

ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ Σχολή Ψηφιακής Τεχνολογίας Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεματικής

Πειραματικές Μετρήσεις σε Συστήματα Επικοινωνιών Ορατού Φάσματος

Δ ιπλωματική Εργάσια

του

ΓΕΩΡΓΙΟ ${\bf \Upsilon}$ ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗ

Επιβλέπων: Θωμάς Καμαλάκης Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, 2017



Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Σχολή Ψηφιακής Τεχνολογίας Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεματικής

Πειραματικές Μετρήσεις σε Συστήματα Επικοινωνιών Ορατού Φάσματος

Διπλωματική Εργάσια

του

ΓΕΩΡΓΙΟ Υ ΦΡΑΓΚΙΑ Δ AKH

Επιβλέπων: Θωμάς Καμαλάχης Επίχουρος Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 17/02/2017.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

..... Θωμάς Καμαλάκης Επίκουρος Καθηγητής Γεώργιος Δημητραχόπουλος Επίχουρος Καθηγητής

..... Χρήστος Μιχαλακέλης

Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, 2017



Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Σχολή Ψηφιακής Τεχνολογίας Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεματικής

Copyright ©–All rights reserved Γιώργος Φραγκιαδάκης, 2017. Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέχρινε.

Υπεύθυνη Δήλωση

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας, και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην διπλωματική εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η διπλωματική εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Πληροφορικής & Τηλεματικής του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου. Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

(Υπογραφή)

..... Γιώργος Φραγκιαδάκης

Περίληψη

Η αυξανόμενη ζήτηση ασύρματης επικοινωνίας οδηγεί τον παραδοσιαχό τρόπο ασύρματης μεταφοράς δεδομένων, μέσω ραδιοσυχνοτήτων, σε κορεσμό. Η ανάγκη λοιπόν, για εύρεση φάσματος ασύρματης επικοινωνίας οδηγεί την έρευνα στην περιοχή του ορατού φάσματος του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με τα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας στο φάσμα του ορατού πιο συγκεκριμένα στην αξιολόγηση των συσκευών που συνθέτουν τέτοια συστήματα. Μέσω πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Οπτικών Επικοινωνιών του τμήματος Πηροφορικής & Τηλεματικής του Χαροχόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών, οδηγούμαστε σε περαιτέρω συμπεράσματα για την απόδοση αυτών των συστημάτων και των συσκευών που τα αποτελούν. Αφού γίνεται η κατάλληλη αναφορά στην μέχρι τώρα εξέλιξη αυτών των συστημάτων παρουσιάζονται οι εργαστηριακές μετρήσεις με τα αντίστοιχα αποτελέσματά τους που οδηγούν στην αξιολόγηση τέτοιων συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας. Με γνώμονα τις καθημερινές ανάγκες και την εμπειρία του τελικού χρήστη γίνεται αντιστοίχιση των αποτελεσμάτων με καθημερινές εφαρμογές ώστε να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα των διαφορετικών πηγών μετάδοσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.

Λέξεις Κλειδιά

ασύρματη οπτική επικοινωνία, δίοδοι LED, ορατό φάσμα, VLC

Abstract

The increasing demand for wireless communication leads the traditional way of wireless data transmission via radio frequency to saturation. The need, therefore, for finding wireless spectrum leads researchers in the visible spectral region of the electromagnetic field. In this study we addressed the wireless communication systems in the visible spectrum particularly in the evaluation of the devices that make up such systems. Through experimental measurements were performed at the Laboratory of Optical Communications in the department of Informatics & Telematics of Harokopio University of Athens, led to further conclusions on the performance of these systems and devices. After the appropriate references to the evolution of these systems laboratory our experimental measurements are presented with the corresponding results leading to the evaluation of such wireless communication systems. Taking into consideration the daily needs of the end-user experience we are matching the results with daily applications to evaluate the efficiency of different data transmission sources used in these experiments.

Keywords

optical wireless communication, LED diodes, visible spectrum, visible light communications (VLC)

στην Ηλέκτρα

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ.Καμαλάκη Θωμά για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω στο Εργαστήριο Οπτικών Επικοινωνιών του Χροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών. Επίσης ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Κανάκη Παναγιώτη για την καθοδήγησή του και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε εντός του εργαστηρίου.

Περιεχόμενα

Π	ερίλι	ηψη					i
A	bstra	act					iii
E	υχαρ	οιστίες					vii
П	εριεχ	χόμενα					\mathbf{x}
K	ατάλ	λογος Σχημάτων					xi
K	ατάλ	λογος Πινάχων					xiii
1	Εισ	σαγωγή					1
	1.1	Σκοπός - Αντικείμενο της διπλωματικής					2
	1.2	Ερώτημα Έρευνας					2
	1.3	Δομή διπλωματικής				•	3
	1.4	Αντί Ορισμών				•	4
	1.5	Οριοθετήσεις - Περιορισμοί - Παραδοχές	•	•			5
2	Θεα	ωρητικό υπόβαθρο					7
	2.1	Πρόοδος					7
	2.2	Εφαρμογές				•	9
	2.3	Κίνητρα για την ανάπτυξη	•		•		13
	2.4	Οπτική ασύρματη επικοινωνία	•		•		15
	2.5	Φωτισμός με LED	•				17
		2.5.1 Βασικές ιδιότητες των LED	•				18
		2.5.2 Φωτεινότητα LED	•				18
		2.5.3 Οπτική ισχύς άμεσης ζεύξης			•	•	19
		2.5.4 Διάφοροι τύποι LED	•				20
	2.6	Δομή VLC συστημάτων	•				22
		2.6.1 Δέκτης συστήματος VLC					24

3	Πει	ραματικές Μέθοδοι 2	7	
	3.1	3.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας		
	3.2	Όργανα Πειραματικών Διατάξεων	28	
		3.2.1 Πειραματική διάταξη με πηγή LED - Ostar E3B	28	
		3.2.2 Πειραματική διάταξη με πηγή RED - LED	81	
		3.2.3 Πειραματική διάταξη με πηγή Quantum Dot - LED	33	
	3.3	Αναλυτική πειραματική περιγραφή	84	
		3.3.1 1° Πείραμα	84	
		3.3.2 2° Πείραμα	86	
		3.3.3 3° Πείραμα	88	
4	Απα	τελέσματα 4	1	
-	4.1	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	1	
		4.1.1 Π Elogue us $\pi p \gamma p$ LED - Ostar LE CW E3B 4	1	
		4.1.2 Πείραμα με πηγή RED LED	5	
		4.1.3 Πείραμα με πηγή Quantum Dot - LED	6	
	4.2	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	60	
5	Συμ	περάσματα 5	5	
	5.1	Περίληψη των πορισμάτων	55	
	5.2	Συμπεράσματα που συνάγονται από τα αποτελέσματα	6	
	5.3	Συστάσεις για περαιτέρω έρευνα	57	
A	Πίν	αχες μετρήσεων και υπολογισμών 5	9	
	A′.1	PDA10A - EC	59	
	A'.2	Μετρήσεις 1 ^{ου} Πειράματος	51	
B′	Αλγ	όριθμοι Matlab 6	9	
	B.1	Main Matalb code	59	
	B.2	Normalization Code	2	
	B.3	Remove and normalize new data Code	2	
Bibliography 73				

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα συχνοτήτων/μήκους κύματος	1
2.1	Αρχιτεκτονική συστήματος για Συστήματα μεταφορών	10
2.2	Συστήματα ευφυούς φωτισμού σε εσωτερικό χώρο	11
2.3	Εντοπισμός σε εσωτερικό χώρο με χρήση VLC συστημάτων	12
2.4	Χρήση συστημάτων VLC σε ευαίσθητο, σε ΗΜ παρεμβολές, περιβάλλον	13
2.5	Διαγραμματική περιγραφή μετάδοσης δεδομένων σε συστήματα OWC	15
2.6	Τρόποι μετάδοσης οπτικής ακτινοβολίας σε εσωτερικό χώρο	16
2.7	Εξέλιξη των τεχνολογιών φωτισμού	17
2.8	Οπτική ασύρματη ζεύξη LED - PD στο επίπεδο	19
2.9	Γεωμετρία ζεύξης (α) LOS (b) non-direct LOS $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	19
2.10	Εκπομπή φωτός από LED	20
2.11	Δομή φωτοδιόδου ΟLED	21
2.12	Δομή φωτοδιόδου HB-LED	21
2.13	Οπτική διαμόρφωση LED: (a) Ψηφιακή (b) Αναλογική	22
2.14	Διαγραμματική δομή συστήματος VLC	23
2.15	Οπτική ασύρματη μετάδοση δεδομένων συστήματος VLC	24
2.16	Δομή διόδου ΡΙΝ	25
3.1	Όργανα μέτρησης 1^{ou} πειράματος	28
3.2	Πηγή LED - Ostar LE CW E3B με σε επιφάνεια Heat Sink	29
3.3	Εσωτερικό κύκλωμα PDA10A-EC	30
3.4	Φασματική καμπύλη απόκρισης φωτοανιχνευτή PDA10A-EC	31
3.5	Όργανα πειραματικής διάταξης 2^{ou} πειράματος	32
3.6	QD-LED	33
3.7	Διαγραμματική περιγραφή της QD-LED	33
3.8	Σ χεδιασμός πειραματικής διάταξης 1^{ou} πειράματος	34
3.9	Πειραματική διάταξη 1° υ π πειράματος \ldots	35
3.10	Χαρα χτηριστική καμπύλη $I-V$ Ostar LE CW E2B \ldots	35
3.11	Πειραματική διάταξη πειραμάτων 2 & 3	36
3.12	Γράφημα $H(f)-f$ της RED-LED με βήμα $3,5KHz$ στο εύρος $0,5MHz-2MHz$	38
4.1	Γραφική παράσταση γραμμικής περιοχής λειτουργίας της Ostar LE CW E2B .	42

Φασματική καμπύλη απόκρισης φωτοανιχνευτή PDA10A-EC στο ορατό φάσμα	43
Χαρακτηριστική καμπύλη της πηγής από το λαμβανόμενο οπτικό σήμα στον	
ανιχνευτή	43
Εχπεμπόμενη ισχύς της πηγής συναρτήσει της ισχύος του δέχτη	44
Κέρδος της ζώνης $-3dB$ η οποία καλύπτει το $70,7\%$ του μέγιστου κέρδους	
πλάτους	44
Κανονικοποιημένη $H(f) - f$ της RED-LED με βήμα 3,5 KHz	45
QD-LEDs πειραματικής διάταξης 3^{ou} πειράματος \ldots	46
Σύγκριση QD-LEDs με $V_{pp} = 900 mV$ σε εύρος $0,5 Khz - 10 MHz$	47
Σύγκριση QD1 μεταξύ των διαφορετικών πλατών τάσης σε εύρος $450, 5 Khz-$	
10MHz	48
Σ ύγκριση QD2 μεταξύ των διαφορετικών πλατών τάσης σε εύρος $450, 5 Khz-$	
10MHz	48
Σύγκριση $0.8 {\rm QD3}$ μεταξύ των διαφορετικών πλατών τάσης σε εύρο ς $450, 5 Khz-$	
10MHz	49
Σ ύγκριση QD4 μεταξύ των διαφορετικών πλατών τάσης σε εύρος $450, 5 Khz-$	
10MHz	50
Σύγκριση QD-LEDs με $V_{pp}=600mV$ σε εύρος $450,5Khz-10MHz$	53
	Φασματική καμπύλη απόκρισης φωτοανιχνευτή PDA10A-EC στο ορατό φάσμα Χαρακτηριστική καμπύλη της πηγής από το λαμβανόμενο οπτικό σήμα στον ανιχνευτή

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Σύγκριση μεταξύ συστημάτων VLC και RF	13
2.2	Σύγκριση μεταξύ φωτοδιόδων PIN - APD με διαφορετικά υλικά κατασκευής $% \mathcal{L}_{\mathrm{A}}$.	26
3.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά Ostar LE CW E3B	30
3.2	Τεχνικά χαρακτηριστικά PDA10A-EC	30
3.3	Δ εδομένα πειραματικών μετρήσεων για το πείραμα 2	37
3.4	Δεδομένα πειραματικών μετρήσεων για το πείραμα 3	39
4.1	Αποτελέσματα μετρήσεων συχνότητας f_{-3dB} για την ${ m QD1}$	47
4.2	Αποτελέσματα μετρήσεων συχνότητας f_{-3dB} για την ${ m QD2}$	49
4.3	Αποτελέσματα μετρήσεων συχνότητας f_{-3dB} για την ${ m QD3}$	50
4.4	Αποτελέσματα μετρήσεων συχνότητας f_{-3dB} για την ${ m QD4}$	50
4.5	Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων για τα πειράματα 2 και 3	51
4.6	Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων των εξεταζόμενων LED	52
A'.1	Μετρήσεις κατασκευαστή για την απόκριση (ℜ) συναρτήσει του μήκους κύματος	59
A'.2	Μετρήσεις τάσης V_{led} και έντασης ρεύματος I_{led} της LED \ldots	62
A'.3	Αποτελέσματα επεξεργασίας πειράματος 1	64

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Οι επικοινωνίες μέσω οπτικού φάσματος συχνοτήτων (Visible Light Communications - VLC) είναι ένα αναδυόμενο πεδίο της ασύρματης οπτικής επικοινωνίας (Optical Wireless Communications - OWC) η οποία χρησιμοποιεί την ανώτερη ζώνη, σε εύρος διαμόρφωσης, του φωτός που εκπέμπεται από διόδους εκπομπής φωτός (φωτοδίοδος) (Light Emitting Diode - LED). Συνδυάζοντας τον φωτισμό και την επικοινωνία, το πεδίο των VLC προσφέρει συνεχή και παντού καλυπτόμενη επικοινωνία, αντιμετωπίζοντας έτσι τις ασθένειες τις επικοινωνίας στο πεδίο των ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency - RF).

Η ασύρματη επικοινωνία, από την υιοθέτηση της Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας, έχει περάσει από ποικίλα στάδια, ασύρματη τηλεγραφία, ραδιόφωνο κ.α. Στο ηλεκτρομαγνητικό (HM) φάσμα συχνοτήτων όσο το μήκος κύματος μειώνεται, η συχνότητα και κατά συνέπεια η ενέργεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αυξάνεται (σχήμα 1.1). Το ορατό HM πεδίο καταλαμβάνει το πεδίο συχνοτήτων από 400THz έως 800THz ενώ το RF από 3KHz ως 300GHz.



Σχήμα 1.1: Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα συχνοτήτων/μήκους κύματος

Το πεδίο των ραδιοσυχνοτήτων είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο στον τομέα της επικοινωνίας με κύριο χαρακτηριστικό τους, τις μειωμένες παρεμβολές σε σχέση με τα υπόλοιπα πεδία συχνοτήτων αλλά και το γεγονός της ευρείας κάλυψης σε χωρικό πεδίο. Ωστόσο διάφοροι παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της ταχείας μείωσης των συχνοτήτων στο φάσμα των RF οδηγούν στην ανάγκη εξεύρεσης νέων τεχνολογιών.

Η επικοινωνία μέσω οπτικού φάσματος έρχεται να δώσει λύση στον συνωστισμό του ραδιοφάσματος για τα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας. Στα VLC συστήματα οι πληροφορίες μεταδίδονται διαμορφώνοντας την ένταση της οπτικής πηγής, που λειτουργεί στην ορατή περιοχή του HM πεδίου. Αυτή η διαμόρφωση έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση ρυθμού μετάδοσης του φωτός σε αρκετά μεγαλύτερο ρυθμό από αυτόν που μπορεί το ανθρώπινο μάτι να αντιληφθεί.

Οι φωτοδίοδοι (LED) λόγω του υψηλού ρυθμού μεταγωγής έχουν γίνει η πιο κατάλληλη πηγή φωτός για τα VLC συστήματα. Τελευταία ευδοκιμεί η τάση για εξοικονόμηση ενέργειας στις κατοικίες, τις εμπορικές μονάδες, τις δημόσιες υπηρεσίες και σε συνδυασμό με την πιο προσιτή τιμή των LED, τις καθιστά μοναδικούς αντικαταστάτες των παραδοσιακών λαμπτήρων. Αυτό ισχυροποιεί και την χρήση των συστημάτων VLC.

1.1 Σκοπός - Αντικείμενο της διπλωματικής

Από τις βασικότερους παραμέτρους για την ανάπτυξη των επικοινωνιών μέσω του οπτικού φάσματος, του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, είναι η αξιοπιστία και η εξέλιξη, προς αυτή την κατεύθυνση, των συστημάτων που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία του VLC.

Με την παρούσα προσπαθήσαμε να αξιολογήσουμε, μέσω πειραματικών μετρήσεων, αυτά τα συστήματα και κυρίως όλα τα μέρη που αποτελούν το σύνολο των συστημάτων που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία αυτή.

Βασιχός χρίχος των συστημάτων αυτών αποτελεί η φωτοδίοδος, εφεξής LED. Πάνω στην ανάπτυξη της οποίας πραγματοποιούνται και οι περισσότερες έρευνες που αφορούν την ασύρματη οπτιχή επιχοινωνία. Σε ευρύτερο πεδίο για τις LED υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για την συνεχή αναβάθμισή τους για σχοπούς που αφορούν το βασιχό πεδίο λειτουργίας τους, τον φωτισμό.

Με την πειραματική έρευνα που παρουσιάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια κατανόησης, μέσω χειροπιαστών αποτελεσμάτων, των εξής βασικών ερωτημάτων:

- 1. Είναι εφικτή η μεταφορά δεδομένων μέσω του ορατού φάσματος συχνοτήτων;
- Τα υπάρχοντα μέρη που αποτελούν τέτοια συστήματα είναι αρχετά εξελιγμένα ώστε να αποτελέσουν μέρος της χαθημερινής ασύρματης επιχοινωνίας;

1.2 Ερώτημα Έρευνας

Στην παρούσα ερευνητική διαδικασία σχεδιάστηκαν τρία βασικά πειράματα με τις αντίστοιχες πειραματικές διατάξεις, που σκοπό έχουν την προοδευτική εξέλιξη μεταξύ τους ώστε στο τρίτο και τελευταίο να αξιολογηθούν, μέσω των πειραματικών μετρήσεων, στην απάντηση του βασικού ερωτήματος που τέθηκε παραπάνω ως προς το αν είναι εφικτή η μεταφορά δεδομένων μέσω του ορατού φάσματος.

Οι μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάζονται, αφορούν στην αποδοτικότητα των διόδων LED για την μεταφορά δεδομένων μέσω του ορατού φάσματος. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε διαφορετικές συνθήκες ως προς τις κυματομορφές (πλάτος τάσης, εύρος συχνοτήτων). Ενώ οι βασικές πηγές (LED) μέτρησης ήταν τέσσερις (3° πείραμα), χρησιμοποιήθηκαν και δύο ακόμα σε αντίστοιχα πειράματα (1° και 2° πείραμα) ώστε να επιτευχθούν οι εξής στόχοι:

- Παρουσίαση και καταγραφή θεμελιωδών μεγεθών και τρόπου μετάδοσης δεδομένων μέσω ασύρματης οπτικής ζεύξης.
- Αξιολόγηση οργάνων μέτρησης των αντίστοιχων μεγεθών.
- Δημιουργία και κατάλληλη παραμετροποίηση αλγορίθμων που θα βοηθήσουν στην αυτοματοποίηση των διαδικασιών λήψης μετρήσεων και έπειτα στην αποτελεσματικότερη επεξεργασία των μετρήσεων αυτών.
- Κατασκευή και βελτίωση καθ΄ οδόν, της πειραματικής διάταξης.
- Επιλογή χατάλληλων συνθηχών για την διενέργεια των μετρήσεων.

1.3 Δομή διπλωματικής

Μετά το κεφάλαιο της εισαγωγής στο Κεφάλαιο 2 γίνεται προσπάθεια καταγραφής των εξελίξεων που έχουν παρουσιαστεί από ερευνητές και κατασκευαστές αντίστοιχων συστημάτων, στο πεδίο των ασύρματων επικοινωνιών μέσω οπτικού και πιο συγκεκριμένα ορατού φάσματος συχνοτήτων. Εκεί καταγράφονται και όλα τα μέρη ενός συστήματος ασύρματων επικοινωνιών ορατού φωτός, με την ανάλογη εξέλιξη που έχει παρουσιαστεί στην διάρκεια της ύπαρξής τους μέχρι σήμερα. Οι εφαρμογές για τις οποίες θα ήταν και είναι χρήσιμα τα εξεταζόμενα συστήματα αναφέρονται σε ενότητα του κεφαλαίου αυτού σε συνδυασμό με τα κίνητρα που δίνουν οι εν λόγω εφαρμογές. Ενώ τέλος παρουσιάζονται χρήσιμες για την πορεία της ερευνητικής διαδικασίας θεωρητικές έννοιες.

Στο Κεφάλαιο 3 ο αναγνώστης θα βρει την αναλυτική περιγραφή των πειραματικών διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Οπτικών Επικοινωνιών του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών, με αναφορά στα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν και την παρουσίαση τεχνικών χαρακτηριστικών τα οποία είναι χρήσιμα στην εξέλιξη της παρούσας έρευνας. Σε αυτό το σημείο τίθενται και όποιοι περιορισμοί εμφανίστηκαν κατά την διαδικασία είτε αυτοί είχαν προβλεφθεί από την φάση του σχεδιασμού είτε όχι.

Το επόμενο κεφάλαιο περιέχει όλα τα αποτελέσματα που προήλθαν από την διαδικασία των μετρήσεων αλλά και την επεξεργασία τους, δομημένα ανά πειραματική διάταξη όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3. Όπου κρίθηκε απαραίτητο σημειώθηκαν επιπλέον θεωρητικές έννοιες και μέθοδοι για την πληρότητα της παρούσας αλλά και την καλύτερη κατανόηση από τον αναγνώστη.

Κλείνοντας την συγγραφή της ερευνητικής αυτής διαδικασίας, στο Κεφάλαιο 5 γίνεται η απαραίτητη αξιολόγηση των πεπραγμένων και εξαγωγή συμπερασμάτων που προκύπτουν. Ενώ παρουσιάζονται ενδεικτικές βελτιώσεις που θα μπορούσαν μελλοντικά να πραγματοποιηθούν για την παρούσα έρευνα.

Τέλος στα παραρτήματα συμπεριλαμβάνονται οι μετρήσεις του πρώτου πειράματος και όποιοι πίνακες κρίθηκαν απαραίτητοι κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Όπως επίσης και οι αλγόριθμοι που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια των πειραματικών διαδικασιών.

1.4 Αντί Ορισμών

Για την διευχόλυνση της περαιτέρω μελέτης θα επισημανθούν επιγραμματικά χάποιες από τις έννοιες που θα φανούν χρήσιμες στην πορεία της παρούσας εργασίας.

Σήματα

Τι είναι Σήμα: Πληροφορίες που αντιλαμβανόμαστε μέσω των αισθήσεων μας και μπορούν να περιγραφούν ως μια ή περισσότερες φυσικές μεταβλητές η τιμή των οποίων είναι μια συνάρτηση του χρόνου.

Μορφές και Αναπαραστάσεις Σημάτων: Ηλεκτρικά σήματα, οπτικά σήματα, ακουστικά σήματα, μαγνητικά σήματα

Τι είναι σύστημα: Υπολογιστικά περιβάλλοντα με τα οποία μπορούμε να χειριστούμε να μεταβάλλουμε, να καταγράψουμε ή να μεταδώσουμε σήματα. Το μικρόφωνο είναι ένα απλό σύστημα (αισθητήρας) το οποίο μετατρέπει τα ηχητικά σήματα σε ηλεκτρικά.

Συνεχή (αναλογικά) Σήματα: Η πληροφορία που συλλέγεται από τα ανθρώπινα αισθητήρια όργανα είναι αναλογική, δηλαδή το σήμα που περιγράφει το φυσικό μέγεθος μεταβάλλεται ανάλογα με τον τρόπο που μεταβάλλεται και το φυσικό μέγεθος. Αναπαριστά αυτό το μέγεθος και παρακολουθεί τις όποιες μεταβολές του μέσα από μια σχέση αναλογίας. Ένα σήμα για το οποίο για κάθε τιμή της ανεξάρτητης (ή των ανεξάρτητων) μεταβλητής μπορεί να υπολογιστεί μια τιμή του σήματος ονομάζεται συνεχές σήμα

Ημιτονικές συναρτήσεις

Κάθε συνεχές σήμα αναλύεται σε ένα άθροισμα ημιτονικών συναρτήσεων με διάφορα πλάτη, συχνότητες και φάσεις.

Συχνότητα (frequency): Η αντίστροφη τιμή της περιόδου του ημιτονιχού σήματος, δηλώνει τον αριθμό των περιόδων ανά sec και μετριέται σε Hz.

Πλάτος (amplitude): Η μέγιστη απομάχρυνση του σήματος από τη θέση ισορροπίας. Φάση: Η γωνία που αντιστοιχεί στη αρχιχή τιμή του ημιτονιχού σήματος.

Φάσμα Συχνοτήτων Σήματος

Χρησιμοποιώντας την ανάλυση κάθε σήματος σε άθροισμα ημιτονικών συναρτήσεων μπορούμε να περιγράψουμε κάθε σήμα με ένα διάγραμμα που απεικονίζει το πλάτος των συχνοτήτων από τις οποίες αποτελείται. Η αναπαράσταση αυτή αποτελεί το φάσμα συχνοτήτων (frequency spectrum) για το συγκεκριμένο σήμα.

Ψηφιοποίηση συνεχών σημάτων

Το πέρασμα από τον αναλογικό στον ψηφιακό κόσμο είναι η διαδικασία της ψηφιοποίησης (digitization). Κατά την ψηφιοποίηση ένα σήμα αναλογικής μορφής μετατρέπεται σε ψηφιακό (συνήθως δυαδικό), δηλ. από συνεχή συνάρτηση του χρόνου μετατρέπεται σε μια σειρά διακριτών αριθμητικών τιμών. Η αναπαράσταση της κάθε πληροφορίας στα ηλεκτρονικά μέσα γίνεται σε δυαδική μορφή. Η δυαδική κωδικοποίηση χρησιμοποιεί δύο τιμές 1 και 0 οι οποίες αντιστοιχούν στις καταστάσεις θετικό και μη θετικό. Έτσι κάθε πληροφορία αποθηκεύεται σαν μια ακολουθία από 0 και 1 (bits).

Στο Κεφάλαιο 2 επίσης βρίσκεται συγκεντρωμένο όλο το θεωρητικό υπόβαθρο που υποστηρίζει την παρούσα εργασία. Ενώ όπου κρίθηκε απαραίτητο η ανάλογη θεωρία τοποθετήθηκε στα σημεία όπου χρειάστηκε για την επεξεργασία των εκάστοτε υπολογισμών.

1.5 Οριοθετήσεις - Περιορισμοί - Παραδοχές

Είναι απαραίτητο να γνωρίζει ο αναγνώστης ότι κατά την πειραματική διαδικασία αλλά κυρίως κατά την επεξεργασία των μετρήσεων δεν συμπεριελήφθησαν στους υπολογισμούς των μεγεθών οποιαδήποτε σφάλματα προέρχονται από τα όργανα μέτρησης ή οποιεσδήποτε απώλειες. Αντίθετα από αυτό, σε οποιοδήποτε σημείο θα μπορούσε να επηρεαστεί η πειραματική διαδικασία από τα εν λόγω σφάλματα είτε οργάνων είτε του πειραματιστή, αυτό αναφέρεται ρητά.

Είναι κατανοητό ότι εφόσον η έρευνα ασχολείται με το πεδίο του ορατού φάσματος, υπάρχει επίδραση εξωτερικών πηγών φωτός που επηρεάζουν την λήψη των μετρήσεων. Αυτό είχε σαν συνέπεια να κρατηθεί ο χώρος στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις με χαμηλό φωτισμό για την ελαχιστοποίηση των θορύβων. Μια ακόμη ενέργεια που είχε ως στόχο την μείωση αυτών των παρενεργειών, ήταν η μέτρηση των πηγών σε απόσταση ελάχιστη από τον δέκτη του συστήματος και άρα στην μείωση του εύρους του καναλιού οπτικής επικοινωνίας δηλαδή τον ελεύθερο χώρο.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό υπόβαθρο

Παρά τα εγγενή πλεονεκτήματα του VLC σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, το VLC αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Το περιορισμένο εύρος ζώνης και η αργή ανταπόκριση στη διαμόρφωση των LED είναι από τα ζωτικά προβλήματα για την επίτευξη μεγάλης ταχύτητας στη μεταφορά δεδομένων. Επίσης η απόσταση μετάδοσης περιορίζεται εν γένη λόγω της μείωσης του φωτισμού συναρτήσει της απόστασης. Ο περιβάλλον φωτισμός είναι άλλο ένα πρόβλημα προς αντιμετώπιση, λόγω της πρόκλησης θορύβου στο σύστημα και της μείωσης στην απόδοσή του. Επί γραμματικά τα πεδία έρευνας και βελτίωσης είναι:

- Ενίσχυση εύρους ζώνης Bandwidth Enhancement
- Παρεμβολές και αφαίρεση Θορύβου Interference and Noise removal
- Βελτίωση Μη γραμμικότητας και σήματος Non-linearity and signal clipping
- Optical beamforming

Τα συστήματα VLC βασίζονται σε Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) τεχνικές για την αύξηση της ταχύτητας δεδομένων. Χρησιμοποιούν συστήματα ελεγχόμενης ροής τάσης (dimming) για την εξοικονόμηση ενέργειας και τον πλήρη έλεγχο της φωτεινότητας από τους χρήστες. Υπάρχουν πεδία τα οποία χρήζουν βελτίωσης αλλά και αυτά που είναι ήδη σε καλό επίπεδο λύσης.

2.1 Πρόοδος

Το πρώτο γνωστό σύστημα που χρησιμοποίησε ορατό φως, για την επικοινωνία μεταξύ δύο σημείων ήταν το φωτόφωνο του Graham Bell το 1880 [1]. Η ιδέα της χρήσης LED καθώς και της διαμόρφωσης του ορατού φωτός παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους Pang *et. al.* το 1999 [2]. Έκτοτε τα τελευταία 16 χρόνια έχουν παρουσιαστεί βελτιώσεις, εξελίξεις και νέες προτάσεις στο πεδίο έρευνας των συστημάτων VLC, από διάφορες ερευνητικές ομάδες. Παραχάτω αναφέρονται μεριχές από τις ερευνητιχές ομάδες που δραστηριοποιούνται ή έχουν δραστηριοποιηθεί στον τομέα αυτόν, εξάγοντας ενδιαφέροντα αποτελέσματα που ενισχύουν την ανάγχη εξέλιξης της εν λόγω τεχνολογίας.

- OMEGA project: Ευρωπαϊκή ομάδα (hOME Gigabit Access) η οποία ερευνά την παροχή ασύρματης συνδεσιμότητας σε οικιακούς χρήστες. Ως στόχος τους είναι η ανάπτυξη ετερογενούς δικτύου επικοινωνίας το οποίο περιλαμβάνει την χρήση τριών τεχνολογιών επικοινωνίας Power Line Communication (PLC), Radio Frequency Communication (RFC), Optical Wireless Communication (OWC) [3]
- RONJA (Reasonable Optical Near Joint Access): Το 2001 με την χρήση οπτικού φάσματος ακτινοβολίας πέτυχαν την μετάδοση δεδομένων σε ρυθμό μετάδοσης 10Mb/s, ενώ η απόσταση των συσκευών (πομπού - δέκτη) είχαν απόσταση περίπου 1.4Km [4].
- Oxford University: Η προσέγγιση που υιοθετήθηκε από τους ερευνητές της ομάδας του πανεπιστημίου της Οξφόρδης έχει σαν στόχο την ομαλοποίηση (equalization) και την χρήση τεχνικών MIMO. Πρόσφατα κάνοντας χρήση αυτών των τεχνικών που μελετούν, πέτυχαν ταχύτητες της τάξης των 1.1Gb/s χρησιμοποιώντας pc-LED [5].
- Keio University: Τα περισσότερα από τα πρώτα στάδια ανάπτυξης της τεχνολογίας στο VLC πραγματοποιήθηκαν από τους Komine et al. του πανεπιστημίου. Τα κύρια πεδία αφορούσαν διαμόρφωση, ενσωμάτωση των PLC καθώς και την χρήση της ελέγχου ρο-ής τάσης (dimming) των φωτεινών πηγών προς όφελος οικονομίας. Ενώ τα πρόσφατα ερευνητικά πεδία της ομάδας έχουν εστιαστεί στα ευφυή συστήματα μεταφορών (Intelligent Transportation Systems ITS) [6].
- VLCC (Visible Light Communications Consortium): Το 2003 υπό την προεδρία του καθηγητή Μ. Nakagawa, που συμμετείχε στο παραπάνω έργο του πανεπιστημίου της Ιαπωνίας, συστάθηκε η εν λόγω κοινοπραξία (αποτελούμενη από πανεπιστήμια, ερευνητικές ομάδες αλλά και πλήθος εταιρειών του παραγωγικού τομέα της Ιαπωνίας) με σκοπό την προτυποποίηση και διάδοση της τεχνολογίας συστημάτων VLC [7].
- University of Edinburgh: Το project D-Light του πανεπιστημίου έχει ως στόχο την ανάπτυξη του VLC για εμπορική χρήση, εστιάζοντας στην μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας με χρήση OFDM [8].
- Boston University: Η ομάδα του πανεπιστημίου επικεντρώθηκε το 2008 στον τομέα του VLC. Οι ιδέες τις οποίες κατέθεσαν ήταν προσανατολισμένες στο "Lights off" project
 [9] και σε υβριδικά συστήματα RF/VLC ασύρματης επικοινωνίας.
- Sant'Anna School of Advanced Studies: Το κέντρο ερευνών δικτύων και νέων τεχνολογιών της σχολής έχει ερευνήσει το πεδίο των OWC με προσανατολισμό στην αντικατάσταση των RF επικοινωνιών. Αξιοσημείωτο είναι ο μέγιστος, μέχρι σήμερα, ρυθμός μεταφοράς δεδομένων μέσω VLC συστήματος, που ήταν στα 3.4Gb/s [10].

- Yeungnam University: Η προσπάθεια τους επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη της κωδικοποίησης των συστημάτων VLC και συγκεκριμένα στο κομμάτι που αφορά τον έλεγχο ροής τάσης (dimming)[11].
- KAIST University: Όπως και η προηγούμενη ερευνητική ομάδα ασχολήθηκε με την βελτίωση και του dimming μέσω διαμόρφωσης των VLC συστημάτων [12].
- Choshun University: Άλλη μία ερευνητική ομάδα που επικέντρωσε τις έρευνές της στο επίπεδο κωδικοποίησης dimming μεθόδου αλλά και διαμόρφωσης του εύρους του παλμού Pulse Width Modulation - PWM [13].
- Monash University: Πρόσφατες έρευνες που έγιναν στη Μελβούρνη, επιχεντρώθηχαν στην ανάπτυξη συστήματος VLC με ειδικό σχοπό τον εντοπισμό σε εσωτερικό χώρο (indoor localization systems)[14].

Το πρώτο πρότυπο παρουσιάστηκε από την ΙΕΕΕ [15] το 2011 ενώ συντάχθηκε και εγκρίθηκε από την ομάδα εργασίας για τα Ασύρματα Προσωπικά Δίκτυα (WPANs) ΙΕΕΕ 802.15.7, μόλις τον Δεκέμβριο του 2014. Ενώ προβλέπεται από την ΙΕΕΕ να παρουσιαστεί στη τελική της μορφή η επόμενη έκδοση του προτύπου ΙΕΕΕ P802.15.7r1 στα τέλη του 2017.

2.2 Εφαρμογές

Σχοπός των ερευνητικών ομάδων αλλά και όσων ασχολούνται στο ευρύτερο πεδίο των ασύρματων επικοινωνιών, και όχι μόνον στις οπτικές ασύρματες επικοινωνίες, είναι να βρεθεί λύση στο όλο και αυξανόμενο πρόβλημα της πλήρωσης του πεδίου των ραδιοσυχνοτήτων (RF). Το φαινόμενο αυτό έχει αυξηθεί ραγδαία από την ευρύτατη, πλέον, χρήση των ασύρματων συσκευών (κινητά, laptops, tablets). Η χρήση του συγκεκριμένου φάσματος ίσως και να αρκούσε αν και εφόσον παραμέναμε στην αξιοποίηση του μόνο από τις συγκεκριμένες συσκευές, με τον ανάλογο, βέβαια, ρυθμό αύξησης τους. Το γεγονός όμως της ενσωμάτωσης πομπών και δεκτών μεταφοράς δεδομένων σε παραδοσιακές συσκευάλα και σε αυτοκίνητα αφενός ανοίγει ένα νέο πεδίο εφαρμογών και τεχνολογιών αφετέρου αυξάνει την ανάγκη διεύρυνσης του πεδίου μεταφοράς δεδομένων.

Σαφώς οι συσκευές αυτές συγκαταλέγονται στο αναπτυσσόμενο τεχνολογικό φαινόμενο του Internet of Things (IoT) όπου σύμφωνα με τον David Trossell [16] μέχρι το 2020, 25 δισεκατομμύρια συσκευές IoT πρόκειται να παράγουν κίνηση στο διαδίκτυο της τάξης των 150 Petabytes η οποία θα προστεθεί στην ήδη υπάρχουσα κίνηση των 1,1 Zetabytes. Από την αναφερόμενη κίνηση μεγάλο ποσοστό πραγματοποιείται ασύρματα. Πέρα λοιπόν, από την ένταξη των IoT συσκευών στη καθημερινότητα των ασύρματων επικοινωνιών και άλλες εφαρμογές προκύπτουν, αλλά και βρίσκουν λύση, από την χρήση του οπτικού φάσματος μέσω των συστημάτων VLC.

Η εφαρμογή των VLC συστημάτων είναι εμφανές ότι θα ευδοχιμήσει σε περιβάλλοντα τα οποία ο τεχνητός φωτισμός είναι συνεχής χαι πραγματοποιείται μέσω λαμπτήρων LED. Η εφαρμογή στους χώρους που πληρούν την παραπάνω βασιχή προϋπόθεση χρίνεται αρχετά εύχολη χαθώς τα δεδομένα μπορούν να προέρχονται από ένα τοπικό σημείο προς τα υπάρχοντα φωτιστικά σώματα διαμέσου της ηλεκτρικής καλωδίωσης που ήδη είναι εγκατεστημένη. Μερικά από τα σενάρια που εξετάζονται για άμεση εφαρμογή VLC συστημάτων ακολουθούν με ενδεικτική περιγραφή.

Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (ITS)[17]: Εξετάζεται η χρήση τους στις μεταφορές με σχοπό την βελτίωση των συνθηχών, την αποφυγή ατυχημάτων, τον έλεγχο των συγχοι-νωνιών κ.α. Αυτή η εφαρμογή συγκεχριμένα μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μεταξύ των οχημάτων (Vehicle to Vehicle -V2V) είτε μεταξύ οχήματος και υποδομής δικτύου συγχοινωνιών (Vehicle to Infrastracture - V2I). Αρκετές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί στην Ιαπωνία με την κατοχύρωση πολλών πατεντών. Όμως αχόμη δεν έχει εφαρμοστεί στην πράξη διότι δεν υπάρχει τάση της αγοράς να υισθετήσουν αυτή την πραχτική στα συστήματα των αυτοχινήτων. Η βασιχή δυσχολία, που προχαλεί και την αργή υισθέτηση τους, είναι ότι η επιχοινωνία πρέπει να γίνεται ενόσω ο φωτεινός πομπός και δέχτης χι-νούνται, για V2V. Όσο για την εφαρμογή με την υποδομή του συγχοινωνιαχού δικτύου χρίνεται ως πιο εφαρμόσιμη αλλά το εμπόδιο των υψηλών ταχυτήτων των αυτοχινήτων θα πρέπει να ξεπεραστεί πρώτα.



Σχήμα 2.1: Αρχιτεκτονική συστήματος για Συστήματα μεταφορών

 Ευφυής Φωτισμός: Συστήματα ευφυούς φωτισμού μπορούν να συνεργάζονται με την τεχνολογία των VLC, με στόχο την κάλυψη αναγκών των χρηστών εντός εσωτερικού χώρου. Σημαντική παράμετρος χρήσης είναι η εξοικονόμηση ενέργειας. Η εμφάνιση των LED έχει συνεισφέρει στην ευελιξία και ευκολία εφαρμογής για χρήση τέτοιων συστημάτων αλλά και την περαιτέρω ανάπτυξη συστημάτων επικοινωνίας μέσω οπτικού φάσματος. Με αποτέλεσμα την επικοινωνία όλων των συσκευών που βρίσκονται σε εσωτερικό χώρο, παράδειγμα στο σχήμα 2.2. Η εκπαίδευση τέτοιων συστημάτων μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα τον εντοπισμό του χρήστη μέσα στον χώρο και την αντίληψη των ενεργειών του ώστε να προσαρμόζει ανάλογα το περιβάλλον. Επίσης με συνδυασμένη χρήση συστήματος GPS εξετάζεται η δυνατότητα να αντιλαμβάνεται το σύστημα την προσέγγιση του χρήστη στο σπίτι ώστε να ανάβουν τα φώτα. Συσκευές όπως ο φορητός υπολογιστή, το κινητό τηλέφωνο, η έξυπνη τηλεόραση μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο βαθμό από αυτή την τεχνολογία. Επίσης έχοντας εγκαταστήσει μια μονάδα ελέγχου φωτός σε ένα σημείο του χώρου, θα επιτρέπει στους χρήστες να ελέγχουν την ένταση του φωτός ανάλογα με τη διάθεση και τις προτιμήσεις μέσω οποιασδήποτε συσκευής.



Σχήμα 2.2: Συστήματα ευφυούς φωτισμού σε εσωτερικό χώρο

Εντοπισμός σε εσωτερικό χώρο (Indoor Localization): Μια κατεύθυνση ανάπτυξης συστήματος VLC είναι προς την εντοπισμό θέσης, σε εσωτερικό χώρο, μέσω οπτικού φωτός (Visible Light Positioning - VLP). Εφαρμογή της συγκεκριμένης υλοποίησης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλα εμπορικά καταστήματα. Παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής έγινε το 2013 σε μεγάλο εμπορικό κατάστημα λιανικής στην Ν. Κορέα [18]. Εκεί, δόθηκε στους πελάτες ένα κουπόνι (με κατάλληλο οπτικό δέκτη) που τους οδηγούσε σε προϊόντα προσφοράς. Παρόμοιες εφαρμογές θα μπορούσαν να να εξελιχθούν σε θέατρα, οδηγώντας τους θεατές στην θέση τους, σε μουσεία, όπου με παράλληλη

χρήση συσκευών ήχου να εντοπίζουν την θέση του επισκέπτη και να του δίνεται ηχητική πληροφόρηση για το έκθεμα που βρίσκεται. Ενώ δίνεται έμφαση στην ακρίβεια του εντοπισμού θέσης (σχήμα 2.3 [19]) μέσω αλγορίθμων όπως παρουσιάζουν οι Zhou *et. al.* [19] το 2012, όπου πετυχαίνουν ακρίβεια της τάξης των 0,5mm, σε εσωτερικό χώρο.



Σχήμα 2.3: Εντοπισμός σε εσωτερικό χώρο με χρήση VLC συστημάτων

- Πλαστικές Οπτικές Τνες (Plastic Optical Fiber (POF)): Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί και αποκτήσει δημοτικότητα η πλαστική οπτική ίνα. Έχουν διαπιστωθεί χαμηλές εξασθενήσεις πετυχαίνοντας υψηλές ταχύτητες ταχύτητες στο φάσμα των 520 780nm (περιοχή κόκκινου πράσινου φωτός) [20]. Επίσης οι POF εμφανίζουν αντοχή στις δονήσεις και χαμηλή επίδραση των παρεμβολών της HM ακτινοβολίας, που τις καθιστά αξιόπιστες στην χρήση εντός των οχημάτων. Ένας συνδυασμός, λοιπόν με συστήματα VLC σε και POF εντός σπιτιού ή γραφείου, έχει παρουσιαστεί στο [21] χρησιμοποι-ώντας πλαστική ίνα μέχρι 50m για την διανομή σε πομπούς συστήματος VLC και οι τελευταίοι διένεμαν στον τελικό χρήστη, μέχρι τα 2.5m.
- Υποθαλάσσιες επικοινωνίες: Η συχνότητα των 2.4GHz έχει περιορισμένο μήκος κύματος και ταχύτητα λόγω της αυξημένης εξασθένησης στο νερό. Τα συστήματα sonar κοστίζουν αρκετά. Οπότε η εύρεση εναλλακτικών τρόπων επικοινωνίας, υποθαλάσσια, οδηγεί στην ερεύνα χρήσης των συστημάτων οπτικής επικοινωνίας και συγκεκριμένα των VLC. Προσαρμόζοντας ανάλογα την εκπομπή των LED είναι δυνατό να επιτευχθούν αυξημένες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας (20Mbps) [22].
- Ευαίσθητα συστήματα στην ΗΜ ακτινοβολία: Είναι γνωστό ότι το οπτικό φάσμα συχνοτήτων που χρησιμοποιείται από τα συστήματα VLC δεν προκαλεί ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Ως αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος θα ήταν η χρήση τέτοιων συστημάτων οπτικής επικοινωνίας σε περιβάλλοντα ευαίσθητα στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Τέτοιοι χώροι είναι καμπίνες αεροσκαφών, νοσοκομεία (σχήμα 2.4 [8]), εγκαταστάσεις πετροχημικών που απαγορεύεται η χρήση ραδιοκυμάτων.



Σχήμα 2.4: Χρήση συστημάτων VLC σε ευαίσθητο, σε ΗΜ παρεμβολές, περιβάλλον

2.3 Κίνητρα για την ανάπτυξη

Είδαμε πρακτικά κάποιες από τις εφαρμογές στις οποίες τα συστήματα των VLC μπορούν να συνεισφέρουν και να ενισχύσουν στην εξέλιξη τους. Όπως και την πρόοδο που έχει καταγραφεί από ερευνητικές ομάδες προς αυτή την κατεύθυνση. Παρατηρείται λοιπόν, μία αύξηση της δημοτικότητας των συστημάτων VLC με σκοπό την ενίσχυση των υπαρχόντων συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών αλλά και την αντικατάστασή τους, σε ορισμένες περιπτώσεις, τα οποία κυρίως βασίζονται και χρησιμοποιούν το πεδίο των ραδιοσυχνοτήτων RF.

	VLC	RF
Υποδομή	LED	Access Point
Ρυθμός Μετάδοσης	Ευρύ (400 - 800THz)	Περιορισμένο (3KHz -
		300GHz)
Ηλεκτρομαγνητικές	Όχι	Ναι
Παρεμβολές		
LOS (Line of Sight)	Ναι	Όχι
Προτυποποίηση	Πρώιμο στάδιο	Εξελιγμένη
Κατανάλωση	Χαμηλή	Μέτρια
ενέργειας		
Κάλυψη	Περιορισμένη	Ευρεία
Ασφάλεια εν γένη	Ναι	Όχι

Πίνακας 2.1: Σύγκριση μεταξύ συστημάτων VLC και RF

Οι κύριοι παράγοντες που οδηγούν στην περαιτέρω έρευνα των VLC αντιστοιχούν και στα λεγόμενα πλεονεκτήματα τους έναντι των συστημάτων που χρησιμοποιούν ραδιοκύματα. Μια συνοπτική σύγκριση παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1 ενώ ακολουθεί καταγραφή των πλεονεκτημάτων των VLC.

- Ανάγκη αύξησης χωρητικότητας: Η χρήση του ραδιοφάσματος, για την ασύρματη επικοινωνία, είναι η κατεξοχήν επιλογή παρόχων και κατασκευαστών πολλές δεκαετίες τώρα. Από την εποχή των πειραμάτων του Hertz (1894) και στη συνέχεια με την πρώτη φορά που ο G. Marconi [23] μετέδωσε για διατλαντικά ραδιοκύματα, το 1901. Από τότε μέχρι σήμερα η ραγδαία εξέλιξη έχει μεταφραστεί σε περαιτέρω ανάγκη για εύρος φάσματος στην ασύρματη επικοινωνία. Το φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων με το εύρος του να μην ξεπερνά τα 0,3GHz μοιάζει ολοένα και μικρότερο να χωρέσει τις ανάγκες που δημιουργούνται [24]. Όπως εύκολα μπορεί να εξαχθεί από τον πίνακα 2.1 η ζώνη εύρους συχνότητας του ορατού είναι 10.000 φορές μεγαλύτερη από αυτή του φάσματος ραδιοκυμάτων.
- Έλλειψη παρεμβολών: Εν γένη τα συστήματα VLC δεν παρουσιάζουν παρεμβολές με τα συστήματα RF. Οπότε η χρήση τους θα μπορουσε να φανεί αποτελεσματική σε χώρους ευάλωτους σε παρεμβολές [25], όπως περιγράφηκε και παραπάνω.
- Ασφάλεια Δεδομένων: Το ορατό φως λόγω της ιδιότητάς του παραμένει στον χώρο διάδοσής του, περιορισμένο από τα εμπόδια (τοίχους κ.α). Αυτό ως ιδιότητα εξυπηρετεί την ασφάλεια των δεδομένων που μεταφέρονται από δέσμες ορατού φωτός και είναι πλήρως ελεγχόμενες. Σε αντίθεση με την χρήση RF συστημάτων όπου τα τα ραδιοκύματα διαπερνούν εμπόδια όπως τοίχους και έτσι τα δεδομένα είναι ευάλωτα σε υποκλοπές.
- Κατανάλωση ενέργειας: Το βασικό τμήμα ενός συστήματος VLC είναι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι φωτοδίοδοι LED. Οι φωτοδίοιδοι LED είναι ενεργειακά αποδοτικοί εντάσσοντας τους στην Πράσινη Τεχνολογία [26]. Το παραπάνω ενισχύεται από το ίδιο άρθρο το οποίο προβλέπει ότι στην ενδεχόμενη αντικατάσταση των συμβατικών πηγών φωτός με LED, η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας θα μειωθεί κατά 50%. Κατά συνέπεια και τα επίπεδα εκπομπών του CO₂.
- Εύκολη υιοθέτηση λόγω υποδομής: Οποιαδήποτε μετάβαση προϋποθέτει μια σειρά ενεργειών που επιφέρουν κόστος και πολυπλοκότητα. Τα συστήματα VLC μπορουν να εφαρμοστούν με ευκολία και μικρό κόστος στην υπάρχουσα υποδομή φωτισμού με μικρές μετατροπές σε αυτήν [27], οι οποίες θα επιτρέψουν και την μεταφορά δεδομένων που είναι και ο σκοπός. Επισημαίνεται επίσης ότι με την ενοποίηση των συστημάτων VLC και PLC(Power Line Communication) γίνεται ακόμη πιο αποτελεσματική αυτή η μετάβαση και οδηγεί στην ενίσχυση της ευρύτερης εφαρμογής [25].
- Κόστος: Ισχυρό πλεονέκτημα της τεχνολογίας των συστημάτων ορατής ασύρματης επικοινωνίας είναι το κόστος. Παραμένει χαμηλό ανα μονάδα συσκευής για κάθε ένα από τα

συστήματα όπως αναφέρεται στο [28] υπάρχουν συνδέσεις που σε απόσταση μέχρι και 10m πετυχαίνουν ταχύτητες μεγαλύτερες και του 1Mb/s στη συχνότητα των 2,4GHz, με κόστος της τάξης των 4,5Euro ανά μονάδα. Ενώ με ταχύτητα της τάξης των 4Mb/s σε αρκετά περιορισμένη απόσταση έχουμε κόστος λιγότερο του ευρώ. Όπως περιγράφηκε και στο παραπάνω πλεονέκτημα, η απλότητα της μετάβασης σε συστήματα VLC έχει σαν άμεσο αποτέλεσμα το μειωμένο κόστος της όλης διαδικασίας.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από την συγκέντρωση των κύριων παραγόντων καθιστούν τα συστήματα VLC, πολλά υποσχόμενα για την επέκταση της ασύρματης επικοινωνίας, για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών σε μέρη που μέχρι τώρα δεν ήταν εφικτό. Στην επόμενη ενότητα θα δούμε ευρύτερα το οπτικό φάσμα και πως αυτό χρησιμοποιείται σήμερα και τι παραπάνω μπορεί να προσφέρει.

2.4 Οπτική ασύρματη επικοινωνία

Τα οπτικά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας (OWC) βασίζονται στην οπτική ακτινοβολία ώστε να μεταφέρουν δεδομένα στον ελεύθερο χώρο (Free Space Optics - FSO) με εύρος συχνοτήτων που κυμαίνονται από τις υπέρυθρες (Infra-Red - IR) στις υπεριώδης (Ultraviolet - UV). Περιγραφικά, η μετάδοση πληροφορίας μέσω του οπτικού φάσματος, μεταφέρεται από τον πομπό, αφού πρώτα έχει μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε οπτικό, προς τον δέκτη όπου μετατρέπεται το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό ρεύμα, όπως αυτό φαίνεται από το διάγραμμα 2.5. Ως πομποί, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δίοδοι φωτός LED για το ορατό φάσμα και δίοδοι λέιζερ Laser και φωτοανιχνευτές (Photo-Detectors - PD) ως δέκτες.



Σχήμα 2.5: Διαγραμματική περιγραφή μετάδοσης δεδομένων σε συστήματα OWC

Γενικά στις οπτικές ασύρματες επικοινωνίες οι βασικότερες προκλήσεις για την επίτευξη υψηλής ταχύτητας μετάδοσης εστιάζονται στους εξής παράγοντες:

- Απώλεια ελεύθερου χώρου (FSL)
- Φως του περιβάλλοντος, πρόκληση θορύβου
- Διασπορά πολλαπλών διαδρομών, πρόκληση διασυμβολικής παρεμβολής (Intersymbolic Interference - ISI)

Όπως ορίστηκαν από τους J. Kahn και J. Barry στο [29], οι έξι διαφορετικοί τρόποι μετάδοσης στον ελεύθερο εσωτερικό χώρο, της οπτικής ακτινοβολίας από τον πομπό στο δέκτη φαίνεται στο σχήμα 2.6. Από την απεικόνιση αυτή αναδεικνύονται κάποια από τα μειονεκτήματα που καταγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα.



Σχήμα 2.6: Τρόποι μετάδοσης οπτικής ακτινοβολίας σε εσωτερικό χώρο

Στο σημείο αυτό δε θα μπορούσε να λείπει μια σύγχριση μεταξύ των δύο από τα διαφορετικά συστημάτα που έχουν αναπτυχθεί και οι τεχνολογίες τους βασίζονται στο οπτικό πεδίο ραδιοσυχνοτήτων του ΗΜ φάσματος. Μεταξύ λοιπόν των VLC και IR συστημάτων υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Ενώ οι IR πηγές είναι φασματικά στενές, τα λευκά LED χαρακτηρίζονται από ένα οπτικό φάσμα με εύρος 300nm. Αυτό σημαίνει ότι για την ίδια εκπεμπόμενη ισχύ τα στενής ζώνης IR συστήματα αντιμετωπίζουν καλύτερα τον ευρυζωνικό θόρυβο που προέρχεται από φωτεινές πηγές του περιβάλλοντα χώρου, σε σχέση με τα VLC συστήματα. Από την άλλη πλευρά, η ευρυζωνική φύση του λευκού φωτός προσφέρει μια ποικιλομορφία στο μήκος κύματος κατά τη φασματικά επιλεκτική ανάκλαση από χρωματιστές επιφάνειες, οι οποίες απορροφούν συγκεκριμένα μήκη κύματος. Επίσης, η υπέρυθρη ακτινοβολία είναι αόρατη στο ανθρώπινο μάτι, γεγονός που επιτρέπει τη συνεχή λειτουργία των IR συστημάτων
χωρίς να γίνονται αντιληπτά από το ανθρώπινο μάτι. Το ίδιο, όμως, δεν ισχύει για τα VLC συστήματα, καθώς δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε περιπτώσεις όπου δεν απαιτείται φωτισμός, τουλάχιστον ακόμη [30].

2.5 Φωτισμός με LED

Βασική χρήση των λαμπτήρων LED, και ευρύτερα γνωστή, είναι ο φωτισμός εσωτερικών και εξωτερικών χώρων αλλά και οπουδήποτε χρειάζεται φως είτε για πρακτικούς λόγους (σηματοδότηση κλπ.) είτε για αισθητικούς λόγους. Από την εποχή των κεριών στην σημερινή, μεταβατική, εποχή των λαμπτήρων LED, χρησιμοποιήσαμε και χρησιμοποιούμε λαμπτήρες πυρακτώσεως οι οποίοι λόγω της μεγάλης απώλειας ενέργειάς τους, σε θερμική ενέργεια, αντικαταστάθηκαν από του λαμπτήρες φθορισμού. Ένας από τους βασικότερους παράγοντες που οι LED κερδίζουν έδαφος είναι η διάρκεια ζωής τους σε συνδυασμό με την αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται από την χαμηλή κατανάλωση συγκριτικά με τους "προκατόχους' της, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.7



Σχήμα 2.7: Εξέλιξη των τεχνολογιών φωτισμού

Συγκεντρωτικά τα πλεονεκτήματα των λαμπτήρων LED έναντι των παραδοσιακών τεχνολογιών φωτισμού.

- Παράγουν αισθητά χαμηλότερη θερμότητα, που σημαίνει ότι οι απώλειες είναι ελάχιστες.
- Η διάρχεια ζωής τους μπορεί να φτάσει χαι τις 50.000 ώρες συγχριτιχά με τις 15.000 ώρες του μέγιστο για τους παραδοσιαχούς λαμπτήρες.
- Η φωτεινότητα (luminous) που παράγεται ανά μονάδα Watt αγγίζει το θεωρητικό όριο των 300lm/W με White-LED (WLED) όπως περιγράφεται στο [31]. Ενώ αντίστοιχα σε λάμπες πυρακτώσεως έχουμε μέχρι και 20lm/W [32] και στους λαμπτήρες φθορίου 70lm/W(σχήμα 2.7).
- Δεν περιέχουν επικίνδυνες ουσίες, όπως υδράργυρο.

 Λόγω του μεγάλου εύρους ζώνης (100MHz) [25] μπορούν να αξιοποιηθούν και ως συσκευές επικοινωνίας.

Μετά λοιπόν την αναχάλυψη του κόκκινου LED και την ανάπτυξη των IR συστημάτων, η πρόσφατη αναχάλυψη των white High-Brightness LEDs (HB-LED) ανανέωσε το ενδιαφέρον για τις επικοινωνίες ορατού φωτός. Τα HB-LED επιτρέπουν την ταυτόχρονη λειτουργία φωτισμού και τηλεπικοινωνιακού συστήματος και αναμένεται να αποτελέσουν την πηγή φωτισμού στο άμεσο μέλλον, καθώς ξεπερνούν σε απόδοση τις λυχνίες πυρακτώσεως και φθορισμού.

2.5.1 Βασικές ιδιότητες των LED

Οι LED λυχνίες έχουν δύο βασικές ιδιότητες, τη φωτεινή ένταση και την μεταδιδόμενη οπτική ισχύ. Η φωτεινή ένταση είναι το μέγεθος που περιγράφει τη ροή ενέργειας ανά στερεά γωνία. Συνδέεται με τη φωτεινότητα μιας φωτεινής επιφάνειας και χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη λαμπρότητα ενός LED. Η φωτεινή ένταση δίνεται από την Εξ. 2.1 [33].

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \tag{2.1}$$

όπου Ω είναι η χωρική γωνία και Φ η φωτεινή ροή, η οποία είναι δυνατόν να βρεθεί μέσω της ροής ενέργειας Φ_e όπως στην Εξ. 2.2 [33].

$$\Phi = K_m \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} V(\lambda) \Phi_e d\lambda \tag{2.2}$$

όπου $V(\lambda)$ είναι η πρότυπη συνάρτηση φωτεινότητας, K_m η μέγιστη ορατότητα. Η μέγιστη ορατότητα είναι περίπου 683 lm/W για μήχος χύματος λ =555 nm. Η ολοχλήρωση της ροής ενέργειας Φ_e για όλες τις χατευθύνσεις είναι η μεταδιδόμενη οπτιχή ισχύς P_t η οποία μπορεί να υπολογιστεί από την Εξ. 2.3 [33]

$$P_t = \int_{\Lambda_{min}}^{\Lambda_{max}} \int_0^{2\pi} \Phi_e d\theta d\lambda \tag{2.3}$$

όπου τα Λ_{min} και Λ_{max} υπολογίζονται από τη καμπύλη ευαισθησίας της φωτοδιόδου. Η μεταδιδόμενη οπτική ισχύς εκφράζει τη συνολική ενέργεια που ακτινοβολείται από ένα LED και είναι χρήσιμη παράμετρος για τις οπτικές επικοινωνίες.

2.5.2 Φωτεινότητα LED

Η φωτεινότητα εκφράζει την λαμπρότητα μίας επιφάνειας που φωτίζεται. Η φωτεινή ένταση σε μία γωνία φ, δίνεται από την Εξ. 2.4. [33]

$$I(\phi) = I(0)cos_m\phi \tag{2.4}$$

Σε μία επιφάνεια η οποία φωτίζεται, η οριζόντια φωτεινότητα σε ένα σημείο του επιπέδου (x, y) δίνεται από την Εξ. 2.5 [33]

$$E_{hor} = \frac{I(0)cos_m\phi}{D_d^2}cos^2\psi \tag{2.5}$$

όπου I(0) η κεντρική ένταση φωτεινότητας ενός LED, φ η γωνία ακτινοβολίας, ψ η γωνία πρόσπτωσης και D_d η απόσταση μεταξύ της LED και της επιφάνειας του φωτοανιχνευτή. Θεωρούμε ότι τα LED έχουν κατανομή ακτινοβολίας Lambertian¹, ετσι η ένταση της ακτινοβολίας εξαρτάται μόνο από την γωνία ακτινοβόλησης φ. Ενώ η παράμετρος m καθορίζει την τάξη της Λαμπερτιανής εκπομπής και δίνεται απο την γωνία ημι-ισχύος $\Phi_{1/2}$ όπως φαίνεται στην Εξ. 2.6 [29]

$$m = -\frac{ln2}{\ln\cos\Phi_{1/2}}\tag{2.6}$$

Ενώ στο σχήμα 2.8 μπορούμε να δούμε διαγραμματικά, πως απεικονίζονται τα μεγέθη που περιγράφηκαν, σε μια οπτική ζεύξη φωτοδιόδου LED με έναν φωτοανιχνευτή που βρίσκεται σε επίπεδο σημείο (x, y).



Σχήμα 2.8: Οπτική ασύρματη ζεύξη LED - PD στο επίπεδο

2.5.3 Οπτική ισχύς άμεσης ζεύξης

Το βασικότερο από τα μεγέθη, για τον χαρακτηρισμό μιας οπτικής ζεύξης, είναι η ενίσχυση του DC καναλιού *H*(0), το οποίο συνδέει το την λαμβανόμενη και την εκπεμπόμενη οπτική ισχύς. Ενώ αυτό φαίνεται από την Εξ. 2.7 της οπτικής λαμβανόμενης ισχύος.

$$P = H(0)P_t \tag{2.7}$$

Ενώ η σχέση που μας δίνει το μετασχηματισμό Fourier της παλμικής απόκρισης του οπτικού ασύρματου καναλιού (h(t)) ζεύξης άμεσης οπτικής επαφής, γενικά (είτε LOS είτε non direct-LOS σχήμα 2.9) περιγράφεται στην εξίσωση



Σχήμα 2.9: Γεωμετρία ζεύξης (α) LOS (b) non-direct LOS

¹Μια τυπική κατανομή διάχυτης ανάκλασης είναι η Λαμπερτιανή, σύμφωνα με την οποία το φως ανακλάται με την ίδια λαμπρότητα προς όλες τις κατευθύνσεις.

$$H(0)_{LOS} = \begin{cases} \frac{A}{d^2} R_o(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi & 0 \le \psi \le \Psi_{(c)} \\ 0 & \theta > \Psi_c \end{cases}$$

Όπου A το εμβαδόν της επιφάνειας του ανιχνευτή, $T_s(\psi)$ είναι η ενίσχυση οπτικού φίλτρου και $g(\psi)$ η ενίσχυση οπτικού συγκεντρωτή. Τα υπόλοιπα μεγέθη όπως περιγράφονται στην 2.5. Το Ψ_c υποδεικνύει το εύρος του πεδίου στον δέκτη.

2.5.4 Διάφοροι τύποι LED

Το χυρίαρχο συστατιχό μιας φωτοδιόδου είναι ένας ημιαγώγιμος, ηλεχτροφωταυγής χρύσταλλος, που εχπέμπει φως όταν τον διατρέχει ηλεχτριχό ρεύμα. Η φωτοδίοδος LED είναι μια ορθά πολωμένη επαφή p - n, η οποία εχπέμπει φως μέσω αυθόρμητης εχπομπής, φαινόμενο το οποίο ονομάζεται ηλεχτροφωταύγεια. Οι ημιαγωγοί τύπου p οι φορείς του ηλεχτριχού ρεύματος είναι οι οπές, ενώ στους ημιαγωγούς τύπου n οι φορείς είναι τα ηλεχτρόνια. Η πιο απλή της μορφή φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Η αχτινοβόλος επανασύνδεση ηλεχτρονίων-οπών στην περιοχή απογύμνωσης



Σχήμα 2.10: Εκπομπή φωτός από LED

παράγει φως, ένα μέρος του οποίου διαφεύγει από τη διάταξη. Το εκπεμπόμενο φως είναι ασύμφωνο και έχει ένα σχετικά ευρύ φασματικό εύρος. Υπάρχει πλήθος διαφορετικών τύπων LED τα οποία βρίσκονται διαθέσιμα, χρησιμοποιούνται αλλά και αναπτύσσονται. Μπορούν να διακριθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες όπως περιγράφονται παρακάτω.

- Ανόργανα LED: Αυτό το είδος των LED είναι η παραδοσιαχή μορφή της διόδου που είναι διαθέσιμη από τη δεχαετία του 1960. Είναι χατασχευασμένα από ανόργανα υλιχά. Μεριχά από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα είναι ένωση ημιαγωγών, όπως νιτρίδιο του γαλλίου (GaN), νιτρίδιο του ινδίου - γαλλίου (InGaN), νιτρίδιο αργιλίου του γαλλίου (AlGaN) χαι πολλά άλλα.
- Οργανικά LED OLED: Είναι η άμεση εξέλιξη των διόδων εχπομπής φωτός. Αυτός ο τύπος χρησιμοποιεί οργανιχά υλιχά τα οποία επιτρέπουν την χατασχευή τους σε επίπεδα φύλλα χαι προσφέρουν μια διάχυτη περιοχή φωτός. Πραχτιχά ένα πολύ λεπτό φιλμ οργανιχού υλιχού είναι τοποθετημένο ανάμεσα σε μία γυάλινη επιφάνεια χαι ένα μεταλλιχό χάλυμμα, βλπ σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11: Δομή φωτοδιόδου OLED

High Brightness LED: Υψηλής φωτεινότητας LED, είναι ένα είδος ανόργανων LED που αρχίζουν να χρησιμοποιούνται για εφαρμογές φωτισμού. Αυτό το είδος είναι ουσιαστικά το ίδιο με το βασικό ανόργανο LED, αλλά έχει πολύ μεγαλύτερη απόδοση φωτός. Για να δημιουργηθεί υψηλότερη απόδοση απαιτείται από την συσκευή να είναι σε θέση να χειριστεί υψηλά επίπεδα της κατανάλωσης ισχύος. Συχνά αυτά τα LED είναι δομημένα έτσι ώστε να τοποθετούνται πάνω σε τέτοια επιφάνεια που σκοπός της είναι να ψύχει (Heat Sink) ώστε να ελαχιστοποιείται η ανεπιθύμητη θερμότητα, βλπ σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12: Δομή φωτοδιόδου HB-LED

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι το ορατό φως (Visible Light) είναι καταλληλότερο για την χρήση σε ασύρματη οπτική επικοινωνία (OWC) από τα ήδη διαδεδομένα IR συστήματα τα οποία προτιμούνται για μεγάλες αποστάσεις. Η ικανότητα της αυξημένης μεταγωγής των λαμπτήρων LED μαζί με άλλα χαρακτηριστικά όπως η ενεργειακή απόδοση και η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής την καθιστούν την πλέον ευνοϊκή πηγή για την ενσωμάτωση της σε συστήματα VLC. Διαφόρων τύπων LED είναι διαθέσιμα με το καθένα να έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και μοναδικές ιδιότητες. Με βάση τα χαρακτηριστικά τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικούς τύπους εφαρμογών φωτισμού. Η ανάπτυξη της αγοράς φωτισμού, της τεχνολογίας LED, προβλέπεται να είναι πολύ αυξημένη στα επόμενα έτη και ως εκ τούτου δημιουργούν ένα ισχυρό επιχείρημα για αυτή τη τεχνολογία με κατεύθυνση την ενσωμάτωση της σε συστήματα VLC.

2.6 Δομή VLC συστημάτων

Τα συστήματα VLC χρησιμοποιούν την οπτική επαφή για τις ζεύξεις μεταξύ πομπών και δεκτών, αυτό προκύπτει εν γένη από την φύση λειτουργίας των πηγών που χρησιμοποιούνται (LED), που ως σκοπό έχουν τον φωτισμό του περιβάλλοντος και μέσω αυτού προσπαθεί να επιτευχθεί η μεταφορά δεδομένων. Όπως ήδη έχει επισημανθεί, τα συστήματα VLC λειτουργούν σε μικρές αποστάσεις αποτελεσματικότερα και έτσι πετυχαίνουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Οι πηγές που χρησιμοποιούνται εκπέμπουν το φως με τρόπο διάχυτο². Η ένταση της ακτινοβολίας (I) εξαρτάται από το ρεύμα που ρέει στη διάταξη της διόδου VLC συναρτήσει της διαφοράς δυναμικού (V) που εφαρμόζεται στα άκρα της. Από την χαρακτηριστική καμπύλη V-I, διαφαίνεται η καλή λειτουργία του συστήματος η οποία επιτυγχάνεται στη γραμμική περιοχή της καμπύλης και υποδεικνύεται η τάση κατωφλίου³.

Πρακτικά για την επίτευξη ψηφιακής διαμόρφωσης η δίοδος διαμορφώνεται από μία πηγή ρεύματος η οποία απλά ωθεί τη LED να ανάβει και να σβήνει σχήμα 2.13(a). Όταν ωθείται κοντά στο κατώφλι, η δίοδος ανοίγει πιο γρήγορα, και το σήμα του ρεύματος μπορεί να είναι μικρότερο. Σε αναλογική διαμόρφωση σήματος το συνεχές ρεύμα πόλωσης μετακινείται πέρα από το όριο (I_{dc}) ώστε η λειτουργία να βρίσκεται κατά μήκος της γραμμικής περιοχής στην χαρακτηριστική ισχύος - έντασης ρεύματος, σχήμα 2.13(b).



Σχήμα 2.13: Οπτική διαμόρφωση LED: (a) Ψηφιακή (b) Αναλογική

Σημειώνεται ότι η αναλογική διαμόρφωση απαιτεί την ύπαρξη συνεχούς ρεύματος πόλωσης

²Τα εκπεμπόμενα φωτόνια έχουν διαφορετικό μήκος κύματος και φάση, σε αντίθεση με πηγές φωτός που εκπέμπουν συνεκτικά την φωτεινή ακτινοβολία, όπως τα λέιζερ.

³Είναι η τάση που εφαρμόζεται μεταξύ πύλης και πηγής ενός στοιχείου κάτω από την οποία το ρεύμα υποδοχής - πηγής ουσιαστικά πέφτει στο μηδέν.

για να παραμένει ορθά πολωμένο το σύστημα ανά πάσα στιγμή. Το συνολικό ρεύμα διόδου δίνεται από την Εξ. 2.8 [34].

$$i = I_{dc} + I_{SP} sin\omega t \tag{2.8}$$

και η αντίστοιχη οπτική ισχύς εξόδου [34] που προκύπτει από την παραπάνω είναι

$$P = P_{dc} + P_{SP} sin\omega t \tag{2.9}$$

όπου I_{dc} είναι το συνεχές ρεύμα πόλωσης, P_{dc} η μέση ισχύς και P_{SP} είναι το μέγιστο πλάτος των διαμορφωμένων τμημάτων της ισχύς εξόδου (εναλλασσόμενο ρεύμα - AC). Η διακύμανση του ρεύματος εισόδου αναπαριστάται από την κυματομορφή της οπτικής ισχύος λόγω της γραμμικής σχέσης μεταξύ ισχύος και ρεύματος [34]. Οι οποιεσδήποτε αποκλίσεις από τη γραμμικότητα στρεβλώνουν το σήμα και συμβαίνουν εξαιτίας θορύβων που επηρεάζουν το σύστημα μας σε οποιοδήποτε σημείο της διαδικασίας, είτε στη μεταφορά στον ελεύθερο χώρο είτε κατά την διαμόρφωση είτε εντός του συστήματος, λόγω θερμότητας.

Λόγω της διαμόρφωσης, που ως αποτέλεσμα έχει να αναβοσβήνει την πηγή, η άμεση ανίχνευση (Direct Detection - DD) είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται από τον φωτοανιχνευτή για την λήψη της έντασης του οπτικού σήματος και την μετατροπή του σε ηλεκτρικό σήμα. Λόγω αυτού θα πρέπει οι συχνότητες διαμόρφωσης να είναι αρκετά υψηλές ώστε να αποφεύγεται το τρέμουλο στην οπτική δέσμη, που θα μπορούσε να γίνει αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι.



Σχήμα 2.14: Διαγραμματική δομή συστήματος VLC

Στο σχήμα 2.14 φαίνεται η δομή ενός συστήματος VLC και η οπτική ζεύξη μεταξύ της πηγής φωτός (LED) και του φωτοανιχνευτή (PD). Η διαμορφωμένη οπτική κυματομορφή (I_{SP}) και το συνεχές ρεύμα πόλωσης I_{dc} συνθέτουν το συνολικό ρεύμα που διαπερνά την δίοδο, όπως περιγράφεται στην Εξ. 2.8. Η οπτική δέσμη με την αντιστοίχου μεγέθους οπτική ισχύ εξόδου (Εξ. 2.9) περνούν μέσω του οπτικού καναλιού (ελεύθερος χώρος) στον φωτοανιχνευτή ενώ σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και οπτικά φίλτρα, για την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Σε αυτό το σημείο ο PD μετατρέπει το οπτικό σήμα εκ νέου σε ηλεκτρικό ρέυμα και αφού προστεθούν οποιοιδήποτε θόρυβοι από τις συσκευές του συστήματος (κυρίως θερμικές παρεμβολές που δημιουργούνται από τους φορείς των αγωγών ρεύματος), τότε το σήμα ενισχύεται. Τελικά το λαμβανόμενο σήμα I_{rec} μετά από ψηφιακή επεξεργασία αποδιαμορφώνεται ώστε να ληφθούν τα δεδομένα που είχαν σταλεί εξ αρχής. Ενώ μία πιο πραγματική απεικόνιση οπτικής ασύρματης μετάδοσης φαίνεται στο σχήμα 2.15 [35], όπου διακρίνεται και το σημείο της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (Digital Signal Processing - DSP).



Σχήμα 2.15: Οπτική ασύρματη μετάδοση δεδομένων συστήματος VLC

Ένα άλλο σημείο που διαχρίνεται στο παραπάνω σχήμα είναι η δημιουργία πολυδιόδευσης (Multi-path) που οδηγεί σε διασπορά και εξασθένιση του οπτικού σήματος. Έχουν όμως μοντελοποιηθεί οι πηγές ως Λαμπερτιανής κατανομής [33], με στόχο την εξάλειψη των δυσλειτουργιών που επιφέρουν αυτού του είδους οι θόρυβοι.

2.6.1 Δέκτης συστήματος VLC

Βασικό ρόλο στην λειτουργία ενός συστήματος συστήματος VLC παίζει ο δέκτης - φωτοανιχνευυτής (PD), όπως περιγράφηκε και παραπάνω ρόλος του είναι να λαμβάνει οπτικό σήμα με την μέθοδο της άμεσης ανίχνευσης (DD). Η μετατροπή του λεγόμενου φωτορεύματος σε ηλεκτρικό σήμα και έπειτα η περεταίρω επεξεργασία για την λήψη των δεδομένων συνθέτουν το μέρος του δέκτη σε ένα σύστημα VLC. Οι φωτοδίοδοι που παίζουν το ρόλο του ανιχνευτή και χωρίζονται σε δύο βασικούς τύπους [36], που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ορατών οπτικών επικοινωνιών:

- Φωτοδίοδοι P-I-N
- Φωτοδίοδοι APD Avalanche Photodiode

Οι κύριοι παράγοντες που χαρακτηρίζουν τις φωτοδιόδους για τις ασύρματες οπτικές επικοινωνίες είναι οι παρακάτω:

• Φασματική απόκριση

- Φωτοευαισθησία
- Κβαντική απόδοση
- Ισοδύναμη ισχύς θορύβου
- Χρόνος απόκρισης
- Εύρος ζώνης μετάδοσης

Η φωτοανίχνευση επιτυγχάνεται με την αντίδραση μεταξύ του φωτοευαίσθητου υλικού και του προσπίπτοντος φωτός όπου παράγονται ελεύθερα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά με την κατάλληλη ενίσχυση (εξωτερικό δυναμικό) κατευθύνονται και με αυτό τον τρόπο σχηματίζεται ηλεκτρικό ρεύμα το οποία μετέπειτα επεξεργάζεται.

Φωτοανιχνευτές τύπου ΡΙΝ

Αυτός ο τύπος φωτοδιόδου εμφανίζει πλεονεχτήματα στο χρόνο απόχρισης και στην λειτουργία με ανάστροφη πόλωση. Η κατασκευή της διόδου συνθέτει τους γνωστούς ημιαγωγούς τύπου p (φορείς ηλ. ρεύματος οι οπές) και τύπου n (φορείς ηλ. ρεύματος) και επιπλέον ανάμεσα τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.16, ένα ενδογενές τμήμα (intrinsic) προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση στο επίπεδο χωρητικότητας της διόδου. Αυτό επιτρέπει στις διόδους αυτού του τύπου την γρήγορη απόκριση, η οποία αποτελεί και την αιτία



Σχήμα 2.16: Δομή διόδου ΡΙΝ

της δημοφιλίας τους στο χώρο των τηλεπικοινωνιών. Η ικανότητα της μετατροπής οπτικής ισχύος σε ηλεκτρικό ρεύμα εξαρτάται από το υλικό και το μήκος κύματος. Η ικανότητα αυτή Responsivity) της φωτοδιόδου εκφράζεται από την εξίσωση 2.10

$$\Re = \frac{ne}{h\nu} \tag{2.10}$$

όπου n η κβαντική αποδοτικότητα, e το φορτίο του ηλεκτρονίου $(1, 6 \cdot 10^{-19} C)$, h η σταθερά του Plank $(6.624 \cdot 10^{-34} J)$ και ν το μήκος κύματος της προσπίπτουσας οπτικής δέσμης.

Φωτοανιχνευτές τύπου APD

Αυτό το είδος φωτοανιχνευτών είναι εξαιρετικά αποτελεσματικό σε περιβάλλον με χαμηλά επίπεδα φωτισμού. Η λειτουργία του στηρίζεται στο φαινόμενο χιονοστιβάδας⁴, εκμεταλλευ-

⁴Σε υψηλές ανάστροφες πολώσεις συμβαίνει ένα φαινόμενο χιονοστιβάδας φορέων (carrier avalanche) λόγω της γρήγορης χίνησης των φορέων μειονότητας.

όμενος το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο⁵. Η ενίσχυσή του εκφράζεται από την εξίσωση 2.11

$$M = \frac{I_G}{I_p} \tag{2.11}$$

όπου I_G είναι η τιμή του ενισχυμένου ρεύματος εξόδου λόγω του φαινομένου της χιονοστιβάδας και I_p το ρεύμα πριν την ενίσχυση. Το ρεύμα εξόδου της διόδου APD είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της διόδου PIN για την ίδια τιμή προσλαμβανόμενης οπτικής ισχύος. Στα μειονεκτήματα είναι το γεγονός ότι ο θόρυβος είνια μεγαλύτερος ενώ η απόκριση πιο αργή σε σχέση πάντα με την αντίστοιχη δίοδο PIN.

Υλιχό	Μήκος κύματος	Responsivity	Ενίσχυση	Χρόνος
κατασκευής	(nm)	(A/W)		Απόκρισης (ns)
PIN Silicon	300 - 1100	0.5	1	0.1 - 5
PIN InGaAs	1000 - 1700	0.9	1	0.01 - 5
APD	800 - 1300	0.6	10	0.3 - 1
Germanium				
APD InGaAs	1000 - 1700	0.75	10	0.3

Πίνακας 2.2: Σύγκριση μεταξύ φωτοδιόδων PIN - APD με διαφορετικά υλικά κατασκευής

⁵Κβαντική διεργασία κατά την οποία απελευθερώνονται ηλεκτρόνια από μια επιφάνεια αγωγού όταν προσπέσει σε αυτή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συχνότητας τέτοιας ώστε τα ηλεκτρόνια να κατορθώσουν να υπερπηδήσουν το φράγμα δυναμικής ενέργειας που τα συγκρατεί στην επιφάνεια αυτή.

Κεφάλαιο 3

Πειραματικές Μέθοδοι

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικά όλες οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Ενώ θα γίνει αναλυτική καταγραφή όλων των οργάνων που αξιοποιήθηκαν. Ξεκινώντας με μια απλή περιγραφή του κάθε πειράματος που έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Οπτικών Επικοινωνιών του τμήματος Πληροφορικής & Τηλεματικής του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου Αθηνών, θα συνεχιστεί η καταγραφή και παρουσίαση των οργάνων κατηγοριοποιημένα ανά πείραμα. Έτσι ο αναγνώστης θα έχει τα εργαλεία για να μπορέσει να παρακολουθήσει την αναλυτική περιγραφή τον πειραμάτων, που αχολουθές και τέλος μία συνοπτική παρουσίαση των μεθόδων εξαγωγής αποτελεσμάτων που ακολουθεί και τέλος μία συνοπτική παρουσίαση των μεθόδων εξαγωγής αποτελεσμάτων, τα οποία θα αποτελέσουν και αντικείμενο αναφοράς του επόμενου κεφαλαίου. Παράλληλα παρουσιάζονται φωτογραφίες από τις διατάξεις των πειραμάτων για την καλύτερη καταγραφής των μετρήσεων έπαιξε η χρήση του λογισμικού ΜΑΤLAB όπου προσέφερε αυτοματισμούς στην λήψη τους και διευκόλυνε καταρχήν, στην αναλυτική τους καταγραφή.

3.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας, όπως έχει δηλωθεί εξ αρχής, είναι να αξιολογηθούν τα μέρη που αποτελούν ένα σύστημα ασύρματων οπτικών επικοινωνιών (VLC) και να παρουσιαστούν κάποιες από τις εφαρμογές αξιοποίησης τέτοιων συστημάτων. Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστεί το πρώτο μέρος και συγκεκριμένα ο σχεδιασμός των πειραμάτων που έγινε για να επιτευχθεί ο σκοπός αυτός.

Η αρχή έγινε από τον σχεδιασμό ενός απλού πειράματος ώστε να γίνει κατανοητό και εμφανές στον συγγραφέα αλλά και στον αναγνώστη της παρούσας, η βασική λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος VLC και κυρίως να ανακαλυφθεί ο τρόπος χαρακτηρισμού των εξαρτημάτων τέτοιων συστημάτων.

Στο επόμενο πείραμα έγινε προσθήκη αναβαθμισμένων οργάνων όπως και χρήση του λογισμικού ΜΑΤLAB ώστε να ενταχθούν οι αυτοματισμοί στην λήψη των μετρήσεων. Σε αυτό το σημείο δημιουργήθηκε και τροποποιήθηκε κατάλληλα, ο αλγόριθμος που αυτοματοποιεί τις διαδικασίες μετρήσεων. Ενώ στο τρίτο πείραμα, με οδηγό τα προηγούμενα και την εμπειρία που αποκτήθηκε έγιναν μετρήσεις σε ένα πρότυπο σύστημα πηγής LED, το οποίο σε συνεργασία με Πανεπιστήμιου της Ισπανίας βρέθηκε στην κατοχή του εργαστηρίου Οπτικών Επικοινωνιών και αξιοποιήθηκε από των συγγραφέα για την πραγματοποίηση μετρήσεων που αφορούν τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

Είναι εμφανές λοιπόν, ότι διατηρήθηκε ένα μοτίβο στον σχεδιασμό των πειραμάτων και κάθε φορά γίνονταν προσθήκες οι οποίες εξέλισσαν την πειραματική διαδικασία. Το μοτίβο στο σχεδιασμό και την υλοποίηση είναι απλό και αποτελείται από δύο μέρη την κατασκευή της εκάστοτε πειραματικής διάταξης και την λήψη των μετρήσεων με χρήση των εκάστοτε οργάνων. Βασική διάταξη, όπως περιγράφηκε και στην βιβλιογραφία, είναι η χρήση οπτικής πηγής και φωτοανιχνευτή όπου η πρώτη, με χρήση γεννήτριας, εκπέμπει ακτινοβολία στο φάσμα του ορατού (φως) και η δεύτερη λαμβάνει την οπτική αυτή ακτινοβολία και την μετατρέπει σε ηλεκτρικό ρεύμα όπου με επεξεργασία αυτού μας οδηγεί στο βαθμό της αποδοτικότητας κάθε συστήματος αλλά και κάθε συσκευής ξεχωριστά.

Η οπτική πηγή όλες τις περιπτώσεις ήταν φωτοδίοδοι LED διαφορετικού τύπου σε κάθε πειραματική διάταξη. Ενώ διατηρήθηκε κοινός και στα τρία πειράματα ο φωτοανιχνευτής (PD), εφόσον κάλυπτε το εκπεμπόμενο μήκος κύματος που χρησιμοποιήσαμε και στους τρεις τύπους πηγών, αλλά περισσότερα θα περιγραφούν στη επόμενη ενότητα όπου θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των οργάνων και των συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν.

3.2 Όργανα Πειραματικών Διατάξεων

3.2.1 Πειραματική διάταξη με πηγή LED - Ostar E3B

Στο πρώτο πείραμα έγινε χρήση των οργάνων που περιγράφονται με τα χαρακτηριστικά τους παρακάτω. Όπως και ο ρόλος που έπαιξε το κάθε ένα από αυτά στο πείραμα μας.



Σχήμα 3.1: Όργανα μέτρησης 1^{ou} πειράματος

Ψηφιακό πολύμετρο Faithful FT-3900: Χρησιμοποιήθηκαν δύο όμοια μοντέλα (σχήμα 3.1α) όπου το ένα συμμετέχει στο κύκλωμα της πηγής ως αμπερόμετρο, για την λήψη

της έντασης ρεύματος (I_{led}) , ενώ συνδέεται σε σειρά με την πηγή και την γεννήτρια. Το δεύτερο, συνδεδεμένο, παράλληλα, στο φωτοανιχνευτή καταγράφει την λαμβανόμενη τάση (V_{pda}) από την πηγή.

- Αναλογική γεννήτρια (σχήμα 3.1b): Τροφοδοσία της πηγής LED, όπου με σταθερό βήμα (~ 0.02mV) αυξανόταν η τάση τροφοδοσίας της πηγής.
- Ψηφιακό πολύμετρο Peak Tech 1890: Για την καλύτερη δυνατή ακρίβεια στην αύξηση του βήματος τάσης τροφοδοσία της πηγής, έγινε χρήση του συγκεκριμένου οργάνου (σχήμα 3.1c) ώστε να μετράται ψηφιακά η τάση (V_{led}).

Ενώ τα βασικά μέρη του συστήματος ασύρματης οπτικής επικοινωνίας - η πηγή και ο πομπός - του πρώτου πειράματος περιγράφονται παρακάτω με τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους και επισημαίνονται μεγέθη που κατά την επεξεργασία των μετρήσεων θα φανούν χρήσιμα στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Πηγή LED - Ostar LE CW E3B

Η συγκεκριμένη LED - Ostar LE CW E3B της εταιρίας OSRAM, ήταν μέρος του ερευνητικού ευρωπαικού προγράμματος OMEGA project [3], όπως αυτό αναφέρθηκε στη παράγραφο 2.1. Όπως φαίνεται από την εικόνα 3.2 η LED έχει προσαρτηθεί σε επιφάνεια που επιτρέπει την αποτελεσματικότερη ψύξη της, με σκοπό την αποδοτικότερη λειτουργία της, όπως αυτό αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.5.4. Το υλικό της επιφάνειας ψύξης είναι αλουμίνιο (Al). Επίσης έχει προσαρμοστεί, κατάλληλα, είσοδος υποδοχής BNC connector¹ και σύνδεση απαραίτητου αντάπτορα για την καλωδίωση.



Σχήμα 3.2: Πηγή LED - Ostar LE CW E3B με σε επιφάνεια Heat Sink

Ενώ τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης παρουσιαζονται αναλυτικά στο πίνακα 3.1, όπως αυτά περιγράφονται στο [37].

¹Bayonet Neill–Concelman: είναι σύνδεσμος για χρήση με ομοαξονικό καλώδιο

invariaç on i iç vita yapartı pie tirta estai ill ett ile		
Αριθμός LED chips	6	
Εύρος τάσης (V)	17,4 - 24,5	
Τυπική ένταση ρεύματος (Α)	0,7	
Γωνία ακτινοβόλησης (FOV)	130°	
Φωτεινότητα (lm)	450	
Επιφάνεια εκπομπής φωτός (mm^2)	$2, 1 \times 3, 2$	

Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά Ostar LE CW E3B

Φωτοανιχνευτής PDA10A-EC

Ο PDA10A-EC - Si Apmlified Detector, της εταιρίας Thorlabs είναι ένας ευρείας ζώνης ανιχνευτής πυριτίου που έχει σχεδιαστεί για την ανίχνευση φωτεινών σημάτων έως 150 MHζ. Ως ρυθμιστικό εξόδου υπάρχει αντίσταση εισόδου 50Ω η οποία επιτρέπει την τάση έως 5V με σκοπό την προστασία της συσκευής[38]. Πιο αναλυτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά PDA10A-EC

Υλικό κατασκευής	Πυρίτιο
Ενεργή περιοχή λήψης (mm^2)	0,8
Μέγιστη απόκριση (A/W)	$0,45$ \degree 750 nm
Τάση εξόδου (V)	0 - 5
Φωτεινότητα (lm)	450
Ενίσχυση V/A	$5 imes 10^3$
Ισχύς εισόδου VAC	220-240, 50-60 Hz , 5 Ω
Εύρος μήχους χύματος nm	200 - 1100

Η λειτουργία του PDA10A-EC περιγράφεται αναλυτικά από το κύκλωμα του σχήματος 3.3. Όπου εύκολα παρατηρούμε την χρήση ανεστραμμένης διόδου, με συνδυασμό ενός σταθερού κέρδους που προσφέρει ενίσχυση.



Σχήμα 3.3: Εσωτερικό κύκλωμα PDA10A-EC

Ενώ στο παρακάτω γράφημα 3.4 παρουσιάζεται η φασματική καμπύλη για την απόκριση της συσκευής σε όλο το εύρος μήκους κύματος στο οποίο ο ανιχνευτής αποκρίνεται. Οι μετρήσεις του κατασκευαστή [38] βρίσκονται στο πίνακα Α΄.1 στην ενότητα Α΄.1 του παραρτήματος Α΄.



Σχήμα 3.4: Φασματική καμπύλη απόκρισης φωτοανιχνευτή PDA10A-EC

3.2.2 Πειραματική διάταξη με πηγή RED - LED

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου, στην πειραματική διάταξη του δεύτερου πειράματος πραγματοποιήθηκαν αλλαγές στα όργανα λήψης μετρήσεων όπως και στο τρόπο λήψης τους. Ενώ διατηρήθηκε η χρήση του ίδιου φωτοανιχνευτή όπως αυτός περιγράφηκε στην ενότητα 3.2.1.

- Παλμογράφος Agilent 1024 Digita Signal Oscilloscope: Η καταγραφή των τάσεων εισόδου - εξόδου και συχνοτήτων, στον πομπό και την πηγή πραγματοποιείται με τον παλμογράφο. Ενώ όλες οι μετρήσεις μεταφέρονται μέσω σειριακής θύρας σειριακής θύρας επικοινωνίας RS-232 στον υπολογιστή και ο χειρισμός τους γίνεται από τον αλγόριθμο (βλπ Παράρτημα B.1) για την περαιτέρω επεξεργασία τους. Τα δύο κανάλια λήψης μετρήσεων (Channel 1, Channel 2) συνδέθηκαν με την πηγή και τον φωτοανιχνευτή αντίστοιχα, ώστε να λαμβάνει τις κατάλληλες μετρήσεις.
- Γεννήτρια συχνοτήτων Agilent 33250A: Τροφοδοτεί την πηγή RED LED ενώ καθορίζει τα χαρακτηριστικά της συχνότητας που επιλέγονται από τον συγγραφέα. Συγκεκριμένα

επιλέγονται το εύρος συχνοτήτων, το βήμα αλλαγής συχνοτήτων, πλάτος χυματομορφής τάσης, ορισμός DC offset. Κάποιες από τις μεταβλητές διαφοροποιούνταν για χάθε παχέτο μετρήσεων, χαθώς τα ο περιορισμός των 600 σημείων χαταγραφής από τον παλμογράφο δεν επέτρεπε την λήψη μετρήσεων στο επιθυμητό εύρος με το επιθυμητό βήμα, αναλυτιχότερα θα αναφερθούμε σε επόμενη ενότητα.

 RED - LED: Στο συγκεκριμένο πείραμα μετρήθηκε η αποδοτικότητα της ως πηγή μεταφοράς δεδομένων, μια κόκκινης LED 5mm, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.5.



 Σ χήμα 3.5: Όργανα πειραματικής διάταξης 2^{ou} πειράματος

Χρήση λογισμικού Matlab στη πειραματική διαδικασία

Η αλλαγή τρόπου λήψης των μετρήσεων αφορά στην χρήση του λογισμικό ΜΑΤLAB, μέσω σύνδεσης του ηλεκτρονικού υπολογιστή με τα παρακάτω όργανα. Για να πραγματοποιηθεί όμως η επικοινωνία των 3 μερών (υπολογιστή - γεννήτρια συχνοτήτων - παλμογράφο), δημιουργήθηκε κατάλληλος αλγόριθμος (βλπ Παράρτημα B.1) ο οποίος αυτοματοποιεί την διαδικασία λήψης μετρήσεων πραγματοποιώντας άνοιγμα/κλείσιμο οργάνων, παραμετροποίηση συνθηκών λήψης μετρήσεων (τιμές βήματος, πλάτος ταλάντωσης, ορισμός DC offset, εύρος συχνοτήτων). Ενώ παράλληλα με την αυτοματοποίηση της λήψης των μετρήσεων, πραγματοποιείται μέσω του αλγόριθμου, η εξαγωγή των γραφημάτων που θα χρησιμοποιηθούν στην επεξεργασία των μετρήσεων με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων/συμπερασμάτων. Η σύνδεση μεταξύ του υπολογιστή και των οργάνων μέτρησης πραγματοποιήθηκε μέσω της σειριαχής θύρας επικοινωνίας RS-232.

Για την δημιουργία του μέρους του αλγορίθμου (Παράρτημα Β.1) που αφορά την την αυτοματοποίηση της λήψης των μετρήσεων εγινε χρήση των επίσημων δηγιών του κατασκευαστή των οργανών μέτρησης [39], [40] στα αντίστοιχα κεφάλαια αναφορά για χρήση των οργάνων μέσω ΜΑΤLAB.

3.2.3 Πειραματική διάταξη με πηγή Quantum Dot - LED

Σε αυτό το πείραμα υπάρχει μόνο μία διαφοροποίηση ως προς τα τμήματα του συστήματος μας και αυτή ακούει στην πηγή που χρησιμοποιείται. Εδώ ως πηγή συνδέουμε 4 διαφορετικές QD-LED όπως αυτές φαίνονται στην εικόνα 3.6, όπου η διαφορετικότητα τους έγκειται στον τρόπο έγχυσης των νανοκρυστάλλων.



Σχήμα 3.6: QD-LED



Σχήμα 3.7: Διαγραμματική περιγραφή της QD-LED Οι Quantum Dot - LED ή αλλιώς QD-LED θεωρείται ως η επόμενη τεχνολογία στον χώρος των οθονών προβολής μετά τις OLED, στις οποίες αναφερθήκαμε στην ενότητα 2.5.4. QD-LED σημαίνει κβαντική τελεία διόδου εκπομπής φωτός και είναι μια μορφή της εκπομπής φωτός και αποτελείται από κρυστάλλους νάνο-κλίμακας, που μπορεί να προσφέρει μια εναλλακτική λύση για εφαρμογές όπως στις νεότερες τεχνολογίες οθονών. Η δομή ενός QD-LED είναι παρόμοια με την τεχνολογία των OLED. Αλ-

λά η διαφορά είναι στο κέντρο της διόδου όπου αποτελείται νανοκρυστάλλους σεληνιούχου καδμίου (CdSe) ή κβαντικές κουκκίδες. Ένα στρώμα σεληνιούχου καδμίου - κβαντικές τελείες - τοποθετείται μεταξύ των στρωμάτων του ηλεκτρονίου μεταφοράς και οργανικά υλικά. Μόλις εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο αναγκάζει ηλεκτρόνια και οπές να μετακινηθούν μέσα στο στρώμα κβαντικής τελείας, όπου συλλαμβάνονται από το στρώμα αυτό και ανασυνθέτονται, εκπέμποντας φωτόνια (σχήμα 3.7). Το φάσμα της εκπομπής φωτονίων είναι αρκετά στενό και χαρακτηρίζεται από το πλήρες πλάτος του κατά το ήμισυ της μέγιστης τιμής (Full Width at Half the maximum - FWHM).

3.3 Αναλυτική πειραματική περιγραφή

3.3.1 1° Πείραμα



Σχήμα 3.8: Σχεδιασμός πειραματικής διάταξης 1^{ou} πειράματος

Η σύνδεση των οργάνων και συσκευών, όπως αυτή σχεδιάστηκε (σχήμα 3.8), είναι το δεύτερο βήμα προετοιμασίας για την καταγραφή μετρήσεων. Συνδέθηκε σε σειρά η LED με τη γεννήτρια και το αμπερόμετρο και τοποθετήθηκε σε ένα κουτί όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9. Ο φωτοανιχνευτής (PDA) τοποθετήθηκε και αυτός στο κουτί, σε απόσταση 17cm από την LED, αφού συνδέθηκε με την τροφοδοσία του και σε παράλληλη σύνδεση με το βολτόμετρο, για την μέτρηση της λαμβανόμενης τάσης. Είναι το σωστό σημείο να υπενθυμίσουμε στον αναγνώστη, ότι ο φωτοανιχνευτής έχει ενσωματωμένη αντίσταση ($R_{load} = 50\Omega$) λόγω του ομοαξονικού καλωδίου που είναι συνδεδεμένο στην έξοδο του.

Εδώ χρίνεται απαραίτητο να διευχρινιστεί ότι η χρήση του κουτιού έγινε με σκοπό τον περιορισμό λήψης των εξωτερικών θορύβων από τον φωτοανιχνευτή. Στα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή σημειώνεται η ικανότητα λήψης σήματος στο εύρος 200nm έως 1100nm. Είναι εμφανές ότι η ικανότητα ανίχνευσης υπέρυθρης ακτινοβολίας ($\lambda_{ir} \ge 700nm$) θεωρείται θόρυβος για το πείραμά μας. Αυτό το γεγονός παρατηρήθηκε από τον συγγραφέα, καθώς με κλειστή την πηγή και το κουτί κατεγράφη λήψη σήματος στον ανιχνευτή όπου συμπεραίνεται εύκολα ότι η υπέρυθρη ακτινοβολία δεν είναι εύκολο να περιοριστεί σε αυτό το περιβάλλον.

Η διαδικασία λήψης των μετρήσεων ξεκινάει αφού έχει τελειώσει η συνδεσμολογία και ο απαραίτητος έλεγχος λειτουργίας του κυκλώματος. Με την βοήθεια του ψηφιακού πολύμετρου (βλπ παράγραφο 3.2) η αύξηση τάσης τροφοδοσίας, από την αναλογική γεννήτρια, έγινε με βήμα της τάξης των $\sim 0.02mV$. Από τις μετρήσεις αυτές, όπως παρουσιάζονται στον πίνακα Α΄.2 στο παράρτημα Α΄.2, σχεδιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη I-V της LED του σχήματος



 Σ χήμα 3.9: Πειραματική διάταξ
η 1^{ou} πειράματος

3.10. Παρατηρήθηκε ότι ο PDA άρχισε να καταγράφει τάση όταν η τάση εισόδου στη LED ήταν $V_{led}=14.59V.$



Σχήμα 3.10: Χαρακτηριστική καμπύλη I-VOstar LE CW E2B

3.3.2 2° Πείραμα

Η κατασκευή της πειραματικής διάταξης πραγματοποιήθηκε μετά τον σχεδιασμό του συστήματος όπως αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα ;;. Ο αλγόριθμος (παράρτημα B.1) δημιουργήθηκε με σκοπό την αυτοματοποίηση λήψης μετρήσεων, όπως έχει ήδη αναφερθεί.



Σχήμα 3.11: Πειραματική διάταξη πειραμάτων 2 & 3

Βασική λειτουργία του επίσης είναι η ταυτόχρονη επεξεργασία των λαμβανόμενων μετρήσεων, καθώς κατασκευάζονται και αποθηκεύονται άμεσα τα επιθυμητά γραφήματα (απόκριση του ασύρματου οπτικού καναλιού συναρτήσει συχνότητας H(f) - f). Περιγράφοντας την λειτουργία του αλγόριθμου οι εντολές που μεταφέρει στα όργανα του συστήματος μας περιγράφονται ως εξής:

- Στέλνει σήμα στην γεννήτρια χυματομορφών με τα χαραχτηριστικά της χυματομορφής που θα μεταφερθεί στη πηγή LED. Όπου μέσω της ασύρματης οπτικής ζεύξης ο PDA θα λάβει το φωτόρευμα και θα αποστείλει μέσω του CH2 την πληροφορία στον παλμογράφο, η οποία θα καταγραφεί από τον αλγόριθμο σε αντίστοιχο πίνακα για μετέπειτα επεξεργασία.
- Ο αλγόριθμος λαμβάνει ως είσοδο τα δεδομένα των CH1 και CH2, μέσω του παλμογράφου και υπολογίζει το φάσμα συχνοτήτων X(x) και Y(y) αντίστοιχα μετά από μετασχηματισμό Fourier όπως φαίνεται και στις γραμμές 64-65 του αλγορίθμου (παράρτημα B.1).
- Έπειτα και ενώ κρατάει την μέγιστη τιμή από τα θετικά μέρη του λαμβανόμενου σήματος (συχνότητα f εισόδου) την οποία χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό της συνάρτησης

μεταφοράς H(f) από την εξίσωση 3.1

$$H(f) = \frac{abs(Y(y))}{abs(X(x))}$$
(3.1)

 Ενώ τελικά σχεδιάζει τις γραφικές παραστάσεις του παραπάνω συναρτήσει των συχνοτήτων που δόθηκαν από την γεννήτρια στη πηγή ως είσοδο.

Στο συγκεκριμένο πείραμα οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τα δεδομένα που φαίνονται στον πίνακα 3.3.

Μέγεθος	Τιμή	
V _{DC}	1, 4V	DC τάση στα άχρα της LED
Peak to peak Amplitude	0,9V	Πλάτος ημιτονοειδούς σήματος εισόδου στην LED
Sample number	600	Διαχριτές μετρήσεις
Frequency range	0,5MHz - 2MHz	
Step transition	3,5KHz	Βήμα αλλαγής συχνοτήτων

Πίνακας 3.3: Δεδομένα πειραματικών μετρήσεων για το πείραμα 2

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι για την επιλογή του βήματος που αναφέρεται στον πίνακα 3.3 έγιναν δοκιμές με διαφορετικές τιμές (1KHz/2, 5KHz/3KHz) μέχρι την τελική επιλογή. Αυτή η απόφαση μας στην επιλογή των 3,5KHz έγινε αφού παρατηρώντας τα εξαγόμενα γραφήματα παρατηρήθηκε η ομαλότερη συμπεριφορά στην καμπύλη της γραφικής παράστασης. Εδώ φαίνεται ξεκάθαρα το πλεονέκτημα της χρήσης του αλγορίθμου που δημιουργήθηκε αφού επέτρεπε την λήψη αποφάσεων και την αλλαγή στο σχεδιασμό ενώ βρισκόμασταν στη διάρκεια μετρήσεων. Επίσης βοήθησε στο καλύτερο συντονισμό ευθυγράμισης της πηγής με τον δέκτη ανάμεσα στις διαφορετικές μετρήσεις, ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Στο παρακάτω γράφημα 3.12 παρουσιάζεται το εξαγόμενο αποτέλεσμα από την διαδικασία των μετρήσεων.



Σχήμα 3.12: Γράφημα H(f)-fτης RED-LED με βήμα 3,5
 KHzστο εύρος 0,5MHz-2MHz

3.3.3 3° Πείραμα

Όπως ήδη ήταν εμφανές από τη παράγραφο 3.2.3 οι ουσιαστικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με το προηγούμενο είναι δύο:

- Χρήση διαφορετικής πηγής και συγκεκριμένα τεσσάρων QD-LED, οι οποίες προήλθαν από την συνεργασία του εργαστηρίου με Πανεπιστήμιο της Ισπανίας με σκοπό την μέτρηση τους ως προς την αποδοτικότητά τους στη μεταφορά δεδομένων.
- Παρόλο που η διαδικασία λήψης μετρήσεων και ο αλγόριθμος παρέμειναν τα ίδια, μια μικρή διαφοροποίηση υπάρχει λόγω του περιορισμού που θέτει ο παλμογράφος², ο οποίος μας οδηγεί στο χωρισμό σε διαφορετικά συνεχή μέρη του φάσματος των συχνοτήτων που θα μετρηθούν. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει στην επιλογή μικρού βήματος το οποίο κρίθηκε επιθυμητό για την καλύτερη δυνατή απεικόνιση.

²Η ικανότητα του παλμογράφου να καταγράφει και να αποθηκεύει 600 διακριτές μετρήσεις ανά κύκλο μετρήσεων.

QD-LED	V_{dc} (V)	$V_{pp}~({f mV})$	Βήμα (KHz)
QD_1	3	300	7,5
QD_1	3	600	$7,\!5$
QD_1	3	900	7,5
QD_2	3	600	7,5
QD_2	3	900	7,5
QD_3	3	300	2,5
QD_3	3	600	2,5
QD_3	3	900	2,5
QD_4	3	300	7,5
QD_4	3	600	7,5
QD_4	3	900	7,5

Πίνακας 3.4: Δεδομένα πειραματικών μετρήσεων για το πείραμα 3

Στον πίναχα 3.4 αναφέρονται οι βασιχές τιμές που χρησιμοποιήθηχαν για τις μετρήσεις της χάθε QD-LED. Το εύρος συχνοτήτων που επιλέχθηχε χαι για τις 4 QD-LED είναι 0, 5Khz – 10MHz. Επιλέχθηχαν 3 διαφορετιχές τιμές για το πλάτος τάσης των χυματομορφών (V_{pp}) που παράγονταν από την γεννήτρια. Ενώ μόνο στην δεύτερη QD-LED δεν χρατήθηχε η μέτρηση, με $V_{pp} = 300mV$ διότι φάνηχε αναξιόπιστη, παρ΄ όλες τις επαναλήψεις που πραγματοποιήθηχαν. Επισημαίνεται ότι οι μετρήσεις της QD_3 πραγματοποιήθηχαν με μιχρότερο βήμα από της άλλες διότι ήταν η πρώτη χατά σειρά μέτρηση που πραγματοποιήθηχε χαι επέτρεψε στην αλλαγή απόφασης για το βήμα στις επόμενες QD-LED, χαθώς η διάρχεια των μετρήσεων με μιχρό βήμα χρίθηχε ανασταλτιχός παράγοντας συναρτήσει του οφέλους που θα υπήρχε με τέτοιο βήμα.

Έπειτα από την εξαγωγή των μετρήσεων από τον αλγόριθμο επιλέχθηκε να γίνει κανονικοποίηση όλων των μετρήσεων που ελήφθησαν μεταξύ των τιμών 0-1 για το μέγεθος H(f)καθώς αυτό θα φανεί χρήσιμο στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων μετέπειτα. Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε από τον αλγόριθμο κανονικοπίησης (βλπ παράρτημα B.2), φαίνεται από την εξίσωση 3.2

$$z_i = \frac{H_i - \min(H)}{\max(H) - \min(H)}$$
(3.2)

Σε αυτό το κεφάλαιο καλύφθηκε η ανάλυση της διαδικασίας του κάθε πειράματος αλλά και όλοι οι περιορισμοί και εμπόδια που που εμφανίστηκαν κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Έγινε επίσης εμφανές ότι η χρήση αλγορίθμων για την λήψη μετρήσεων επιτρέπει την λήψη αποφάσεων κατά την διάρκεια των πειραματικών διαδικασιών με γνώμονα την βελτίωση/διόρθωση είτε της πειραματικής διάταξης είτε της μεθόδου λήψης μετρήσεων και κατ΄ επέκταση της επεξεργασίας τους. Περισσότερα θα αναφερθούν στο επόμενο κεφάλαιο όπου και θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων και αξιολόγηση των μεθόδων, όπως και θα επισημανθούν τυχόν βελτιώσεις.

Κεφάλαιο 4

Αποτελέσματα

Σημαντικό μέρος πειραματικών μετρήσεων αποτελεί η εξαγωγή των αποτελεσμάτων από την πραγματοποίηση των πειραματικών διαδικασιών. Η αξιολόγηση τους οδηγεί συγγραφέα και αναγνώστη στην αποδοχή ή όχι των αποτελεσμάτων αυτών ώστε να αξιοποιηθούν σε περαιτέρω ερεύνα για την εξέλιξη του εξεταζόμενου συστήματος. Ενώ στο προηγούμενο κεφάλαιο οι αναφορές περιορίστηκαν στις τελείως απαραίτητες για την διευκόλυνση του αναγνώστη στην κατανόηση της διαδικασίας, σε αυτό κεφάλαιο, ακολουθώντας την ίδια δομή, θα παρουσιαστούν όσα αποτελέσματα προήλθαν από επεξεργασία των μετρήσεων που έλαβαν χώρα για το κάθε πείραμα χωριστά. Ενώ η αξιολόγησή τους θα ακολουθήσει στο επόμενο και τελευταίο κεφάλαιο.

4.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

4.1.1 Πείραμα με πηγή LED - Ostar LE CW E3B

Όπως αναφέρθηκε στη παράγραφο 2.6 το ενδιαφέρον για την ορθή και αποτελεσματική λειτουργία της ασύρματης οπτικής επικοινωνίας σε μία ζεύξη εστιάζεται στη γραμμική περιοχή λειτουργίας της πηγής. Από την χαρακτηριστική καμπύλη του σχήματος 3.10 παρατηρούμε ότι η γραμμική περιοχή της συγκεκριμένης πηγής εκτείνεται από την τάση των $V_{led} = 17,49V$ και έπειτα οπότε χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του πίνακα Α΄.2, από την τιμή τάσης αυτή και έπειτα σχεδιάζουμε την γραφική παράσταση της γραμμικής περιοχής λειτουργίας της LED όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.

Στο σχήμα φαίνεται και η γραμμή τάσης της χαρακτηριστικής καμπύλης όπου με εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει ότι $R^2 = 0,9569$. Η τιμή αυτή υποδεικνύει ότι η γραμμική περιοχή στο γράφημα μας περιγράφεται πολύ καλά, αρκεί αναλογιστούμε ότι η ιδανική τιμή, για μια χαρακτηριστική καμπύλη, μιας απόλυτα γραμμικής συμπεριφοράς δύο μεγεθών είναι ίση με την μονάδα.

Για τον PDA μετρήθηκε η τάση στην έξοδο του (V_{pda} , βλπ πίνακα A'.3). Με την χρήση της εξίσωσης 4.1 όπως αυτή περιγράφεται στο φυλλάδιο του κατασκευατή [38] της συσκευής θα υπολογιστεί η οπτική ισχύς του φωτορεύματος που φτάνει από την πηγή P_{pda} , βλπ πίνακα A'.3.



Σχήμα 4.1: Γραφική παράσταση γραμμικής περιοχής λειτουργίας της Ostar LE CW E2B

$$P_{pda} = \frac{V_{pda}}{\Re(\lambda) \cdot R_{load}} \tag{4.1}$$

Όπου $\Re(\lambda)$ η αποκρισημότητα της συσκευής για ορισμένο μήκος κύματος - όπως αυτό αναφέρθηκε στη παράγραφο 3.2. Στην περίπτωση του εν λόγω πειράματος παρατηρήθηκε λευκό φως, το οποίο αντιπροσωπεύεται από το μέσο μήκος κύματος του ορατού φάσματος. Επομένως κατά σύμβαση, από το γράφημα 4.2 (απεικονίζει την αποκρισιμότητα του ανιχνευτή στη περιοχή του ορατού φάσματος) υπολογίζουμε για την τιμή του μέσου μήκους κύματος, $\lambda = 545nm$ την αντίστοιχη αποκρισημότητα $\Re(\lambda) = 2,47A/W$. Ενώ να υπενθυμίσουμε ότι η αντίσταση στη έξοδο του PDA είναι $R_{load} = 50\Omega$. Στον πίνακα Α΄.3 φαίνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για την λαμβανόμενη ισχύς που περιγράφηκε.

Έχοντας υπολογίσει την ισχύ που λαμβάνει ο PDA μέσω της σχέσης για την απόκρισημότητα $\Re(\lambda)$ (Εξ. 4.1), μπορεί να υπολογιστεί το παραγόμενο φωτορεύμα (photocurrent - I_{pda}) που ο ανιχνευτής λαμβάνει, άρα προκύπτει η Εξ. 4.2,

$$\Re(\lambda) = \frac{I_{pda}}{P_{pda}} \tag{4.2}$$

Εδώ να σημειωθεί ότι το I_{pda} αλλά και η ισχύς που λαμβάνει η συσκευή μετρούνται ανά μονάδα επιφάνειας (cm^2) , αλλά προφανώς αναιρούνται στην παραπάνω σχέση, οπότε δεν λαμβάνουμε υπόψη μας την επιφάνεια $(0, 8mm^2)$ της συσκευής, στους υπολογισμούς μας.

Στο επόμενο γράφημα 4.3, της χαραχτηριστικής καμπύλης του λαμβανόμενου φωτορεύματος συναρτήσει της λαμβανόμενης τάσης $(I_{pda} - V_{pda})$ από τον φωτοανιχνετή, ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η γραμμικότητα μεταξύ των μεγεθών στην μεριά του ανιχνευτή είναι απόλυτη $(R^2 = 1)$. Γεγονός το οποίο θα συζητήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 4.2: Φασματική καμπύλη απόκρισης φωτοανιχνευτή PDA10A-EC στο ορατό φάσμα



Σχήμα 4.3: Χαρακτηριστική καμπύλη της πηγής από το λαμβανόμενο οπτικό σήμα στον ανιχνευτή

Από τα αποτελέσματα των υπολογισμών που φαίνονται στον πίνακα Α΄.3 άλλο ένα χρήσιμο γράφημα που βοηθάει στην αντίληψη της αποδοτικής ή μη λειτουργίας του συστήματος που εξετάζεται, είναι η σχέση ανάμεσα στην εκπεμπόμενη ισχύς της πηγής LED - Ostar LE CW E3B (*P*_{led}) και του δέκτη PDA10A-EC (*P*_{pda}). Αυτό αποτυπώνεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Εκπεμπόμενη ισχύς της πηγής συναρτήσει της ισχύος του δέκτη

Πριν από την έναρξη της παρουσίασης των αποτελεσμάτων των επόμενων δύο πειραμάτων θεωρείται κατάλληλο σημείο για την αναφορά απαραίτητου θεωρητικού υπόβαθρου, το οποίο χρησιμοποιείται στην διαδικασία υπολογισμών που θα ακολουθήσει.

Full Width at Half the maximum - FWHM



πλάτους

Όπως ήδη αναφέρθηκε πρώτη φορά στην παράγραφο 3.2.3, εδώ χρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω επεξήγηση του μεγέθους που προχύπτει από τη μέθοδο αυτή εφόσον είναι μέγεθος το οποίο θα αναζητήσουμε ως αποτέλεσμα για την εξαγωγή συμπεράσματος.

Έτσι λοιπόν, γνωρίζουμε ότι το εύρος ζώνης μετριέται σε Ηz και περιγράφει τη ζώνη συχνοτήτων που ένα κανάλι επιχοινωνίας είναι σε θέση να μεταδώσει πληροφορία με χα-Σχήμα 4.5: Κέρδος της ζώνης μηλές απώλειες. Συνήθως μιλάμε για ένα εύρος ζώνης της -3dB η οποία καλύπτει το τάξης των 3dB, που σημαίνει ότι το φάσμα των συχνο-70,7% του μέγιστου κέρδους τήτων ενός καναλιού μπορεί να μεταδώσει με λιγότερο από -3dB της απώλειας. Έστω τώρα ότι για ένα σύστημα, το εύρος ζώνης εκτείνεται από 0Hz σε συχνότητα B το οποίο

χαλούμε το εύρος ζώνης. Για ένα διαμορφωμένο σύστημα, εάν ο φορέας είναι f₀ τότε η ζώνη μετάδοσης θα είναι από $f_0 - \frac{B}{2}$ έως $f_0 - \frac{B}{2}$. Όπως περιγράφεται και στο σχήμα 4.5 το κέρδος της ζώνης -3dB η οποία καλύπτει το 70,7% του μέγιστου κέρδους πλάτους. Η κλίμακα του άξονα μπορεί να είναι είτε γραμμική είτε λογαριθμική.

4.1.2 Πείραμα με πηγή RED LED

Η αλλαγή του τρόπου λήψης δεδομένων αλλά και εν γένη της πειραματικής διάταξης, επιφέρουν αλλαγές και στον τρόπο επεξεργασίας και εξαγωγής των αποτελεσμάτων. Για την επεξεργασία πλέον, γίνεται χρήση MATLAB. Στην ενότητα 3.2.1 παρουσιάστηκε το γράφημα 3.12 όπου απεικονίζει τη συνάρτηση μεταφοράς H(f) συναρτήσει της συχνότητας f. Η πληροφορίες που το γράφημα σε αυτή τη μορφή μας δίνει είναι περιορισμένες. Επομένως κάνοντας χρήση της εξίσωσης 3.2 και χρησιμοποιώντας ως εργαλείο τον αλγόριθμο της κανονικοποίησης (βλπ παράρτημα B.2) μετατρέπουμε το εν λόγω γράφημα όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 4.6 (σημ.επιλέχθηκε λογαριθμική κλίμακα στον άξονα των συχνοτήτων)



Σχήμα 4.6: Κανονικοποιημένη H(f) - f της RED-LED με βήμα 3,5KHz

Ως αποτέλεσμα της κανονικοποίησης της μεταφοράς συνάρτησης, στη μονάδα, σε συνδυασμό με την μέθοδο FWHM αρκεί να εντοπιστεί το σημείο της γραφικής παράστασης στο οποίο η συνάρτηση μεταφοράς έχει τιμή 0,707. Σε αυτό το σημείο η συχνότητα f_{-3dB} είναι το ζητούμενο μέγεθος που βοηθήσει στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και θα οδηγήσει σε συμπεράσματα για την αποδοτικότητα των συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών που θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Για το σύστημα του παρόντος πειράματος προκύπτει όπως φαίνεται από το γράφημα του σχήματος 4.6 ότι η συχνότητα στην οποία η ισχύς έχει μειωθεί στο ήμισυ της μεσαίας ζώνης είναι $f_{-3dB} = 2,496 \cdot 10^5 Hz$ ή καλύτερα $f_{-3dB} = 249,6 KHz$

4.1.3 Πείραμα με πηγή Quantum Dot - LED

Με οδηγό την επεξεργασία των μετρήσεων του προηγούμενου πειράματος και αφού υπενθυμίσουμε στον αναγνώστη ότι οι διαδικασία λήψης των μετρήσεων όπως και η πειραματική διάταξη παρέμειναν ίδια, θα ακολουθήσει η παρουσίαση των απαραίτητων γραφημάτων για την εξαγωγή αποτελεσμάτων για κάθε μία από τις QD-LED όπως αυτές φαίνονται στην εικόνα 4.7.



Σχήμα 4.7: QD-LEDs πειραματικής διάταξη
ς 3^{ou} πειράματος

Στο πρώτο γράφημα 4.8 θα παρουσιαστεί μια συνολική σύγκριση των τεσσάρων πηγών στην τάση πλάτους των $V_{pp} = 900mV$, επιλέχθηκε αυτή η τάση διότι το σήμα είναι πιο καθαρό, όπως θα γίνει αντιληπτό. Επιλέγεται το σημείο αυτό για να επισημανθούν οι παρακάτω παρατηρήσεις, που προκύπτουν από την ανάλυση του γραφήματος.

- Όπως φαίνεται από το γράφημα 4.8, εμφανίζονται τα υποδεδειγμένα peaks στο ίδιο σημείο (συχνότητα) και για τις τέσσερις πηγές. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αναδιαμόρφωση της πειραματικής διάταξης τρεις φορές χωρίς όμως να διορθωθεί το αποτέλεσμα.
- Βασική παρατήρηση επίσης είναι το γεγονός ότι η απόκριση της συνάρτησης μεταφοράς στην αλλαγή των συχνοτήτων είναι αργή μέχρι τα 400KHz και από εκείνο το σημείο και έπειτα ομαλοποιείται. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στο γεγονός αποκλεισμού των μετρήσεων μέχρι το σημείο εκείνο, όπως θα δούμε παρακάτω.

Ο αποκλεισμός των συχνοτήτων μέχρι και το σημείο των 400KHz οδηγεί στην αλλαγή του εξεταζόμενου εύρους που από το σημείο αυτό και έπειτα διαμορφώνεται στα 450Khz – 10MHz. Η συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιήθηκε με την χρήση του αλγόριθμου του παραρτήματος B.3.



Σχήμα 4.8: Σύγκριση QD-LEDs με $V_{pp} = 900mV$ σε εύρος 0,5Khz - 10MHz

Ξεκινώντας λοιπόν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων επισημαίνεται ότι οι γραφικές παραστάσεις θα παρουσιαστούν χωριστά για κάθε QD-LED με τις διαφορετικές τιμές πλάτους τάσης V_{pp} σε κάθε γράφημα. Ενώ σε αυτό το σημείο θα εστιαστεί το ενδιαφέρον στην απλή καταγραφή των αποτελεσμάτων ενώ η περεταίρω ανάλυση και εξαγωγή συμπερασμάτων θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο.

QD1

Τα περίπου 1300 σημεία (μετά και την απομάκρυνση εκείνων όπως περιγράφηκε παραπάνω) που κατεγράφησαν από τον παλμογράφο δημιουργούν την γραφική παράσταση του σχήματος 4.9, σε λογαριθμική κλίμακα. Ενώ στον πίνακα 4.1 σημειώνονται οι συχνότητες, αντίστοιχα στις οποίες η ισχύς έχει μειωθεί στο ήμισυ της μεσαίας ζώνης.

V_{pp}	f_{-3dB}	
300mV	1,106MHz	
600mV	1,973MHz	
900mV	1,749MHz	

Πίναχας 4.1: Αποτελέσματα μετρήσεων συχνότητας f_{-3dB} για την QD1



Σχήμα 4.9: Σύγκριση QD1 μεταξύ των διαφορετικών πλατών τάσης σε εύρο
ς450,5Khz-10MHz

$\mathbf{QD2}$

Για την δεύτερη QDLED όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 3.2.3 θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων (πίναχας 4.2) για τις τιμές $V_{pp} = 600mV$ και $V_{pp} = 900mV$ όπως αυτά προχύπτουν, από την ανάλυση του γραφήματος 4.10.



Σχήμα 4.10: Σύγκριση QD2 μεταξύ των διαφορετικών πλατών τάσης σε εύρο
ς450,5Khz-10MHz

V_{pp}	f_{-3dB}
600mV	1,356MHz
900mV	1,316MHz

Πίναχας 4.2: Αποτελέσματα μετρήσεων συχνότητας f_{-3dB} για την QD2

QD3

Η συγκεκριμένη πηγή QD3 κατά την διάρκεια την πειραματικών μετρήσεων ήταν η πρώτη κατά σειρά που επιλέχθηκε για την έναρξη μετρήσεων. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.2.3 το βήμα αλλαγής συχνοτήτων είναι 2,5KHz (πίνακας 3.4). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η καμπύλη συνάρτησης μεταφοράς συναρτήσει της συχνότητας να περιγράφεται από περίπου 3800 σημεία (μετά και την απομάκρυνση των συχνοτήτων μέχρι και 400KHz). Στο πίνακα 4.3 βρίσκονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση του γραφήματος 4.11



Σχήμα 4.11: Σύγκριση 0.8
QD3 μεταξύ των διαφορετικών πλατών τάσης σε εύρος 450,
 5Khz-10MHz

QD4

Στην τελευταία πηγή δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη επισήμανση που να επηρεάζει τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο πίνακα 4.4, πέρα από τις γενικές παρατηρήσεις ισχύουν

V_{pp}	f_{-3dB}
300mV	1,501MHz
600mV	1,975MHz
900mV	1,766MHz

Πίνα
χας 4.3: Αποτελέσματα μετρήσεων συχνότητας f_{-3dB} για τη
ν ${\rm QD3}$

και έχουν αναφερθεί στην αντίστοιχη παράγραφο (3.2.3). Όποτε τα 1300 σημεία μετρήσεων περιγράφουν την καμπύλη του γραφήματος 4.12.



Σχήμα 4.12: Σύγκριση QD4 μεταξύ των διαφορετικών πλατών τάσης σε εύρο
ς450,5Khz-10MHz

Πίνα
χας 4.4: Αποτελέσματα μετρήσεων συχνότητας f_{-3dB} για τη
ν ${\rm QD4}$

V_{pp}	f_{-3dB}
300mV	1,971MHz
600mV	1,975MHz
900mV	1,975MHz

4.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα βρίσκονται συγκεντρωμένα όλα εκείνα τα α αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, με στόχο την καλύτερη δυνατή σύγκρισή τους για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Ενώ παρουσιάζονται συγκριτικά γραφήματα μεταξύ των πηγών μετάδοσης οπτικής ασύρματης επικοινωνίας που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές διατάξεις των δύο τελευταίων πειραμάτων.

Ξεκινώντας λοιπόν, με τον πίνακα 4.5, παρουσιάζονται οι συχνότητες όπου η ισχύς έχει μειωθεί στο ήμισυ της μεσαίας ζώνης ανά πηγή και τάση πλάτους στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

LED	V_{pp} (mV)	f_{-3dB} (MHz)
RED	900	0.25
QD_1	300	1.106
QD_1	600	1.973
QD_1	900	1.749
QD_2	600	1.356
QD_2	900	1.316
QD_3	300	1.501
QD_3	600	1.975
QD_3	900	1.766
QD_4	300	1.971
QD_4	600	1.975
QD_4	900	1.975

Πίναχας 4.5: Αποτελέσματα πειραματιχών μετρήσεων για τα πειράματα 2 χαι 3

Έχουν επισημανθεί εκείνες οι συχνότητες σε κάθε πηγή που παρουσιάζουν την μεγαλύτερη τιμή και με οδηγό αυτό σχεδιάζεται το γράφημα 4.13, στο οποίο συγκρίνονται μεταξύ τους οι τέσσερις QD-LED στην τιμή τάσης πλάτους $V_{pp} = 600mV$ όπου παρατηρείται να έχουν και την μέγιστη τιμή f_{-3dB} .

Ενώ ένα συγκριτικό γράφημα μεταξύ των τεσσάρων QD-LED και της κόκκινης LED δεν θα ήταν περισσότερο χρήσιμο από την σύγκριση μεταξύ των τιμών της συχνότητας f_{-3dB} αφού το εύρος συχνοτήτων είναι πολλαπλάσιο στις QD-LEDs από αυτό της RED LED. Αρκεί να επισημανθεί η περίπου 8 φορές μεγαλύτερη συχνότητα που έχουν οι QD-LEDs.

Στο χεφάλαιο αυτό παρουσιαστήκαν αναλυτικά τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν εντός του εργαστηρίου. Ξεκινώντας από την πραγματοποίηση μετρήσεων για την αξιολόγηση των οργάνων στο πρώτο πείραμα και κυρίως του φωτοδέκτη, στο πρώτο πείραμα ακολούθησε η επεξεργασία για το πείραμα 2, όπου έγιναν μετρήσεις με σκοπό την αξιολόγηση της πειραματικής διάταξης και των αλγορίθμων που συντάχθηκαν και παρουσιάστηκαν. Ενώ τέλος στο τρίτο πείραμα με οδηγό τα προηγούμενα και χρήση της γνώσης που αποκτήθηκε, έγινε η επεξεργασία και ανάλυση των των μετρήσεων με τα ανάλογα γραφήματα ενώ κατεγράφησαν τα εξαγόμενα αποτελέσματα τα οποία οδηγούν στο επόμενο κεφάλαιο για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με την αποδοτικότητα των πηγών και ευρύτερα των συστημάτων μεταφοράς δεδομένων μέσω του ορατού φάσματος συχνοτήτων.

Θεώρημα Nyquist

Σε αυτό το σημείο και για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω αποτελεσμάτων σε συνάρτηση με καθημερινές εφαρμογές μεταφοράς δεδομένων, αξίζει να αναφερθεί ο τρόπος που το εύρος ζώνης μεταφράζεται σε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ανά δευτερόλεπτο. Αυτή η διαδικασία περιγράφεται από το Θεώρημα του Nyquist. Περιγραφικά λοιπόν δίνεται το άνω φράγμα στο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ενός συστήματος από τον υπολογισμό του αριθμού των bit που μεταφέρονται σε ένα σύμβολο. Η σχέση που δίνει τελικά τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ανά δευτερόλεπτο περιγράφεται από την εξίσωση 4.3

$$bitrate = 2 \cdot B \cdot \log_2 \cdot 2^n \tag{4.3}$$

όπου B το εύρος ζώνης μετρούμενο σε Hz και n το επίπεδο σήματος δηλαδή πόσα bit χρειάζονται για την μεταφορά ενός συμβόλου. Η διαμόρφωση του σήματος μετάδοσης καθορίζει το επίπεδο σήματος. Κάνοντας την παραδοχή ότι έχουμε την μικρότερη διαμόρφωση και χωρίς θόρυβο επιλέγεται το n = 1.

Με βάση την παραπάνω υπόθεση και πραγματοποιώντας τους απαραίτητους υπολογισμούς, από τον πίνακα 4.5 προκύπτει ο πίνακας 4.6, όπου φαίνονται οι επιτρεπόμενοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων από τις συγκεκριμένες LED βάση των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν παραπάνω.

LED	f_{-3dB} (MHz)	Bitrate
RED	0.25	150Kbps
QD_1	1.106	665Kbps
QD_1	1.973	1.18Mbps
QD_1	1.749	1.05 Mbps
QD_2	1.356	816Kbps
QD_2	1.316	792Kbps
QD_3	1.501	903Kbps
QD_3	1.975	1.19Mbps
QD_3	1.766	1.06Mbps
QD_4	1.971	1.18Mbps
QD_4	1.975	1.19Mbps
QD_4	1.975	1.19Mbps

Πίναχας 4.6: Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων των εξεταζόμενων LED


Σχήμα 4.13: Σύγκριση QD-LEDs με $V_{pp}=600mV$ σε εύρος 450, 5Khz-10MHz

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

5.1 Περίληψη των πορισμάτων

Από την πορεία της παρουσίασης των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας των μετρήσεων διακρίνεται άμεσα μια γρήγορη απάντηση στο αρχικό ερώτημα που τέθηκε στην εισαγωγή της εργασίας. Η ασύρματη οπτική επικοινωνία μέσω ορατού φάσματος συχνοτήτων είναι εφικτή, αφού όπως φάνηκε το οπτικό κανάλι επικοινωνίας στην περιοχή της ημίσεος της μέγιστης τιμής ισχύος είναι ικανό να μεταφέρει δεδομένα για επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη. Είναι λοιπόν το σημείο που μέσω των πειραματικών διαδικασιών και μετέπειτα την επεξεργασία τους επιβεβαιώνουμε την βιβλιογραφία, γεγονός το οποίο αναμενόταν. Αυτό φάνηκε από την ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε και την έμφαση που οι ερευνητές έχουν δώσει στην εξέλιξη των συστημάτων VLC. Το ευρύτερο πεδίο των οπτικών επικοινωνιών OWC αναπτύσσεται μέσω των της εξέλιξης των συσκευών που χρησιμοποιούνται σε αυτά. Συσκευές όπως Laser, δίοδοι LED είτε αυτές έχουν μία χρήση είτε παραπάνω.

Συσκευές με διπλό ρόλο είναι οι δίοδοι LED όπου μετά την βασική τους λειτουργία που είναι ο φωτισμός του περιβάλλοντος, εξελίσσεται προς την κατεύθυνση να συμβάλλει στη μεταφορά δεδομένων ως πηγή. Σε αυτή την κατεύθυνση σημαντικό ρόλο παίζουν τα πλεονεκτήματα της, το χαμηλό κόστος σε σχέση με την αποδοτικότητα της, οι μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της και η χαμηλή κατανάλωση. Αυτά και μόνο τα πλεονεκτήματα οδηγούν τις LED να είναι οι αντικαταστάτες παλαιών πηγών φωτισμού. Δίνεται ώθηση λοιπόν στους ερευνητές και τους κατασκευαστές να εκμεταλλευτούν τον υψηλό ρυθμό μεταγωγής των διόδων LED αλλά και την αναμενόμενη ευρεία κάλυψη τους σε χώρους οικιαχούς και μη, να ενισχύσουν τον ρόλο της διόδου ως πομπό δεδομένων. Άλλοι παράγοντες,που οδηγούν προς αυτή τη κατεύθυνση, είναι η συμφόρηση του πεδίου των ραδιοσυχνοτήτων αλλά και η εκμετάλλευση τους σε σημεία που μέχρι τώρα η παρουσία γενικότερα ασύρματης επικοινωνίας ήταν απαγορευτική, όπως νοσοχομεία.

Ο ρυθμός εξέλιξης των διόδων LED δείχνει να βρίσκεται σε αυξανόμενα επίπεδα αν παρατηρήσει κανείς την εμπορική παρουσία διάφορων τύπων σε εφαρμογές όπως σε οθόνες, σηματοδοτικό φωτισμό, φωτισμό περιβάλλοντος, φωτισμό κινούμενων μέσων κ.ο.κ. Οι τύποι LED αυξάνονται και υπήρξε η παρουσίαση της επόμενης γενιάς οργανικών LED μετά τις OLED αυτή των Quantum Dot - LED.

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα συστήματα VLC είναι η συνύπαρξη τους με τις υπόλοιπες πηγές φωτισμού και ειδικότερα σε εφαρμογές εξωτερικού περιβάλλοντος. Αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης είναι η μείωση του λόγου του ληφθέντος σήματος πληροφορίας προς τον θόρυβο και συνεπώς την ποιότητα της επικοινωνίας.

Πέρα όμως από τις υπόλοιπες πηγές φωτισμού αν ο δέκτης του συστήματος που χρησιμοποιείται έχει ευρύ φάσμα μηκών κύματος που αντιλαμβάνεται, όπως αυτός που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικέ διατάξεις, θα πρέπει να αντιμετωπιστούν και θόρυβοι από το φάσμα των υπερύθρων, όπως αυτό εντοπίστηκε και αναφέρθηκε στη παράγραφο 3.2.1.

5.2 Συμπεράσματα που συνάγονται από τα αποτελέσματα

Ακολουθώντας την δομή που έχει παρουσιαστεί μέχρι τώρα η πειραματική διαδικασία θα παρατηρήσουμε σε αυτό το σημείο ότι ένας από τους στόχους του αρχικού σχεδιασμού επετεύχθη καθώς κάθε μετά το πέρας κάθε πειράματος γινόταν και μία προσθήκη προ τη βελτίωση κάθε φορά της αποτελεσματικότερης διαδικασίας λήψης. Στο πρώτο μέρος αφού επιβεβαιώθηκε η ορθή λειτουργία της συσκευής του δέκτη - καθώς αυτό φαίνεται από την χαρακτηριστική καμπύλη του φωτοανιχνευτή, σχήμα 4.3 - και την απόδειξη της καλής μεταφοράς μέσω του οπτικού καναλιού (ελεύθερος χώρος), καθώς η σχέση λαμβανόμενης ισχύος με την εκπεμπόμενη (σχήμα 4.4) είναι σχεδόν γραμμική ($R^2 = 0.9729$).

Στο επόμενο βήμα και ενώ άλλαξε η πειραματική διάταξη και τα όργανα μέτρησης, η ουσιαστική προσθήκη ήταν αυτή που έδωσε την δυνατότητα αυτοματοποίησης των μετρήσεων. Η προσθήκη στην πειραματική διάταξη του λογισμικού ΜΑΤLAB, μέσω του υπολογιστή έδωσε την δυνατότητα άμεσης εικόνας για την πορεία των μετρήσεων και ως εκ τούτου την λήψη αποφάσεων για την βελτίωση των αποτελεσμάτων. Ο αλγόριθμος που δημιουργήθηκε στο σημείο αυτό παραμετροποιήθηκε κατάλληλα μέσω των μετρήσεων της RED LED. Ενώ από το αποτέλεσμα του εύρους ζώνης για την συγκεκριμένη πηγή δίνει την δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων της τάξης περίπου των 150Kbps όπου αν αναλογιστούμε ότι για την ομαλή και καθαρή επικοινωνία φωνής μέσω VoIP χρειάζονται τουλάχιστον 56Kbps, κρίνεται αρκετά ικανοποιητική για μια δίοδο τόσο χαμηλού κόστους.

Στο τρίτο και τελευταίο πείραμα έγινε επανάληψη μετρήσεων για όλες τις QD-LED σε διαφορετικές τιμές πλάτους τάσης ενώ το εύρος συχνοτήτων που καλύφθηκε ήταν 0, 5KHz - 10MHz. Από την περιγραφή της επεξεργασίας φάνηκε ότι όλες οι πηγές είχαν αργή απόκριση στις μικρές συχνότητες, οπότε και αποφασίστηκε η απομάκρυνση των μετρήσεων αυτών. Από όλα τα γραφήματα συνάρτησης μεταφοράς συναρτήσει των συχνοτήτων παρατηρείται μη ομαλή απόκριση στις αλλαγές συχνότητας από τις πηγές, καθώς υπάρχουν αρκετά peaks. Με ένα μόνο chip σε κάθε πηγή, όπως φαίνεται από τις φωτογραφίες, διαπιστώθηκε ότι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (με τις ανάλογες υποθέσεις) κυμαίνεται από 0, 6Mbps – 1.9Mbps. Συγκρίνοντας με ευρέως γνωστές εφαρμογές που μεταφέρονται και μέσω ασύρματων επικοινωνιών, θα μπορούσαν οι εν λόγω QD-LED να μεταφέρουν μέσω καναλιού οπτικής ασύρματης ζεύξης αποτελεσματικά βίντεο ανάλυσης 480p (1Mbps) ενώ πλησιάζουν την μεταφορά βίντεο υψηλότερης ανάλυσης 720p (2.5Mbps).

Παρατηρήθηκε επίσης ότι σημαντικό ρόλο στην απόδοση της πηγής παίζει η επιλογή εύρους τάσης της κυματομορφής που αποστέλλεται στην πηγή καθώς οι μέγιστες τιμές και στις τέσσερις πηγές εμφανίστηκαν στην τιμή των $V_{pp} = 600 mV$.

Γίνεται αντιληπτό οι μέθοδοι πραγματοποίησης μετρήσεων χρίνονται ως αποτελεσματιχοί και χυρίως αποδοτιχοί. Ενώ δίνουν δυνατότητες περαιτέρω πτυχών για τις πηγές όπως για παράδειγμα η φωτεινότητα των πηγών.

5.3 Συστάσεις για περαιτέρω έρευνα

Κατά την διάρχεια των πειραματιχών διαδιχασιών αλλά χαι της επεξεργασίας αυτών, γεννήθηχαν ερωτήματα όπου χάποια απαντήθηχαν με δοχιμές που ήταν εφιχτές χαι πραγματοποιήθηχαν στην διάρχεια των πειραμάτων ενώ άλλα παρέμειναν χαι ενισχύθηχαν χατά την επεξεργασία χαι συγγραφή του παρόντος. Ερωτήματα σαν χαι αυτά αφορούν το ευρύτερο πεδίο των οπτιχών ασύρματων επιχοινωνιών χαι δεν εφάπτονται με το πεδίο που ασχολήθηχε η παρούσα εργασία ενώ αρχετά αφορούν τον τρόπο που θα μπορούσε να βελτιωθεί αλλά χαι να εμπλουτιστεί.

Μένοντας στο δεύτερο μέρος θεωρείται απαραίτητο να σημειωθούν κάποια σημεία τα οποία θα οδηγούσαν στην βελτίωση και τον εμπλουτισμό της παρούσας εκπόνησης.

- Παράλληλα με την διερεύνηση του εύρους ζώνης του οπτιχού χαναλιού χαι της αποδοτιχότητας του να πραγματοποιηθεί αξιολόγηση ως προς την φωτεινότητα των πηγών χαι σύγχριση με υπάρχοντες πηγές φωτισμού.
- Πραγματοποίηση μετρήσεων σε διαφορετικές αποστάσεις.
- Μέτρηση της πηγής του πρώτου πειράματος με την μέθοδο του τρίτου και περαιτέρω συγκρίσεις.
- Δημιουργία αντίστοιχου κυκλώματος που θα επέτρεπε την μεταφορά πραγματικών δεδομένων (εικόνα, ήχος).
- Καταγραφή περισσότερων στοιχείων ως προς την λειτουργία των LED και αντίστοιχων τύπων που εξελίσσονται.
- Πραγματοποίηση μετρήσεων με πηγή OLED που χρησιμοποιείται σε κινητές συσκευές ώστε να αξιολογηθεί η δυνατότητα χρήσης της ως πομπό ή/και ως δέκτη.
- Δοχιμή κατασχευής εξωτεριχού ποπμποδέχτη για χινητές συσχευές και μεταφορά δεδομένων στη συσχευή μέσω της θύρας micro usb στην οποία θα συνδέεται η εξωτεριχή (plug and play) συσχευή.

Παράρτημα Α΄

Πίνακες μετρήσεων και υπολογισμών

A'.1 PDA10A - EC

Εδώ παρουσιάζονται όλες οι μετρήσεις του κατασκευαστή για την συσκευή του φωτοανιχνευτή που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση των πειραμάτων τις παρούσας εργασίας.

Wavelength (nm)	Responsivity (A/W)
200	0.023
210	0.028
220	0.025
230	0.031
240	0.031
250	0.034
260	0.036
270	0.036
280	0.042
290	0.05
300	0.055
310	0.056
320	0.057
330	0.056
340	0.056
350	0.054
360	0.051
370	0.051

Πίνακας Α΄.1: Μετρήσεις κατασκευαστή για την απόκριση (ℜ) συναρτήσει του μήκους κύματος

Συνέχεια πίνακα Α΄.1			
380	0.057		
390	0.069		
400	0.083		
410	0.092		
420	0.106		
430	0.121		
440	0.135		
450	0.149		
460	0.163		
470	0.177		
480	0.191		
490	0.205		
500	0.219		
510	0.232		
520	0.246		
530	0.26		
540	0.273		
550	0.286		
560	0.299		
570	0.312		
580	0.325		
590	0.337		
600	0.348		
610	0.36		
620	0.371		
630	0.382		
640	0.393		
650	0.403		
660	0.412		
670	0.42		
680	0.427		
690	0.433		
700	0.437		
710	0.441		
720	0.443		
730	0.444		
740	0.443		
750	0.442		
760	0.437		
770	0.432		

Α'.2 Μετρήσεις 1^{ου} Πειράματος

Συνέχεια πίνακα Α΄.1			
780	0.425		
790	0.415		
800	0.405		
810	0.393		
820	0.38		
830	0.366		
840	0.35		
850	0.333		
860	0.315		
870	0.296		
880	0.277		
890	0.257		
900	0.238		
910	0.218		
920	0.199		
930	0.179		
940	0.161		
950	0.142		
960	0.125		
970	0.109		
980	0.094		
990	0.08		
1000	0.067		
1010	0.055		
1020	0.045		
1030	0.035		
1040	0.027		
1050	0.02		
1060	0.015		
1070	0.011		
1080	0.009		
1090	0.007		
1100	0.005		
Τέλος πίναχα Α΄.1			

$V_{led}(V)$	$I_{led}(mA)$
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0.018
12.27	0.028
12.62	0.039
12.86	0.049
13.57	0.096
13.65	0.102
13.9	0.127
14.2	0.163
14.34	0.188
14.59	0.25
15.25	1.21
15.33	1.47
15.54	2.28
15.62	2.66
15.79	3.36
15.84	3.88
15.88	4.23
16.04	5.37
16.16	6.39
16.22	7.01
16.31	7.97
16.34	8.25
16.44	9.47
16.49	10.04

Πίνα
χας Α΄.2: Μετρήσεις τάσης V_{led} και έντασης ρεύματο
ς I_{led} της LED

Συνέχεια	πίνακα Α΄.2
16.56	11
16.61	11.67
16.65	12.38
16.69	13.03
16.76	14.19
16.88	20.1
16.94	21.6
16.97	22.6
17.02	24
17.06	25.4
17.11	27.4
17.14	28.4
17.19	30.1
17.2	30.9
17.22	31.6
17.28	33.9
17.3	35
17.35	37
17.36	37.7
17.4	40
17.43	41.4
17.45	42.2
17.48	44.5
17.49	44.8
17.54	47.5
17.56	49.4
17.59	51.1
17.62	53
17.63	53.8
17.67	56.3
17.69	58.1
17.73	60.9
17.75	62.6
17.78	64.4
17.83	69
17.89	73.7
17.91	74.9
17.93	78.1
17.99	83.6
18.01	85.6

Συνέχεια πίνακα Α΄.2			
18.03	87.9		
18.05	89.9		
18.1	95		
18.12	97.6		
18.17	103.3		
18.21	109		
18.27	115.2		
18.35	124.8		
18.38	129.9		
18.42	136		
18.45	140		
18.54	154.1		
18.62	164.4		
18.69	177.8		
18.73	185.1		
18.8	198		
18.85	210		
18.90	222		
18.96	235		
19.01	245		
19.07	261		
18.12	288		
19.18	302		
Τέλος πίνακα Α΄.2			

Πίνα
κας Α΄.3: Αποτελέσματα επεξεργασίας πειράματος 1

$V_{led}(V)$	$V_{pda}(mV)$	$P_{pda}(W)$	$I_{pda}(A)$	$P_{led}(A)$
0	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0000000
1	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0000000
2	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0000000
3	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0000000
4	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0000000
5	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0000000
6	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0000000
7	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0000000
8	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0000000
9	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0000000
10	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0000000

Συνέχεια πίνακα Α΄.3				
11	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0000000
12	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0002160
12.27	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0003436
12.62	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0004922
12.86	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0006301
13.57	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0013027
13.65	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0013923
13.9	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0017653
14.2	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0023146
14.34	0.2	1.33E-05	3.60E-06	0.0026959
14.59	0.3	2.00E-05	5.40E-06	0.0036475
15.25	0.4	2.67E-05	7.20E-06	0.0184525
15.33	0.5	3.33E-05	9.00E-06	0.0225351
15.54	0.6	4.00E-05	1.08E-05	0.0354312
15.62	0.7	4.67E-05	1.26E-05	0.0415492
15.79	0.8	5.33E-05	1.44E-05	0.0530544
15.84	0.9	6.00E-05	1.62E-05	0.0614592
15.88	1	6.67E-05	1.80E-05	0.0671724
16.04	1.2	8.00E-05	2.16E-05	0.0861348
16.16	1.3	8.67E-05	2.34E-05	0.1032624
16.22	1.4	9.33E-05	2.52E-05	0.1137022
16.31	1.6	1.07E-04	2.88E-05	0.1299907
16.34	1.7	1.13E-04	3.06E-05	0.1348050
16.44	1.9	1.27E-04	3.42E-05	0.1556868
16.49	2	1.33E-04	3.60E-05	0.1655596
16.56	2.1	1.40E-04	3.78E-05	0.1821600
16.61	2.3	1.53E-04	4.14E-05	0.1938387
16.65	2.4	1.60E-04	4.32E-05	0.2061270
16.69	2.5	1.67E-04	4.50E-05	0.2174707
16.76	2.7	1.80E-04	4.86E-05	0.2378244
16.88	3.7	2.47E-04	6.66E-05	0.3392880
16.94	3.9	2.60E-04	7.02E-05	0.3659040
16.97	4.1	2.73E-04	7.38E-05	0.3835220
17.02	4.3	2.87E-04	7.74E-05	0.4084800
17.06	4.5	3.00E-04	8.10E-05	0.4333240
17.11	4.8	3.20E-04	8.64E-05	0.4688140
17.14	5	3.33E-04	9.00E-05	0.4867760
17.19	5.2	3.47E-04	9.36E-05	0.5174190
17.2	5.3	3.53E-04	9.54E-05	0.5314800
17.22	5.5	3.67E-04	9.90E-05	0.5441520

Συνέχεια πίνακα Α΄.3				
17.28	5.8	3.87E-04	1.04E-04	0.5857920
17.3	6	4.00E-04	1.08E-04	0.6055000
17.35	6.2	4.13E-04	1.12E-04	0.6419500
17.36	6.4	4.27E-04	1.15E-04	0.6544720
17.4	6.7	4.47E-04	1.21E-04	0.6960000
17.43	6.9	4.60E-04	1.24E-04	0.7216020
17.45	7	4.67E-04	1.26E-04	0.7363900
17.48	7.3	4.87E-04	1.31E-04	0.7778600
17.49	7.4	4.93E-04	1.33E-04	0.7835520
17.54	7.8	5.20E-04	1.40E-04	0.8331500
17.56	8.1	5.40E-04	1.46E-04	0.8674640
17.59	8.3	5.53E-04	1.49E-04	0.8988490
17.62	8.6	5.73E-04	1.55E-04	0.9338600
17.63	8.7	5.80E-04	1.57E-04	0.9484940
17.67	9	6.00E-04	1.62E-04	0.9948210
17.69	9.2	6.13E-04	1.66E-04	1.0277890
17.73	9.6	6.40E-04	1.73E-04	1.0797570
17.75	9.8	6.53E-04	1.76E-04	1.1111500
17.78	10.1	6.73E-04	1.82E-04	1.1450320
17.83	10.7	7.13E-04	1.93E-04	1.2302700
17.89	11.3	7.53E-04	2.03E-04	1.3184930
17.91	11.5	7.67E-04	2.07E-04	1.3414590
17.93	11.8	7.87E-04	2.12E-04	1.4003330
17.99	12.5	8.33E-04	2.25E-04	1.5039640
18.01	12.8	8.53E-04	2.30E-04	1.5416560
18.03	13	8.67E-04	2.34E-04	1.5848370
18.05	13.3	8.87E-04	2.39E-04	1.6226950
18.1	13.9	9.27E-04	2.50E-04	1.7195000
18.12	14.2	9.47E-04	2.56E-04	1.7685120
18.17	14.8	9.87E-04	2.66E-04	1.8769610
18.21	15.5	1.03E-03	2.79E-04	1.9848900
18.27	16.2	1.08E-03	2.92E-04	2.1047040
18.35	17.2	1.15E-03	3.10E-04	2.2900800
18.38	17.8	1.19E-03	3.20E-04	2.3875620
18.42	18.4	1.23E-03	3.31E-04	2.5051200
18.45	18.8	1.25E-03	3.38E-04	2.5830000
18.54	20.2	1.35E-03	3.64E-04	2.8570140
18.62	21.2	1.41E-03	3.82E-04	3.0611280
18.69	22.5	1.50E-03	4.05E-04	3.3230820
18.73	23.1	1.54E-03	4.16E-04	3.4669230

Συνέχεια πίναχα Α΄.3				
18.8	24.2	1.61E-03	4.36E-04	3.7224000
18.85	25.2	1.68E-03	4.54E-04	3.9585000
18.91	26.2	1.75E-03	4.72E-04	4.1969100
18.96	27.2	1.81E-03	4.90E-04	4.4556000
19.02	28	1.87E-03	5.04 E-04	4.6586750
19.07	29.2	1.95E-03	5.26E-04	4.9772700
19.13	31	2.07E-03	5.58E-04	5.5080000
19.18	32	2.13E-03	5.76E-04	5.7923600
Τέλος πίνακα Α΄.3				

Παράρτημα Β΄

Αλγόριθμοι Matlab

B.1 Main Matalb code

```
1 close all;
2
                                       %input rate of frequencies
  Freqs = 9e6:7.5e3:10e6;
3
4
  Chs=zeros(length(Freqs),600); %table where samples are
5
      recorded
_{6} H=zeros(1, length(Freqs));
                                         %table where H are recorded
7
8 % Oscilloscope and Generator opening and handling
  osc_name='USB0::0x0957::0x0588::CN50097489::0::INSTR';
9
  osc=visa('agilent', osc_name);
10
  set(osc, 'InputBufferSize',10000);
11
  set(osc, 'OutputBufferSize',10000);
12
  set(osc, 'TimeOut', 1000.0);
13
14
awg = serial('COM10');
                                         %open and handle generator
16 fopen(awg);
  query (awg, '*IDN?')
17
18
  fopen(osc);
                                         %Open oscilloscope file
19
  query(osc, '*IDN?')
20
21
  ampPP=0.9;
                                         %peak to peak amplitude
22
                                       \%\!D\!C offset voltage
23 DC=3;
24
  for m=1:length(Freqs)
25
       fprintf(' \ Iter : \%1.2g \ ',m);
26
```

```
freq = Freqs(m);
27
28
        str = ['APPL: SIN ' num2str(freq) ', ' num2str(ampPP) ', '
29
           num2str(DC)];
        fprintf(awg, str);
30
31
        tack_ts=2/freq;
                                   %variable for time scaling in osc
32
           div
33
        fprintf(osc, ':TIMebase:SCALe %d', tack_ts);
                                                                   %sent the
34
           variable of time scaling in osc
35
  %
          keyboard
36
        pause(2);
37
38
        fprintf(' \setminus n Flag 1 \setminus n');
39
        time_base=str2num(query(osc, ':TIMebase:OFFSet?'));
40
        fprintf(osc, ':WAVeform:FORMat ASCII');
41
        fprintf(osc, ':WAVeform:SOURce CHAN1');
42
        fprintf(osc, ':DIGitize');
43
        pre=query(osc, ':WAVeform:PREAMBLE?');
44
        output=query(osc, ':WAVeform:DATA? CHAN1');
45
        output2=query(osc, ':WAVeform:DATA? CHAN4');
46
47
       %time between to samples from osc
48
       time=str2num(query(osc, ':WAVeform:XINCrement? CHAN1'));
49
50
       Ch=str2num(output(11:end));
51
       Chs(m, :) = Ch;
52
       Ch_2 = str2num(output2(11:end));
53
       Chs_2(m,:) = Ch_2;
54
        fprintf(' \setminus n Flag 2 \setminus n');
55
       % Time line
56
       t = 0: time : time * length (Chs); t = t (1 : end - 1);
57
58
       % Freq line
59
       dw=2*pi/time/length(Chs);
60
       omega = (-length(Chs)/2: length(Chs)/2-1)*dw;
61
62
       % FFT
63
       X=fftshift(fft(fftshift(Ch)));
64
```

```
Y=fftshift(fft(fftshift(Ch_2)));
65
66
        fprintf(' \setminus n Flag 3 \setminus n');
67
68
69
        % figures of input and out after FFT
70
        figure(2);
71
        subplot (2,1,1)
72
             plot(omega/(2*pi)/1e6, abs(X), '.-');
73
             legend('xin')
74
             xlabel('Frequency');
75
             ylabel('Amp');
76
             title('FFT');
                                 figure(2)
77
             subplot(2,1,2)
78
             plot (omega/(2*pi)/1e6, abs(Y), 'g.-');
79
             xlabel('Frequency');
80
        ylabel('Amp');
81
        legend('yout')
82
83
        %Transform function
84
        [, x] = find((max(abs(X((length(X)/2+5):end))))) = abs(X)); \%{
85
            length/2+5} because we want ro measure the AC peak which
            is the real info
        [,y]=find ((max(abs(Y((length(X)/2+5):end)))))=abs(Y));
86
87
        fprintf(' \setminus n Flag 4 \setminus n');
88
89
        H(m) = abs(Y(y(1)))./abs(X(x(1)));
90
91
        %plot H and Frequency
92
        figure(3);
93
        semilogx (Freqs/1e3, H, '.-');
94
        xlabel('Frequency (kHz)');
95
   end
96
97
   figure (4);
98
   plot (Freqs ,H)
99
   xlabel('Frequency (Hz)');
100
   ylabel('H(f)');
101
102
   fclose(osc);
103
```

```
104 fclose(awg);
105
106 save 03c_qd2
```

B.2 Normalization Code

```
<sup>1</sup> %Normalize the data
  for i = (1: length (H));
2
       n(i) = (H(i) - min(H)) / (max(H) - min(H));
3
  end
4
\mathbf{5}
6 % plot normalized data
7 figure
8 plot (Freqs, n)
  xlabel('Frequency (Hz)');
9
  ylabel('H(f)');
10
   title('Normalized QD4 for Vpp=300mV')
11
12
  clear all;
13
```

B.3 Remove and normalize new data Code

```
<sup>1</sup> % remove the data till 400KHz, for QD3 H(1:180) = [] and Freqs
       (1:180) = []
<sup>2</sup> H(1:60) = [];
  Freqs (1:60) = [];
3
4
  %Normalize the new data
5
   for i = (1: length (H));
6
       d(i) = (H(i) - min(H)) / (max(H) - min(H));
7
  end
8
9
  %Plot the new figures
10
  figure
11
   plot (Freqs,d)
12
  xlabel('Frequency (Hz)');
13
  ylabel('H(f)');
14
   title('Normalized QD1 for Vpp=900mV')
15
16
  savefig qd1c_cut.fig
17
```

Bibliography

- A. G. Bell, W. Adams, W. Preece, et al., "Discussion on the photophone and the conversion of radiant energy into sound," *Telegraph Engineers, Journal of the Society*, vol. 9, no. 34, pp. 375–383, 1880.
- [2] G. Pang, T. Kwan, H. Liu, and C.-H. Chan, "Led wireless," *Industry Applications Magazine*, *IEEE*, vol. 8, no. 1, pp. 21–28, 2002.
- [3] omega project team, "Home gigabit access project," 2012.
- [4] K. Kulhavy, "Home:ronja," 2001.
- [5] A. H. Azhar, T. Tran, and D. O'Brien, "A gigabit per second indoor wireless transmission using mimo-ofdm visible-light communications," *Photonics Technology Letters*, *IEEE*, vol. 25, no. 2, pp. 171–174, 2013.
- [6] T. Komine, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Performance evaluation of narrowband ofdm on integrated system of power line communication and visible light wireless communication," in Wireless Pervasive Computing, 2006 1st International Symposium on, pp. 6 pp.–, Jan 2006.
- [7] VLCC, "Visible light communications consortium," 2003.
- [8] G. Povey, "D-light project hits target," 2011.
- [9] T. Borogovac, M. B. Rahaim, M. Tuganbayeva, and T. D. Little, "'lights-off' visible light communications," in *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, 2011 IEEE, pp. 797–801, IEEE, 2011.
- [10] G. Cossu, A. Khalid, P. Choudhury, R. Corsini, and E. Ciaramella, "3.4 gbit/s visible optical wireless transmission based on rgb led," *Optics express*, vol. 20, no. 26, pp. B501–B506, 2012.
- [11] S. H. Lee, K.-I. Ahn, and J. K. Kwon, "Multilevel transmission in dimmable visible light communication systems," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 31, no. 20, pp. 3267–3276, 2013.

- [12] J. Kim, K. Lee, and H. Park, "Power efficient visible light communication systems under dimming constraint," in *Personal Indoor and Mobile Radio Communications* (*PIMRC*), 2012 IEEE 23rd International Symposium on, pp. 1968–1973, IEEE, 2012.
- [13] H.-J. Jang, J.-H. Choi, Z. Ghassemlooy, and C. G. Lee, "Pwm-based ppm format for dimming control in visible light communication system," in *Communication Systems*, *Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP)*, 2012 8th International Symposium on, pp. 1–5, IEEE, 2012.
- [14] T. Q. Wang, Y. A. Sekercioglu, A. Neild, and J. Armstrong, "Position accuracy of time-of-arrival based ranging using visible light with application in indoor localization systems," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 31, no. 20, pp. 3302–3308, 2013.
- [15] ieee 802.15 wpan taskgroup 7 (tg7), "visible light communication," 2014.
- [16] D. Trossell, "Iot: How to alleviate bandwidth challenges," 2017.
- [17] G. Dimitrakopoulos, J. Ghattas, and T. Kamalakis, "Enhancing intelligent transport systems through visible light communications and context aware decision making systems.".
- [18] S.-K. Lim, K. Ruling, I. Kim, and I. S. Jang, "Entertainment lighting control network standardization to support vlc services," *Communications Magazine*, *IEEE*, vol. 51, no. 12, pp. 42–48, 2013.
- [19] Z. Zhou, M. Kavehrad, and P. Deng, "Indoor positioning algorithm using lightemitting diode visible light communications," *Optical Engineering*, vol. 51, no. 8, pp. 085009–1–085009–6, 2012.
- [20] P. Polishuk, "Plastic optical fibers branch out," Communications Magazine, IEEE, vol. 44, no. 9, pp. 140–148, 2006.
- [21] G. Cossu, A. Khalid, P. Choudhury, R. Corsini, M. Presi, and E. Ciaramella, "Vlcsignals distribution over gi-pof for in-home wireless networks," in *Optical Wireless Communications (IWOW)*, 2012 International Workshop on, pp. 1–3, IEEE, 2012.
- [22] F. Schill, U. R. Zimmer, and J. Trumpf, "Visible spectrum optical communication and distance sensing for underwater applications," in *Proceedings of ACRA*, vol. 2004, pp. 1–8, 2004.
- [23] J. S. Belrose, "Fessenden and marconi: their differing technologies and transatlantic experiments during the first decade of this century," in 100 Years of Radio., Proceedings of the 1995 International Conference on, pp. 32–43, IET, 1995.
- [24] M. Oh, "A flicker mitigation modulation scheme for visible light communications," in Advanced Communication Technology (ICACT), 2013 15th International Conference on, pp. 933–936, IEEE, 2013.

- [25] H. Ma, L. Lampe, and S. Hranilovic, "Integration of indoor visible light and power line communication systems," in *Power Line Communications and Its Applications* (ISPLC), 2013 17th IEEE International Symposium on, pp. 291–296, IEEE, 2013.
- [26] M. Kavehrad, "Sustainable energy-efficient wireless applications using light," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 12, pp. 66–73, 2010.
- [27] A. Jovicic, J. Li, and T. Richardson, "Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 26–32, 2013.
- [28] I. D. Association, 2012.
- [29] J. M. Kahn and J. R., "Wireless infrared communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265–298, 1997.
- [30] T. Borogovac, M. B. Rahaim, M. Tuganbayeva, and T. D. Little, ""lights-off" visible light communications," in *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, 2011 IEEE, pp. 797–801, IEEE, 2011.
- [31] Y. Narukawa, M. Ichikawa, D. Sanga, M. Sano, and T. Mukai, "White light emitting diodes with super-high luminous efficacy," *Journal of physics D: Applied physics*, vol. 43, no. 35, p. 354002, 2010.
- [32] D. L. Klipstein, "The great internet light bulb book, part i," *DL Klipstein*, vol. 19, 1996.
- [33] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using led lights," *IEEE transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 100–107, 2004.
- [34] Z. S. Roberto Ramirez-Iniguez, Sevia M. Idrus, Optical Wireless Communications: IR for Wireless Connectivity. 1 ed., 2008.
- [35] H. H. Svilen Dimitrov, Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi. Cambridge University Press, 2015.
- [36] J. Franz and V. K. Jain, Optical Communications: Components and Systems: Analysis-design-optimization-application. CRC press, 2000.
- [37] "Osram opto semiconductors," LE CW E3B, 2008.
- [38] ThorLabs, "Pda10a operating manual wideband amplified silicon detector," 2005.
- [39] AgilentTechnologies, "Agilent 1000 series oscilloscopes," 2009.
- [40] Agilent Technologies, "Agilent 33250a 80 mhz waveform generator," 2003.