση, καθυστέρηση και γωνία πρόσπτωσης στο δέκτη, στο οποίο συμβάλλει και η ανάκλαση την οποία υπέστη το σήμα. Με αυτό τον τρόπο, πολλά αντίγραφα του ίδιου σήματος φτάνουν στον δέκτη από διαφορετικές κατευθύνσεις, με διαφορετικό πλάτος και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (Ντόγαρη , 2011).

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει σημαντική ερευνητική προσπάθεια για την υλοποίηση και βελτίωση οπτικών συστημάτων μικρής εμβέλειας, τα οποία θα προσφέρουν και υψηλές ταχύτητες (Wangetal. 2012). Πέραν από το μεγάλο, διαθέσιμο φάσμα και τις μεγάλες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, τα ασύρματα οπτικά συστήματα δεν εμφανίζουν παρεμβολές με τα ήδη υπάρχοντα συστήματα ραδιοεπικοινωνιών, ενώ παράλληλα έχουν αμελητέες βιολογικές αλληλεπιδράσεις (Margariti, Kamalakis, 2014). Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, έχει υπάρξει μια μεγάλη πρόοδος στις σύμφωνες οπτικές επικοινωνίες λόγω των ανακαλύψεων στον τομέα της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (Fludgeretal. 2008). Μέχρι και σήμερα, με τη βοήθεια της σύμφωνης ανίχνευσης επιτρέπεται μια πλήρης αναπαράσταση του οπτικού πεδίου, παρέχοντας πληροφορίες για την ένταση, την φάση και την πόλωση από το εισερχόμενο σήμα καθώς και βελτιωμένη φασματική απόδοση στα συστήματα οπτικών ινών (Margariti, Kamalakis, 2014).

Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την σύμφωνη ανίχνευση φαίνονται ιδιαίτερα σε ένα σύστημα οπτικών ινών. Παρόλα αυτά πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν ο θόρυβος φάσης του laser και ο θερμικός θόρυβος, καθώς και η παραμόρφωση που δημιουργείται στην φάση και στο πλάτος του λαμβανόμενου οπτικού σήματος, λόγω της φύσης της διάδοσης αυτής, σε ένα line of sightσύστημα (Margariti, Kamalakis, 2014).Ο θόρυβος φάσης του laserθεωρείται μια από τις πιο μεγάλες παρεμποδίσσεις στην απόδοση των οπτικών συστημάτων επικοινωνίας. Ο θόρυβος αυτός προκαλείται από τυχαία συμβάντα αυθόρμητης εκπομπής στην κοιλότητα του laserκαι εκδηλώνεται σαν μία τυχαία διακύμανση φάσης από την έξοδο του laser. Το καθιερωμένο μοντέλο είναι μία συνεχής κίνηση Brown (Wiener – Levy) με Gaussianστατιστικές (Atzmon, Nazarthy, 2009).

Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

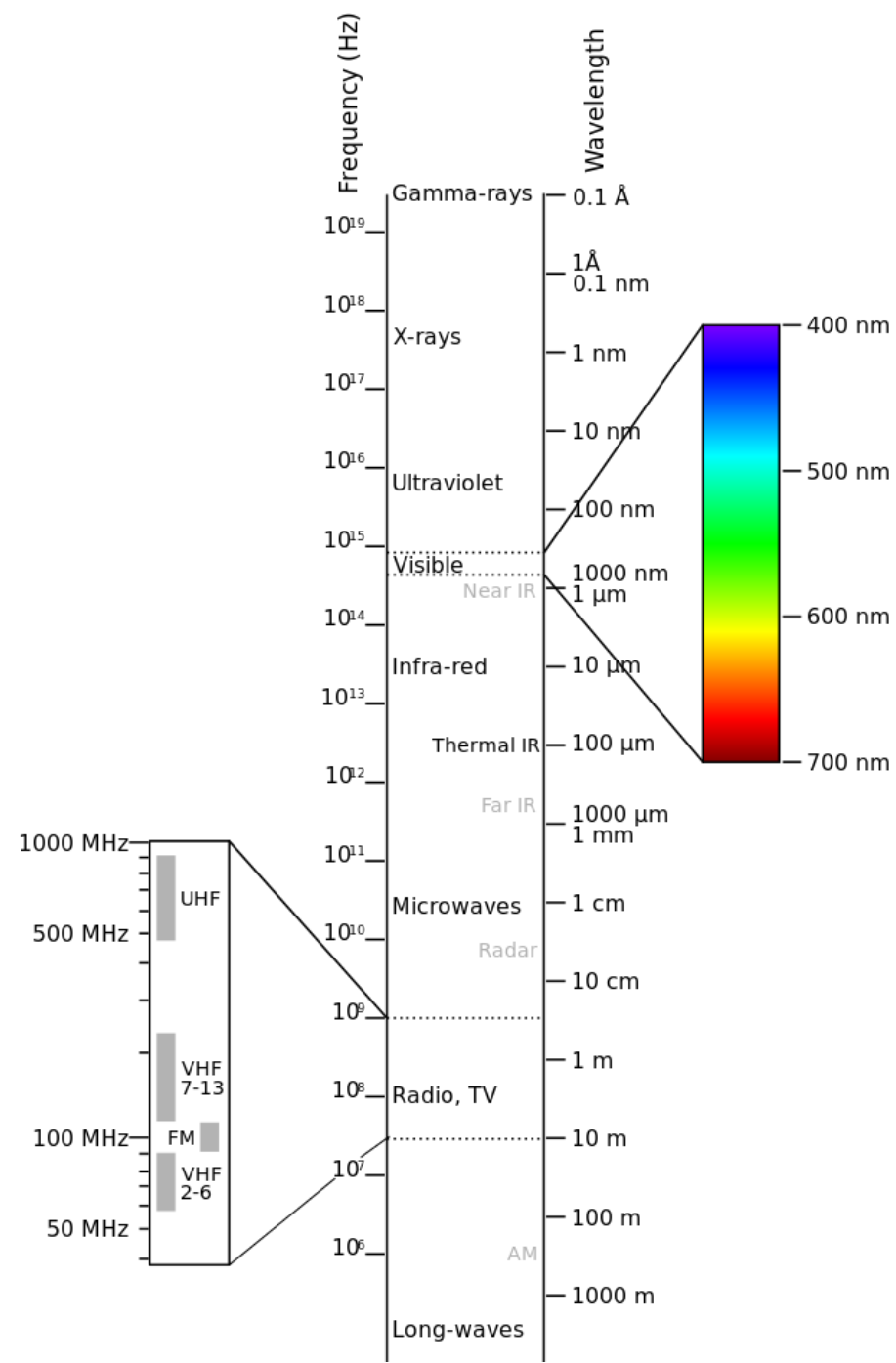
Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ονομάζεται το εύρος της περιοχής συχνοτήτων οι οποίες καλύπτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εκτείνεται θεωρητικά από σχεδόν μηδενικές συχνότητες έως το άπειρο. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται, με βάση κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες, σε επιμέρους ζώνες. Αυτές είναι τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, η υπέρυθρη ακτινοβολία, η ορατή ακτινοβολία (φως), η υπεριώδης ακτινοβολία, οι ακτίνες X και οι ακτίνες Γ. Οι ασύρματες εφαρμογές για οικιακά δίκτυα επικοινωνίας χρησιμοποιούν είτε την περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων (RF) είτε την οπτική περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Οι ραδιοσυχνότητες είναι ο ρυθμός ταλάντωσης στη περιοχή περίπου από 3 KHz έως 300 GHz, η οποία αντιστοιχεί στη συχνότητα των ραδιοκυμάτων και του εναλλασσόμενου ρεύματος που μεταφέρουν τα ραδιοκύματα αυτά. Οι ραδιοσυχνότητες αναφέρονται κυρίως σε ηλεκτρικές ταλαντώσεις.

Η ζώνη του ορατού φωτός είναι μία στενή ζώνη του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, στην οποία είναι ευαίσθητο το αισθητήριο της όρασης των ζωντανών οργανισμών. καλύπτει περιοχή συχνοτήτων 400-800 THz και η ενέργεια των φωτονίων κυμαίνεται από 1,6 - 3,2 eV. Το ορατό φάσμα χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες τις οποίες το ανθρώπινο μάτι τις αντιλαμβάνεται ως διαφορετικά χρώματα.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής θα ασχοληθούμε με το υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Περιοχή φάσματος	Συχνότητα	Μήκος κύματος
Ακτίνες Γ	300 EHz – 30 EHz	1 pm
Ακτίνες Χ	30 EHz – 30 PHz	10 pm – 10 nm
Υπεριώδες	30 PHz – 300 THz	10 nm – 1 μm
Υπέρυθρο	300 THz – 300 GHz	1 μm – 1mm
Extremely High Frequency (EHF)	300 GHz – 30 GHz	1mm – 1 cm
Super High Frequency (SHF)	30 GHz – 3 GHz	1 cm – 1 dm
Ultra High Frequency (UHF)	3 GHz – 300 MHz	1 dm – 1 m
Very High Frequency (VHF)	300 MHz – 30 MHz	1 m – 10 m
High Frequency (HF)	30 MHz – 3 MHz	10 m – 100 m
Medium Frequency (MF)	3 MHz – 300 KHz	100 m – 1 km
Low Frequency (LF)	300 KHz – 30 KHz	1 km – 10 km
Very Low Frequency (VLF)	30 KHz – 3 KHz	10 km – 100 km
Ultra Low Frequency (ULF)	3 KHz – 300 Hz	100 km – 1 Mm
Super Low Frequency (SLF)	300 Hz – 30 Hz	1 Mm – 10 Mm
Extremely Low Frequency (ELF)	30 Hz – 3 Hz	10 Mm – 100 Mm



Εικόνα 1: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Οπτικά συστήματα επικοινωνίας

Από τα σήματα καπνού και αργότερα τον οπτικό τηλεγράφο, φτάνουμε στον ηλεκτρικό τηλεγράφο, το τηλέφωνο και τις ραδιοφωνικές ζεύξεις, στα μικροκύματα, στα radar, την τηλεόραση, τα τηλέτυπα και τις δορυφορικές επικοινωνίες. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι πολύ μεγάλο, και για τις τηλεπικοινωνίες χρησιμοποιούμε ένα πολύ μικρό μέρος του, αυτό των ραδιοκυμάτων. Η συνεχής όμως ανάπτυξη του διαδικτύου τα τελευταία χρόνια σημαίνει ότι η τεχνολογία θα πρέπει να είναι σε θέση να διαχειριστεί τη διακίνηση ολοένα και μεγαλύτερης ποσότητας πληροφορίας και ταυτόχρονα να μπορεί να υποστηρίξει και νέες υπηρεσίες με αυξημένες απαιτήσεις από πλευράς ρυθμού μετάδοσης. Έτσι λόγω των αναγκών που παρουσιάζονται αλλά και της προόδου της επιστήμης και της τεχνολογίας, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε και άλλα μέρη του, όπως το ορατό. Και αρχίζουν οι προσπάθειες για την αξιοποίηση του τεράστιου εύρους ζώνης, που προσφέρει η οπτική περιοχή (υπέρυθρο, ορατό και υπεριώδες) του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το έναυσμα για τη χρήση του οπτικού φάσματος αποτελεί η ανακάλυψη του laser γύρω στα 1960. Το laser είναι μία μονοχρωματική πηγή στην οπτική περιοχή, με σταθερά κυματικά χαρακτηριστικά, εξαιρετική πυκνότητα ακτινοβολίας, κατευθυντικότητα και με δυνατότητα διαμόρφωσης στις υψηλές συχνότητες. Δεδομένου ότι αρχικά η τεχνολογία δεν διέθετε τις κατάλληλες διατάξεις διαμόρφωσης του φωτός, η κινητοποίηση των ερευνητών και των μηχανικών ήταν πρωτοφανής. Ανακαλύπτονται νέα υλικά και εξελίσσονται για τηλεπικοινωνιακή χρήση φωτοδίοδοι, φωτοτρανζίστορ, φωτο-FET και άλλα είδη φωτοπηγών όπως οι φωτοεκπέμπουσες δίοδοι ή LED.

Τα οπτικά δίκτυα υψηλής χωρητικότητας έχουν γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες, γιατί προσφέρουν πολύ υψηλό εύρος ζώνης το οποίο δεν μπορεί να επιτευχθεί από καμία άλλη τεχνολογία και η οπτική ίνα έχει αποδείξει πως έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης κατά μήκος μεγάλων αποστάσεων. Συνεπώς, τα δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούν οπτικές ίνες είναι σε θέση να ανταποκριθούν στις παραπάνω απαιτήσεις χωρητικότητας, ταχύτητας και απόστασης. Σε πολλά ήδη εγκατεστημένα οπτικά δίκτυα επιτυγχάνονται ρυθμοί της τάξεως των 2.5Gbps, 5Gbps και των 10Gbps ανά κανάλι. Η τεχνολογία που προσφέρουν οι οπτικές ίνες καθιστά εφικτή πλέον την οπτική διασύνδεση σε όλα τα επίπεδα και είδη δικτύων (δημόσια –ιδιωτικά), παρέχοντας τεράστιους ρυθμούς μετάδοσης και κοινή υποδομή για μεγάλη γκάμα υπηρεσιών. Οι οπτικές ασύρματες επικοινωνίες επιτρέπουν εύκολη επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων δεδομένου ότι η ακτινοβολία του φωτός περιορίζεται στο χώρο που φωτίζει, το χαρακτηριστικό αυτό το κάνει ποιο ασφαλές σε σχέση με τα RF (Radio

Frequency) συστήματα καθώς είναι αδύνατο να υποκλέψει κάποιος εκτός του δωματίου το μεταδιδόμενο σήμα. Επίσης το ορατό φάσμα έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με τις ραδιοσυχνότητες, το οποίο είναι περίπου 300GHz και συμπεριλαμβανομένων των Terahertz συχνοτήτων που βρίσκονται στο όριο των ραδιοσυχνοτήτων αλλά χωρίς πρακτικές εφαρμογές για την ώρα, ανεβαίνει στα 3THz. Απ' την άλλη το ορατό φάσμα από μόνο του έχει εύρος περίπου 300THz, και αν συμπεριλάβουμε και το υπέρυθρο αλλά και το υπεριώδες τότε η χωρητικότητα αυξάνεται πάρα πολύ.

Ένα προτέρημα των ραδιοσυχνοτήτων έναντι του οπτικού φάσματος στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών είναι ότι οι πρώτες έχουν την ιδιότητα να διαπερνούν τους τοίχους και να μην απαιτούν οπτική επαφή (line of sight – LOS) μεταξύ πομπού και δέκτη, όπου αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε ένα σπίτι για παράδειγμα, με περισσότερα από ένα δωμάτια, να απαιτείται μόνο ένας πομπός για να επικοινωνήσουν όλες οι WiFi συσκευές ασχέτως σε ποιο σημείο του σπιτιού βρίσκονται και αν έχουν οπτική επαφή με τον πομπό, όπου σε αντίθεση με τα οπτικά συστήματα που η εμβέλεια τους δεν ξεπερνάει τον χώρο τον οποίο φωτίζουν. Αυτό το χαρακτηριστικό συνέβαλε σημαντικά τα προηγούμενα χρόνια στο να μην υιοθετηθεί το ορατό φάσμα και γενικότερα το οπτικό για ασύρματες επικοινωνίες. Με την έλευση όμως των LED τα τελευταία χρόνια κατέστη δυνατό να χρησιμοποιήσουμε το ήδη υπάρχον δίκτυο φωτισμού σε ένα κτήριο και για τις ανάγκες μας για δικτύωση. Το μόνο που χρειάζεται είναι να αντικαταστήσουμε τις παραδοσιακές λάμπες φωτισμού, πυρακτώσεως και φθορίου, με LED και το ασύρματο router με ένα power line modem. Αυτή ήταν και η κυριότερη εξέλιξη η οποία επανατροφοδότησε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και των εταιρειών για την χρήση τους στις τηλεπικοινωνίες.

Οι πηγές φωτός, είτε ορατού είτε μη ορατού, βρίσκονται σήμερα στο επίκεντρο των δύο πλέον αναπτυσσόμενων βιομηχανιών: των υπολογιστών και των τηλεπικοινωνιών. Η οπτική ίνα μεταφέρει το φως ειδικών πηγών το οποίο μπορεί να περιέχει πληροφορία δεδομένων, εικόνας και φωνής, σε πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Η αναγκαιότητα της ανάπτυξης και χρησιμοποίησης οπτικών τηλεπικοινωνιακών μέσων προέκυψε από την αυξανόμενη ανάγκη μεταφοράς ολοένα και μεγαλύτερου όγκου πληροφοριών. Η ικανότητα που έχει μια πηγή να μεταφέρει πληροφορία

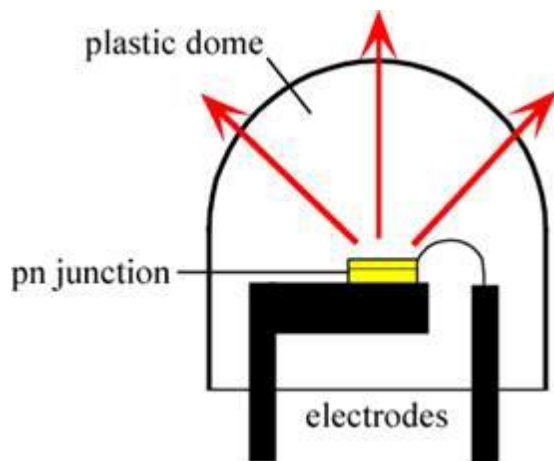
εξαρτάται αποκλειστικά από την συχνότητά της, η οποία είναι γνωστή σαν φέρουσα συχνότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι η φέρουσα συχνότητα, τόσο περισσότερη πληροφορία μπορεί να μεταδώσει και η οπτική πηγή. Υπάρχουν πηγές με φέρουσες συχνότητες της τάξης 1014Hz, οι οποίες υπερτερούν κατά 4-5 τάξεις μεγέθους σε σχέση με τις μικροκυματικές πηγές, οι οποίες συνήθως εκπέμπουν σε συχνότητες μερικών GHz(109Hz). Συνεπώς, τα συστήματα οπτικών μέσων είναι ικανά να μεταβιβάζουν 10 έως 100 χιλιάδες φορές περισσότερη πληροφορία από τα μικροκυματικά και βεβαίως εκατοντάδες εκατομμύρια φορές σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο μέσο μετάδοσης (π.χ. χάλκινα καλώδια). Η ανακάλυψη του laser το 1960, σε συνδυασμό με τις εξαιρετικές ικανότητες της οπτικής ίνας να μεταφέρει το φως σε πολύ μακρινές αποστάσεις, επέτρεψαν τη ραγδαία ανάπτυξη των οπτικών επικοινωνιών μέσα σε διάστημα λίγων δεκαετιών.

Οι δύο βασικότερες κατηγορίες οπτικών πηγών είναι τα LED (Light Emitting Diode) και τα Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Σκοπός και των δύο είναι να μετατρέπουν το ηλεκτρικό ρεύμα με το οποίο τροφοδοτούνται σε δέσμη φωτός, μεταφέροντας με αυτό τον τρόπο την πληροφορία από το ρεύμα τροφοδοσίας στη φωτεινή δέσμη. Η πληροφορία, η οποία εμπεριέχεται στις μεταβολές ή διακυμάνσεις του ρεύματος, μετατρέπεται στις μεταβολές των χαρακτηριστικών (π.χ. της έντασης) της φωτεινής δέσμης.

LED (Light Emitting Diode)

Τα LED είναι απλούστερες πηγές οι οποίες βρίσκουν ευρεία χρήση σε ασύρματες υπέρυθρες επικοινωνίες, στα τηλεχειριστήρια διάφορων συσκευών, σε εφαρμογές ηλεκτρονικής απεικόνισης (φωτεινοί δείκτες) κλπ. Το LED είναι μία ημιαγωγική διάταξη ένωσης p-n, η οποία εκπέμπει φως, όταν ο θετικός ακροδέκτης τροφοδοσίας συνδεθεί στην περιοχή τύπου p και ο αρνητικός στην περιοχή τύπου n, πετυχαίνοντας έτσι ορθή πόλωσή του. Η παραγωγή φωτός στην ένωση p-n οφείλεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Όταν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο κινείται από τον αρνητικό προς το θετικό ακροδέκτη, συναντά μια αντίθετα κινούμενη οπή στην περιοχή της ένωσης. Τα δύο σωματίδια επανασυνδέονται μεταξύ τους και εκπέμπουν ενέργεια με την μορφή ενός φωτονίου. Αυτός ο τρόπος παραγωγής φωτός είναι γνωστός σαν αυθόρμητη εκπομπή και χαρακτηρίζει τον

τρόπο λειτουργίας των LED κατά τον οποίο το φως που παράγουν εκπέμπεται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις στο χώρο.



Εικόνα 2: Διάταξη LED

Η παραγωγή φωτός προκύπτει από συγκεκριμένους ημιαγωγούς και όχι από οποιοδήποτε ημιαγωγό. Στο πυρίτιο και το γερμάνιο, αγωγούς που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα, η επανασύνδεση πραγματοποιείται με απελευθέρωση θερμότητας και επομένως οι ημιαγωγοί αυτοί δεν είναι κατάλληλοι για κατασκευή οπτικών πηγών. Οι πιο κατάλληλοι ημιαγωγοί είναι οι σύνθετοι ημιαγωγοί που προέρχονται από ανάμειξη των στοιχείων αλουμινίου (Al), γαλλίου (Ga), ή ινδίου (In) με τα στοιχεία φώσφορο (P), αρσενικό (As), ή αντιμόνιο (Sb). Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι ημιαγωγοί GaAsP, GaAlAs και GaInAsP. Το μήκος κύματος του φωτός το οποίο εκπέμπει η κάθε πηγή εξαρτάται από την ακριβή σύνθεση του ημιαγωγού.

Η ισχύς των LED φτάνει τα μερικά mW και η απόδοσή τους είναι το κλάσμα της ηλεκτρικής ισχύς εισόδου που μετατρέπεται σε φωτεινή ισχύ εξόδου. Η απόδοση αυτή στις σημερινές συσκευές είναι της τάξης του 10%. Τα LED μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετάδοση πληροφορίας είτε σε ψηφιακή είτε σε αναλογική μορφή μέσα από μια οπτική ίνα. Στην ψηφιακή μορφή, ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να φτάσει τις μερικές εκατοντάδες Mbps, γεγονός που επιτυγχάνεται με την κατάλληλη διαμόρφωση του ρεύματος οδήγησης του LED από το σήμα

πληροφορίας. Σαν διαμόρφωση ορίζεται η μεταβολή της φωτεινής ισχύς εκπομπής του LED σύμφωνα με τις μεταβολές του ρεύματος οδήγησης που το διαρρέει.

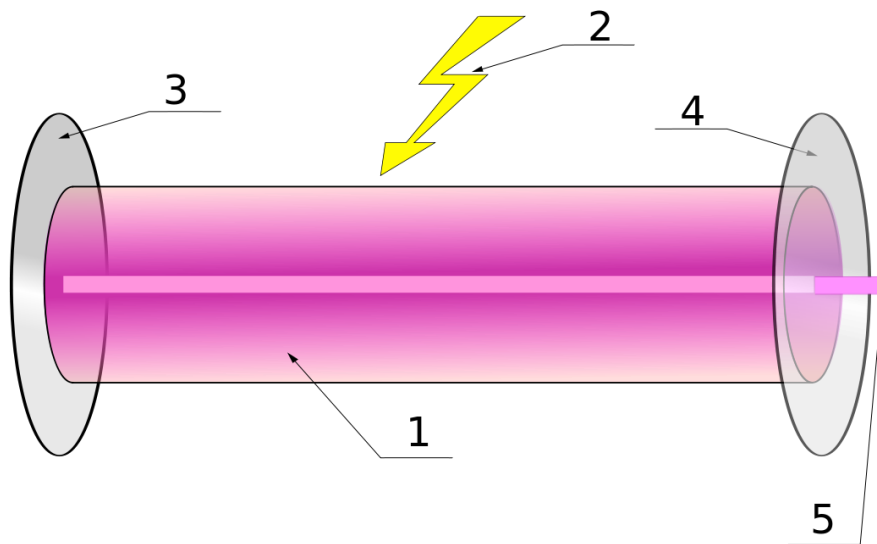
Ανάλογα με το χρώμα του φωτός σε μία LED μεταβάλλεται και το μήκος κύματος. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής που ασχολούμαστε με το υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, το μήκος κύματος είναι μεγαλύτερο των 760 nm.

Laser

Στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα με οπτικές ίνες οι πηγές που χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά είναι τα διοδικά laser ημιαγωγού. Τα πρώτα laser ημιαγωγού κατασκευάστηκαν το 1962 και τελειοποιήθηκαν το 1970, οπότε και άρχισαν να παίρνουν θέση σε εφαρμογές. Ο όρος 'laser' προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (Ενίσχυση Φωτός από Εξαναγκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας), οι οποίες δείχνουν την δυνατότητα που έχουν τα laser να παράγουν φως εκμεταλλευόμενα την εξαναγκασμένη ακτινοβολία.

Τα laser είναι παρόμοια κατασκευαστικά με τα LED (δηλαδή είναι και αυτά ενώσεις p-n), αλλά διαφέρουν στο ότι το φως παράγεται από εξαναγκασμένη (όχι αυθόρμητη) επανασύνδεση ηλεκτρονίων - οπών. Επίσης διαθέτουν ανακλαστικά άκρα, στα οποία το φως ανακλάται πολλαπλά εσωτερικώς μεταξύ τους, όταν το laser τροφοδοτηθεί με ρεύμα (σχήμα 4). Οι πολλαπλές αυτές ανακλάσεις των φωτεινών κυμάτων (οπτική ανατροφοδότηση) έχουν ως αποτέλεσμα την εξαναγκασμένη αποδιέγερση όλο και περισσότερων ηλεκτρονίων και την ενίσχυση της ακτινοβολίας λόγω εξαναγκασμένης εκπομπής. Μόλις το ρεύμα αυξηθεί αρκετά, τότε:

- α) η ενίσχυση (απολαβή) ξεπερνά τις εσωτερικές απώλειες του υλικού
- β) η φωτεινή δέσμη διαπερνά τα ημιδιαφανή ανακλαστικά άκρα (κάτοπτρα) και
- γ) εκπέμπεται μια σχεδόν μονοχρωματική φωτεινή δέσμη, εξαιρετικά μεγάλης λαμπρότητας και μεγάλης κατευθυντικότητας.



Εικόνα 3: Στοιχεία ενός laser

1. Ενεργό υλικό του λέιζερ
2. Προσφερόμενη ενέργεια άντλησης
3. Κάτοπτρο υψηλής ανακλαστικότητας
4. Διάταξη εξόδου δέσμης
5. Δέσμη Λέιζερ

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν δίοδοι LED για το πειραματικό κομμάτι, ενώ οι διαφορές με το αν χρησιμοποιούνταν laser θα ήταν ελάχιστες, όπως θα αναλυθούν παρακάτω.

Ray Tracing

Στη φυσική, ray tracing είναι μια μέθοδος για τον υπολογισμό της διαδρομής των κυμάτων ή σωματιδίων μέσα από ένα σύστημα με περιοχές διαφορετικής ταχύτητας διάδοσης, χαρακτηριστικά απορρόφησης και ανακλαστικές επιφάνειες. Υπό αυτές τις συνθήκες, το διαδιδόμενο κύμα μπορεί να λυγίσει, να αλλάξει κατεύθυνση, ή να αντανακλαστεί από επιφάνειες, περιπλέκοντας την ανάλυση. Το ray tracing λύνει το πρόβλημα με την επαναλαμβανόμενη προώθηση ακτίνων δια του μέσου με διακριτές ποσότητες. Απλά προβλήματα μπορούν να αναλυθούν με τη διάδοση μερικών ακτίνων χρησιμοποιώντας απλά μαθηματικά. Το ray tracing δουλεύει υποθέτοντας ότι το κύμα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένας μεγάλος αριθμός πολύ στενών δεσμών.

Η μέθοδος ray tracing απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ αλλά μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε σύστημα, σε οποιοδήποτε χώρο και να υπολογίσει με ακρίβεια την κρουστική απόκριση (impulse response) του καναλιού. Αποτελείται από τρεις φάσεις:

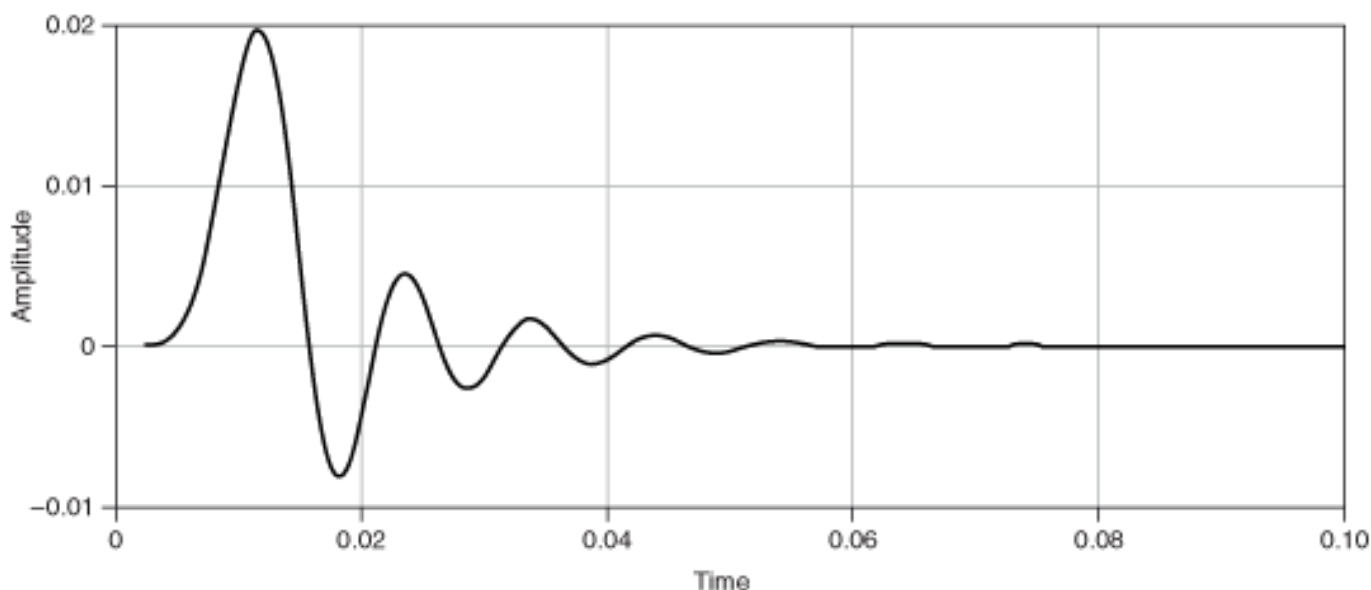
- 1) Παράγονται δέσμες ακτίνων από τον πομπό
- 2) Ανακλώνται στις επιφάνειες του δωματίου
- 3) Υπολογίζεται η κρουστική απόκρουση στον δέκτη.

Χαρακτηριστικό της κάθε επιφάνειας στον χώρο είναι ο συντελεστής ανάκλασης της, καθώς αυτό καθορίζει και την κατεύθυνση της ανακλώμενης ακτίνας. (Hernandez, Jimenez, Santamaria 1998).

Impulse response

Η έξοδος ενός γραμμικού (σε αρχική ηρεμία) συστήματος μπορεί να περιγραφεί ως συνάρτηση δύο σημάτων: του σήματος εισόδου και της απόκρισης του συστήματος όταν αυτό διεγείρεται από κρουστικό σήμα $\delta(t)$. Η περιγραφή του συστήματος ως μιας απεικόνισης, που επενεργεί στην είσοδο, δεν είναι πάντα εύκολη, ιδιαίτερα όταν το σύστημα είναι πολύπλοκο (Proakis, Salehi, 2002).

Η κρουστική απόκριση ενός δυναμικού συστήματος είναι η έξοδος του όταν παρουσιάζεται με ένα σύντομο σήμα εισόδου, που ονομάζεται ώθηση (impulse). Γενικότερα, μια κρουστική απόκριση αναφέρεται στην αντίδραση οποιουδήποτε δυναμικού συστήματος σε κάποια εξωτερική αλλαγή. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις, η κρουστική απόκριση περιγράφει την αντίδραση του συστήματος ως συνάρτηση του χρόνου (ή ενδεχομένως ως συνάρτηση κάποιας άλλης ανεξάρτητης μεταβλητής που παραμετροποιεί τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος).



Εικόνα 4: Ένας παλμός και η κρουστική απόκριση στον δέκτη σε συνάρτηση με τον χρόνο

Δεδομένου ότι η κρουστική απόκριση περιέχει όλες τις συχνότητες ορίζει την απόκριση ενός γραμμικού χρονικά αναλλοίωτου συστήματος για όλες τις συχνότητες. Η κρουστική απόκριση είναι απαραίτητη λοιπόν για να περιγράψουμε το κανάλι μας, με τα χαρακτηριστικά τα οποία λαμβάνουμε στην έξοδο. Οπότε, με την βοήθεια της εισόδου που έχουμε στον πομπό και την κρουστική απόκριση, μπορούμε να υπολογίσουμε την έξοδο.

Ορισμός ερευνητικού προβλήματος

Οι μελέτες που εξετάστηκαν περιέγραφαν τεχνολογίες και αλγορίθμους για συστήματα οπτικών ινών και την ασύρματη διάδοση σήματος. Η συγκεκριμένη έρευνα θα προσπαθήσει να δημιουργήσει μία προσομοίωση ασύρματης διάδοσης σήματος σε έναν εσωτερικό χώρο και να εξετάσει την απολαβή ισχύος και την κρουστική απόκριση του συστήματος αυτού.

Ανάλυση έρευνας

MATLAB: Για την έρευνα αυτή χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MATLAB της Mathworks, ένα προγραμματιστικό περιβάλλον που χρησιμοποιείται κυρίως για αριθμητικούς υπολογισμούς, υλοποιήσεις αλγορίθμων και σχεδίαση γραφικών παραστάσεων.

Monte Carlo Iterations: Η μέθοδος Monte Carlo είναι μια σειρά από υπολογιστικούς αλγορίθμους οι οποίοι βασίζονται στην τυχαία δειγματοληψία για να λάβουν αριθμητικά αποτελέσματα. Χρησιμοποιούνται ευρέως για προσομοιώσεις. Κατά τη διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται πολλές φορές η ίδια προσομοίωση μέχρι να λάβουμε την κατανομή του επιθυμητού αποτελέσματος.

Στην έρευνα αυτή χρησιμοποιούνται επαναλήψεις Monte Carlo για την λήψη στατιστικά σημαντικών αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά των επαναλήψεων αυτών:

- Το μέγεθος του δείγματος πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο, ώστε τα αποτελέσματα που θα λάβουμε να είναι στατιστικά σημαντικά και να ανταποκρίνονται σε πραγματικές συνθήκες. Επαναλαμβάνεται η διαδικασία της προσομοίωσης διάδοσης ενός σήματος σε έναν εσωτερικό χώρο 3.000.000 φορές.
- Με τη χρήση μαθηματικών συναρτήσεων, κάνουμε τους απαραίτητους υπολογισμούς που χρειαζόμαστε στο σύστημα. Έτσι, με τη βοήθεια συναρτήσεων υπολογίζουμε το κάθε σήμα που ξεκινάει από τον πομπό, την γωνία που θα έχει μία ακτίνα μετά την ανάκλασή της με

κάποια επιφάνεια και την ισχύ που λαμβάνει ο δέκτης την κάθε χρονική στιγμή. Έτσι μπορούμε να καταλάβουμε τι επίδραση είχαν τα αντικείμενα αυτά που προστέθηκαν στον χώρο στο σύστημά μας.

- Το σήμα δεν έχει την ίδια ισχύ καθ' όλη την διάρκεια της διάδοσής του. Ο περιορισμός που θέτουμε είναι πως η κάθε ακτίνα μετά την τρίτη αναπήδηση σε κάποια επιφάνεια του χώρου εξασθενεί, η ισχύς που λαμβάνει ο δέκτης δεν είναι ικανοποιητική, οπότε και δεν προσφέρει κάποια ουσιαστική πληροφορία στον δέκτη.

Περιγραφή μοντέλου

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη διπλωματική αποτελείται από ένα σύστημα οπτικών ινών, έναν πομπό και έναν δέκτη. Η εξομοίωση γίνεται σε ένα δωμάτιο του οποίου οι διαστάσεις καθώς και τα χαρακτηριστικά του πομπού και του δέκτη δίνονται σαν είσοδος στο πρόγραμμα. Κατά την εξομοίωση, ο πομπός στέλνει έναν αριθμό από ακτίνες σε τυχαίες κατευθύνσεις σε όλο το δωμάτιο και, κατά την έξοδο, παρατηρούμε πόσες από αυτές τις ακτίνες φτάνουν εν τέλει στον πομπό καθώς και την ισχύ που μεταφέρει η κάθε ακτίνα. Κατά την υλοποίηση έχει γίνει η παραδοχή πως μετά την τρίτη αναπήδηση μιας ακτίνας σε κάποια επιφάνεια το σήμα εξασθενεί οπότε και δεν λαμβάνεται υπ' όψιν στην έξοδο. Για την εξομοίωση αυτή υλοποιήθηκαν τα παρακάτω .m αρχεία: **cart_to_spher.m**, **define_room.m**, **draw_room.m**, **find_wall.m**, **generate_ray.m**, **hlinplinter.m**, **impulse_response.m**, **LOS_power.m**, **reflected_ray.m**, **rotatex.m**, **rotate.m**, και **rotatez.m**, **shper_to_cart.m**.

Το **cart_to_spher.m** μετατρέπει τις καρτεσιανές συντεταγμένες που δέχεται ως είσοδο σε σφαιρικές συντεταγμένες.

Το **define_room.m** οριοθετεί το δωμάτιο. Δίνει τις διαστάσεις της κάθε πλευράς/τοίχου, το κάθετο σε αυτή διάνυσμα και τον συντελεστή ανάκλασης της καθεμιάς.

Το **draw_room.m** σχεδιάζει το δωμάτιο και το εμφανίζει σε ένα νέο παράθυρο.

Το **find_wall.m** βρίσκει σε ποια επιφάνεια (τοίχο) ανακλάται η ακτίνα και κατά την έξοδο επιστρέφει τον δείκτη αυτής της επιφάνειας. Μέσα στη συνάρτηση αυτή, με την βοήθεια της `inside_room` υπολογίζεται και αν η ακτίνα βρίσκεται μέσα στο δωμάτιο μέσα σε κάποια μικρά όρια ανεκτικότητας (tol), απομακρύνοντας έτσι τυχόν λάθη. Παίρνει σαν αρχικά ορίσματα τους πίνακες που αποθηκεύονται τα δεδομένα των ακτίνων και των τοίχων καθώς και τις διαστάσεις του δωματίου.

Το **generate_ray.m** δημιουργεί τις ακτίνες της προσομοίωσης, αρχικοποιώντας και κάποιες μεταβλητές τους, όπως η ισχύς τους. Χρησιμοποιεί τυχαία x και y ώστε να παράγει Lambertian ακτίνες με τα οποία υπολογίζουμε και το z . Με την βοήθεια της `find_wall` βρίσκει από ποιον τοίχο ξεκίνησε η κάθε ακτίνα, ενώ με την `hlinplinter` καταλαβαίνει αν ο τοίχος αυτός ανήκει στο δωμάτιο. Παίρνει σαν αρχικά ορίσματα την κατεύθυνση της ακτίνας, το σημείο εκκίνησής της, τον πίνακα που αποθηκεύονται τα δεδομένα των τοίχων, τις διαστάσεις του δωματίου και την ισχύ που φέρει το σήμα.

Το **hlinplinter.m** υπολογίζει αν μία ακτίνα τέμνεται με ένα επίπεδο. Παίρνει σαν αρχικά ορίσματα το σημείο εκκίνησης μιας ακτίνας και το διάνυσμά της σε καρτεσιανές συντεταγμένες, ένα σημείο στην επιφάνεια και ένα κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια αυτή, ενώ η όλη διαδικασία γίνεται με την εκτέλεση εσωτερικών γινομένων.

Το **impulse_response.m** είναι το βασικό εκτελέσιμο αρχείο που παίρνει τα δεδομένα της προσομοίωσης, δηλαδή τη θέση και τον προσανατολισμό του δέκτη και του πομπού, το εμβαδό και το οπτικό πεδίο του πομπού, την αρχική εκπεμπόμενη ισχύ, κάποιες σταθερές, και δημιουργεί το δωμάτιο και τα αντικείμενα μέσα σε αυτό. Αφού υπολογίσει την συνεισφορά του line-of-sight στην εκπεμπόμενη ισχύ με το `LOS_power`, σχεδιάζει το δωμάτιο με το `draw_room` και δημιουργεί τις ακτίνες με το `generate_ray`. Μετά, για καθεμία ακτίνα υπολογίζει την ισχύ τους καθώς και τον χρόνο μέχρι να συναντήσουν κάποια επιφάνεια και, εφόσον ο αριθμός των ανακλάσεων της κάθε ακτίνας είναι μικρότερος του τρία, υπολογίζει την νέα ακτίνα με την `reflect_ray` και ανανεώνει τον πίνακα που αποθηκεύονται τα δεδομένα των ακτίνων με τα νέα. Αφού ικανοποιηθεί η παραπάνω

συνθήκη, υπολογίζονται μια τελευταία φορά η ισχύς της κάθε ακτίνας καθώς και ο χρόνος που χρειάστηκε για να φτάσει σε αυτό το σημείο και αποθηκεύονται στον πίνακα των κρουστικών αποκρίσεων. Τέλος, δημιουργείται ένα γράφημα που αναπαριστά τις τιμές της κρουστικής απόκρισης σε συνάρτηση με τον χρόνο, όπου και εμφανίζονται τα τελικά αποτελέσματα.

Το **LOS_power.m** υπολογίζει την ισχύ και τις απώλειες σε αυτή της ακτίνας λόγω του line-of-sight. Παίρνει σαν αρχικά ορίσματα τη θέση του πομπού, ή του σημείου στο χώρο που λειτουργεί σαν πομπός τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, και του δέκτη, τον προσανατολισμό του πομπού, ή του σημείου στο χώρο που λειτουργεί σαν πομπός τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, και του δέκτη, το εμβαδό και το οπτικό πεδίο του πομπού, την τιμή της Lambertian κατανομής και την εκπεμπόμενη ισχύ.

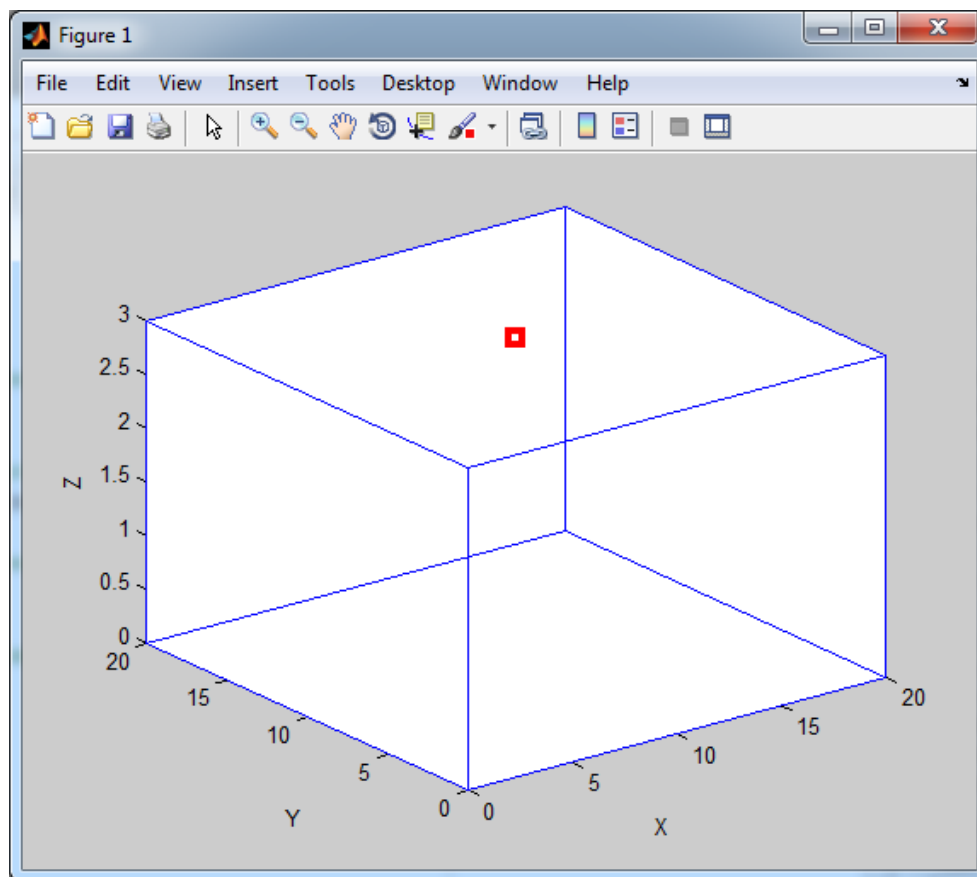
Το **reflect_ray.m** υπολογίζει μια νέα, πιθανή, τυχαία ακτίνα από το σημείο που η ακτίνα τέμνει ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Με την βοήθεια της `find_wall` βρίσκει σε ποιον τοίχο του δωματίου προσέπινε η ακτίνα και την υπολογίζει εκ νέου, δίνοντας νέες τιμές στις μεταβλητές της, ενώ με την `hlinplinter` καταλαβαίνει αν ο τοίχος αυτός ανήκει στο δωμάτιο. Παίρνει σαν αρχικά ορίσματα την πηγή της ακτίνας εκείνη τη χρονική στιγμή, τον δείκτη του τοίχου στον οποίο προσέπινε η ακτίνα, τον πίνακα που αποθηκεύονται τα δεδομένα των τοίχων και τις διαστάσεις του δωματίου.

Το **rotatex.m** περιστρέφει μία ακτίνα ως προς τον άξονα x.

Το **rotatey.m** περιστρέφει μία ακτίνα ως προς τον άξονα y.

Το **rotatez.m** περιστρέφει μία ακτίνα ως προς τον άξονα z.

Το **shper_to_cart.m** μετατρέπει τις σφαιρικές συντεταγμένες που δέχεται ως είσοδο σε καρτεσιανές συντεταγμένες.

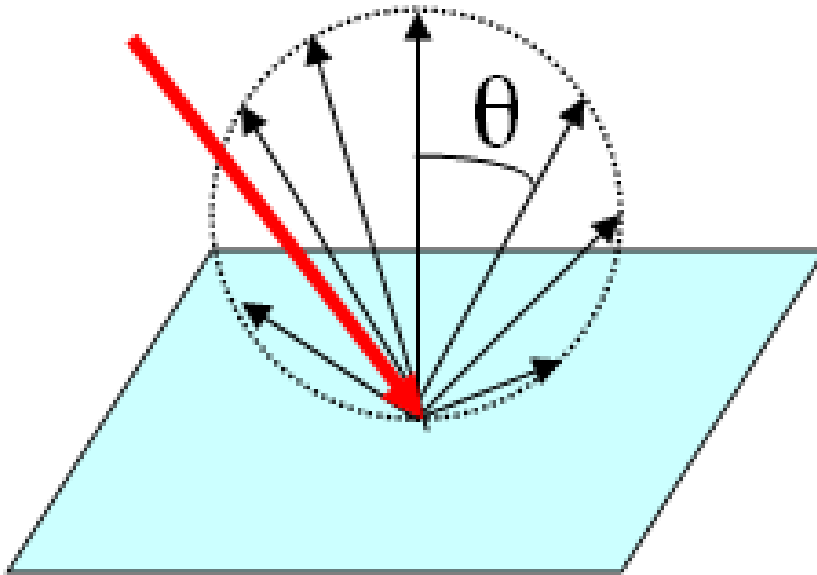


Εικόνα 5: Ένα κενό δωμάτιο με μήκος 20, πλάτος 20 και ύψος 3.

Lambertian κατανομή

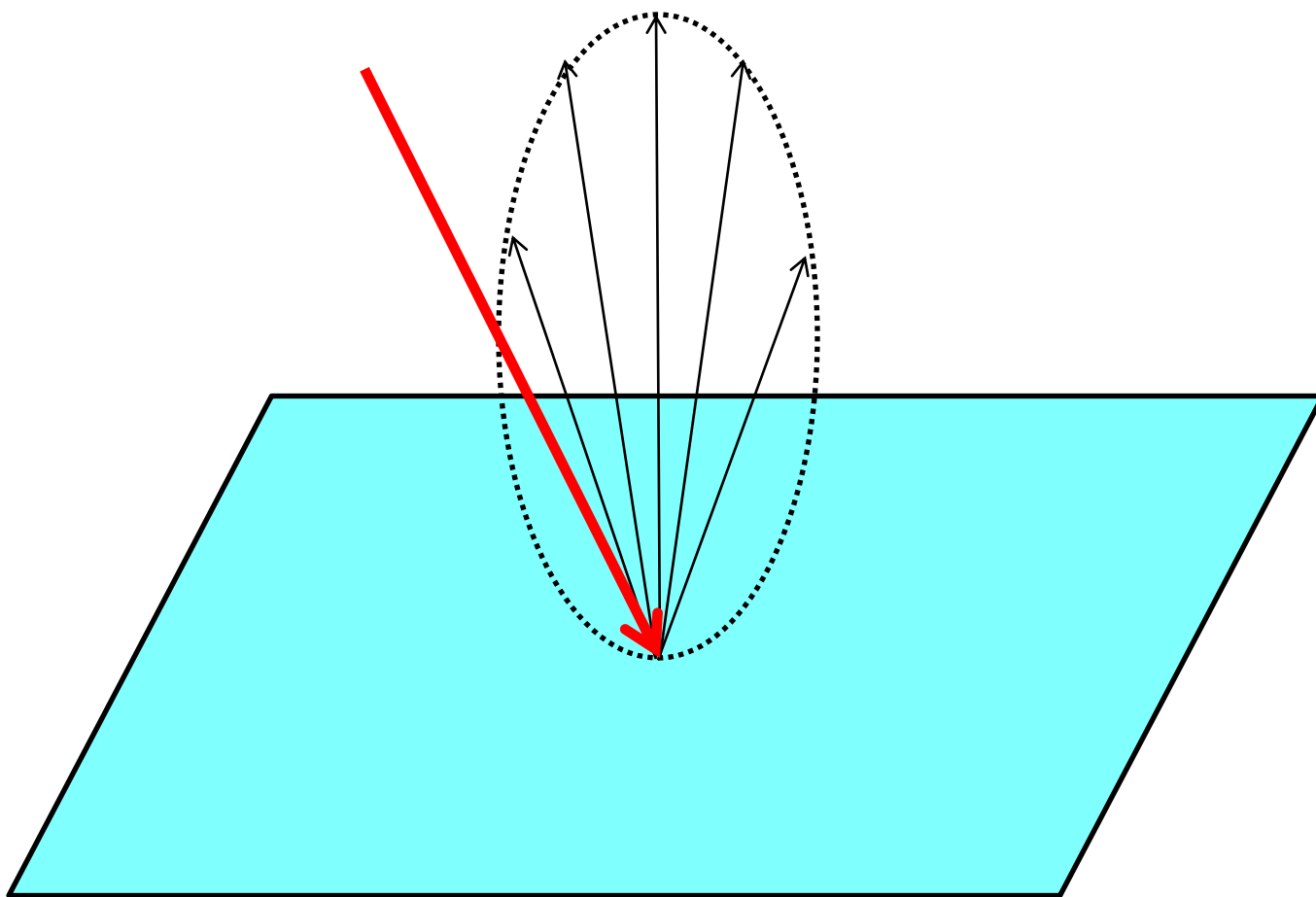
Στο σύστημά μας, ο πομπός γεννάει ακτίνες βάσει της Lambertian κατανομής. Επειδή, ο πομπός μας είναι μια δίοδος LED η κατανομή είναι πρώτης τάξης. Οι πηγές αυτού του τύπου να εμφανίζονται το ίδιο φωτεινές από οποιαδήποτε διεύθυνση κι αν παρατηρούνται. Η ένταση του φωτός εμφανίζεται μέγιστη κατά την κάθετο στην επίπεδη επιφάνεια εκπομπής του LED. Όταν μια ακτίνα προσπίγει σε μία επιφάνεια, τότε αυτή ανακλάται και μπορεί να συνεχίσει την πορεία της, με τυχαία κατεύθυνση όπως βλέπουμε και στο σχήμα 1.

Σε τέτοιες περιπτώσεις η ισχύς που εκπέμπεται σε γωνία θ από την κάθετο στην επιφάνεια εκπομπής, μεταβάλλεται ανάλογα με το $\cos_m(\theta)$, όπου m είναι η τάξη της κατανομής.



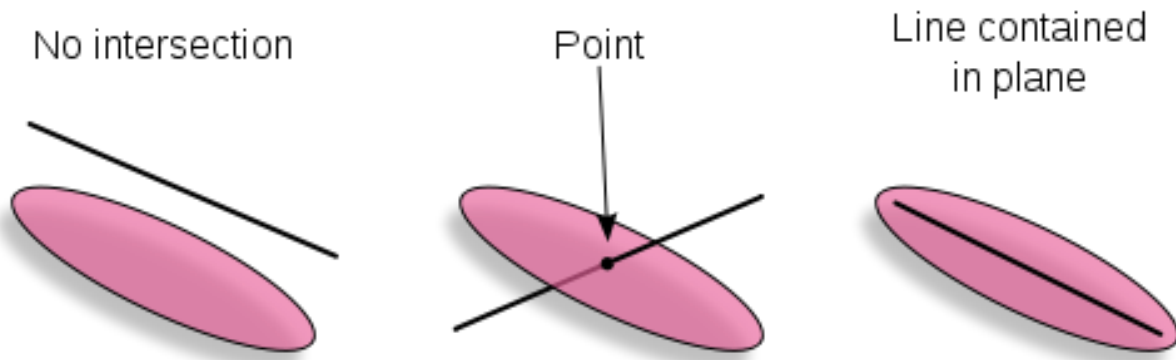
Σχήμα 1: Lambertian κατανομή 1^{ης} τάξης ($m=1$)

Στην περίπτωση που η πηγή μας ήταν laser, τότε η Lambertian κατανομή θα ήταν μεγαλύτερης τάξης και το διάγραμμα ακτινοβολίας θα ήταν κατευθυντικότερο, όπως στο σχήμα 2.



Σχήμα 1: Lambertian κατανομή 2^{ης} τάξης ($m=2$)

Τομή ακτίνας με επίπεδο

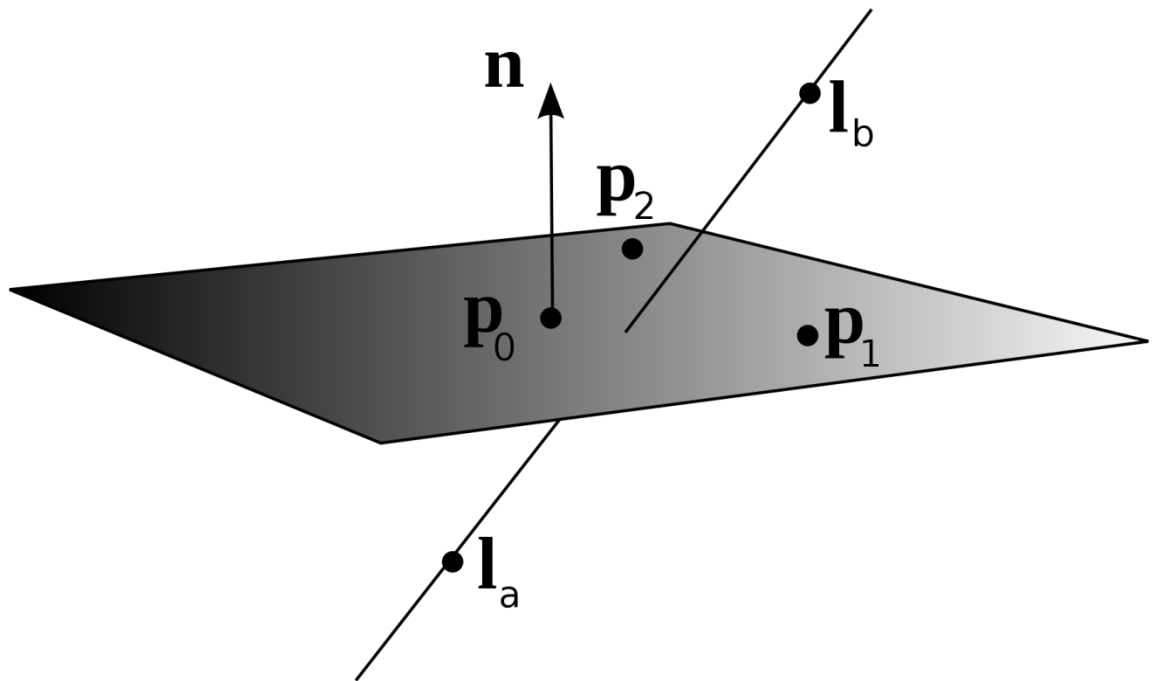


Εικόνα 6: Τομή ακτίνας με επίπεδο

Για την υλοποίηση του μοντέλου, ήταν απαραίτητος ο υπολογισμός της κάθε ακτίνας μετά την ανάκλασή της με ένα επίπεδο, δηλαδή έναν τοίχο. Οι περιπτώσεις τομής μια ακτίνας με ένα επίπεδο που λήφθηκαν υπ' όψιν στο `reflect_ray.m` ήταν οι εξής:

- 1) Καμία τομή με το επίπεδο. Η ακτίνα είναι παράλληλη με το επίπεδο, οπότε και δεν τέμνονται ποτέ
- 2) Τομή σε ένα μόνο σημείο. Η πιο συχνή περίπτωση, κατά την οποία ύστερα υπολογιζόταν η γωνία με την οποία η ακτίνα ανακλόταν από την επιφάνεια και συνέχιζε την πορεία της.
- 3) Η ακτίνα είναι πάνω στο επίπεδο. Η ακτίνα ταξιδεύει πάνω στο επίπεδο, οπότε και περιλαμβάνεται ολόκληρη πάνω σε αυτό.

Για να υπολογίσουμε σωστά την ανακλώμενη ακτίνα πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας τον συντελεστή ανάκλασης της κάθε επιφάνειας, οι οποίοι αρχικοποιούνται στην `generate_ray.m`. Για να περιγραφεί σωστά ένα επίπεδο χρειάζεται να γνωρίζουμε ένα σημείο πάνω στο επίπεδο και ένα κάθετο σε αυτό διάνυσμα.



Εικόνα 7: Σημείο πάνω στο επίπεδο και κάθετο διάνυσμα στο επίπεδο αυτό

Σε κάθε σημείο του επιπέδου στο οποίο προσπίπτει μία ακτίνα δημιουργείται μια νέα, μικρότερη πηγή γύρω από το σημείο ανάκλασης. Ασθενέστερες ακτίνες μπορεί να φτάσουν στον δέκτη από αυτή την πηγή, βοηθώντας στον καλύτερο υπολογισμό της κρουστικής απόκρισης.

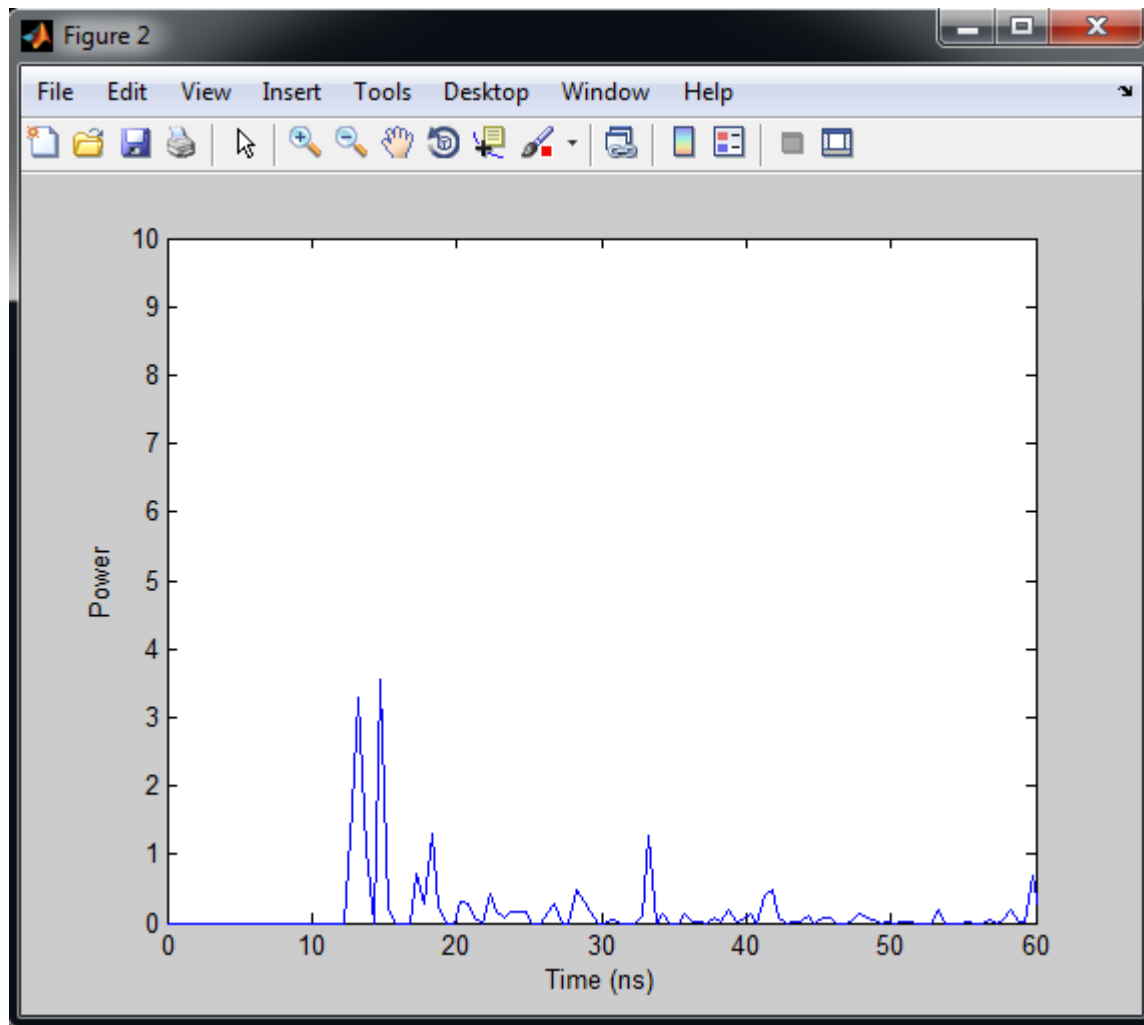
Η προσομοίωση

Η προσομοίωση του μοντέλου υλοποιήθηκε εξ' ολοκλήρου στο πρόγραμμα MATLAB. Πιο συγκεκριμένα, το `impulse_response.m` είναι το αρχείο το οποίο εκτελεί την προσομοίωση. Στην αρχή δίνονται κάποιες σταθερές, οι διαστάσεις του δωματίου και οι συντελεστές ανάκλασης της κάθε επιφάνειας, καθώς και η θέση και ο προσανατολισμός του πομπού και του δέκτη. Αφού σχεδιαστεί το δωμάτιο με την `define_room.m`, υπολογίζεται η επίπτωση που έχει το line-of-sight στην ισχύ του δέκτη. Υπολογίζονται οι αρχικές ακτίνες, δηλαδή αυτές που παράγει ο δέκτης, με την `generate_ray.m`, καθώς και η αρχική ισχύς που φέρουν οι ακτίνες αυτές. Για καθεμία από τις ακτίνες υπολογίζεται η ισχύς που έχουν όταν φτάσουν στον δέκτη καθώς και πόσος χρόνος, σε nanoseconds, πέρασε για να φτάσουν στον δέκτη, αν έχουν άμεση οπτική επαφή με αυτόν. Αφού γίνει αυτό, βρίσκονται οι ακτίνες οι οποίες προσέπιψαν σε κάποια επιφάνεια χωρίς να έχουν φτάσει στον δέκτη, μέσω του `reflect_ray.m`, υπολογίζονται οι νέες ανακλώμενες ακτίνες και ισχύς που τώρα πια φέρουν. Η διαδικασία αυτή του υπολογισμού των ακτινών επαναλαμβάνεται τρεις φορές, σύμφωνα με τον αρχικό περιορισμό που έχουμε θέσει, και κάθε φορά η τιμή της ισχύος κάθε ακτίνας αποθηκεύεται στον πίνακα της κρουστικής απόκρισης. Αφού επαναληφθεί η διαδικασία τρεις φορές, υπολογίζεται μια τελευταία φορά η ισχύς όσων ακτίνων δεν είχαν φτάσει ως εκείνη τη στιγμή στον δέκτη και εμφανίζεται σε ένα γράφημα η έξοδος, δηλαδή ισχύς που φτάνει τελικά στον δέκτη.

Αποτελέσματα

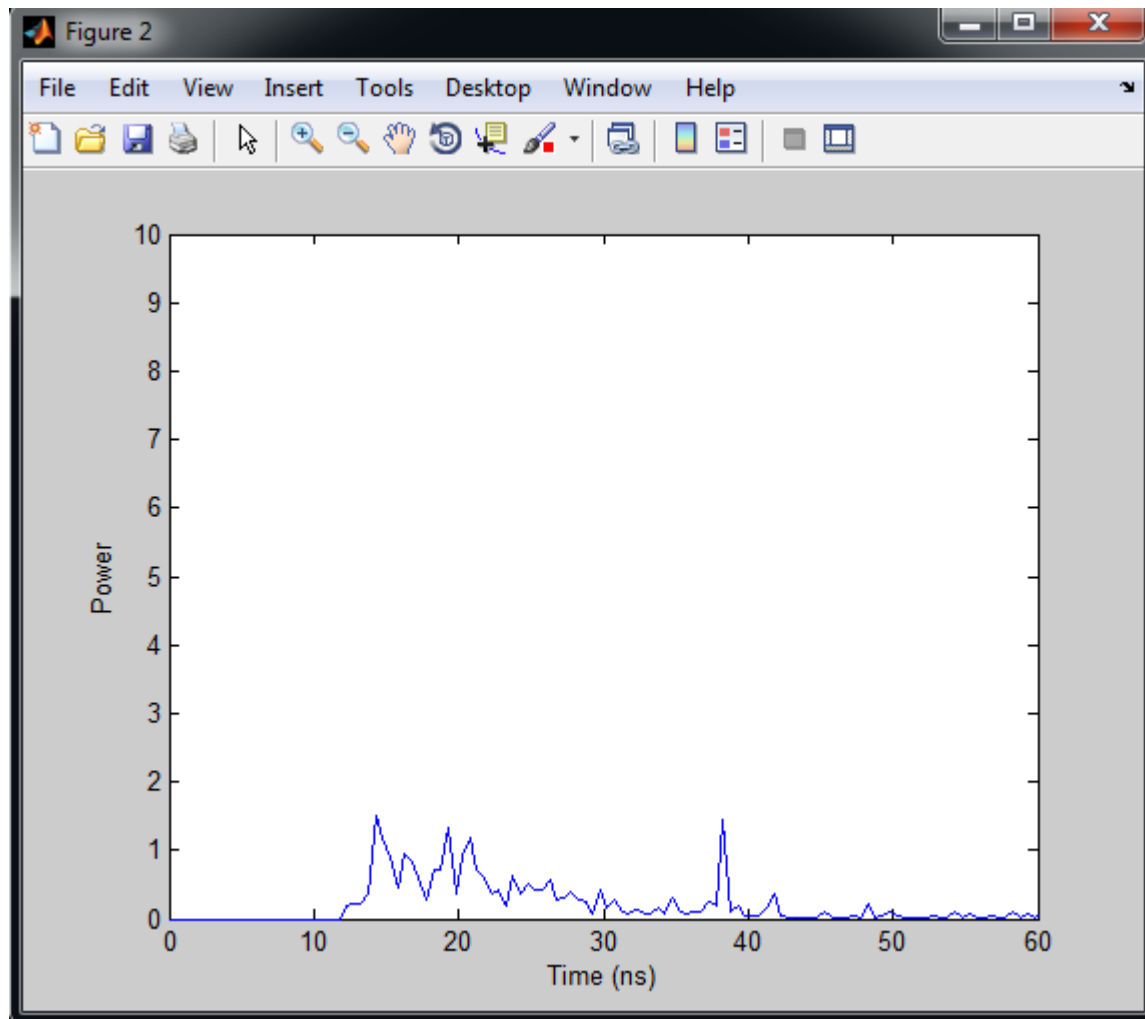
Σκοπός του πειράματος ήταν η εξομοίωση της ασύρματης διάδοσης σήματος σε έναν εσωτερικό χώρο. Σαν πομπός χρησιμοποιήθηκε μία δίοδος LED. Στα παρακάτω γραφήματα βλέπουμε την κρουστική απόκριση στον δέκτη, για διαφορετικό αριθμό ακτίνων κάθε φορά, σε συνάρτηση με τον χρόνο. Το μοντέλο αυτό παρέχει πολύτιμη πληροφορία σχετικά με τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς που εισάγει το εκάστοτε σύστημα. Κάθε φορά που προσπίπτει μία ακτίνα σε μία επιφάνεια, εξετάζεται αν από το σημείο εκείνο υπάρχει LOS με το δέκτη, και αν ναι τότε προστίθεται η συνεισφορά αυτή στην κρουστική απόκριση του συστήματος. Έτσι, κάθε παραγόμενη ακτίνα συνεισφέρει περισσότερες από μία φορές στον υπολογισμό της κρουστικής απόκρισης με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ακρίβεια της μεθόδου.

Στην εικόνα 8 βλέπουμε την απολαβή στον δέκτη στο δωμάτιο όταν ο πομπός δημιούργησε 100 ακτίνες.



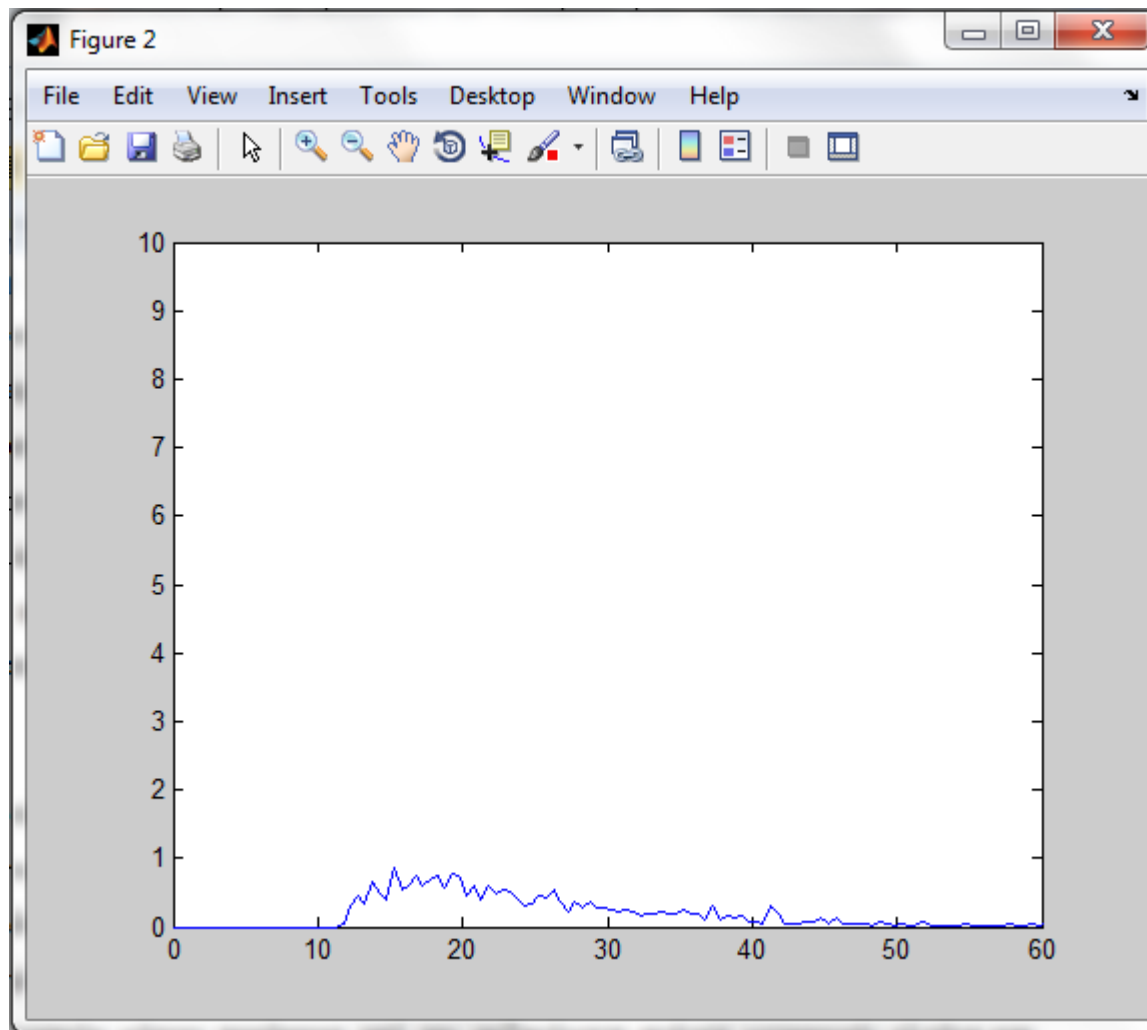
Εικόνα 8: Έξοδος για 100 ακτίνες

Στην εικόνα 9 βλέπουμε την απολαβή στον δέκτη στο δωμάτιο όταν ο πομπός δημιούργησε 1.000 ακτίνες.



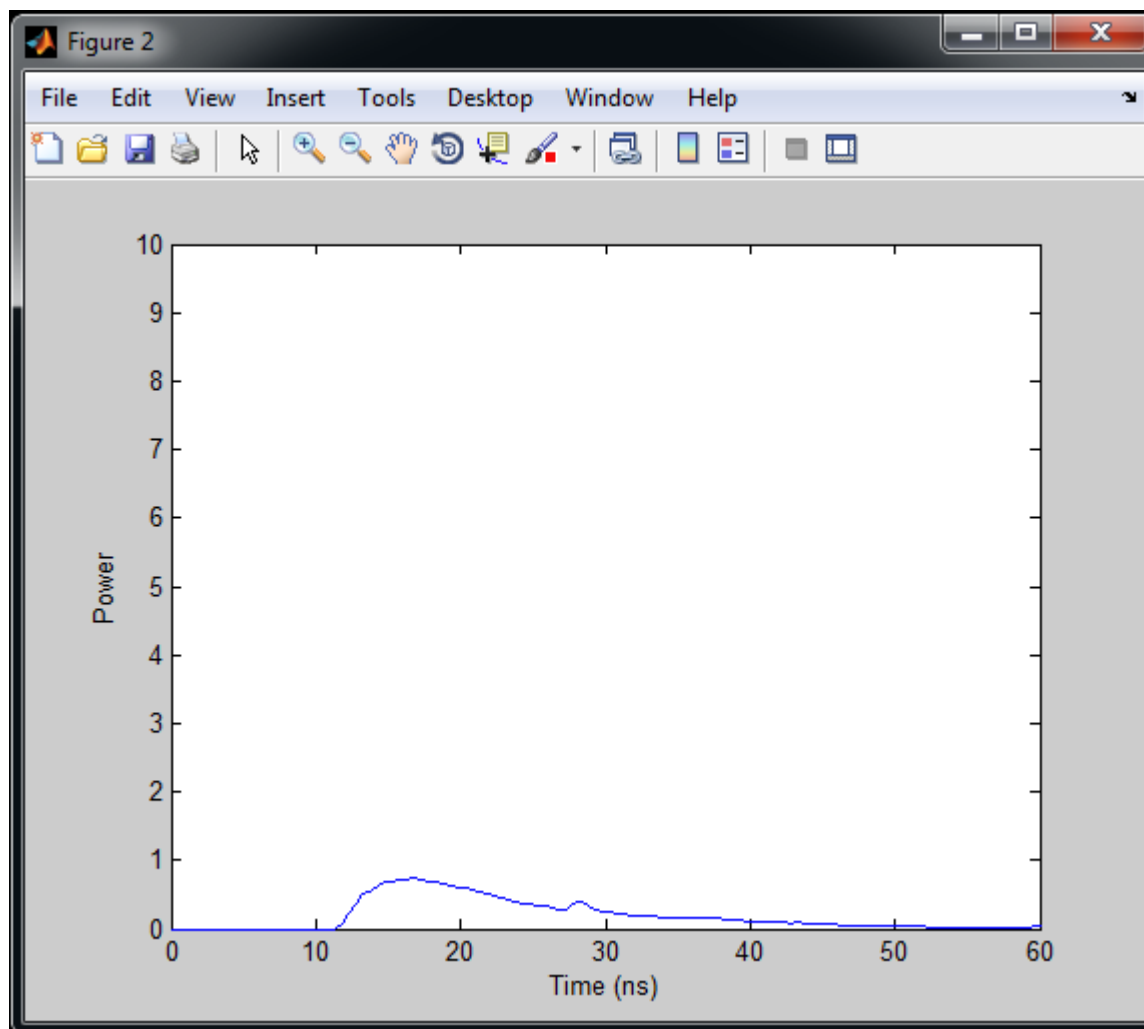
Εικόνα 9: Έξοδος για 1.000 ακτίνες

Στην εικόνα 10 βλέπουμε την απολαβή στον δέκτη στο δωμάτιο όταν ο πομπός δημιούργησε 100.000 ακτίνες.



Εικόνα 10: Έξοδος για 100.000 ακτίνες

Στην εικόνα 11 βλέπουμε την απολαβή στον δέκτη στο δωμάτιο όταν ο πομπός δημιούργησε 1.000.000 ακτίνες.



Εικόνα 11: Έξοδος για 1.000.000 ακτίνες

Όσο οι ακτίνες στην είσοδο του συστήματος αυξάνονται, παρατηρείται μια εξομάλυνση στη γραφική παράσταση της κρουστικής απόκρισης. Αυτό είναι λογικό, μιας και όσο αυξάνουν οι ακτίνες αυξάνεται και η στατιστική ακρίβεια του αποτελέσματος. Επιπροσθέτως, παρατηρούμε πως η ισχύς μετά το χρονικό διάστημα που συμβαίνει η πρώτη αναπήδηση πέφτει, μέχρι εν τέλει να φτάσει η ακτίνα στον δέκτη μας. Η ισχύς έχει μια φθίνουσα πορεία σε σχέση με το χρόνο, πράγμα λογικό μιας και ένα ποσοστό της χάνεται με κάθε αναπήδηση.

Αν και το πιο στατιστικά σωστό αποτέλεσμα είναι το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για 1.000.000 ακτίνες μιας και αυτό αντικατοπτρίζει πιο ολοκληρωμένα το τι συμβαίνει στο σύστημά

μας, πιο αποδεκτό είναι αυτό για 100.000 ακτίνες, αφού χρησιμοποιούμε τη μέθοδο ray tracing η οποία όπως αναφέραμε απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ και άρα χρόνο, γιατί μειώνει τον υπολογιστικό χρόνο σημαντικά.

Επίλογος

Τα τελευταία χρόνια η χρήση των οπτικών ινών για ερευνητικούς, και όχι μόνο, σκοπούς έχει αυξηθεί εκθετικά. Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η υλοποίηση ενός μοντέλου για την ασύρματη διάδοση σήματος σε εσωτερικό χώρο, είτε για την καλύτερη μελέτη του συστήματος είτε για την γενίκευση της χρήσης τέτοιων συστημάτων στην καθημερινή ζωή. Τέλος, η έρευνα αυτή έχει σαν μελλοντικό στόχο την επέκταση αυτού του συστήματος με την προσθήκη αντικειμένων μέσα στον εσωτερικό χώρο για την ευρύτερη χρήση της προσομοίωσης αλλά και για την προσέγγιση σε ένα πραγματικό σύστημα, καθώς και την μελέτη της επίδρασής των αντικειμένων αυτών στην έξοδο του δέκτη..

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1: Lambertian κατανομή 1^{ης} τάξης (m=1)

Σχήμα 2: Lambertian κατανομή 2^{ης} τάξης (m=2)

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Εικόνα 2: Διάταξη LED

Εικόνα 3: Στοιχεία ενός laser

Εικόνα 4: Ένας παλμός και η κρουστική απόκριση στον δέκτη σε συνάρτηση με τον χρόνο

Εικόνα 5: Ένα κενό δωμάτιο με μήκος 20, πλάτος 20 και ύψος 3.

Εικόνα 6: Τομή ακτίνας με επίπεδο

Εικόνα 7: Σημείο πάνω στο επίπεδο και κάθετο διάνυσμα στο επίπεδο αυτό

Εικόνα 8: Έξοδος για 100 ακτίνες

Εικόνα 9: Έξοδος για 1.000 ακτίνες

Εικόνα 10: Έξοδος για 100.000 ακτίνες

Εικόνα 11: Έξοδος για 1.000.000 ακτίνες

Βιβλιογραφία

1. Moretto, A., Colin, E.: New Indoor Propagation Channel Model for Location Purposes (2013)
2. Margariti, K., Kamalakis, T.: Performance of coherent detection in optical wireless systems for high speed indoor communications (2014)
3. Kahn, J. M., Barry, J. R.: Wireless infrared communications (1997)
4. Marsh, G. W., Kahn, J. M.: Performance evaluation of experimental 50 Mb/s diffuse infrared wireless link using on-off keying with decision feedback equalization (1996)
5. Shieh, W., Bao, H., Tang, Y.: Coherent optical OFDM: theory and design (2008)
6. Gonzalez, O., Rodriguez, S., Perez-Jimenez, R., Mendoza, B.R., Ayala, A.: Comparison of Monte Carlo ray-tracing and photon-tracing methods for calculation of the impulse response on indoor wireless optical channels (2011)
7. Wang, K., Nirmalathas, A., Lim, C., Skafidas, E.: Experimental demonstration of a full-duplex indoor optical wireless communication system. (2012)
8. Ντόγαρα, Γ. Σ.: Μελέτη ασύρματων οπτικών συστημάτων για την υλοποίηση ευρυζωνικών δικτύων εσωτερικού χώρου (2011)
9. Fludger, C.R.S., Duthel, T., van den Borne, D., Schulien, C., Schmidt, E.-D., Wuth, T., Geyer, J., de Man, E., Khoe, G.-D., De Waardt, H.: Coherent equalization and POLMUX-RZ-DQPSK for robust 100-GE transmission. (2008)
10. Atzmon, Y., Nazarathy, M.: Laser phase noise in coherent and differential optical transmission revisited in the polar domain. (2009)
11. Lopez-Hernandez F.J., Perez-Jimenez R., and A. Santamaria A.: Modified Monte Carlo scheme for high efficiency simulation of the impulse response on diffuse IR wireless indoor channels. (1998)
12. Proakis J. G., Salehi M.: Communications Systems Engineering. (2002)