

HAVA HARP OKULU
HAVACILIK VE UZAY TEKNOLOJİLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖRÜNÜR IŞIKLA KABLOSUZ YEŞİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Dilek ŞENYER

Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Başkanlığı

Elektronik Mühendisliği Programı

ARALIK 2014



HAVA HARP OKULU
HAVACILIK VE UZAY TEKNOLOJİLERİ ENSTİTÜSÜ



GÖRÜNÜR IŞIKLA KABLOSUZ YEŞİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Dilek ŞENYER
(212101)

Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Başkanlığı

Elektronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Özgür Barış AKAN
Eş Danışman: Yrd.Doç.Dr. Numan ÜNALDI

ARALIK 2014

Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsünün 212101 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Dilek ŞENYER, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra Prof.Dr. Özgür Barış AKAN danışmanlığında ve Yrd.Doç.Dr. Numan ÜNALDI eş danışmanlığında hazırladığı “**GÖRÜNÜR IŞIKLA KABLOSUZ YEŞİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Özgür Barış AKAN**
KOÇ Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Fatih ALAGÖZ**
Boğaziçi Üniversitesi

Doç.Dr. İlker BEKMEZCİ
HHO K.lığı

Teslim Tarihi : 01 Kasım 2014
Savunma Tarihi : 01 Aralık 2014

Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsünün 212101 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Dilek ŞENYER, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra Prof.Dr. Özgür Barış AKAN danışmanlığında ve Yrd.Doç.Dr. Numan ÜNALDI eş danışmanlığında hazırladığı “**GÖRÜNÜR IŞIKLA KABLOSUZ YEŞİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Özgür Barış AKAN
KOÇ Üniversitesi



Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Fatih ALAGÖZ
Boğaziçi Üniversitesi



Doç.Dr. İlker BEKMEZCİ
HHO K.lığı



Teslim Tarihi : 01 Kasım 2014
Savunma Tarihi : 01 Aralık 2014

ÖNSÖZ

Tezimle ilgili tüm süreçlerde benden yardımlarını esirgemeyen ve beni araştırmam kapsamında en iyi şekilde yönlendiren Tez Danışmanım sayın Prof.Dr. Özgür Barış AKAN'a ve eş danışmanım sayın Yrd.Doç.Dr. Numan ÜNALDI'ya çok teşekkür ederim. Ayrıca tezimi hazırlamam aşamasında benden yardımlarını, desteğini ve sabrını esirgemeyen eşim Mustafa şENYER'e de çok teşekkür ederim.

Aralık 2014

Dilek şENYER

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
1. GİRİŞ...	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması ve İzlenen Yöntem	1
1.3 Hipotez.....	2
2. GÖRÜNÜR IŞIKLA KABLOSUZ YEŞİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ... 3	3
2.1 Giriş	3
2.2 Görünür Işıklı Haberleşme Sisteminin Çalışma Prensibi	9
2.2.1 LED yapısı ve çalışma prensibi	12
2.2.1.1 LED'in ilettiği güç ve spektral yoğunluğun hesaplanması	13
2.2.1.2 Vericinin ışık mekansal yoğunluk dağılımı $I_{0gt}(\theta)$ 'ın hesaplanması	15
2.2.2 Kanal kayıpları	15
2.2.3 Fotodiod yapısı	17
2.3 Görünür Işıklı Yeşil Haberleşme Teknolojisinde LED Tabanlı İç Mekan Uygulamaları	23
2.3.1 Birleşik aydınlatma ve haberleşme	23
2.3.1.1 Akkor lambalar, florasan lambalar ve LASER diod ışık kaynakları ile yapılan uygulamalar	27
2.3.1.2 LED-tabanlı görünür ışıklı haberleşme sistemi uygulamaları	28
2.3.2 Aydınlatma performansı	40
2.3.2.1 Karartma kontrolü	41
2.3.2.2 Titreme etkisinin azaltılması	42
2.3.2.3 Gölgeleme etkisi	43
2.3.2.4 Sabit renk kontrolü	44
2.4 Yeşil Görünür Işıklı Haberleşme Teknolojisinde Modülasyon Tabanlı İç Mekan Uygulamaları	45
2.4.1 Enerji etkin haberleşme	45
2.4.1.1 MIMO tekniği	47
2.4.1.2 MIMO OFDM tekniği	49
2.4.1.3 MU-MISO tekniği	50
2.4.2 Fiziksel katmanlar	51
2.4.2.1 Modülasyon tabanlı uygulamalar	54
2.4.2.2 Modülasyon tekniklerinin karşılaştırılması	71

2.5 Organik VLC Uygulamaları	73
2.6 Mobilite Uygulamaları	76
3. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	79
3.1 VLC Sistemleri Konusunda Üzerinde Çalışılması Gereken Konular ve Karşılaşılan Zorluklar	79
3.2 Önerilen LED Tabanlı ve Modülasyon Tabanlı Çalışmalar	81
3.3 Çalışmanın Uygulama Alanı.....	82
KAYNAKLAR.....	83
EKLER.....	95
ÖZGEÇMİŞ.....	105

KISALTMALAR

ICT	: Information and Communication Technology
QoS	: Quality of Service
EARTH	: Energy Aware Radio and Network Technologies
ICC	: The International Conference on Communications
GLOBECOM	: The Global Communications Conference
GHG	: The Greenhouse Gas
VLC	: Visible Light Communication
VLCC	: Visible Light Communication Consorsium
JEITA	: Japanese Electronic and Information Technology Industry Association
WWRF	: Wireless World Research Forum
IEEE	: The Institute of Electrical and Electronics Engineers
WPAN	: Wireless Personal Area Networks
PLASA	: Professional Lighting and Sound Association
LED	: Light Emitting Diode
AR	: Augmented Reality
IR	: Infrared
EMI/RFI	: Electromagnetic Interference (EMI)/Radio Frequency Interference (RFI)
Wi-Fi	: Wireless Fidelity
Wimax	: Worldwide Interoperability for Microwave Access
D/L	: Downlink
U/L	: Uplink
VoIP	: Voice Over Internet Protocol
NAS	: Network Attached Storage
M2M	: Machine To Machine
PoE	: Power Over Ethernet
ITS	: Intelligent Transportation System
SSL	: Solid-State Lighting
MIMO	: Multiple-Input Multiple-Output
MISO	: Multiple-Input Single-Output
CIE	: International Commission on Illumination
LOS	: Line of Sight
GaAs	: Galyum Arsenit
IT	: Information Technology
FET	: Field Effect Transistor
IT	: Information Technology
FLC	: Fluorescent Light Communication
FLI	: Fluorescent Light Interference
OOK	: On-Off Keying
OOK-NRZ	: On-Off Keying Non-Return-To-Zero

BER	: Bit Error Rate
S/N	: Signal to Noise Ratio
ISI	: Intersymbol Interference
LD	: Laser Diode
GaN	: Gallium Nitride
OCS	: Optical Communication Systems
GPS	: Global Positioning System
RFID	: Radio Frequency Identification
QR CODE	: Quick Response Code
WiFi	: Wireless Fidelity
RoHS	: Restriction of Hazardous Substances Directive
DFE	: Decision Feedback Equalizer
PWM	: Pulse Width Modulation
HB-LED	: High Brightness Light Emitting Diodes
DMT	: Discrete Multitone
QAM	: Quadrature Amplitude Modulation
RGB	: Red-Green-Blue
WDM	: Wavelength Division Multiplexing
OFDM	: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
FOV	: Field of View
CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor
InGaN	: Indium Gallium Nitride
RCLED	: Resonant Cavity Light Emitting Diode
OLED	: Organic Light Emitting Diode
MLP-ANN	: Multilayer Perceptron Artificial Neural Network
AC-LED	: Alternating Current Light Emitting Diode
DC-LED	: Direct Current Light Emitting Diodes
PAPR	: Peak To Average Power Ratios
HVAC	: Heating, Ventilation, and Air Conditioning
AM	: Amplitude Modulation
PHY	: Physical Layer
FCC	: Critical Flicker Fusion Rate or Threshold
MFTP	: Maximum Flickering Time Period
RLL	: Run Length Limited
FEC	: Forward Error Correction
NLOS	: Non-Line-of-Sight
LDPC	: Low-Density Parity-Check
EARTH	: Optimising Power Efficiency in Mobile Radio Networks
SINR	: Signal to Interference Noise Ratio
MRC	: Maximal Ratio Combining
MU	: Multi-User
IM/DD	: Intensity Modulation with Direct Detection
LZF	: Linear Zero Forcing
ZF-DPC	: Zero Forcing Dirty Paper Coding
PD	: Photodiode
MAC	: Media Access Control
VPPM	: Variable Pulse Position Modulation
CSK	: Color Shift Keying
FDM	: Frequency Division Multiplexing

QASK	: Quaternary-Amplitude-Shift Keying Modulation
SPAM	: Superposed Pulse Amplitude Modulation
PPM	: Pulse Position Modulation
M-QAM	: Variable Multi-Level Quadrature Amplitude Modulation
MM	: Metameric Modulation
OPPM	: Overlapping Pulse Position Modulation
MPPM	: Multiple Pulse Position Modulation
PDSM	: Pulse Dual Slope Modulation
DMM	: Discrete Multitone Modulation
IPPM	: Inverse Pulse Position Modulation
SFM	: Switching Frequency Modulation
CAP	: Carrierless Amplitude and Phase
EPPM	: Expurgated Pulse-Position Modulation
OEPPM	: Overlapped Expurgated Pulse-Position Modulation
MEPPM	: Multilevel Expurgated Pulse-Position Modulation
FIR	: Finite Impulse Response
DCO-OFDM	: DC Biased Optical OFDM
ACO-OFDM	: Asymmetrically Clipped Optical OFDM
SM	: Spatial Modulation
BLW	: Baseline Wander
PAM	: Pulse Amplitude Modulation
OPPM	: Overlapped-PPM
VPPM	: Variable-PPM
SSK	: Spaceshift Keying
SPPM	: Spatial PPM
SC-PPM	: Sub-Carrier Pulse Position Modulation
TCM	: Trellis-Coded Modulation
AWGN	: Additive White Gaussian Noise
VOOK	: Variable On-Off Keying
FDE	: Frequency Domain Equalizer
TDE	: Time Domain Equalizer
DFT	: Discrete Fourier Transform
IDFT	: Inverse Discrete Fourier Transform
DFE	: Decision Feedback Equalizers
SM	: Spatial Modulation
BLW	: Baseline Wander
MC-VPPM	: Multi-Coded Variable Pulse Position Modulation
BIBD	: Balanced Incomplete Block Designs
OPD	: Organic Photodetector
EQE	: External Quantum Efficiency
NEP	: Noise Equivalent Power
BHJ	: Organic Bulk Heterojunction
P3HT:PCBM	: Poly 3-Hexylthiophene:Phenyl-C61-Butyric Acid Methyl Ester
VLP	: Visible Light Positioning

SEMBOL LİSTESİ

λ	: Dalgaboyu
f	: Frekans
W_f	: Fermi seviyeler
W_g	: LED yasak bölge genişliği
$S(\lambda)$: Güç spektral dağılımı (W/nm) fonksiyonu
Φ_v	: Akı (lm)
F_t	: LED'in toplam aydınlatma akısı (lumens)
$V(\lambda)$: Bağlı aydınlatma verimliliği fonksiyonu
$St(\lambda)$: Spektral eğri
$St'(\lambda)$: Normalize edilmiş spektral eğri
c_t	: Ölçekleme faktörü
$g_t(\theta)$: Normalize edilmiş mekansal aydınlatma şiddeti dağılımı
I_θ	: Vericinin eksenel şiddeti
Ω_{max}	: Kaynak demeti katı açısı
θ_{max}	: Maksimum yarı açı
D	: Alıcı mesafesi
R	: Alıcı açıklık yarıçapı
A_r	: Alıcı alanı
Ω_r	: Alıcı katı açısı
L_p	: Yol (kanal) güç kaybı
L_L	: Aydınlatma yol kaybı
$S_r(\lambda)$: Alınan ışık güç spektral yoğunluğu (W/nm),
$R_r(\lambda)$: Alıcı filtre spektral tepkisi
$R_D(\lambda)$: Dedektör duyarlılığı (A/W at λ)
F_r	: Alıcı tarafından yutulan aydınlatma akısı
N_0	: Alıcıdaki gürültü yoğunluğu
N_{diode}	: Dedektörün gürültü yoğunluğu (W/ $\sqrt{\text{Hz}}$)
I_D	: Koyu akımlar
I_S	: Gelen ışığın akımı
I_B	: Arka plandaki ışık tarafından endüklenen akım
q	: Elektron yükü
B	: Bantgenişliği
T	: Sıcaklık değeri
R_{SH}	: Şönt direnci
C_J	: Eklem kapasitansı
R	: Fotodiodun parlama dalgaboyunda duyarlılığı
P_0	: Fotodiodun aktif alanında algılanan gelen ışığın gücü
I_N^*	: Gürültü akımı
R_S	: Seri direnç
R_L	: Yük direnci

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : VLC ve RF karakteristiklerinin karşılaştırılması	36
Çizelge 2.2 : Radyometrik ve fotometrik birimler	42
Çizelge 2.3 : $V(\lambda)$ fonksiyonunun değeri	44
Çizelge 2.4 : TI OPA111 op-amp için gürültü bölgeleri	52
Çizelge 2.5 : LED'lerin, floresan ve akkor lambaların karşılaştırılması	59
Çizelge 2.6 : VLC'nin farklı haberleşme teknikleri ile karşılaştırılması	61
Çizelge 2.7 : Modülasyon tekniklerinin karşılaştırılması	102
Çizelge A.1 : Modülasyon tekniklerinin avantaj ve dezavantajları	127
Çizelge B.1 : VLC sistemleri tarihsel gelişim süreci	132

ŞEKİL LİSTESİ

sayfa

Şekil 2.1	: VLC iç mekan uygulamaları	37
Şekil 2.2	: LED aydınlatma ve kablosuz haberleşme ile füzyon teknolojisi	38
Şekil 2.3	: Haberleşme frekansları	39
Şekil 2.4	: Elektromanyetik spektrumun optik kısmı	40
Şekil 2.5	: Görünür Işıklı İletişim prensibi	40
Şekil 2.6	: VLC sistemi blok diyagramı	41
Şekil 2.7	: VLC sistemi prensibi	41
Şekil 2.8	: LED PN-eklemi kutuplama düzenlemesi ve enerji bantları	43
Şekil 2.9	: Beyaz LED'in normalize edilmiş optik spektrumu	44
Şekil 2.10	: $V(\lambda)$ fonksiyonu değeri	45
Şekil 2.11	: Normalize edilmiş mekansal aydınlatma şiddeti dağılımı eğrisi	46
Şekil 2.12	: LOS hattı yapısı	47
Şekil 2.13	: Temel kutuplama ve fotodiodun yapısı	48
Şekil 2.14	: Spektral Tepki	49
Şekil 2.15	: Örnek Optik Filtre Tepkisi	50
Şekil 2.16	: Modülasyon ortamı spektrumu	50
Şekil 2.17	: Kullanılan dedektör modeli	51
Şekil 2.18	: Pin fotodiod uygulaması	51
Şekil 2.19	: Devrenin hata kaynakları ile gösterimi	52
Şekil 2.20	: Transempedans	52
Şekil 2.21	: Fotodiod uygulamasının gürültü modeli	53
Şekil 2.22	: Gürültü voltaj kazancı	53
Şekil 2.23	: Çıkış voltajı gürültü spektral yoğunluğu	54
Şekil 2.24	: Photophone deneyi	55
Şekil 2.25	: VLC Dış mekan uygulamaları	56
Şekil 2.26	: 60 Watt LED fiyat trendi	57
Şekil 2.27	: LED'lerin ve LED armatürlerinin ışık verimi gelişim eğrileri	61
Şekil 2.28	: LED'lerin modülasyon karakteristikleri	66
Şekil 2.29	: LED yayılım spektrumu	67
Şekil 2.30	: Farklı anten sistemlerinin gösterimi	78
Şekil 2.31	: MIMO haberleşme sisteminin şematik gösterimi	79
Şekil 2.32	: MISO sistemi	82
Şekil 2.33	: VLC PHY Mimarisi	84
Şekil 2.34	: PHY tiplerinin modülasyon ortamında FDM dağılımı	85
Şekil 2.35	: Sinyal gösterimi	89
Şekil 2.36	: OFDM verici	89
Şekil 2.37	: OFDM alıcı	90
Şekil 2.38	: Değişken darbe konum modülasyonunun prensibi	92
Şekil 2.39	: Karartma kontrolü ile değişken darbe konum modülasyonu örneği	93

GÖRÜNÜR IŞIKLA KABLOSUZ YEŞİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ

ÖZET

Haberleşme son zamanlarda 5G WiFi, yeşil haberleşme, vücudumuzun içindeki nano-haberleşme, nötrino haberleşmesi, gezegenler arası haberleşme, yerçekimsel haberleşme gibi mevcut ve gelecekte kullanılması öngörülen bir çok haberleşme tekniği ile gelişen bir teknolojidir.

Gelecek vadeden bu tür yeni nesil teknolojilerin yakın bir gelecekte yaygın olarak kullanımı artık insanoğlu için uzak bir hedef olmaktan çıkmıştır. Özellikle yeşil haberleşme kavramı, ekolojik perspektiften bakıldığında küresel ısınma konusunda önemli etkisi olan CO₂ gazı yayılımını azaltması ve insan nesli için hayati önemi olan enerji tüketimini düşürerek enerji verimli bir haberleşme olanağı sunması açısından geleceğin haberleşme teknolojileri arasında önemli bir yer tutmaktadır. Kablosuz haberleşmede daha yeşil çözüm arayışları günümüzde hükümetlerin, akademik camianın ve endüstrinin dikkatini çeken bir husustur. Bu kapsamda geliştirilen görünür ışıkla kablosuz haberleşme teknolojisi, gelişme aşamasında olan ve mevcut diğer haberleşme teknolojilerine oranla daha az enerji tüketim potansiyeli ile dikkat çeken, endüstride, bilimde ve medikal (ISM) bantta, radyo frekans spektrumun (RF) aksine maliyet etkin ve henüz lisanslandırılmamış bantgenişliği ile haberleşme olanağı sunan bir teknolojidir. Görünür ışıkla haberleşme teknolojisini diğer tekniklerinden ayıran özelliği haberleşme ve aydınlatma olarak çift fonksiyonlu kullanım sunabilmesidir. Bu durumda diğer sistemlerden farklı olarak tasarımda optik güç kısıtlarının da dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca sinyal formatı RF haberleşmeden farklıdır ve RF enerji ile kıyaslandığında insan sağlığına daha az zarar vermektedir. Bu nedenle araştırmacılar görünür ışıkla haberleşme sistemlerini gelecek nesil haberleşme ve ağ iletimi için potansiyel bir araştırma alanı olarak görmektedirler ve özellikle iç mekan aydınlatma sistemleri üzerine yoğunlaşarak kablosuz haberleşme kapasitesinin sistem fonksiyonları üzerindeki etkilerinin azaltılması ve ortaya çıkan zorlukların belirlenmesi üzerine çalışmaktadırlar. Yeni gelişen bu teknolojinin pratik olarak günlük yaşamda veri iletiminde kullanımının yaygınlaşması Gb/s hızına erişilebilmesi durumunda olacaktır ki, bu durumda bir takım düzenlemelerin yapılması ve teknik anlamda ortaya çıkan zorlukların aşılması gerekmektedir. Sistem tasarımında; Gb/s hızında yayın yaparken veri iletiminin aydınlatma fonksiyonu üzerindeki etkilerinin giderilmesini sağlamak, değişik ortamlarda etkin karatma kontrol teknikleri kullanılarak yeterli aydınlatma seviyesini standartlara uygun şekilde ayarlamak, karatma sisteminin modülasyon tekniği ile uyumlu olarak çalışmasını sağlamak, mobilite yönetimini sağlamak ve geliştirmek, çok yönlü iletim kanal karakteristikleri sorununu çözmek, çift yönlü iletişim sağlamak karşılaşılan sorunlar arasında yer almaktadır. Ayrıca dış mekan haberleşme sistem tasarımı, sistem güvenilirliği, kanal kodlama teknikleri, ağ iletimi kapsama alanı sorunları da ortaya çıkan diğer sorunlardır. Araştırmaları bu yönde geliştirerek,

güncel standartlar yayınlanması gerekmektedir. Araştırmacılar mevcut ve öngörülen görünür ışıkla haberleşme teknolojisi üzerinde daha yeşil çözümler üretmek amacıyla yeni tasarım paradigmaları üzerinde çalışmalarını sürdürmektedir.

Bu tezde LED tabanlı ve modülasyon tabanlı enerji verimli görünür ışıkla haberleşme sistemleri ile ilgili olarak yapılan çalışmalar aktarılmıştır. Geleneksel ışık kaynakları ve LED ışık kaynakları ile yapılan VLC uygulamaları incelenerek, haberleşme tekniği ile yakın ilgisi bulunan katı hal aydınlatma teknolojisinde gelinen son nokta özetlenmiştir. Yüksek veri hızı sağlayan yeni nesil LED teknolojilerinin avantajları belirtilerek, tasarımlarında karşılaşılan sorunlar tartışılmıştır. Sistemin standartlarla tanımlanan fiziksel katmanları, güç optimizasyonu ile veri hızını Gb/s seviyesine çıkarmak için çözümlenmesi gereken süreçler aktarılmış ve uygulanan modülasyon teknikleri tanıtılmıştır. Başlangıç safhasında bulunan mobilite uygulamaları aktarılmıştır. Enerji verimliliğinin sağlanması için uygulanan ve görünür ışıkla haberleşme sistemi için tasarlanan temel ve ileri teknikler ve elde edilen sonuçlar açıklanmıştır. Ayrıca yapılan literatür araştırmasında, sistem tasarımı aşamasında aydınlatma kriterlerinin optimizasyonu ile enerji verimli bir sistem tasarlanması konusu üzerine yapılan çalışma bulunmadığı belirlenmiştir. Karartma, gölgeleme, titreme etkisi gibi aydınlatma fonksiyonunu doğrudan etkileyen kriterlerin optimize edilmesi sonucunda elde edilecek enerji verimli görünür ışıkla veri iletimi tasarımının VLC sistem tasarımlarında önemli bir aşama olacağı değerlendirilmektedir.

Bu incelemede amaç, günümüz için yeni bir teknoloji olması ve teknik sorunların çözümlenememesi nedeniyle pratikte uygulama alanları henüz kısıtlı olan görünür ışıkla haberleşme sistemlerinin yeşil haberleşme kapsamındaki potansiyelinin daha iyi anlaşılmasını sağlamak ve araştırmacıları bu güncel teknoloji alanında daha fazla çalışma yapabilmeleri amacıyla motive etmektir.

WIRELESS GREEN COMMUNICATION SYSTEMS WITH VISIBLE LIGHT

SUMMARY

The developments in the communication technologies have yielded many existing and envisioned data transmission architectures such as 5G WiFi, green communication, body-in nano-communication, neutrino communication, inter-planets communication, gravitational communication.

The widespread use of these promising technologies in the very near future is not out of reach anymore. From ecological perspective, among these technologies, green communication known as also energy efficient communication that mitigates green house gas (CO₂) emissions which is a major contributor to the climate change equation and decrease the overall energy consumption becomes vitally important for human beings. Therefore, the need for greener solutions for wireless technologies has emerged by increasing the attention of government, academia, and industry.

Wireless network's environmental responsibility, such as energy efficiency and environmental impact are key challenges in this area. In wireless communication energy efficiency has significant economic benefits, ecological benefits and also represents social responsibility in the means of climate change. By reviewing the trend and taking into account the new generation wireless communications which are expected to be a major energy consumer, rapid increasement of rate in the future is expected. Therefore effective actions must be taken in the case of energy efficiency.

Reducing energy consumption in wireless communications to construct a green wireless communication network has become a primary purpose currently. Therefore many research industries, telecommunication service providers, lighting industry manufacturers and academic fields are engaged in green communication and energy efficient system design of wireless communications is the future trend from now on. And also high energy consumption make it almost impossible for the RF communication systems to independently provide the increasing demand for wireless data transmission. Although this technology is still in its infant stages, VLC is considered to be a green communication alternative depending on its developing stage which can be used instead of RF communication or as a complementary technology to the existing wireless Networks.

The rapid development of these wireless communication technologies may have brought convenience and ease directly or indirectly to human life in many respects, however besides these beneficial aspects, technology also brings many adversities to natural life such as increasing green house effect which is a sensitive spot to be dealt with seriously. The fossil fuels will be extinct in near future, and the climate changes due to global warming will become much more severe. To overcome the concerns about global warning, considerable strategies to mitigate the increase of CO₂ levels in the atmosphere have to be developed. These factors force us to search greener

solutions for communication. To think of how to cause minimal damage to the environment has become more vital nowadays while producing new technologies. On the other hand wireless devices have become an indispensable part of our lives, however this widespread usage of wireless technology makes it an important part of total energy consumption. Therefore green communication technologies such as VLC, the new emerging technology which has the potential of low energy consumption and allows licenced free bandwidth and differs from radio frequency communication in both baseband signal format and optical power constraints and also environment friendly solution compared with IR communication became more popular nowadays. Also, VLC allows low-cost broadband communication in the industrial, scientific, and medical (ISM) band with respect to overcrowding of the radio frequency (RF) spectrum and differs from radio frequency communication in both baseband signal format and optical power constraints and also less harmful to human health compared with IR communication. The researches on VLC systems are in the rapid development stage due to the increasing demand for high-quality applications that needs high-speed data rates. The prospect of ubiquitous Gb/s wireless access to internet transmitted through streetlights without using wireless internet routers which are potentially harmful electromagnetic pollution emitters in mobile indoor or outdoor environments is considered to be a revolution in communication technology and soon it will become vital.

Therefore being a potential research focus for all the next-generation communications and networks designers, the researchers reengineer the function of indoor lighting and address the wireless capacity challenge. However, there exist many common significant regulatory and technical challenges to be addressed for the practical realization of this new emerging technology before its widespread acceptance, such as to find a way to achieve Gb/s transmission without affecting the illumination, to obtain adequate illuminance according to various environments under power efficient dimming control schemes, to achieve enhanced lighting efficiency, to provide modulation scheme compatibility with the dimming system, mobility management, duplex communication, multipath transmission channel characteristics, outdoor communication, reliability, channel coding, network coverage and to publish timely standards. Inspired by these challenges, many researchers are currently engaged in developing innovative design paradigms to address the energy efficiency challenges of existing and envisioned VLC systems for developing green VLC solutions.

In this paper, the current state-of-the-art in LED-based and modulation-based energy efficient visible light communication is captured. VLC applications with traditional light sources, LED-based VLC applications and solid state technology researches are presented. The next generation LED technologies proposed for high-speed communication for VLC applications are discussed and challenges that has to be overcome to increase the data-rate to Gb/s speeds while optimizing the power consumption are reviewed. Basic concepts of VLC physical layer, energy efficient light communication, applications of mobility issues are presented along with open research issues and challenges. A wide range of energy efficient modulation schemes that address the many technical challenges in implementing VLC at high speeds are discussed and challenges that has to be overcome to increase the data-rate to Gb/s speeds while optimizing the power consumption are reviewed. Fundamental and advanced techniques designed for VLC for energy efficiency (EE) such as multiple-

input multiple-output (MIMO) and multiple-input single-output (MISO) techniques with orthogonal frequency division multiplexing are summarized by identifying valuable topics on energy-efficient design for future research. The objective of this survey is to provide better understanding of the potentials for green VLC systems which is currently far from being fully recognized, and to motivate the research community to further explore this timely and vital topic. We also identify the issues that are particular to VLC and we discussed spectrally efficient modulation candidates below that fulfill the required constraints.

The objective of this survey is to provide better understanding of the potentials for green VLC systems which is currently far from being fully recognized, and to motivate the research community to further explore this timely and vital topic.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında; enerji verimli görünür ışıkla yeşil haberleşme sistemlerinin potansiyeli incelenmiş ve günümüzde sistem tasarımında kullanılan LED teknolojileri ve uygulanan modülasyon türleri hakkında bilgi verilmiştir. Mevcut fiziksel katman protokolleri, LED teknolojisindeki gelişmeler, enerji etkin modülasyon tasarımları, mobilite uygulamaları, görünür ışıkla paralel haberleşme tekniklerinin uygulamaları literatürde yapılan çalışmaların büyük bir bölümünü içerecek şekilde aktarılmaya çalışılmıştır. Yüksek hızda haberleşme sağlayan Görünür Işıkla Haberleşme (Visible Light Communication (VLC)) uygulama teknikleri üzerinde durularak, enerji tüketimini optimize ederek Gb/s hızına ulaşan VLC sistemlerinde karşılaşılan sorunlar ve çözümlerine yönelik öneriler tartışılmıştır.

Bu tezde amaç yeşil VLC için olası potansiyelin daha iyi anlaşılabilmesini sağlamak ve araştırmacıları bu hayati ve güncel konuyu daha fazla araştırmaları konusunda motive etmektir.

1.2 Literatür Araştırması ve İzlenen Yöntem

Görünür ışıkla haberleşme konusunda var olan kaynaklar ve makaleler incelenerek tez kapsamında kullanılacak veriler toplanmıştır. Konuyla ilgili güncel makaleler incelenmiştir. Konu içeriği tez kapsamına alınmadan önce verilerin akademik açıdan geçerlilikleri araştırılarak, kaynağın güvenilirliği doğrulanmıştır. Öncelikli olarak konunun öncesi araştırılmış ve konuyla ilgili detaylı bilgi edinilmiştir. Daha sonra konu bölümlere ayrılarak araştırmalar bölümlerin alt başlıkları olarak detaylı olarak incelenmiştir. Sistem tasarımında eksik kalmış ve geliştirilmeye açık konular tez kapsamında tartışılmıştır.

1.3 Hipotez

Aydınlatma uygulamaları için tasarım aşamasında sistemde güç, güvenilirlik ve enerjiyi kısıt olarak değerlendirerek haberleşme ihtiyaçlarını istenen düzeyde karşılarken, mevcut aydınlatma parametrelerinin (titreme etkisini azaltma, gölgeleme etkisini minimize etme, renk stabilitesini sağlama ve şiddet/karartma kontrolünü sağlama, enerji verimliliğini sağlama, insan faktörlerine uyum sağlama) insanın görüşünü artırmak için optimize edilmesi ve eş zamanlı olarak beyaz ışık veren LED'in direkt modülasyonu ile enerji verimliliği de dikkate alınarak daha yüksek veri hızları elde edilmesi konusundaki çalışmaların sürdürülmesi ve bu konunun bir çok perspektiften araştırılması gerektiği değerlendirilmektedir.

Kısaca, görünür ışıkla haberleşme sistemlerinde veri hızını artırırken aydınlatma parametrelerini de optimize ederek enerji verimli bir sistem tasarımı yapılmasının gerekliliği belirtilmektedir.

Ayrıca bu alandaki gelişmelerin literatür üzerinden taranması sonucunda elde edilen veriler ışığında, katı hal aydınlatma sistemlerinde son teknoloji olarak değerlendirilen uzak fosfor LED teknolojisini verici olarak ve güneş pillerini alıcı olarak kullanan bir VLC sistem tasarımının pratikte gerçekleşmesinin çevreye daha duyarlı bir çözüm olacağı değerlendirilmektedir.

2. GÖRÜNÜR IŞIKLA KABLOSUZ YEŞİL HABERLEŞME SİSTEMLERİ

2.1 Giriş

Yeşil haberleşme, aydınlatma ve haberleşmeyi düşük enerji tüketimi ile sağlayan önemli bir teknolojidir. Günümüzde küresel toplam enerji tüketimi konusu mercek altına alınmış ciddi bir sorundur. Enerji verimliliği son zamanlarda işletme giderlerinin düşürülmesi ve özellikle karbon yayılımının azaltılması dikkate alındığında araştırmacılar için önemli bir hedef haline gelmiştir ve enerji etkinliğini artırmak için aydınlatma ve haberleşme alanlarında önemli çalışmalar yapılmaktadır. Günümüz ekonomik çözümleri ve enerji etkin trendler dikkate alındığında, 2030 yılı itibariyle yapay ışığa olan global talebin günümüze oranla 80 % daha fazla olacağı değerlendirilmektedir. Global aydınlatma elektrik talebinin ise 4 250 TWh değerine ulaşacağı hesaplanmaktadır ki bu talep neredeyse tüm modern nükleer enerji santrallerinin çıktısının 2 katına denk gelen kritik bir güç tüketimidir. Enerji-etkin politikalar artırılarak yürürlüğe koyulmadığı takdirde, aydınlatma bağlantılı yıllık CO₂ yayılımının 2030 yılı itibariyle neredeyse 3 gigatona ulaşması öngörülmektedir [1]. Yukarıdaki veriler göz önüne alındığında yeni nesil aydınlatma teknolojilerinin hayata geçirilmesi sürecinin hızlandırılması ve tüketicilerin enerji etkinliği konusunda farkındalıklarının artırılması konusunda ciddi önlemlerin alınması gerektiği değerlendirilmektedir.

Ayrıca günümüzde yüksek kalitede uygulamalar sunan akıllı telefonlara ve tablet bilgisayarlara “herhangi bir yerde, herhangi bir zamanda” bağlantı ihtiyacı giderek artmakta ve bu durum kablosuz yüksek hızda veri iletimi için de artan bir talebe sebep olmaktadır. Önceden tahmin edilemeyen derecede büyüyen küresel servis ihtiyacı, bilgi ve haberleşme teknolojisini (Information and Communication Technology (ICT)) de zorlayarak hızla gelişmeye devam etmektedir. ICT'nin hızla gelişmesi servis kalitesini garanti (quality of service (QoS)) etmek amacıyla kablosuz ağ iletiminde aşırı derecede enerji tüketimine neden olmaktadır. Yapılan araştırmaların sonuçlarına göre, hücreli kablosuz ağ iletimi, kablolu haberleşme ağ iletimi ve internet altyapısı ile birlikte dünya çapında elektrik enerjisinin 3%'ünden

fazlasını tüketmektedir [2]. Kablosuz haberleşme teknolojisi güç tüketiminde ana kaynak olarak tanımlanmaktadır. Sınırlı enerji kaynakları ve çevreye duyarlı haberleşme davranışları nedeniyle küresel çapta sera gazı yayılımı konusunda önemli bir rolü olan Bilgi ve Haberleşme Teknolojisi (Information and Communication Technology (ICT)) endüstrisi açısından enerji etkinliği konsepti önemli ve öncelikli bir görev haline gelmiştir. Buradan hareketle, veri hızı ve güvenilirliği kısıt olarak değerlendirildiğinde ICT sistemlerini optimize ederek, enerji tüketimini azaltmanın, küresel sera etkisi gaz yayılımları için önemli bir çözüm olacağı ve çevreye-duyarlı haberleşme imkanı sağlayacağı değerlendirilmektedir [3].

Bu amaçla başlatılan projeler mevcuttur. Örneğin; mobil haberleşme sistemlerinde daha enerji verimli çözümler üretebilmek, yeni nesil sistemler, dağıtım stratejileri ve ağ iletimi yönetimi çözümleri geliştirmek için iddialı ve benzersiz olarak nitelenen Enerji Farkında Radyo ve Ağ Teknolojileri (Energy Aware Radio and Network Technologies (EARTH)) olarak adlandırılan Avrupa Birliği 7'inci çerçeve Programı "FP7 IP" projesi bu projelerden biridir. [4]. Ayrıca ICC ve GLOBECOM gibi bir çok uluslar arası konferansta; bu konuyla ilgili bildirimler yapılmış, makaleler yayınlanmış ve yeşil radyo konulu çalışma grupları organize edilmiştir. Ayrıca, mevcut kablosuz erişim altyapısından doğan çevresel kaygılar nedeniyle ISO tarafından yayımlanan 14064 sayılı ISO standardı karbon yayılımı (Green House Gas (GHG)) veya ortadan kaldırılması konusunda prensipleri ve ihtiyaçları belirlemektedir [5].

Hayatın her alanında gerçekleştirdiği gelişim süreçleri kapsamında, insanoğlunun aynı zamanda bir çok tehdidin de ortaya çıkmasına yol açtığı günümüzde yadsınamaz bir gerçektir ve artık dünyanın geleceğini tehdit edecek boyutlara ulaşmıştır [6]. Bu nedenle son zamanlarda özellikle geleneksel aydınlatma sistemlerinde ve kablosuz haberleşmede enerji etkinliğini sağlamak amacıyla işletme giderlerini ve karbon yayılımını azaltmak, araştırmacılar için birincil öncelikle konu olarak değerlendirilmektedir. Günümüzde özellikle kablosuz veri iletiminde çevreye daha duyarlı, insan sağlığına daha zararsız metodları içeren daha emniyetli teknolojilerin kullanımı önem kazanmaktadır. Hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olan ışığın haberleşme kaynağı olarak kullanılması yenilikçi, maliyet ve enerji etkin, emniyetli ve henüz ticari anlamda kullanımı yaygınlaşmamış bir yeşil haberleşme teknolojisinin ortaya çıkması anlamına gelmektedir.

Görünür ışıkla haberleşme (Visible Light Communication (VLC)) üzerine yapılan araştırmalar ilk olarak Japonya’da başlatılmıştır, Görünür Işıklı Haberleşme Konsorsiyumu (VLCC) [7] 2003 yılında başlıca Japon şirketleri arasında, Japonların kendi VLC teknolojilerini standardize ederek, farklı protokollerin ve uygulamaların parçalara ayrılmasını önlemek ve sistemin ekonomik kullanımını artırmak için VLC konusunda kamusal farkındalığı yükseltmek amacıyla kurulmuştur. Böylece Japon şirketleri, kolay erişilebilir yüksek hızlı, biyolojik açıdan zararsız VLC sistemlerinin gelişim, test ve araştırma süreçlerini 2007 yılında yayınlanan “Görünür Işıklı Haberleşme Sistem Standardı” ve “Görünür Işıklı ID Sistem Standardı” adı verilen ulusal standartlarla standardize etmiştir. Japon Elektronik ve Enformasyon Teknolojisi Endüstri Ortaklığı (JEITA) bu standartları sırasıyla JEITA CP-1221 ve JEITA CP-1222 olarak adlandırarak kabul etmiştir [8,9]. Günümüzde Asya ve Avrupa da dahil olmak üzere, VLC sistemlerine dünya çapında artan bir ilgi gözlemlenmekte ve Kablosuz Dünya Araştırma Forumu (Wireless World Research Forum-WWRF) [10], Avrupa Komisyonu Sistemi-7 (Europe Commission Framework-7) projesi OMEGA [11] ve Birleşmiş Krallığın Profesyonel Aydınlatma ve Ses Ortaklığı (Professional Lighting and Sound Association-PLASA) kuruluşunun [12] bu konuda faaliyet gösterdiği bilinmektedir. Ayrıca bu sisteme ait standardizasyon faaliyetleri de IEEE tarafından yürütülmekte olup, VLC’nin fiziksel ve medya erişim katmanları 802.15.7 VLC Görev Gurubu [13] tarafından 2011 yılında standardize edilmiştir. MAC ve PHY katmanlarının özelliklerini belirleyen bu standart kısa mesafe kablosuz kişisel alan ağ iletiminde (Wireless Personal Area Networks (WPAN)) görünür ışıkla iletişimin teşvik edilmesini sağlayan bir dönüm noktası olmuştur. Bugünlerde günlük yaşamda VLC sistemlerinin mevcut farklı teknolojilerle birlikte kullanımı, Casio, Eurescom, France Telecom, NEC Corporation, Orange, Panasonic, Samsung, Sharp, Siemens AG, Telefonica, Toshiba, Roma Üniversitesi, Dortmund Üniversitesi, Ilmenau Üniversitesi, Athena Üniversitesi, Kaliforniya Üniversitesi, ve Oxford Üniversitesi [14,15] gibi bir çok üniversite, kurum ve organizasyon tarafından tartışılan başlıca araştırma konusudur. Aydınlatma ve haberleşmenin eş zamanlı olarak sağlandığı Görünür Işıklı Haberleşme Teknolojisi ışık kaynaklarını örneğin LED’leri RF vericiler yerine kullanan bir teknolojidir ve kızılötesi (Infrared (IR)) haberleşmeye kıyasla daha çok tercih edilmektedir. Yakın zamanda hem akademik ve hem de endüstriyel alanda gittikçe artan bir popülerite kazanan bu yeni nesil teknoloji günümüzde özellikle kısa

mesafe haberleşmede çift yönlü kullanım sağlamak amacıyla kullanılmakta ve aydınlatma sistemine kolaylıkla entegre edilebilmektedir.

Çizelge 2.1: VLC ve RF karakteristiklerinin karşılaştırılması [16].

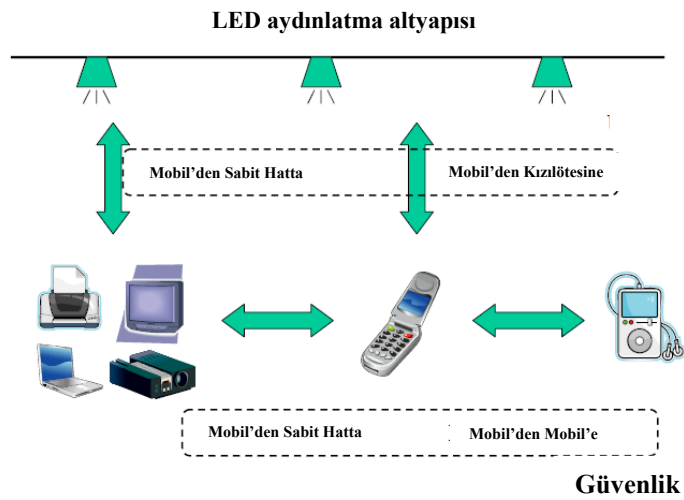
Özellik		VLC	RF
Bantgenişliği		Sınırsız 400nm-700nm	Düzenlenmiş, BW sınırlı
EMI		Hayır	Yüksek
Görüş açısı		Evet	Hayır
Standart		Başlangıç (IG-VLC)	Olgunlaşmış
Tehlike		Hayır	Evet
Mobil cihazdan mobil cihaza	Görünürlük (Güvenlik)	Evet	Hayır
	Güç tüketimi	Bağıl olarak düşük	Orta
	Mesafe	Kısa	Orta
Infra'dan mobil cihaza	Görünürlük (Güvenlik)	Evet	Hayır
	Ötesi	LED aydınlatma	Erişim noktası
	Mobilite	Sınırlı	Evet
Kapsama alanı		Dar	Geniş

VLC potansiyel olarak yüksek veri hızı avantajına sahip, sağlığa zararı olmayan, güvenli, maliyet etkin, erişim kolaylığı sağlayan, neredeyse sonsuz bantgenişliğine sahip, serbest ve henüz düzenlenmemiş kanal olanağı bulunan, sinyal izolasyon özelliğine sahip, elektromanyetik ışıma neden olmayan, Elektromanyetik Girişim veya Radyo Frekans Girişimi (Electromagnetic Interference or Radio Frequency Interference (EMI/RFI))'ne neden olmayan, kompakt yapısı ile veri iletiminde daha az güç harcayan yeni nesil bir teknolojidir. Ayrıca haberleşme için radyo dalgalarını kullanan Kablosuz Bağlantı Alanı (Wireless Fidelity (Wi-Fi)), Bluetooth, Mikrodalga Erişim İçin Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik (Worldwide Interoperability for Microwave Access (Wimax)) vs. gibi diğer geleneksel kablosuz teknolojilerle karşılaştırıldığında, kanal karakteristikleri üzerinde son kullanıcıların karartma kontrolü ile önemli bir etkisinin bulunması sistem için bir diğer avantajdır.

VLC teknolojisinin kablosuz ağlarda iki tür uygulama için kullanımı uygundur; 1 Mbps üzerindeki veri hızları için kullanılan verinin ağ üzerinden kullanıcıya aktarılması (Downlink (D/L)) [17] ve 100 kbps altındaki veri iletimi için kullanılan verinin kullanıcıdan ağa aktarılması (Uplink (U/L)) uygulamaları [18]. Üçüncü bir kategori; Artırılmış Gerçeklik (Augmented Reality (AR)) teknolojisinin verimli

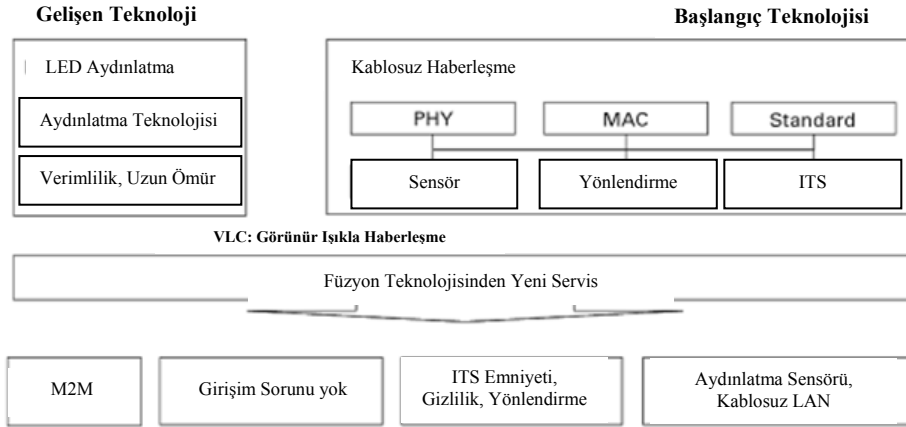
olarak kullanılmasını sağlayan eşzamanlı bir veri haberleşmesidir [19]. VLC doğası gereği yayın uygulamalarına izin vermektedir. Araştırmacılar dağıtılmış verici yapılarına U/L sağlamak için değişik yöntemler üzerinde çalışmalarını sürdürmektedirler [10,20,21]. Örneğin bu kapsamda ışık kaynağının bir VLC alıcısı ile birlikte yönlendirilmesi denenmiş, ancak bu yöntemin maliyet etkin ve enerji etkin olmaması araştırmacıları farklı yöntemler uygulamaya yöneltmiştir. Gelen ışığın bir retro-reflektör kullanılarak geri döndürülmesi yöntemi kullanılmış [22] ve ışık demetini modüle ederek terminalden altyapıya bir veri yolu sağlanmıştır, ancak bu yöntemle de U/L veri hızlarında istenilen hıza ulaşamamıştır. Işık kaynağı RF ve IR alıcılar ile birlikte kullanılmış, yüksek veri hızları elde edilmiş ancak bu bakış açısıyla da VLC kullanılamamıştır [23]. VLC U/L uygulaması, kullanıcı bireyin rahatlığı faktörü de göz önüne alındığında olası güç kısıtları nedeniyle gerçekleşmesi zor bir uygulamadır ve henüz çözümlenmemiş sorunlar içeren, üzerinde çalışılması gereken bir konudur.

Günümüzde, evlerde ve ofislerde yüksek hızda haberleşme ve ticari alanda yüksek doğrulukta iç mekan konumlandırma, D/L internet erişimi, araçtan araca haberleşme, trafik sinyallerinden araca veri gönderme, mobil cihazlar arasında dosya transferi ve bilgi ekranı kullanan haberleşmeler ve iç mekanlarda mobil cihazların konumlandırmasında kullanılan düşük veri hızı haberleşmesi gibi uygulamalarda ve cihaz onarımında VLC kullanımı üzerine çalışmalar yapılmakta olup, yakın bir gelecekte VLC'nin bu alanda pratik olarak kullanımını sağlanabilecektir [18].



Şekil 2.1: VLC iç mekan uygulamaları [16].

Ancak VLC henüz başlangıç fazında olan bir teknolojidir ve bu yeni nesil teknolojinin piyasaya giriş fazı beklenenden çok daha yavaş ilerlemektedir. Örnek uygulamaları sadece; iç mekan ağ iletişimi ve lokasyon tabanlı servisler, planlanmış ticari uygulamaları ise; akıllı trafik yönetimi, uçaklarda eğlence amaçlı kullanımı ve su altı haberleşmesindeki uygulamalardır. VLC'nin gelecekte kullanılması planlanan uygulama alanları; internet veya veri hatları üzerinden ses verisi gönderilmesi (Voice over IP (VoIP)), akıcı görüntü ve müzik aktarımı (streaming video and music), ağ iletişimine bağlı depolama (Network Attached Storage (NAS)), makinalar arası iletişim (Machine To Machine (M2M)), ethernet üzerinden besleme (Power Over Ethernet (PoE)), kablosuz sensör ağ iletişimi, gerçek zamanlı bantgenişliği yoğunluklu uygulamalar, aynı zamanda her yerde mevcut olan ağ iletişimi ve artırılmış gerçekliktir [24,25].



Şekil 2.2: LED aydınlatma ve kablosuz haberleşme ile füzyon teknolojisi [28].

Bu alanda gelecek vadeden bir başka konu ise; maliyet etkin, enerji verimli ve renk dengeli beyaz ışığın yakın bir gelecekte kullanıma sunulması konusunda çalışmalar yapan katı-hal aydınlatma (solid-state lighting (SSL)) teknolojisidir. Bu teknoloji VLC araştırmacılarının ihtiyaçlarına cevap vermek amacıyla hızla gelişmekte ve VLC araştırmalarını yönlendirmektedir. LED aydınlatmanın hızlı bir şekilde piyasada yerini alması VLC sistemlerinin gelişme sürecini hızlandıracak ve LED'lerin düşen maliyetleri VLC'yi kablosuz RF haberleşmeden daha verimli ve ekonomik olarak kullanıma sunacaktır. Tez içeriğinde yeni nesil SSL teknolojisi ile ilgili özet bilgi verilerek, bu alandaki son gelişmeler aktarılmıştır.

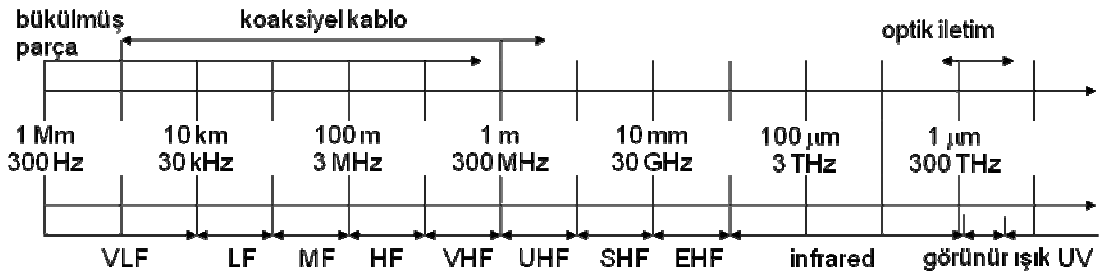
Sonuç olarak, VLC alanında aydınlatma ve haberleşme problemlerini çözmek ve mevcut yapay aydınlatma sistemlerinden farklı olarak çevreye daha duyarlı sistemler dizayn etmek için, VLC sistemlerini optimum spektral ve frekans yayılım profilleri

ile geliştirmek olası bir çözümler olarak görünmektedir. Ancak öncelikli olarak, sisteme yönelik önemli teknik sorunların ve düzenleme ile ilgili zorlukların yakın bir gelecekte, bu teknoloji yaygın bir kullanıma sahip olmadan önce çözümlenmesi önem arz etmektedir.

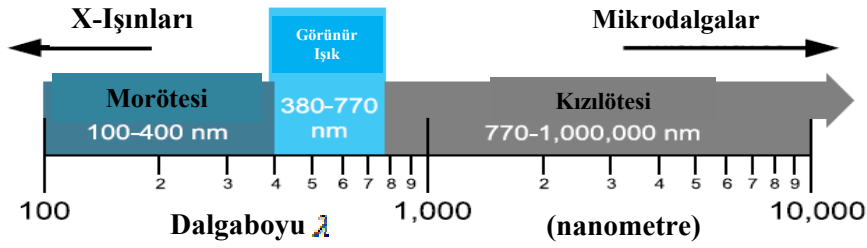
Tez içeriğinde, VLC teknolojisi LED tabanlı iç mekan uygulamaları başlığı altında; birleşik aydınlatma ve haberleşme, aydınlatma performansı, modülasyon tabanlı iç mekan uygulamaları başlığı altında; VLC fiziksel katmanlarının temel konseptleri, enerji verimli modülasyon teknikleri, ve mobilite uygulamaları incelenmiş ve karşılaşılan zorluklar ve üzerinde çalışılması gereken konular belirtilmiştir. Modülasyon teknikleri geniş bir çerçevede ele alınmış ve VLC'yi Gb/s seviyesinde yüksek veri iletim hızlarında tasarlarken bu konuda karşılaşılan teknik zorluklar ve çözüm önerileri ortaya konulmuştur. Enerji verimli VLC tasarımında, Çoklu-Giriş Çoklu-Çıkış (Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)) ve Çoklu-Giriş Tekli-Çıkış (Multiple-Input Single-Output (MISO)) gibi temel ve ileri tekniklerin kullanılması ile elde edilen sonuçlar da incelenmiştir.

2.2 Görünür Işıqla Haberleşme Sisteminin Çalışma Prensipli

Görünür ışıkla haberleşme; LED ışığın insan gözünün algılayamayacağı hızda anahtarlanması ile sağlanmaktadır. Görünür ışık elektromanyetik spektrumunun insan gözünün algılayabildiği kısmını oluşturmaktadır. İnsan gözü 380 nm ve 780 nm dalgalı boyu aralığını algılayabilir ki, $\lambda = c/f$ ($c \cong 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) eşitliğinden bu değer frekans aralığı olarak 385-789 THz'e denk gelmektedir. λ dalgalı boyu, f frekanstır. Şekil 2.3'te haberleşme frekansları gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Haberleşme frekansları [26].



Şekil 2.4: Elektromanyetik spektrumun optik bölümü [27].

Yukarıdaki şekilde ise elektromanyetik spektrumun optik haberleşme bölümü gösterilmiştir.

Göz, biyolojik yapısı nedeniyle 200 Hz gibi yüksek bir frekansta ışığın anahtarlanmasını algılayamamakta, ancak uzun bir süreçte ışığın parlaklık ve şiddetindeki değişimleri gözlemleyebilmektedir. Sistemde alıcı olarak kullanılan bir fotodiyod ise bu hızlı anahtarlama modülasyonunu kolaylıkla algılayabilmektedir. Kullanılan fotodiyod bir fotodetektördür ve yüzeyine gelen optik güçle orantılı olarak elektrik akımı üretmektedir.

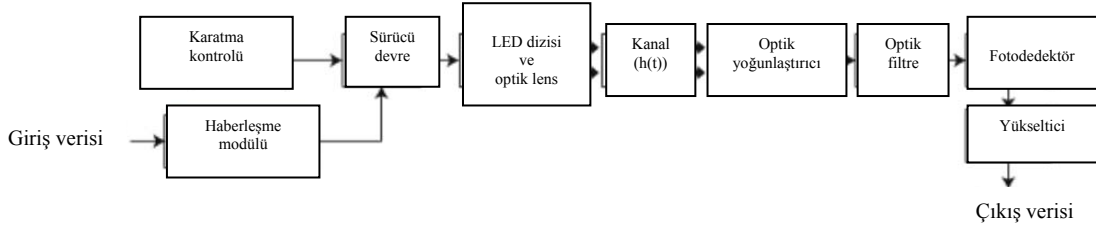


Şekil 2.5: Görünür Işıqla İletişim Prensipleri [28].

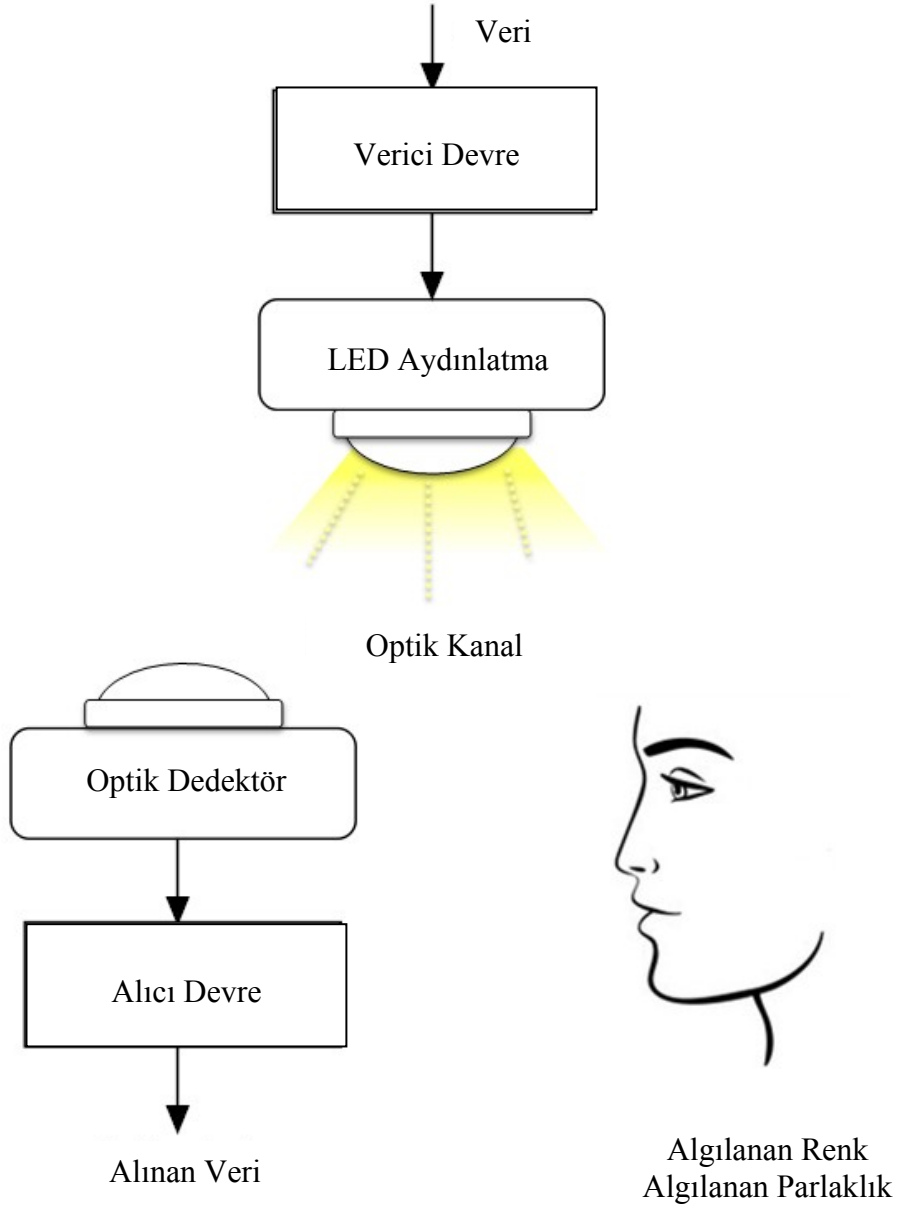
Görünür ışık, LED'lerin gelişim süreci sonucunda önem kazanmıştır ve Şekil 2.5'te gösterilen bu basit prensip görünür ışık iletişimi teknolojisinin LED kullanarak aynı anda aydınlatma ve kablosuz haberleşmeyi desteklemesine imkan sağlamaktadır [28].

Görünür ışık iletişiminin temel bileşenleri LED (Light Emitting Diode), PD (Photodiode), PHY (Fiziksel Katman) ve MAC (Medya Giriş Kontrolü)'dir. Sistemde iletişim görünür ışık kaynağının sinyal vericisi olarak, havanın iletim ortamı olarak ve fotodiyodun sinyal alıcı bileşen olarak kullanılması sonucu sağlanmaktadır. LED ışığın veri sinyali ile modüle edilmesi ile görünür ışık optik taşıyıcı olarak kullanılmaktadır. Kapalı alanda görünür ışıkla iletişim kanalları, mevcut IR iletişim ile bağlantı konfigürasyonlarının benzer olması nedeniyle, IR iletişim baz alınarak yapılandırılmıştır.

Şekil 2.6'da VLC sistemi blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.6: VLC sistemi blok diyagramı [29].



Şekil 2.7: VLC sistemi prensibi [30].

Haberleşmede Radyometrik Birimler, aydınlatma uygulamalarında gözün frekans tepkisini de içeren Fotometrik Birimler kullanılır. LED'ler piyasada aydınlatma amacıyla kullanıldıkları için ve LED'lerin veri iletiminde kullanımı bilinmeyen bir alan olması nedeniyle LED üreticileri tarafından kullanıcılara sadece fotometrik veriler verilmektedir [31].

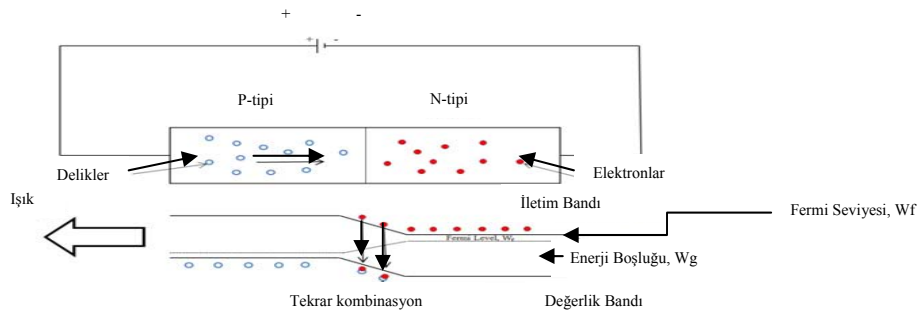
Çizelge 2.2: Radyometrik ve fotometrik birimler [31].

	Radyometrik (Fiziksel)	Fotometrik (Görsel)
Toplam Akı	Watt (W)	lumen (lm)
Akı Yoğunluğu	W/cm^2	lm/cm^2
Kaynak Şiddeti	W/sr	mum = lm/sr
Aydınlık	-	Lux (lx) = lm/m^2
Parlama	W/m^2	-

VLC sisteminin ana bileşenleri olan verici ve alıcı yapıları, LED'ler ve fotodiodlar ile ilgili özet bilgi aşağıda verilmiştir. Ayrıca görüş hattı (Line of Sight (LOS)) yapısında kanal kayıplarının hesaplanması da 2.2.3 bölümünde verilmektedir. VLC sisteminin diğer ana bileşenleri olan Fiziksel Katman ve Medya Erişim Kontrolüne ilişkin detaylı bilgi 3 numaralı bölümde verilmektedir.

2.2.1 LED yapısı ve çalışma prensibi

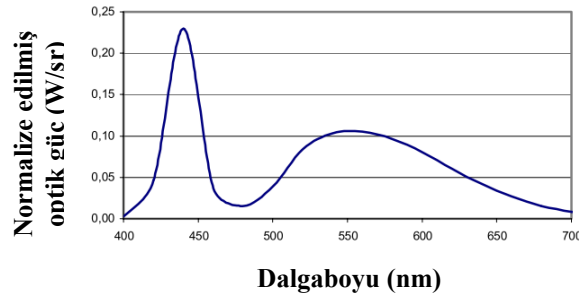
Işık yayan diodlar PN eklemli yarı iletkenler kullanılarak üretilmektedir. LED bir PN eklemli yarıiletken olarak, ileri kutuplandığında enerjisini fotonlar şeklinde açığa çıkararak ışık yaymaktadır [32]. Bu etki elektrolüminesans olarak adlandırılmaktadır. LED'leri diğer diyodlardan ayıran özellikleri ışımaya kombinasyonları için dizayn edilen bant aralıklarıdır.



Şekil 2.8: LED PN-eklemli kutuplaması ve enerji bantları gösterimi [32].

LED'in çalışma prensibini kısaca açıklayacak olursak; N-tip ve P-tip malzemelerin birleştirilmesi ile, Fermi seviyeler (W_f) hizalanır ve dışarıdan bir gerilim uygulanmasa da enerji bariyeri üretirler. Yapısında iki enerji bandı mevcuttur, iletim bandı ve değerlik bandı, bu bantlar W_g genişliğinde yasak bir bölge ile birbirinden ayrılırlar. İletim bandında, atomlara bağlı olmayan elektronlar serbest olarak hareket ederler [32]. Değerlik bandında ise birbirine bağlı olmayan delikler mobildir ve pozitif yüklüdürler. N bölgesindeki serbest elektronlar dışarıdan bir enerji olmazsa bariyeri aşamazlar; bu durum bariyeri aşamayan delikler için de geçerlidir. Yeterli enerji (eV) uygulandığında, serbest bir elektron bariyeri geçerek, daha düşük enerji seviyesine atlar ve delikle birleşerek fotonlar şeklinde enerji yayılmasını sağlar.

Şekil 2.9'da beyaz LED'in normalize edilmiş optik spektrumu verilmiştir. Soldaki tepe mavi LED'den kaynaklanmaktadır, geniş olan sağ yayılım ise sarı fosfordan kaynaklanmaktadır [33].



Şekil 2.9: 1 W/sr beyaz LED'in normalize edilmiş optik güç spektrumu [33].

LED tiplerine ilişkin bilgi bölüm 2.3'te verilmektedir.

2.2.1.1 LED'in ilettiği güç ve spektral yoğunluğun hesaplanması

Bu bölümde LED parametreleri incelenerek, LED'in ilettiği güç ve spektral yoğunluğu hesaplanacaktır. Eşitlik (2.1) güç spektral dağılımı $S(\lambda)$ (W/nm) fonksiyonunun, Φ_v (lm) akısı ile bağıntısını vermektedir. LED'in toplam aydınlatma akısı F_t (lümen) [34] (555 nm'de 1 watt = 683.0 lümen);

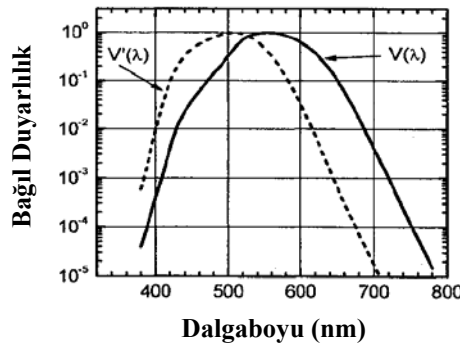
$$F_t = 683 \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_t(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

$V(\lambda)$, Uluslararası aydınlatma komisyonu (International Commission on Illumination (CIE)) tarafından belirlenen bağıl aydınlatma verimliliği fonksiyonudur, fonksiyonun değeri Çizelge 2.3'te ve Şekil 2.10'da verilmiştir.

Çizelge 2.3: $V(\lambda)$ fonksiyonunun değeri

Dalgaboyu (nm)	Fotopik Aydınlatma Verimliliği $V(\lambda)$	Dalgaboyu(nm)	Fotopik Aydınlatma Verimliliği $V(\lambda)$
380	0.00004	580	0.870
390	0.00012	590	0.757
400	0.0004	600	0.361
410	0.0012	610	0.503
420	0.0040	620	0.381
430	0.0116	630	0.265
440	0.023	640	0.175
450	0.038	650	0.107
460	0.060	660	0.061
470	0.091	670	0.032
480	0.139	680	0.017
490	0.208	690	0.0082
500	0.323	700	0.0041
510	0.503	710	0.0021
520	0.710	720	0.00105
530	0.862	730	0.00052
540	0.954	740	0.00025
550	0.995	750	0.00012
560	0.995	770	0.00003
570	0.952		

[31].



Şekil 2.10 $V(\lambda)$ fonksiyonu değeri [34].

Genellikle $V(\lambda)$ fonksiyonu için uygun olan Gaussian eğrisi kullanılmaktadır [31].

$$V(\lambda) \cong 1.019 e^{-285.4(\lambda - 0.555)^2}, \lambda: \mu m \quad (2.2)$$

(2.1) denkleminde $S_t(\lambda)$ yerine sadece normalize edilmiş spektral eğri $S_t'(\lambda)$ fonksiyonu bilinmektedir. İki fonksiyonun aralarındaki ilişki $S_t(\lambda) = c_t S_t'(\lambda)$ eşitliği ile sağlanmaktadır, c_t bilinmeyen ölçekleme faktörüdür ve aşağıda verilen denklemden hesaplanmaktadır [31].

$$F_t = c_t 683 \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_t'(\lambda) V(\lambda) d\lambda \longrightarrow c_t = \frac{F_t}{683 \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_t'(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (2.3)$$

$$S_t(\lambda) = c_t S_t'(\lambda) \quad (2.4)$$

$$P_t = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_t(\lambda) d\lambda \quad (2.5)$$

$S_t(\lambda)$ değeri spektrometre ile ölçülebiliyorsa veya LED üreticisi tarafından verilmişse $S_t(\lambda)$ fonksiyonunun hesaplanması için kullanılan (2.3) ve (2.4) deklemleri kullanılmamaktadır.

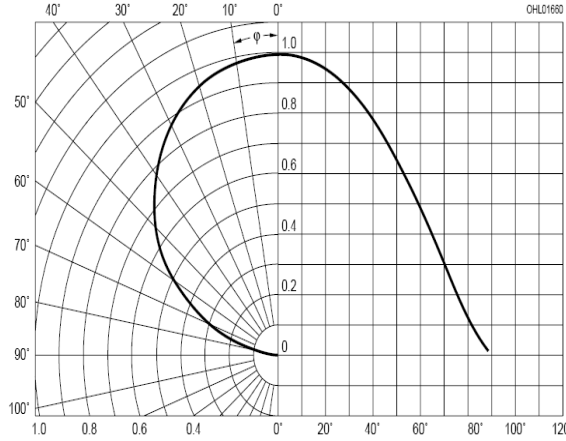
2.2.1.2 Vericinin ışık mekansal yoğunluk dağılımı $I_0 \text{gt}(\theta)$ 'ın hesaplanması

Normalize edilmiş mekansal aydınlatma şiddeti dağılımı $g_t(\theta)$ LED üreticileri tarafından verilen bir değerdir. Eksenel şiddet I_0 'ın değeri ise aşağıdaki formülden hesaplanmaktadır. Aydınlatma akısı F_t ise mekansal aydınlatma şiddetinin integrali ve daha önce kullanılan spektral integral üzerinden hesaplanmaktadır [31].

$$F_t = \int_0^{\Omega_{\max}} I_0 * g_t(\theta) d\Omega = I_0 \int_0^{\theta_{\max}} 2\pi g_t(\theta) \sin \theta d\theta \quad (2.6)$$

$$\longrightarrow I_0 = \frac{F_t}{\int_0^{\theta_{\max}} 2\pi g_t(\theta) \sin \theta d\theta} \quad (2.7)$$

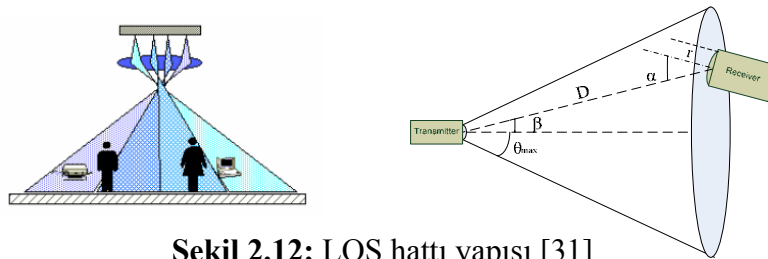
Ω_{\max} ve θ_{\max} , sırasıyla kaynak demeti katı açısı ve maksimum yarı açıdır. Katı açı, $\Omega_{\max} = 2\pi(1 - \cos\theta_{\max})$ denklemi ile hesaplanmaktadır. ayrıca eğer eksenel şiddet değeri üretici tarafından sağlanırsa, yapılacak işlem sadece verilen şiddet değerini mum biriminden (candelas)'dan watts/sr'e çevirmek olacaktır.



Şekil 2.11: Normalize edilmiş mekansal aydınlatma şiddeti dağılımı eğrisi [31].

2.2.2 Kanal kayıpları

Bu bölümde, görüş hattı (LOS hattı) modelinde ışık yayılımına göre kanal kayıplarının hesaplanması ile ilgili bilgi verilecektir.



Şekil 2.12: LOS hattı yapısı [31].

Yukarıdaki şekilde; alıcı mesafesi (D), alıcı açıklık yarıçapı (r) ve alıcı alanı A_r , alıcı normali ve kaynak-alıcı hattı arasındaki açı α , kaynak demet eksenini ve kaynak-alıcı hattı (görüş açısı) arasındaki açı β ve kaynağın gördüğü alıcının katı açısı Ω_r olarak verilmiştir. Alıcı yönündeki kaynağın aydınlatma açısal şiddeti $I_{0gt}(\beta)$ 'dir ve bu nedenle alıcı tarafından yutulan aydınlatma akısı;

$$F_r = I_{0gt}(\beta) \Omega_r \quad (2.8)$$

denklemini ile hesaplanmaktadır.

Buradan hareketle aydınlatma yol (kanal) kaybı aşağıda verilen denklemle hesaplanmaktadır [31].

$$L_i = \frac{F_r}{F_t} = \frac{I_{0gt}(\beta) \Omega_r}{D^2 \int_0^{\theta_{max}} 2\pi g_t(\theta) \sin \theta d\theta} \approx \frac{g_t(\beta) A_r \cos \alpha}{D^2 \int_0^{\theta_{max}} 2\pi g_t(\theta) \sin \theta d\theta} \quad (2.9)$$

Yukarıdaki denklemde Ω_r , alıcı katı açısıdır ve $A_r \cos(\alpha) \approx D^2 \Omega_r$ koşulunu sağlamaktadır. Buradan hareketle aşağıda verilen işlemler sonucunda yol (kanal) güç kaybı L_p 'nin aydınlatma yol kaybı (L_L)'na eşit olduğu sonucunu çıkarabiliriz.

Optik gücü;

$$P = \int_{\lambda_L}^{\lambda_H} S(\lambda) d\lambda \quad (2.10)$$

şeklinde yazdığımızda, LOS hattında serbest uzayda yayılımında, yol kaybının dalga boyundan bağımsız olduğunu kabul edersek, yol güç kaybı;

$$L_p = S_2(\lambda)/S_1(\lambda) = P_2/P_1 \quad (2.11)$$

denklemini ile hesaplanmaktadır. Aydınlatma akısı, $S(\lambda)$ fonksiyonu ile bağlantılıdır ve aşağıdaki denklemden de görülmektedir ki aynı zamanda $S(\lambda)$ ile doğrusaldır.

$$F = 683 \text{lm/W} * \int_{\lambda_L}^{\lambda_H} S(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2.12)$$

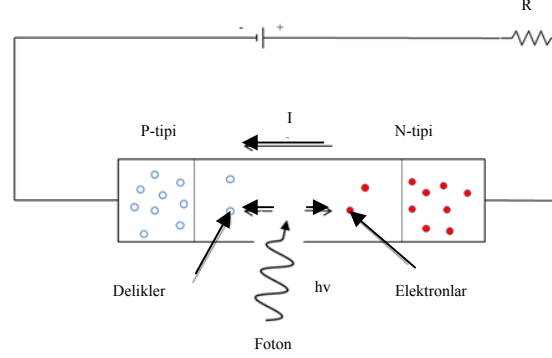
Buradan hareketle, eşitlik;

$$L_L = F_2/F_1 = L_p \quad (2.13)$$

şeklinde gösterilebilmektedir [31].

2.2.3 Fotodiod yapısı

Fotodiod, foto-iletim olarak adlandırılan prensip ile çalışmaktadır. Bir çeşit fotodedektördür ve üzerine gelen ışığı akıma veya voltaja çevirebilmektedir [32,35].



Şekil 2.13: Temel kutuplama ve fotodiodun yapısı [32].

Fotodiodun çalışma modları kısaca; foto-voltaik mod ve foto-iletim modu olarak tanımlanmaktadır. Fotodioda dışarıdan bir voltaj uygulanmadığında foto-voltaik modda çalışmaktadır, bu modda üretilen foto-akım sabittir ve aynı zamanda üzerine gelen ışığın seviyesine doğrusal olarak bağımlıdır [32]. Foto-iletim modunda ise, diod ters kutuplanmıştır (katod ucu pozitif ve anod ucu negatif) ve bu durumda yalıtım bölgesinin genişliği artmakta ve eklem kapasitans değeri düşmektedir. Bu durumda daha hızlı tepki zamanı ortaya çıkmaktadır. Ancak bu modda gürültü ve koyu akımların etkisi daha fazla olmaktadır [32, 34, 36].

2.2.3.1 Alınan optik ve elektriksel gücün hesaplanması

LOS yayılımının olduğu bir ortamda yol kaybı hesaplandıktan sonra, alınan optik spektral yoğunluk, vericinin optik spektral yoğunluğu kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$S_r(\lambda) = L_p S_t(\lambda) = L_L S_t(\lambda) \quad (2.14)$$

Alınan optik güç aşağıda verilen denklem üzerinden hesaplanmaktadır.

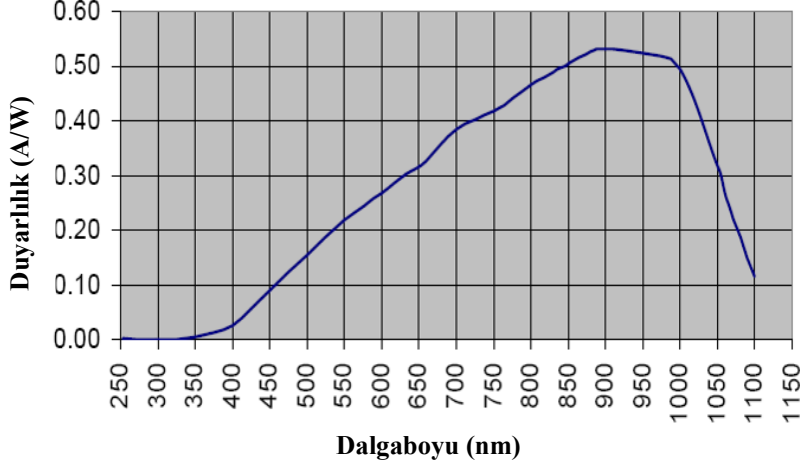
$$P_{r,o} = \int_{\lambda=\lambda_{rL}}^{\lambda=\lambda_{rH}} S_r(\lambda) \cdot R_f(\lambda) d\lambda \quad (2.15)$$

Sistem tasarımında ışık sinyalini almak için bir fotodiod dedektör olarak kullanıldığında, sinyalin elektriksel gücü aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.

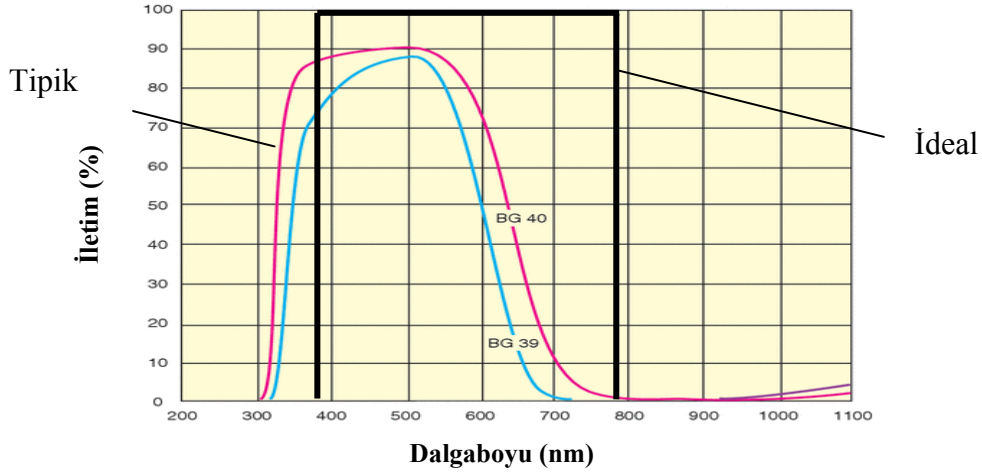
$$P_{r,e} = \left[\int_{\lambda=250 \text{ nm}}^{\lambda=1150 \text{ nm}} S_r(\lambda) \cdot R_f(\lambda) \cdot R_d(\lambda) d\lambda \right]^2 \cdot R_L \quad (2.16)$$

Burada $S_i(\lambda)$ alınan ışık güç spektral yoğunluğu (W/nm), $R_f(\lambda)$ alıcı filtre spektral tepkisi, $R_d(\lambda)$ dedektör duyarlılığı (λ dalgaboyunda A/W)'dir [31].

$$R_D(\lambda) = \frac{\eta q \lambda}{h c} \quad (2.17)$$



Şekil 2.14: Spektral Tepki [31].



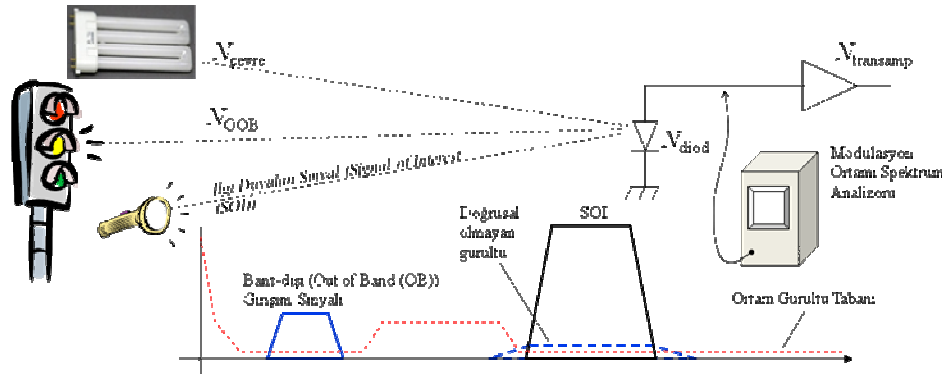
Şekil 2.15: Örnek Optik Filtre Tepkisi [31, 37].

Özet olarak; alınan optik güç ve elektriksel gücün hesaplanması aşamasında, verilen F_t aydınlatma akısı (lümen) ve normalize edilmiş spektral eğri $S_i'(\lambda)$ kullanılarak vericinin (kaynak) optik gücü hesaplanmaktadır. Vericinin eksenel şiddeti I_0 , verilen değer aydınlatma akısı F_t ve aydınlatma mekansal şiddeti dağılımı $g_i(\theta)$ kullanılarak hesaplanmaktadır. Alıcı tarafından yutulan aydınlatma akısı F_r , alıcı katı açısı ve verici aydınlatma mekansal şiddet dağılımı $I_0 g_i(\theta)$ kullanılarak hesaplanmaktadır. Aydınlatma yol kaybı L_L , F_t ve F_r kullanılarak hesaplanmaktadır. Yol kaybı L_p 'nin

aydınlatma yol kaybı L_L 'ye eşitliği ispatlandıktan sonra, alınan optik güç spektral eğrisi $S_r(\lambda)$ kullanılarak alınan optik güç ve elektriksel güç hesaplanmaktadır [31].

2.2.3.2 Alıcıdaki gürültü yoğunluğu (N_0)'nun hesaplanması

Alıcıdaki gürültü yoğunluğuna sebep olan faktörler; fotodetektör gürültüsü, yükselteçten kaynaklanan gürültü, ortamın bant-İçi gürültüsü, fotodetektörün doğrusal olmamasından kaynaklanan bant-dışı çapraz modülasyon gürültüsü ve diğer gürültü kaynakları olarak tanımlanmaktadır [31].

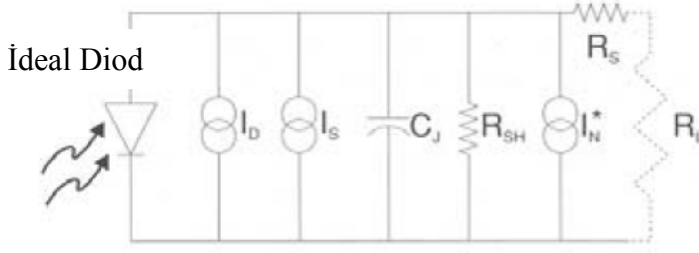


Şekil 2.16: Modülasyon ortamı spektrumu [31].

Ortam bant-İçi gürültü tabanı farklı ortamlar için deneysel olarak ölçülmek zorundadır. İletilen sinyale diğer VLC sinyallerinin girişimi nedeniyle oluşan bant-dışı çapraz modülasyon gürültüsü hesaplamada dikkate alınmamaktadır. Ayrıca kullanılan dedektörün de N_{diode} (W/\sqrt{Hz}) gürültü yoğunluğu mevcuttur [31].

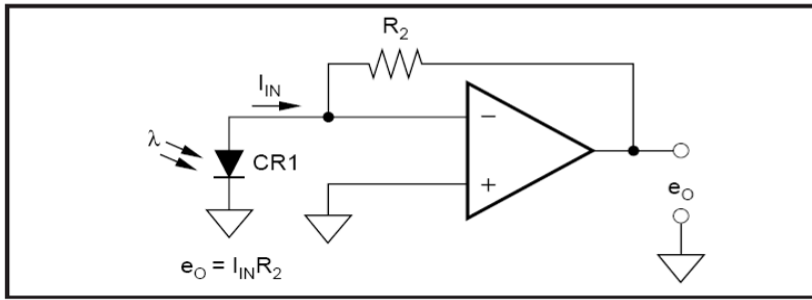
$$i_{npd} = \sqrt{i_{shot}^2 + i_{thermal}^2} = \sqrt{2q(I_D + I_S + I_B) + \frac{4kT}{R_{SH}}} \quad (A/\sqrt{Hz}) \quad (2.18)$$

Yukarıdaki denklemde I_D koyu akımları, I_S gelen ışığın akımını ($I_S=RP_0$ (2.19)), I_B arka plandaki ışık tarafından endüklenen akımı, q elektron yükünü ($1.6e-19$ coulombs), B bantgenişliğini (N_0 için $B=1$ Hz), k Boltzmann sabitini ($1.38e-23$ J/K), T Kelvin cinsinden sıcaklık değerini ($\sim 290^\circ$ K), R_{SH} şönt direncini tanımlamaktadır. Aşağıdaki şekilde ise kullanılan dedektör modeli verilmiştir. Devrede C_J eklem kapasitansı, R fotodiyodun parlama dalgaboyunda duyarlılığı, P_0 (Watt) ise fotodiyodun aktif alanında algılanan gelen ışığın gücü, I_N^* gürültü akımı, R_S seri direnç, R_L yük direncidir.



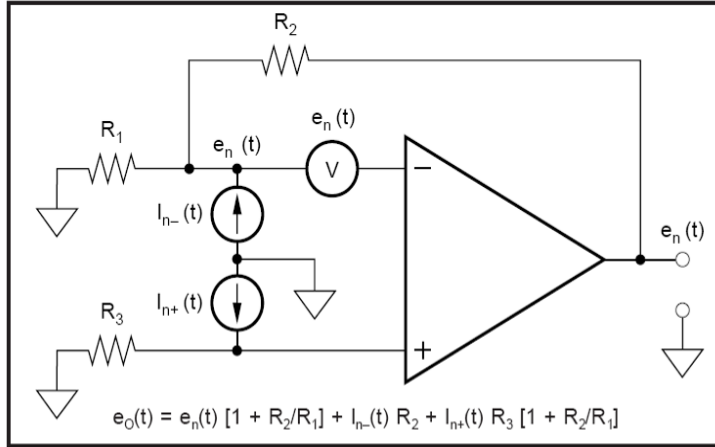
Şekil 2.17: Kullanılan dedektör modeli [31].

Alan etkili transistör (field effect transistor (FET)) transempedans yükselteçlerin gürültü analizlerinde kullanılan basit bir fotodiyod uygulaması Şekil 2.18’de verilmiştir [38].



Şekil 2.18: Pin fotodiyod uygulaması [38].

Yukarıda verilen devre kullanılarak aşağıda yer alan gürültü denklemi elde edilmektedir [38].

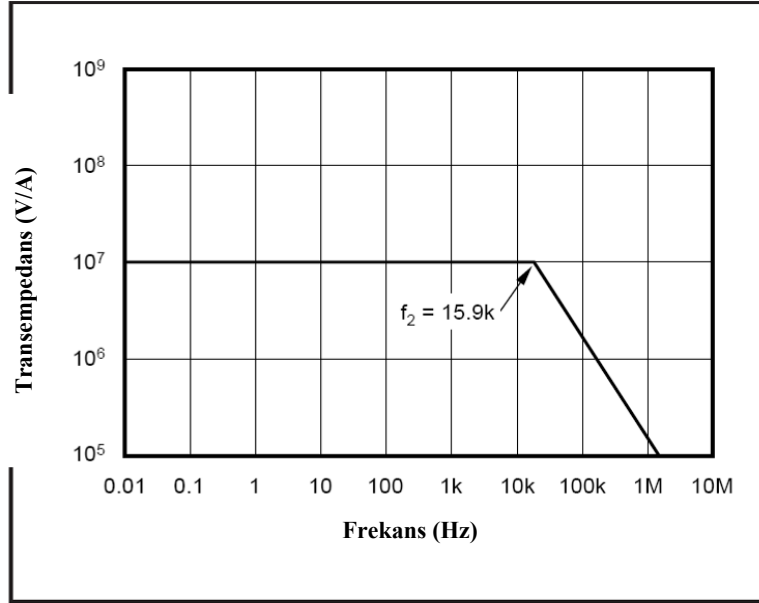


Şekil 2.19: Devrenin hata kaynakları ile gösterimi [38].

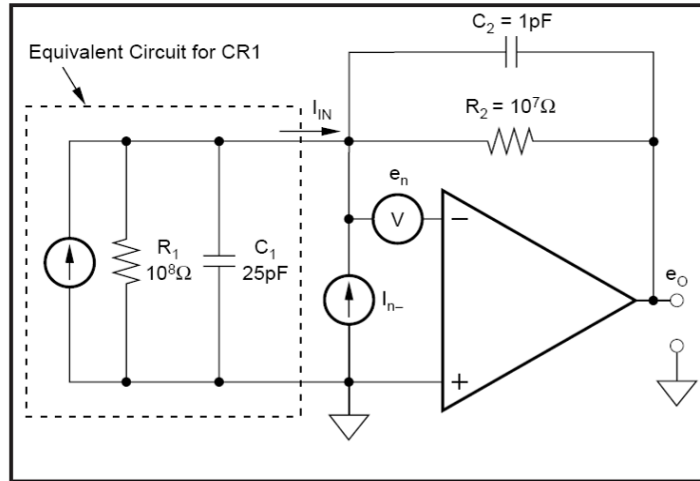
İşlemsel yükselteçlerin iç gürültü kaynakları normalde birbiriyle bağlantılı değildir. Zaman içinde rastgele birbirleriyle bağlantılı olurlar ve sistematik faz bağlantıları da mevcut değildir. Genel olarak, gürültüden kaynaklanan hataların hesaplanmasında, gürültü kaynakları belirlenir, uygun gruplara ayrılarak (gürültü spektral

yoğunluğunun şekline göre) her bir grubun rms değeri hesaplanır ve karelerinin toplamının kök değeri alınarak toplam gürültü değeri hesaplanır.

$$N_{TOPLAM\ rms} = \sqrt{N_1^2\ rms + N_2^2\ rms + N_3^2\ rms} \quad (2.19)$$



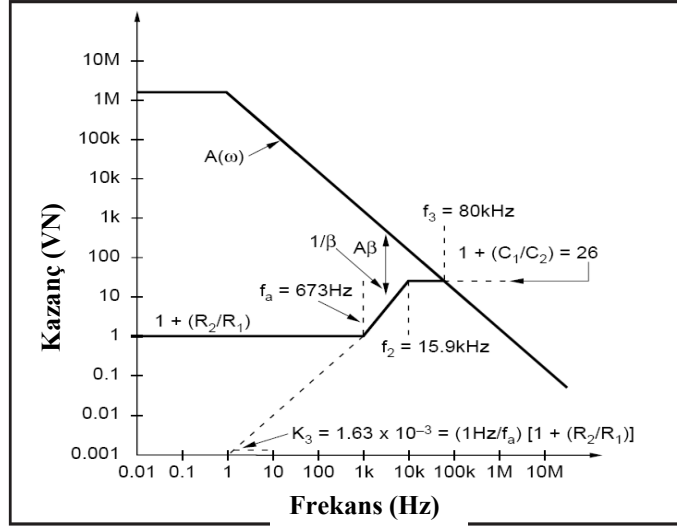
Şekil 2.20: Transempedans [38].



Şekil 2.21: Fotodiyod uygulamasının gürültü modeli [38].

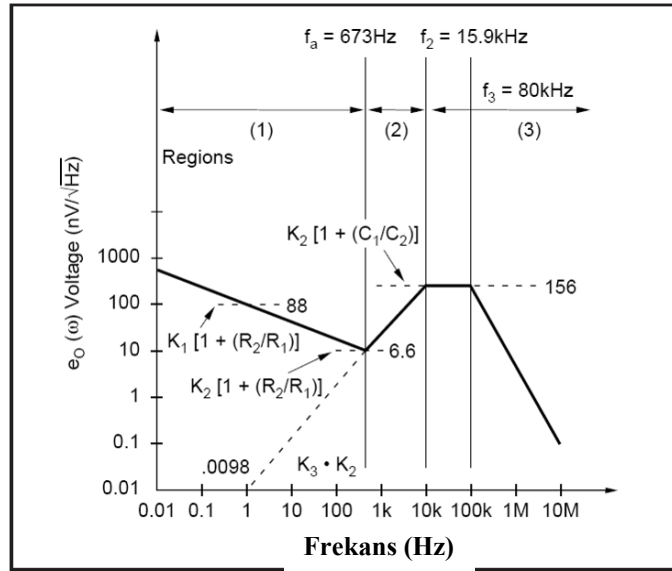
Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi dirençler ve kapasitörler kritik köşe frekanslarını oluşturmaktadır.

$$f_2 = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \quad (2.20)$$



Şekil 2.22: Gürültü voltaj kazancı [38].

$$f_a = \frac{1}{2\pi(R_2 \parallel R_2)(C_1 \parallel C_2)} \quad (2.21)$$



Şekil 2.23: Çıkış voltajı gürültü spektral yoğunluğu [38].

Op-amp'ların üç gürültü bölgesi vardır. TI OPA111 model op-amp için gürültü bölgeleri aşağıda gösterilmiştir. VLC sistemlerinde dış mekan uygulamalarının bant-geçiren sistem olarak üç numaralı gürültü bölgesinde çalışması beklenmektedir.

Çizelge 2.4: TI OPA111 op-amp için gürültü bölgeleri [38].

Gürültü	TI OPA228 gürültü bölgeleri	90	15	3.5	3	3	0.4	* * * * *	nVp-p nVrms nV/sqrt(Hz) nV/sqrt(Hz) nV/sqrt(Hz) pA/sqrt(Hz)
Giriş Voltajı Gürültüsü, f=0,1 Hz to 10 Hz)									
Giriş Voltajı Gürültü Yoğunluğu, f=10 Hz f=100 Hz f=1 kHz									
Mevcut Gürültü Yoğunluğu, f=1 kHz									

Yaklaşık çıkış gürültü değeri aşağıda verilen denklemler kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$N_0 = N_0^{n3} + N_0^R + N_0^{in} \quad (2.22)$$

$$N_0^{n3} = K_z^2 \cdot \left(1 + \frac{C_z}{C_2}\right)^2 \quad (2.23)$$

$$N_0^R = 4kTR_2 \quad (2.24)$$

$$N_0^{in} = (i_{nosp}^2 + i_{npsd}^2)R_2^2 = (i_{nosp}^2 + 2q(I_D + I_S + I_B) + 4kT/R_{SH})R_2^2 \quad (2.25)$$

Sinyal akımı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$I_{sig} = \int_{\lambda=\lambda_{rL}}^{\lambda=\lambda_{rH}} S_r(\lambda) \cdot R_r(\lambda) \cdot R_D(\lambda) d\lambda \quad (2.26)$$

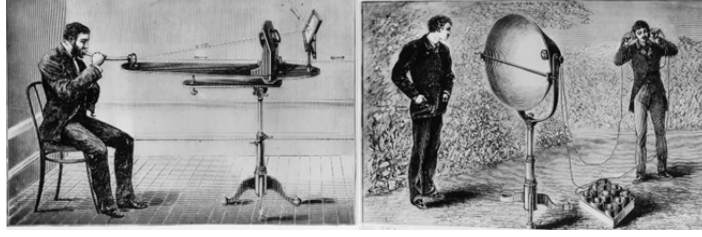
Bu durumda elektriksel SNR değeri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{\left(R_z \int_{\lambda=\lambda_{rL}}^{\lambda=\lambda_{rH}} S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot L(\lambda) d\lambda\right)^2 / Oran}{K_z^2 \left(1 + \frac{C_z}{C_2}\right)^2 + 4kTR_2 + (i_{nosp}^2 + 2q(I_D + I_S + I_B) + 4kT/R_{SH})R_2^2} \quad (2.27)$$

2.3 Görünür Işıqla Yeşil Haberleşme Teknolojisinde LED Tabanlı İç Mekan Uygulamaları

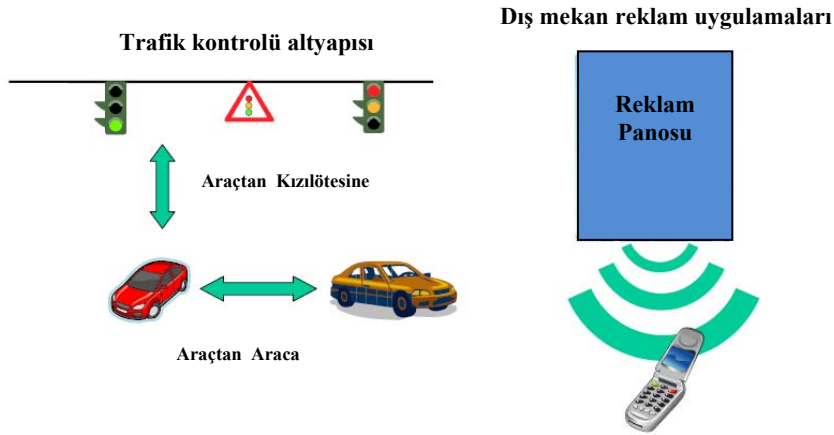
2.3.1 Birleşik aydınlatma ve haberleşme

Işık endüstrisinin tarihi, 1879 yılında Edison'un akkor haline gelmiş karbon filamanı kullandığı 13,5 saat süren ilk aydınlatma testine dayanmaktadır. Araştırmacılar 1879'dan günümüze kadar aydınlatma cihazlarının ömrünü, parlaklığını ve verimliliğini artırmak konusunda çalışmalarını sürdürmektedirler. Yarı iletken teknolojisini kullanan galyum arsenit (GaAs) tabanlı görünür ışık (kırmızı) yayan diod (light emitting diode (LED)) pratik olarak 1962'de denenmiştir. 1880'de, Alexander Graham Bell ve asistanı Charles Tainter güneş ışığının ışınlarını optik kaynak olarak kullanarak veri ileten "Photophone"u icat etmişlerdir. Deneyde modülasyon titreşen ayna, alıcı parabolik ayna olarak kullanılmıştır. Mesafe ise 700 ft (213 m)'dir [16]. Bu buluş VLC sisteminin ilk denemesi olarak tarihe geçmiştir.



Şekil 2.24: Photophone deneyi [39].

1990'ların sonunda kızılötesi spektrum ve 2000'lerin başında görünür ışık spektrumu haberleşme ortamı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde araştırmacılar optik kablosuz haberleşmenin bir kolu olan VLC'nin, yeni nesiller için iç mekan haberleşmesinde ve ağ iletiminde kullanılan enerji verimli bir seçenek olması yolunda çalışmalarını sürdürmektedirler. Ayrıca VLC'nin karbondioksit (CO₂) yayılımlarını azaltması ve çevreyi koruması özelliğinden dolayı iç mekan ve dış mekan uygulamaları ile gelecekte yeşil kablosuz haberleşme kapsamında çok geniş bir potansiyele sahip olacağı değerlendirilmektedir.

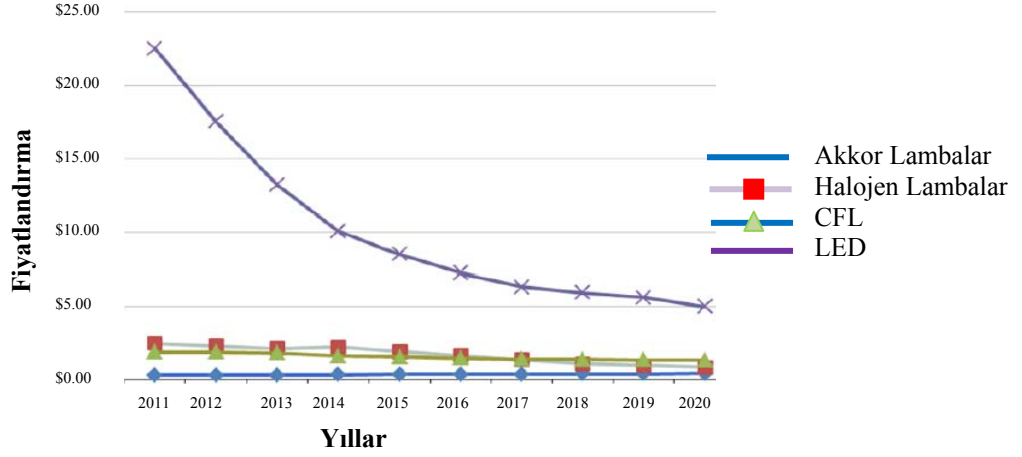


Şekil 2.25: VLC dış mekan uygulamaları [16].

VLC sistem tasarımlarında her çeşit ışık kaynağı verici olarak kullanılabilir. Günümüzde floresan ve akkor lambalar yapay ışık kaynağı olarak çok yaygın kullanılmaktadır ve geleneksel aydınlatma sistemleri modüle edildikleri takdirde aydınlatma ve haberleşme kaynağı olarak çift amaçlı kullanım sağlayabilmektedirler. Ancak VLC sistemlerinde, LED kaynaklar daha verimli olmaları ve yüksek veri gönderme hızları sağlayabilmeleri nedeni ile araştırmacılar için öncelikli seçenek olarak tercih edilmektedirler. Aynı zamanda gelişen VLC teknolojisi ile paralel olarak, aydınlatma endüstrisi de LED teknolojisine geçiş fazındadır. Araştırmacılar dünya çapında LED'lere geçiş fazının yakın zamanda tamamlanacağını tahmin etmektedirler ki bu durumda 560 nükleer santralin kapatılacağını ve yıllık CO₂

tasarrufunun gezegendeki tüm araçların çıktısına eş değer olacağına dikkat çekilmektedir [40]. Yakın zamanda LED'lerin kullanımı ile yeşil enerji anlamında önemli derecede tasarruf edilebileceği değerlendirilmektedir. Ancak LED teknolojisinde; akıllı kontrolörlerin ve güvenilir sürücülerin tasarlanması, renk stabilitesinin sağlanması ve maliyetin düşürülmesi gibi konularda karşılaşılan zorlukların bir an önce çözümlenmesi gerekmektedir. Bir sonraki adımın [41] AC LED'lerden Akıllı Ağ İletimi Aydınlatma (Intelligent Networked Lights) teknolojisine geçiş fazı olacağı değerlendirilmektedir. Bu adımda ışık hizmeti (Light-as-a-Service) adı verilen ve aydınlatma sektöründe örneğine rastlanmamış bir yenilik olacağı değerlendirilen bir sistem söz konusudur ki, bu sistemin ağ iletimi üzerine ışıklar yerleştirilerek tasarlanması planlanmaktadır. Ancak söz konusu geçiş aşamasının zorlu bir basamak olacağı öngörülmekte ve bilgi teknolojisi (Information Technology (IT)) ile çarpışmasının olası olduğu değerlendirilmektedir.

Günümüzde hükümetler enerji tüketiminin azaltılması konusunda anahtar rol üstlenmektedirler. Örneğin US ve UK hükümetleri yakın zamanda güç tüketimi yüksek olan akkor lambaları, florasan lamba ampül/tüpleri verimli, dayanıklı ve güç tüketimi düşük olan LED'ler ile değiştirme kararı almıştır. Verimliliği yaklaşık olarak 15 lm/W olan geleneksel 60–100 W akkor ışık ampülleri ile karşılaştırıldığında LED'ler 150 lm/W değerinde bir verimliliğe sahiptir [42]. Dünyadaki tüm aydınlatma kaynaklarını LED'ler ile değiştirdiğimizde aydınlatma için harcanan toplam küresel güç tüketiminin 50 % oranında azaltılacağı tahmin edilmektedir ki bu oran muazzam bir orandır. Diğer yünden LED'ler halen suni aydınlatma kaynağı olarak öncelikli olarak tercih edilmemektedir ki, bunun sebebi maliyetin üretim aşamasında hala en büyük sorun olmasıdır. Fakat katı-hal teknolojisinin gelişmesi LED ışığın da maliyetinin hızlı bir şekilde düşmesini sağlamıştır, bu durum Şekil 2.26'da gösterilmiştir [43]. 60 Watt LED'in fiyatının 2020'de \$5 olması beklenmektedir.



Şekil 2.26: 60 Watt LED fiyat trendi [43].

Katı hal aydınlatma teknolojisinin verimlilik potansiyeli yalnızca LED'lerin doğasından kaynaklanmamaktadır. Araştırmacılar LED teknolojisinin spektral bileşen özelliklerinin, polarizasyonunun ve temporal modülasyonunun kontrol edilmesi ile LED aydınlatma ile yapılan uygulamalara akıllı metodların entegre edilmesi üzerine çalışmaktadırlar. Örneğin; sabit fonksiyonlu LED sürücülerden kendinden karartma kontrollü, renk karıştırıcı özellikli, adaptif aydınlatma kontrollü ve hatta uzaktan bağlantı özellikli akıllı mikrokontrolör tabanlı yapılara yakın zamanda geçilmesi planlanmaktadır [44]. Enerji ölçümü, ortam aydınlatmasına duyarlılık ve haberleşme özellikleri akıllı LED aydınlatma sistemleri tasarımlarında dönüm noktası olarak nitelendirilmektedir. LED teknolojisi ile çok yüksek miktarda enerji giderinin kurtarılacağı ve işletme giderlerinin düşürüleceği, kablosuz iletişimin insan sağlığına olan zararlarının giderileceği ve çalışanın üretkenliğinin artırılacağı değerlendirilmektedir. Ancak katı-hal aydınlatma sistemlerinin spektral yönetiminin geliştirme fazında, ilave olarak kullanılan materyallerde, cihazlarda ve kontrol sistemlerinde de gelişmiş tasarımlara ihtiyaç duyulacağı değerlendirilmektedir. Bunun yanında ışığın spektral içeriğinin insan psiko-fizyolojik durumuna etkisi üzerine de daha fazla araştırma yapılması gerektiği de değerlendirilmektedir [45].

Geleneksel akkor lamba ve florasan ışık kaynaklarının enerji verimli LED'ler ile değiştirilmesi uzun vadede planlanan önemli bir atılımdır, aynı zamanda LED'lerin geliştirme süreçlerinde üstesinden gelinmesi gereken bir çok zorluk da bulunmaktadır. Diğer yönden VLC ticari uygulamalarının bir an önce hayata geçirilmesi de gerekmektedir. Ve gerçek şu ki LED teknolojisinde maliyetler daha önce de belirtildiği gibi en önemli sorun olmaya devam etmektedir ki, bu da florasan

aydınlatmanın tamamen ortadan kaldırılana dek kullanılmaya devam edileceği anlamına gelmektedir. Bu nedenle araştırmacılar VLC sistem tasarımlarında mevcut aydınlatma kaynaklarını da kullanarak veri iletmenin yollarını aramışlardır.

2.3.1.1 Akkor lambalar, florasan lambalar ve LAZER diod ışık kaynakları ile yapılan uygulamalar

Suni aydınlatma günümüzde akkor lambalar ve florasan lambalar gibi mevcut ticari aydınlatmalar ile sağlanmaktadır. Akkor lambaların ortalama 1000 saat ömrü vardır ve sadece tükettiği enerjinin 5 %'ini ışığa dönüştürürler [40], bu nedenle VLC uygulamalarında tercih edilmezler ve bir çok hükümet enerji sarfiyatını önlemek amacıyla dünya çapında akkor lambaların kullanımının durdurulması eğilimi göstermektedir [15]. Florasan ampuller 10,000 saat ömre sahiptir ve 20 % - 25 % kadarlık enerjilerini ışığa dönüştürürler, bu nedenle akkor lambalara göre kullanımları daha çok tercih edilir [40]. Fakat florasan ampüllerin verimliliği çalışmaları için ihtiyaç duydukları cıva buharı nedeniyle düşmektedir ve ayrıca ampulün kırılması durumunda cıvanın toksisitesinden dolayı potansiyel sağlık risklerine neden olabilirler [15]. Her ne kadar florasan ampuller bu tip sistemler için aydınlatma ihtiyaçlarını karşılarsa da, kompakt florasan lambaların LED'lere göre mevcut düşük verimlilik değerleri (yaklaşık 100 lm/W) nedeniyle, araştırmacılar florasan aydınlatma kaynaklarını VLC tasarımlarında tercih etmemektedirler. Araştırmacıların florasan lambaları tercih etmemesinin bir diğer sebebi de LED lambaların hızlı gelişim süreçleri konusundaki beklentileridir. Ancak literatürde florasan lambaların kullanıldığı ve florasan aydınlatma haberleşmesi (fluorescent light communication (FLC)) olarak adlandırılan sınırlı sayıda [46,47,48] çalışma mevcuttur.

Florasan lambalar kullanıldıklarında, yüksek oranda çakışan optik spektrumları VLC sistemleri üzerinde çok ciddi etkilere sebep olabilir. Çok fazla üzerinde durulmayan kritik bir sorun ise suni ışığın girişimidir ve florasan lamba girişimi (fluorescent light interference (FLI)) olarak adlandırılır, aslında LED'lerle karşılaştırıldığında florasan ışık kaynaklarının nispeten düşük olan bantgenişliğinden kaynaklanan bu girişim kızılötesi kablosuz haberleşme kapsamında üzerinde önemle durulan bir konudur. Bu konuda yapılan çalışmalarda pratik olarak rapor edilen en yüksek veri hızları sırasıyla beyaz ve mavi LED'ler için 150 ve 140 Mb/s'dir, deneyde açma kapama anahtarlama sıfıra dönüşüz (on-off keying non-return-to-zero (OOK-NRZ))

modülasyon kullanan basit bir link ve bir pin fotodetektör kullanılmıştır [49]. Dalgacık dönüşümü ve yapay sinir ağları tabanlı alıcı tasarımı FLI etkisini azaltmak amacıyla kullanılmıştır ve bit hata oranı olarak BER $<10^{-6}$ değeri elde edilmiştir. VLC sistemlerinde FLI etkisini azaltma teknikleri literatürde çok fazla yer almamakla birlikte akademik anlamda üzerinde durulması gereken bir sorun olarak göze çarpmaktadır. Ayrıca sınırlı modülasyon bantgenişliğinden kaynaklanan iç sembol girişimi (intersymbol interference (ISI)) problemi de üzerinde çalışılması gereken konulardan bir diğeridir.

Lazer diodlar (LD), LED'ler ile karşılaştırıldığında yüksek modülasyon bant genişliği avantajına sahiptir ve bu nedenle alıcının gücü çok daha azdır. Ayrıca lazerin dar hat genişliğine sahip ışını optik filtrelerin kullanılmasına olanak sağlar ve ortam gürültüsü daha fazla elimine edilebilir. Güvenlikle ilgili düzenlemeler nedeniyle LD'lerin VLC sistemlerinde kullanımına ilişkin az sayıda çalışma mevcuttur. Örneğin; kırmızı lazer kaynağı LED ile entegre edilerek, ışığın veri hızı, kapsama alanı ve renklendirme performansını geliştirmek amacıyla VLC sistemlerinde kullanılmıştır [50]. 120 Mbit/s veri hızı, VLC vericisi olarak kenar-yayımlı lazer diod ve alıcı olarak silikon fotodiod kullanılarak elde edilmiştir [51]. Ayrıca bir başka çalışmada, direkt olarak modüle edilmiş 422 nm galyum-nitrür (GaN) lazer diode kullanılarak, serbest uzayda VLC sistemlerinde 2.5 Gbit/s hıza ulaşılmıştır ve 1.4 GHz bantgenişliği ölçülmüştür [52]. Lazer diodların dış mekan VLC uygulamalarında, duyarlılığı yüksek fotodiodların alıcı olarak kullanılması durumunda yüksek hızlara ve uzun mesafelere ulaşmak için iyi birer aday olacağı değerlendirilmektedir.

2.3.1.2 LED-tabanlı görünür ışıkla haberleşme sistemi uygulamaları

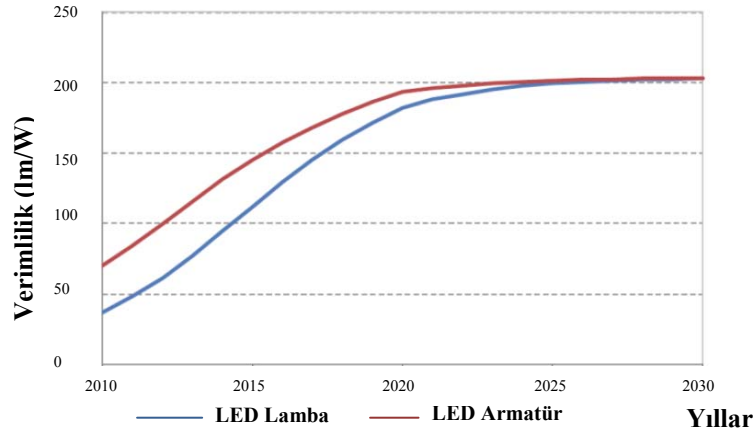
Geleneksel aydınlatma kaynakları, ışık üretmek için ısı kullanmaları nedeniyle önemli miktarda kaynak israfına sebep olurlar, bu nedenle aydınlatma endüstrisi LED'leri soğuk ışıklar olarak adlandırmaktadır. LED'lerin ilk modelleri gösterge ışıklarında ve 7 bölümlü ekranlarda kullanılmıştır, ancak kullanılan LED'lerin maliyetleri yüksek ve parlaklıkları yeterli değildi. İlk olarak optik haberleşme sistemlerinde (optical communication systems (OCS)) kullanılan parlaklık değeri artırılmış LED'ler 1976 yılında üretilmiştir. Fakat aydınlatmayı OCS ile birleştirerek iki teknolojiyi kaçınılmaz olarak birlikte kullanma fikri ilk olarak Japonya'da 2000 yılında ortaya atılmıştır [53]. Bugünlerde hükümetlerin aydınlatma ile ilgili yaptıkları

düzenlemeleri ve LED'lerin gittikçe düşen maliyetlerini göz önüne aldığımızda, her yıl parlaklık değeri daha da artırılarak üretilen yeni nesil LED'lerin gelecekte geleneksel aydınlatma kaynaklarının yerine geçecek kuvvetli birer aday olduğunu görebiliyoruz. LED'ler aydınlatma amacıyla kullanıldıklarında, mevcut aydınlatma kaynaklarına göre üstün enerji verimliliği karakteristiklerine sahiptirler (30 %), uzun ömürlü (100.0000 saat), küçük boyutlu, geliştirilmiş fiziksel dayanıklılığa sahip, daha hızlı anahtarlama yapabilen, parlaklık değerleri artırılmış, ısı üretimleri minimize edilmiş kaynaklar olarak tanımlanabilirler. Ayrıca diğer aydınlatma teknolojileri ile karşılaştırıldıklarında yalnızca ışık fotonları yaymaları nedeniyle çevreye duyarlıdır ve önemli derecede azaltılmış karbon yayılımına neden olurlar. Daha az ışık kirliliğine sebep olmaları, geliştirilmiş yönelme eğilimleri, bakımlarının kolay olması, akıllı sistemlerle kontrol edilebilmeleri ise diğer avantajlarıdır. LED'lerin, florasan ve akkor lambalar ile karşılaştırılması Çizelge 2.5'de verilmiştir.

Çizelge 2.5: LED'lerin, florasan ve akkor lambalar ile karşılaştırılması [15].

Özellikler	LED	Akkor ampuller	Florasan lambalar
Elektrik kullanımı	6-8 Watt	60 Watt	13-15 Watt
Cıva içeriği	Hayır	Hayır	Evet
RoHS Uyumluluğu	Evet	Evet	Hayır
CO ₂ yayılımı	451 libre/yıl	4500 libre/yıl	1051 libre/yıl
Neme duyarlılık	Yok	Az miktarda	Evet
Ani olarak açılma	Evet	Evet	Hayır
Açma/kapama döngüsü etkisi	Yok	Az Miktarda	Evet
Kırılma	Dayanıklı	Dayanaksız	Dayanaksız
Isı yayılımı	3.4 btu/saat	85 btu/saat	30 btu/saat
Hata Modları	Tipik değil	Az miktarda	Evet

Şekil 2.27 [54], LED lambaların ve LED armatürlerinin ışık verimi gelişim eğrilerini göstermektedir. Görülüyor ki verimleri mevcut durumda yaklaşık olarak 100 lm/W iken, bu değer 2020 yılı itibarıyla 200 lm/W'a ulaşması beklenmektedir. Bu değer akkor lambaların yaklaşık olarak 20 lm/W, kompakt florasan lambaların yaklaşık olarak 100 lm/W olan verimlilik değerleri göz önüne alındığında oldukça yüksek bir değer olarak göze çarpmaktadır.



Şekil 2.27: LED'lerin ve LED armatürlerinin ışık verimi gelişim eğrileri [54].

Günümüzde LED üreticileri, LED'lerin sınırlarını zorlamaya devam etmektedir ve özellikle bu alanda enerji verimliliği konusundaki çalışmalar önem kazanmıştır. Araştırmacılar LED'leri soğuk tutmak için yeni termal yönetim sistemleri tasarlamak, daha verimli ve güvenilir sürücüler geliştirmek, basitleştirilmiş LED cihaz üretimi teknikleri uygulamak, daha iyi karartma kontrolü sağlamak, renk kontrolü ve ayarlama yeteneklerini geliştirmek üzerine çalışmalarını sürdürmektedir. Ayrıca yeni optik dizaynlar ile, aydınlatma ortamında ihtiyaç duyulan ancak geleneksel ışık kaynakları ile mümkün olmayan ışığı yönlendirme işlevi ve verimli ışık çıkışı için teorik limitlerin belirlenmesi çalışmaları da günümüz LED teknolojisinin geliştirilmesinde anahtar konulardır. Fakat LED performansını etkileyen öncelikli faktör üretimden kaynaklanan varyasyonlar, sıcaklığın etkileri ve yaşlanmadır.

Ayrıca, LED üreticileri bileşik aydınlatma ve haberleşme fikrinden etkilenerek, LED'lerin aydınlatma karakteristiklerini etkilemeden LED'lere haberleşme yeteneği kazandırarak VLC sistemlerinin ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde gelecek nesil LED'leri tasarlamak için de yeni yöntemler denemektedirler. Katı hal aydınlatma teknolojisinin hızlı gelişimi ile paralel olarak, özellikle LED'lerin kullanılması ile birlikte VLC sistemlerinin WiFi'ye yeşil bir alternatif teknoloji olması konusunda çalışmalar sürdürülmektedir. Gelecekte tüm ampullerin yüksek hızda veri gönderen WiFi noktalarına bu tekniği kullanarak enerji verimliliği ile dönüştürmenin mümkün olabileceği değerlendirilmektedir [55]. Bu kapsamda literatürde mevcut LED özelliklerinin haberleşme üzerine etkilerinin incelenmesi, geleneksel LED'lerin kullanımı ile VLC sistemlerinde haberleşme yeteneğinin artırılması ve yeni nesil

LED kapasitelerinin VLC sistemlerinde kullanılması üzerine çalışmalar bulunmaktadır.

Çizelge 2.6: VLC'nin farklı haberleşme teknikleri ile karşılaştırılması [56].

	GPS	RFID	WiFi	QR Code	VLC
Pozisyon kesinliği	Birkaç metre	Birkaç milimetreden birkaç metreye kadar	Birkaç metreden birkaç yüz metreye kadar	Birkaç milimetreden birkaç metreye kadar	Birkaç metre
Ölçme zamanı	Birkaç dakika	Bir saniyeden az	Birkaç saniye	Birkaç saniye	Bir saniyeden az
Ölçme cihazı	GPS alıcı	RFID okuyucu	WiFi telsiz	Görüntü sensörü	VLC alıcı
Veri tabanı	Gereksiz	Gerekli	Gerekli	Gerekli	Gereksiz
İç mekan ve yer altı kullanımı	İmkansız	Olası	Olası	Olası	Olası
Binaların tanınması	İmkansız	Olası	Zor	Olası	Olası
Uygulamalar	Dış mekan	İç/Dış mekan	İç/Dış mekan	İç/Dış mekan	İç/Dış mekan
Yaygın kullanım olasılığı	Dış mekan kullanımı yaygındır.	Tüm mekanlara RFID etiketleri yerleştirilmesi gereklidir.	Tüm mekanlara WiFi baz istasyonları yerleştirilmesi gereklidir.	Tüm mekanlara QR code etiketleri yerleştirilmesi gereklidir.	Tüm mekanlara VLC verici yerleştirilmesi gereklidir. Aydınlatma lambaları verici olarak kullanılır.

Ayrıca geçenlerde Rensselaer Polytechnic enstitüsü tarafından bir LED'in başarılı olarak yüksek-elektron-mobilitesine sahip güç transistörü ile birlikte aynı galyum nitrid (GaN) çip üzerine entegre edildiği açıklanmıştır. Bu tasarımla yeni nesil maliyet etkin ve daha yüksek enerji verimliliğine sahip LED'ler geliştirilmiş olmakla birlikte, bu LED'lerin yeni işlevlerinin ve uygulamalarının aydınlatmanın çok daha ötesinde olacağını umut edilmektedir [57]. Bu uygulama ile LED'in paketlenmesinden kaynaklanan ve yüksek frekanslarda, modüle edilen sinyalleri zayıflatan çeşitli pasif empedanslar elimine edilebilecektir.

LED'in doğrusal olmayan yapısı ve sıcaklık etkileri üzerine yapılan VLC sistemi çalışmaları

LED teknolojisinin hızlı gelişim fazı yanında, araştırmacılar haberleşme amacı için VLC sistemlerini mevcut LED'leri kullanarak da geliştirmeye çalıştılar. Ancak mevcut LED'lerin aydınlatma amaçlı olarak dizayn edilmeleri nedeniyle VLC sistem tasarımlarında haberleşmede istenmeyen durumlarla karşılaştılar. Önemli bir sorun, LED yapısının doğrusal olmaması ve performanslarının artan sıcaklık değerleri ile

önemli derecede düşmesi ve çıkış rengini de etkileyerek cihazın ömrünü azaltmasıdır. Genellikle LED'lerin ortam sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik gösteren çıkışı, sisteme bir sensör ve mikrokontrolör adapte edilerek kompanse edilebilmektedir. Araştırmacılar LED'lerin doğrusal olmayan davranışlarının VLC sistemlerindeki etkilerini analiz etmektedirler. Ancak VLC uygulamalarında mevcut LED'lerin doğrusal olmayan elektro-optik davranışlarını kompanse etmek LED'lerin frekans bağımlılıkları nedeniyle anlamsızdır. Ayrıca LED'ler genel olarak üreticileri tarafından iyi karakterize edilmezler. Karmaşık modülasyon metodlarına ihtiyaç duyulduğunda, tasarımda beyaz LED'lerin statik ve dinamik doğrusal olmayan gerçek davranışlarının etkilerinin elimine edilmesi için LED karakteristiklerinin bilinmesi hususu, vericide ön bozunum sorununun çözülmesi ve alıcıda dengeleme mekanizmasının geliştirilmesi sürecinde önemli bir bilgi haline gelir [58]. Bir tepki modelinde deneysel elektro-optik LED için kesin olarak frekans bağımlılığını ve lineer olmayan davranışları tersine mühendislik modeli ile belirleyebilmek için yapılan çalışma [59]'da sunulmuştur. Bu çalışma ile doğrusal olmayan bozunumun seviyesinin önemli derecede LED tipine ve sinyalin spektral bileşenlerinin mevcut frekans lokasyonlarına bağlı olarak değişkenlik gösterebildiği kanıtlanmıştır. Performansı ve kolay geliştirilen donanımı nedeniyle, en popüler dijital dengeleyici olan Karar Geri Besleme Dengeleyicisi (Decision Feedback Equalizer (DFE)) kullanılan ve doğrusal olmayan 2'nci dereceye kadar Volterra ileri besleme kısmına sahip bir alıcının, etkin olarak verici olarak çalışan LED'in doğrusal olmayan statik ve dinamik davranışlarının etkilerini kompanse edebileceği [60]'de gösterilmiştir. Ayrıca aynı çalışma kapsamında aynı alıcının, verici olarak kullanılan fosfor tabanlı LED'in çok yönlü yayılımdan kaynaklanan ve veri iletim hızı ile artan ISI etkisini iptal edebileceği ve standard DFE kullanımı ile sağlanamayacak olan alınan optik güçte 5 dB'lik bir kazancın da kolaylıkla sağlanabileceği de kanıtlanmıştır.

Bir başka çalışmada, LED'in ve güç amplifikatörünün doğrusal olmayan etkileri belirlendikten sonra optimize edilmiş ayrık çok-tonlu modülasyon tekniği ve uyarlanabilir bit ve güç yükleme algoritmaları kullanılarak [61] 1 Gb/s veri hızı elde edilmiştir.

VLC sistemlerinde LED özelliklerinden kaynaklanan aşırı ısı şartlarında LED çıkışının bozulması ve LED'in erken yaşlanması sorunu nedeniyle LED, kullanım ömrü boyunca belli bir sıcaklığı geçmemelidir. Tipik bir LED'in çıkışının bozulması yaklaşık olarak 20.000 aydınlatma saatinin üzerinde sinyalin gürültüye oranı (signal

to noise ratio (SNR)) değerinin 2 dB dūşmesine neden olur ki, LED lambalar tipik olarak 40.000 saat ömre sahiptir. LED çıkışının bozulması, bağlantı noktası sıcaklık değişikliğinin VLC sistemlerinin performansları üzerine etkileri ayrı bir çalışma konusudur [42,62].

Yakın zamanda üretilen uzaktan fosforlu LED'ler ile LED çıkışının bozulması probleminin çözüldüğü açıklanmıştır. Bu tasarımda fosfor mavi LED'lerden ayrılarak bir yüzeye bağlanmıştır ve bu durumda LED tarafından üretilen ısının fosfor üzerinde herhangi bir bozunuma sebep olmayacağı ve bozunan fosfor nedeniyle LED çıkışında zamanla oluşan renk kayması sorununun da giderilebileceği açıklanmıştır [63].

Termal koruma, DC voltaj ve darbe genişliği modülasyonu (PWM) karartma kontrolü özelliği sunan LED sürücüler de ayrıca üzerinde çalışılması gereken bir diğer konudur. Geleneksel LED sürücülerin aydınlatma kontrolünü, karartma kontrolünü ve veri transferini eş zamanlı olarak destekleme özelliği bulunmamaktadır.

Araştırmacılar alçak bant genişliği ve nispeten yüksek modülasyon hızı (~1 MHz) kullanımı sunan yüksek parlaklık (high brightness light emitting diodes (HB-LED)) değerli HB-LED'leri LED sürücü tasarımlarında, VLC veri iletimi hızını da artıran farklı modülasyon tekniklerini de kullanarak ve HB-LED'lerin çift yönlü işlevinden de yararlanarak kullanılmaktadırlar [64]. Sisteme verici dengeleyici uygulandığında LED'ler için tasarlanan sürücü devreler modifikasyon gerektirmekte ve çok sayıda kaynak eęer tipik bir kapsama alanında kullanılırsa modifikasyonlar yüksek maliyetler gerektirebilmektedir. Aynı zamanda, kullanılan sinyal enerjisinin bir kısmı ışığa dönüştürülemez ve bu durumda emitörün verimliliği de dūřmektedir. Alıcıda dengeleyici uygulandığında, veri hızlarında önemli bir gelişme elde edilebilir fakat bu durumda alıcının tasarım karmaşıklığı artırılmış olur. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, araştırmacılar gelişmiş modülasyon teknikleri kullanmışlardır, fakat bu teknikler vericinin (Tx) ve alıcının (Rx) tasarımını daha da karmaşık hale getirmiş ve daha fazla işlem gücü talep etmiş, sonuç olarak bu çözüm maliyet etkin olmamıştır. Bu nedenle 1 MHz bantgenişliğine sahip [54] beyaz ışık veren fosfor tabanlı HB-LED'lerin modülasyon veri hızını artırmak için, araştırmacılar açma kapama anahtarlama (on-off keying (OOK)) ön bozunum tekniğini uygulamışlardır. Bu teknik birinci dereceden basit direnç-kapasite (RC) dengeleyici devresi kullanarak sinyal üretimini kolaylaştırmakta olup, 10 Mbit/s hızda bit hata oranı olarak

(BER) $< 10^{-10}$ elde edilmiştir [65]. Ancak bu aşamada elde edilen veri hızı gelecekteki uygulamalar için kabul edilebilir bir değer değildir, spektral olarak etkin, ileri modülasyon teknikleri kullanılarak LED bantgenişliği kısıtının üstesinden gelinmesi gerekmektedir.

Araştırmacılar bit ve güç yükleme teknikleri [66] kullanarak dengesiz-frekans tepkili LED tabanlı VLC sistemlerinde daha yüksek kapasitelere ulaşmayı hedeflemektedirler. Örneğin bir çalışmada; ayırık çoktonlu (discrete multitone (DMT)) ve çok seviyeli bir modülasyon olan dördün genlik modülasyonu (quadrature amplitude modulation (QAM)) kullanılarak, bit ve güç yükleme tekniklerini ve hatta simetrik kırpm kombineyonlarını da tasarıma dahil ederek 513 Mbit/s veri hızına erişilebilmiştir [67].

Bir oda içinde LED sayıları ve dağılımının optimize edilmesi üzerine yapılan VLC sistem çalışmaları

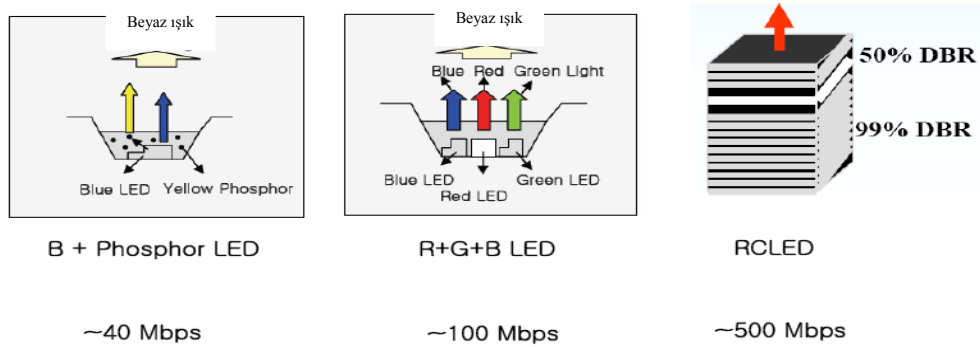
VLC sistemleri ile yapılan ilk çalışmalar, piyasada bulunan basit LED'lerin kullanımı ile ve istenen parlaklığın Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu (International Organization for Standardization (ISO)) standartları seviyesinde elde edilebilmesini sağlamak için çok sayıda LED kullanarak veri hızını artırmak üzerine odaklanmıştır. Fakat bu bakış açısı maliyet etkin bir çözüm değildi ve karmaşık tasarımların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Hatta çoklu ışık kaynakları kullanılarak tasarlanan iç mekan VLC sistemlerinde çok sayıda yansımadan kaynaklanan çok yollu yayılma problemleri ile karşılaşılması ve bu nedenle alınan sinyalin zamanla yayılması bir diğer sorun olarak ortaya çıkmıştır.

Bu nedenle araştırmacılar, aydınlatma ve haberleşme seviyelerini geliştirmek için, önemli bir araştırma potansiyeli olan ve aydınlatma kriterlerini karşılama da, asıl faktör olan bir oda içinde aydınlatma kaynaklarının dağılımını optimize etme konusu üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada ayrıca optimal LED yönleri de belirlenmiş ve LED eğim açısının SNR ile bağlantısı olan kanal kalitesi üzerinde etkileri araştırılmıştır [68]. Ayrıca bir oda içerisinde aydınlatma kaynaklarının sayısal değeriendirilmesi yapılarak, zamanla değışmeyen bir aydınlatma sistemi için gereklilikler araştırılmıştır. Sonuç olarak bu tip tasarımlarda güç sarfiyatı beklenenden fazla elde edilmiştir [69] ve araştırmalar göstermiştir ki VLC sistemlerinde LED sayısını artırıp, monotonluğu sağlayarak yüksek derecede parlaklık elde etmek enerji verimli bir çözüm değildir. Bu nedenle, vericilerin

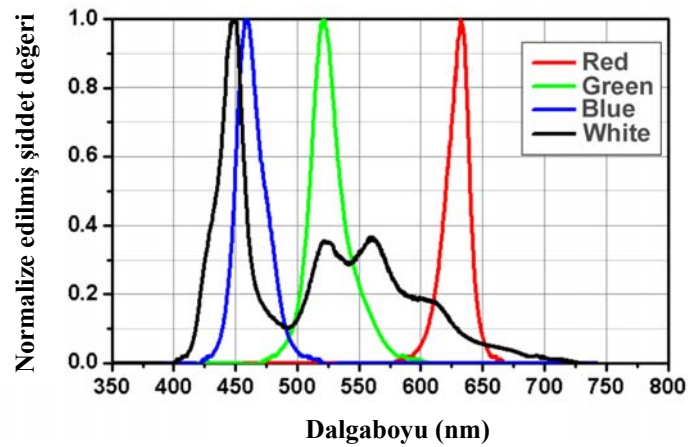
arasında çok yollu dağılım etkisini analiz eden bir çeşit algoritma içeren model geliştirilmiştir. Bu algoritma yol kaybı, zaman gecikmesi ve yansıyan güç değerlerini parametre olarak kullanarak yansımanın dalgaboyu bağımlı çeşitliliğinin etkisini de analiz edebilmektedir [70]. Boyutları küçük ve daha az güçlü olan LED dizileri de aydınlatma kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu LED dizileri tipik LED'lere oranla daha enerji verimli sonuçlar alınmasını sağlamış ve aynı zamanda tepkilerinin ayarlanabilir olması ve paralel veri iletimine uygun yapıları yüksek veri hızlarına da erişilebilmesi için bir avantaj olarak kullanılmıştır.

LED tiplerinin VLC sistemleri üzerindeki performanslarının araştırılması ile ilgili olarak yapılan çalışmalar

Günümüzde VLC sistemlerinde kullanılan beyaz ışık yayan LED'lerin tasarımında üç yöntem kullanılmaktadır; kırmızı, yeşil ve mavi (RGB) ana renkler kullanılarak üretilen yüksek parlaklık sağlayan HB-LED'ler, fosfor tabanlı LED'ler ve RGB fosfor ile kombinasyonlu kullanılan morötesi emitörler.



Şekil 2.28: LED'lerin modülasyon karakteristikleri [16].



Şekil 2.29: LED yayılım spektrumu [71].

Tüm bu LED'lerde ortaya çıkan sorun; mevcut LED'lerin yükselme zamanlarının yetersiz olması ve güçlü doğrusal olmayan davranışlara sahip yapılarının olması nedeniyle modülasyon bantgenişliğinin kısıtlanmasıdır. Bu durumda VLC sistemlerinin veri hızları megahertz mertebesi ile sınırlı kalmaktadır.

Araştırmacılar VLC tasarımlarında, daha az karmaşık yapıları, düşük maliyetleri ve yüksek teorik verimlilikleri nedeniyle fosfor ile kaplanmış mavi LED'leri tercih etmişlerdir. Ancak fosforun yavaş gevşeme zamanı, yüksek hızda veri iletimine engeldir ve mavi LED'lerin de doğrudan modülasyon hızı fosfor nedeniyle tipik olarak $\approx 1\text{MHz}$ 'e sınırlanmıştır [65]. Veri hızının artırılması için alıcıda mavi filtreleme tekniği kullanılarak önceki performansın 10 katı kadar bir artış elde edilmiştir [72,73], ayrıca ek olarak vericide dengeleme tekniği de uygulandığında [74] mavi LED'in bantgenişliği artırılabilir. Ancak mavi filtre uygulaması vuruş-gürültü değişikliğini artırmakta ve 90 % oranında iletilen gücün kaybolmasına neden olmaktadır. Ayrıca SNR ve BER değerlerinin de bozulmasına yol açarak alınan sinyalin önemli ölçüde filtre kayıplarına bağlı olarak zayıflamasına ve istenmeyen bir sonuç olarak VLC sisteminin iletim mesafesinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle alıcıda mavi filtre uygulaması enerji verimli sistem tasarımları için uygun bir çözüm değildir [75]. Alternatif bir çözüm olarak spektral verimliliği yüksek ileri modülasyon tekniklerinin (ayrık çoktonlu (DMT) gibi) [75] kullanılması, çoklu-rezonant ve dengeleyici-sonrası [76,77] kullanılması önerilmiştir. Örneğin DMT modüleli yüksek güçte fosforlu beyaz LED'ler kullanılarak, bit hata oranı $\text{BER} < 2.10^{-3}$ iken, 513 Mbit/s (net~450 Mbit/s) veri hızları elde edilmiştir, aydınlatma seviyesi ~1000 lx olarak ayarlanmıştır [67]. Daha sonra yapılan çalışmalarda, daha hızlı yükselme zamanları (her bir renk için 20 MHz) nedeniyle üçlü kromatik LED'ler (RGB LED'ler) VLC sistemlerinde kullanılmıştır [78]. Bu LED'lerin bir diğer avantajları ise her bir dalgaboyunda çoklu veri akışları taşıyabilmeleridir, böylece sistemin toplam veri hızı Dalgaboyu Bölme Çoğullama (Wavelength Division Multiplexing (WDM)) teknolojisi kullanılarak rahatlıkla artırılabilir [74], hatta daha esnek ve yüksek bantgenişliği verimliliğine erişmek için Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)) tekniği WDM tekniği ile birlikte kullanılmıştır [79]. Bir başka çalışmada piyasada mevcut olan RGB LED'lerle, kısa geçiş filtresi, dengeleme ve OFDM teknikleri ile birlikte kullanılarak 3.4 Gb/s veri hızı elde edilmiştir ve mevcut ticari Wi-Fi teknolojilerinin hızı aşılabilmektedir [80]. Fakat bu durumda çok az

farklılıkları olan emisyon paternlerine bağlı olarak, RGB LED renklerinin farklı renkleri karıştırma ve yayma kontrolü için ek elektronik devrelere ihtiyaç duyulması bir sorun olarak ortaya çıkmıştır [81].

Spot aydınlatma olarak adlandırılan ve birden fazla sayıda güçlü LED'in birarada kullanılması ile tasarlanan aydınlatma kaynakları, geniş görüş alanı (field of view (FOV)) değerine sahip şiddeti değişmeyen LED modeller ile karşılaştırıldığında, yüksek veri hızlarında VLC bağlantılarının tasarımını basitleştirmiş ve değişmeyen bir aydınlatma sağlamıştır. Ayrıca spot aydınlatma ile ayrık ve girişimsiz bağlantılar sağlanmaktadır ki, bu durumda daha az kanal bozulması avantajına da sahiptir. Hatta daha geniş kapsama alanı sağlamak için spot aydınlatma ve değişmeyen aydınlatmayı birleştiren karışık bir teknik de önerilmiştir [82]. Araştırmacılar spot aydınlatmayı cihaza yönlendirme avantajına sahiptirler ki radyo femto-hücrelerde bu özellik bulunmamaktadır.

Ayrıca, bütünleyici metal oksit yarı iletken (complementary metal oxide semiconductor (CMOS)) teknolojisinin düşük iç kapasitans ve düşük parazit empedans özellikleri ile mikro-LED'lerin bantgenişliği kapasitesini artırarak çok fazla güç harcayan doğrusal yükselteçlerin de kullanımının elimine edilmesi mümkündür ve araştırmacılar GaN-tabanlı mikron boyutta ışık yayan diod (μ LED) dizilerini CMOS teknolojisi ile birlikte VLC sistem tasarımında kullanmışlardır. CMOS kontrollü mikro-LED'ler iletim için 185 MHz bant genişliği ve 512 Mbit/s'e kadar veri iletimi hızına erişebilmiştir [83] ve 1 Gb/s veri hızı OOK-NRZ modülasyonu kullanılarak bit-hata-oranı $BER < 1 \times 10^{-10}$ iken elde edilmiştir [84]. Paralel veri iletiminde kullanım avantajı ile bu teknoloji sayesinde çoklu Gigabit/s hızlara erişebileceği değerlendirilmektedir ki, OOK-NRZ modülasyonu ile 4 μ LED piksel kullanılarak 1.5 Gbit/s hızının elde edildiği bildirilmiş, bu çalışmada ayrıca CMOS tasarımı optimizasyonu ile karışma minimize edilmiştir [85].

Yakın zamanda İngiliz araştırmacılar, gelişen VLC teknolojisi kapsamında son zamanların buluşu olarak nitelendirdikleri çalışmalarında, Strathclyde Glasgow Üniversitesinde geliştirilen mikro LED dizileri kullanarak kablosuz veri iletiminde 10 Gb/s'in üzerinde şimdiye kadar ölçülen en yüksek veri hızına eriştiklerini açıklamışlardır. Bu proje "Ultra Paralel Görünür Işık Haberleşmesi" olarak adlandırılmaktadır [86].

Gelişmeler gösteriyor ki yakın zamanda geliştirilen teknolojiler bu alanda karşılaşılan zorlukların üstesinden gelebilecek ve VLC sistemleri ile yüksek hızlarda

veri iletimi mümkün olabilecektir. Bir başka önemli gelişme, yeni nesil aydınlatma kaynağı olmaya aday uzak-fosfor LED'lerin beyaz LED'lere alternatif olarak üretilmesidir [43]. Bu yeni LED'ler fosfor-kaplı beyaz LED'lerle karşılaştırıldıklarında, 30 %'a varan verimlilik değerleri ve artırılmış güvenilirlik avantajları vardır. Renk kararlılıklarını devam ettirme kabiliyetleri, ışıktaki titremeyi azaltma kabiliyetleri ve karartma aralıkları (100 %'den 10 %'e kadar 0-10 V karartma aralığı) geleneksel LED'lere göre çok daha üstündür. Yakın zamanda, verimliliklerini daha da fazla artırmak ve pratik kullanımlarını sağlamak için uzak fosforun, royal mavi LED'lerin ve geçirgen optiklerin basit bir paket içinde üretilmesi beklenmektedir. Henüz bu LED'lerle ilgili VLC uygulaması bulunmamakla birlikte, uygulamada tatmin edici sonuçların alınabileceği değerlendirilmektedir.

VLC araştırmalarında kullanılan bir diğer LED tipi, yüksek parlaklıkta indiyum galyum nitrür (indium gallium nitride (InGaN)) tabanlı resonant-boşluklu LED (resonant cavity light emitting diodes (RCLED))'lerdir. RCLED'lerin kullanımı ile yarı iletkenin yüzeyinden ışık kaçacağı dezavantajı elimine edilmiş ve geleneksel LED'lerin verimliliği de artırılmıştır. VLC sistemlerinde kullanılan RCLED'ler ışığın çıkış gücü performansını, dış kuantum verimliliğini, spektral saflığını, yönlendirilmesini ve modülasyon frekansını artırmıştır. Ayrıca ayna görevi gören bragg reflektörlerin RCLED'ler ile birlikte kullanılması ile yayılan ışık miktarı daha fazla artırılabilmiştir [87]. Ancak RC-LED'lerin 20 mA'den yüksek çalışma akımında ortaya çıkan güçlü doğrusal olmayan davranışlarından dolayı zarar görmeleri ve performanslarının düşmesi sorunu bu LED'lerin kullanımında halen çözülememiş bir zorluk olarak araştırmacıların karşısına çıkmaktadır. RCLED'lerin doğrusal olmayan davranışını azaltan doğrusal frekans-tabanlı LED kompanzasyon tekniğinin DMT modülasyonu ile birlikte uygulanması optik fiber sistemler için bir çözüm olarak önerilmektedir [88] ve VLC sistemlerinde bu yöntem kullanılmaktadır. VLC sistemlerinde LED'ler yüksek modülasyon bantgenişliğine sahip olmaları nedeniyle tercih edilseler de, LED'lerde karşılaşılan bir diğer sorun çok fazla sayıda LED kullanılmadan basit geniş bir alanın aydınlatılamamasıdır. Bu nedenle araştırmacılar VLC sistemlerinde doğal ve maliyet etkin bir alternatif olan organik ışık yayan diod (organic light emitting diode (OLED))'ları (~150 kHz) kullanmışlardır [89, 90, 91]. OLED kullanarak yapılan bir çalışmada delikli (hollow) tasarım ile odanın 99%'u gerekli olan aydınlatma seviyesinin üzerinde

aydınlatılmıştır [92]. OLED kullanımı ile OLED'lerin Lambertian ışınma özelliği ve düşük bantgenişliğine rağmen, yüksek SNR değerlerine erişilebilmekte ve güvenilir bir haberleşme bağlantısı kurulabilmektedir [93]. Ayrıca yapılan bir çalışma ile alıcıda analog ön-dengeleme kullanılarak OLED kesme frekansı 150 KHz'den ~1 MHz'e artırılabilmiştir [91]. OLED tabanlı VLC sistemlerin avantajlarına rağmen, eşik algılamasının başarısız olmasına sebep olan bazal sapan fenomen (basal bias phenomen) gibi ve bantgenişliği sınırlamasına ve iç-sembol girişimine sebep olan düşük taşıma mobilitesi gibi performansını önemli ölçüde azaltan faktörler vardır ve bu nedenle OLED kullanıldığında sistemde dengeleyici kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır [90]. Tüm bu sebeplerden VLC sistemlerinde OLED'ler ile yüksek bantgenişliğine ulaşmak önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır ve üzerinde çalışılması gereken bir konudur. Yapılan çalışmalarda OLED (93 kHz) kullanılarak, 4-PPM, OOK and 2-PPM modülasyonlarının uygulanması sonucunda veri gönderme hızı olarak sırasıyla 2.7, 2.2, and 1.25 Mb/s olarak elde edilmiştir ve ayrıca alıcıda çok katmanlı algılayıcı (multilayer perceptron artificial neural network (MLP-ANN)) kullanılmıştır [89]. Diğer bir çalışmada sinyal işleme ve dengeleyici kullanılarak, hızlı bir OLED (10MHz) ile iç mekanda 100 Mb/s veri hızı elde edilmiştir [92]. OLED'ler kullanılarak yapılan çalışmalarda, OLED'in ana karakteristiklerden kaynaklanan fiziksel ve kimyasal sorunlar örneğin; cihazın ömrü, yapısı ve organik katmanların bozulması gibi zorluklar araştırmacıların karşılaştıkları önemli sorunlardır. Hatta OLED'lerin göstergelerde kullanımına oldukça bağımlı olan maliyet araştırmacılar için en önemli sorun olmaya devam etmektedir [89].

Bunun dışında alternatif akım ışık yayan diod (alternating current light emitting diodes (AC-LED)) teknolojilerinin de VLC sistem tasarımlarında kullanılması üzerinde durulması gereken bir başka konudur. Literatürde VLC sistem tasarımları sabit gerilim sapsmalı doğru akım ışık yayan diod (direct current light emitting diodes (DC-LED))'ların kullanımı üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak LED dizisinde bulunan bir çok LED'e akım sağlayan ve alternatif akımı destekleyen devre yapısına sahip olan AC-LED'leri kullanmak daha enerji verimli çözümler elde edilmesini sağlamaktadır [94]. Ortamda aydınlatmayı sağlarken, VLC fonksiyonlarını kullanabilmek için AC-LED'leri destekleyen bir sürücü sistemi tasarlanması üzerinde çalışılması gereken bir konu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu konuda yapılan bir çalışmada, alternatif sinyal sapsmalı VLC sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımda DC-LED ve AC-LED'lerin her ikisini birden modüle etmek için AC

sapma sinyal gerilimini ve elektrik veri sinyallerini birleştiren bir model tasarlanmıştır [95].

Son dönemde geliştirilen bir başka teknik ise, VLC sistemlerinde eş zamanlı alıcı olarak fotodiodlar yerine güneş pillerinin kullanılmasıdır. Araştırmacılar bu kapsamda VLC sistem performansı üzerinde güneş ışığının girişim etkisini araştırmış ve güneş pillerinin düşük frekans VLC sinyallerini ve optik enerjiyi güneş ışığından eşzamanlı olarak alabildiğini göstermişlerdir. Alıcı olarak güneş pili kullanan VLC sistemleri fotodiod alıcı ve güç kaynağı kullanılmadan geliştirilebilmektedir ki, bu tasarım çevreye daha duyarlı VLC sistemi anlamına gelmektedir [96]. Katı hal aydınlatmada son teknoloji olarak değerlendirilen uzak fosfor LED teknolojisini verici olarak ve güneş pillerini alıcı olarak kullanan bir VLC sistem tasarımının daha çevreye duyarlı bir çözüm olacağı değerlendirilmektedir.

Her ne kadar LED'lerin üretim prosesinde hızlı bir gelişme süreci söz konusu olsa da, bileşik aydınlatma ve haberleşme LED bantgenişliği kısıtı nedeniyle halen karmaşık modülasyon teknikleri gibi uygun destekleme protokollerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sınırlı modülasyon bantgenişliği, doğrusal olmayan doğası ve maliyeti halen VLC sistemlerinde LED'lerin kullanımında karşılaşılan önemli zorluklar olmakla birlikte, araştırmacılar LED özelliklerinden ve kanaldan kaynaklanan sistem sınırlamalarının üstesinden gelebilmek için çalışmalarını sürdürmektedirler.

2.2.2 Aydınlatma performansı

Her ne kadar VLC sistemlerinin en önemli avantajı çift fonksiyonlu kullanım özelliği sunan sistemler tasarlamak olarak görünse de, VLC konseptinde haberleşme özelliği ikincil bir fonksiyon olarak tanımlanmaktadır. Aydınlatma sisteminin ihtiyaçları haberleşme sistemi üzerine ek ihtiyaçlar bindirir ki, bu durum diğer kablolu sistemlerde karşılaşılmayan bir sorundur. Tasarım aşamasında sistem dizaynı iç mekan VLC sistemlerinde birincil fonksiyonun dayandığı standartlarla ve aydınlatma ihtiyaçlarının etkileri ile uyumlu olmak zorundadır [97] ve bu parametreler tasarımda ele alınması gereken anahtar parametrelerdir. VLC sistem tasarımında birincil fonksiyonla bağlantılı ana bakış açısı, gelişmiş aydınlatma verimliliğini değişmeyen düzgün bir dağılım ile sağlamaktır. Aydınlatma uygulamaları için tasarım aşamasında sistemde güç, güvenilirlik ve enerjiyi kısıt olarak değerlendirerek

haberleşme ihtiyaçlarını istenen düzeyde karşılarken, mevcut aydınlatma parametrelerinin (titreme etkisini azaltma, gölgeleme etkisini minimize etme, renk stabilitesini sağlama ve şiddet/karartma kontrolünü sağlama, enerji verimliliğini sağlama, insan faktörlerine uyum sağlama) insanın görüşünü artırmak için optimize edilmesi ve eş zamanlı olarak beyaz ışık veren LED'in direkt modülasyonu ile daha yüksek veri hızları elde edilmesi konusundaki çalışmaların sürdürülmesi ve bu konunun bir çok perspektiften araştırılması gerektiği değerlendirilmektedir.

2.3.2.1 Karartma kontrolü

Sabit güçlü bir LED'in ortalama gücü aydınlatma seviyesi ile orantılıdır ve bu nedenle pratik bir VLC sistem tasarımı ortalama gücü regüle etmek için çeşitli optik tepe ortalama güç oranları aralığını (peak to average power ratios (PAPR)) desteklemelidir. Araştırmacılar, iç mekan aydınlatmasının karartma kontrolü için gerekli olan geniş bir aralıkta PAPR değerlerini sağlayan ve aynı zamanda iletim hızını artıran bir tasarım için çalışmalarını sürdürmektedirler. VLC sistemlerinde alıcıdaki güç, aydınlatma miktarını düşük seviyelere ayarlayarak azaltılabilir ve verimli bir sistem tasarlanabilir ancak iletim hızı potansiyel olarak ayarlanan karartma düzeyinden etkilenir. Bu nedenle ışığın karartma kontrolü ve renk kalitesi VLC sistem tasarımında anahtar parametrelerdir [97]. Enerji verimli bir VLC sisteminin tasarımında, ısı üretimi ve ısıtma, havalandırma ve klima (heating, ventilation, and air conditioning (HVAC)) soğutma yüklerini azaltan karartma kontrolü fonksiyonunun önemli bir yeri vardır.

Ancak VLC sistemlerinde kullanılan karartma kontrolü uygulanan modülasyon metodu üzerinde kısıtlamalara neden olmaktadır. Karartma tekniklerinin, akım ve bağlantı noktası sıcaklık değişimlerinin etkisi ile değişen diodların tepe dalgaboyu kayması üzerinde negatif etkileri söz konusudur [98] ve genlik modülasyonu (amplitude modulation (AM)) karartma tekniği LED'in renk çıkışı üzerinde fark edilebilir bir değişikliğe sebep olmaktadır [63]. Bu nedenle VLC sistemlerinde AM karartma tekniği ile sağlanan ortalama LED sürücü akımının, AM karartma yerine dijital olarak modüle edilmiş darbe dizisi, örneğin darbe-genişlik modülasyonu (pulse width modulation (PWM)) ile elde edilmesi tercih edilen bir yöntemdir [97].

Genel olarak LED kullanılan sistem tasarımlarında karartma metodları analog karartma, dijital karartma ve karışık karartmadır [98,99]. Örneğin bir çalışmada çift-kod kelime dağıtma şeması kullanılarak, 23.1 %-76.9 % karartma aralığı, veri iletim

hızını etkilemeden elde edilmiştir [100]. Sonuçlar göstermektedir ki, VLC sistemlerinde kullanılan kodlama teknikleri ile VLC sistemi hassas karartma desteği ile birlikte optimum performanslar elde edilebilmektedir [101].

2.3.2.2 Titreme etkisinin azaltılması

Işığın titreme etkisi aydınlatmada ana performans ölçütü olarak değerlendirilmektedir. Titreme etkisinin spektral dağılımı zamanla dalgalanan bir ışık uyarıcısı tarafından indüklenmekte ve görsel duyuda dengesizlik izlenimine sebep olmaktadır ve çoğunlukla VLC sistemlerinde veri iletimi sırasında fiziksel katman (physical layer (PHY))’da kullanılan modülasyon tekniği nedeniyle ortaya çıkmaktadır.

Aydınlatmada meydana gelen bu dalgalanma tasarımda istenmeyen bir durumdur ve insan gözü tarafından algılanabilir düzeydedir. Çok uzun süreli maruz kalmalarda görsel rahatsızlık, göz yorgunluğu ve baş ağrısı gibi insan sağlığına zararlı etkileri ortaya çıkmaktadır. Kritik titreme füzyon frekans değeri veya eşik değeri (critical flicker fusion rate or threshold (CFF)), kesik kesik gelen bir ışık uyarıcısının gözlemciye tamamen sabit olarak görüldüğü frekanstır. Düşük veri hızında, LED ışık titreme etkisi yüksek veri hızı ile karşılaştırıldığında daha çok farkedilmektedir. Titremenin sistemin birincil fonksiyonu olan aydınlatma özelliğini etkilememesi için özellikle düşük veri hızında iletim sırasında, VLC modülasyon frekansının CFF değerinin üzerinde olması gerekmektedir, çünkü ışık maksimum titreme zaman periyodu (maximum flickering time period (MFTP))’ndan daha hızlı değiştiğinde göz yalnızca ortalama şiddeti algılayabilmektedir. CFF eşik değeri minimum 200 Hz (= 5ms) olarak belirlenmiştir ve her bir MFTP’nin parlaklık değeri bu kısıta eşit olmak zorundadır. Bu nedenle VLC sistem tasarımlarında ~ 200Hz’den büyük frekanslar emniyetli olarak değerlendirilmekte ve bu frekanslarda karartma teknikleri aydınlatmayı kontrol etmek amacıyla kullanılabilir [102,103]. Titreme şiddeti indeksi, 10 dakikalık aralıklarda kısa dönem titreme şiddeti değeri olarak, 2 saatlik aralıklarda uzun-dönem titreme şiddeti değeri olarak tanımlanmakta ve ciddi anlamda veri iletiminde azalmaya neden olmaktadır [104].

VLC sistemlerinde titreme etkisi iki kategoride sınıflandırılır; çerçevenin içinde oluşan titreme (intra-frame flicker) ve çerçevelerin arasında oluşan titreme (inter-frame flicker). Çerçevenin içinde oluşan titreme etkisi, bir veri çerçevesi içinde 1 ve 0 bit modelleri arasındaki parlaklık farklılıklarından oluşmaktadır. Çerçevelerin

arasında oluşan titreme etkisi ise çerçeve iletim periyodu ve boş periyod arasındaki ortalama parlaklık farklılıklarından meydana gelmektedir [105].

Işığın titreme etkisi, yukarıda belirtildiği üzere VLC sistemlerinde kullanılan modülasyon tekniklerinin ortalama iletilen güç üzerinde varyasyonlara sebep olması ve bu durumda LED'lerin parlaklıkları üzerinde dalgalanma etkisi yaratmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle sabit ortalama gücü sağlayabilmek için modülasyon tekniklerine kısıtlamaların uygulanması bir zorunluluk olarak ortaya çıkmaktadır [17]. Titreme etkisini azaltan modülasyon teknikleri VLC alanında araştırılması ve geliştirilmesi gereken bir başka konudur.

IEEE 802.15.7 standardı VLC sistemlerinde tasarlanan bazı karartma ve titreme etkisini azaltma metodlarını desteklemektedir. Her bir PHY modu, gönderilen veri tarafından endüklenen titreme etkisini ve ileri hata düzeltmeyi önleyerek DC dengelemeye ulaşmak için kodlama mekanizmaları içermektedir. Bu durumda, potansiyel olarak titremeye neden olan 1'lerin ve 0'ların uzun yayınlarını önlemek için sınırlı uzunlukla çalıştırılan (run length limited (RLL)) hat kodları kullanılmaktadır [106].

2.3.2.3 Gölgeleme etkisi

Doppler yayılım etkileri, mikron ölçekte oluşan yıkıcı ve yapıcı girişim modelleri nedeniyle VLC kanallarında oluşmaz ve ayrıca boyutları bir kaç bin mertebesinde olan fotodiod alıcı tarafından da efektif olarak ortalanırlar. Kanal efektif olarak zamanla değişmeyen yapıdadır ve bu nedenle karmaşık kanal izleme alıcı algoritmaları kullanımı gerektirmez, sadece gölgeleme otomatik tekrar isteği ile azaltılabilen firelere neden olabilir [18].

İç mekanda bulunan engeller veya hareket eden insanlar nedeniyle oluşan gölgeleme, aydınlatma kaynağından alıcıya olan direkt yolu bloke eder ve kanalın zamanla değişen yapıda olmasına neden olur. Gölgeleme etkisi VLC sistem tasarımlarında etkili bir kanal parametresidir. Işık radyasyonunun opak objelerden geçememesi nedeniyle, VLC sistemlerinde görüş hattı (line-of-sight (LOS))'nın bloke edilme olasılığı yüksektir ve gölgeleme bu şekilde haberleşmeyi etkilediğinde, kanalın dürtü cevabı sadece gönderilen ışığın görüş olmayan hattına (non-line-of-sight (NLOS)) aittir. NLOS, zengin saçılma özelliği olan kanallarda girişime neden olur. Alıcının bloke etme olasılığını artırarak FOV açısını daraltmak, sistemin gölgelemeye karşı

savunmasızlığını artıran, ancak aynı zamanda ortamdaki girişimi de azaltan etkili bir tekniktir [17].

2.3.2.4 Sabit renk kontrolü

LED'in rengi çıkış gücü tarafından oluşturulur ve LED'in kalitesi yaşından etkilenir, örneğin kırmızı LED mavi LED'den daha hızlı yaşlanır. Bu nedenle LED'lerde zamanla frekansın kayma riski vardır. LED teknolojisindeki gelişmeler ışığında LED'lere karartma, dengeleme ve doğru renk karışımı sağlama gibi ileri düzeyde kontrol fonksiyonları kazandırılırken LED'in ışık kalitesinin devamlılığını sağlamak da önemlidir. LED üreticileri bu önemli parametreyi dikkate alarak çalışmalarını sürdürmektedirler. Örneğin, yeni nesil akıllı aydınlatma sistemleri, akıllı kontrolörler ile LED'lerin yaşlanma sürecini izleme ve LED sisteminin ömrü boyunca ihtiyaç duyulduğunda renk profilini düzeltme yeteneği olacak şekilde tasarlanmıştır.

Aydınlatma sistemlerinde renk aralığının kontrol edilebilir olması, aydınlatma aşamalarını insan faktörlerine uyumlu hale getirme yeteneği nedeniyle ihtiyaç duyulan bir özelliktir. Beyaz ışık elde etmek için tek renkli ışıkları birleştiren çoklu LED'ler kullanılabilen ve her bir rengin miktarını değiştirerek bir renk aralığı ve renk sıcaklığı sağlanabilmektedir. Bu tip bir kontrol mekanizmasının tasarlandığı bir modülasyon tekniği [107]'de önerilmiştir.

Kritik renk kalitesi ve parlaklık kısıtları fonksiyonel ve estetik ihtiyaçları karşılamak için gereklidir ancak bu kısıtlar VLC sistem tasarımını sınırlamaktadır. RGB LED'lerin her bir renginin bağımsız olarak ayarlanabilmesi özelliği kolay renklendirme ve renk ayarlı aydınlatma sağlamaktadır. Her bir cihaz üzerinden değişik veriler üçlü bakış açısı ile üç renk üzerinden gönderilebilir. Ancak bu durumda renk dengeleme sorunu ortaya çıkmaktadır ve tasarımda karmaşık cihazlara ihtiyaç duyulmaktadır. Mavi LED'lerde modülasyon uygulaması renk kaymasına sebep olmaktadır, ancak RGB LED'lerde renk kayması sorunu olmadan modülasyon uygulanabilmektedir. Tasarım esnasında karartma kontrolü tekniğinin renk şiddeti kontrolünü de kapsayacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Renk modellerinin ve renk kalitesinin değerlendirilmesi algılanan ışık ve elektronik devreler tarafından alınan ışık arasındaki farkların gösterilmesi için [97]'deki çalışma yapılmıştır.

VLC araştırmalarının çoğunlukla haberleşme hızı konusuna yoğunlaşmaları nedeniyle aydınlatma kalitesine yönelik sorunlar tam olarak dile getirilmemiştir.

Ancak yüksek hızlara erişirken ortaya çıkan renk kalitesi ve enerji tüketimi kısıtları VLC sistemlerinin tasarımında karşılaşılan önemli sorunlardır.

Bu nedenle VLC sistem tasarımlarında aydınlatma ve haberleşme performanslarının; karartma aralığı, titreme şiddeti indeksi, kesim veri hızı, gölgeleme etkisi, renklendirme indeksi, ışık çıkış gücü ve bantgenişliği verimliliği dikkate alınarak ve bu değerler optimize edilerek incelenmesi ve tasarlanması gerekmektedir.

2.4 Yeşil Görünür Işıklı Haberleşme Teknolojisinde Modülasyon Tabanlı İç Mekan Uygulamaları

2.4.1 Enerji etkin haberleşme

Kanal kapasitesi terimi, ilk olarak 1948'de Claude E. Shannon'ın güvenilir haberleşmenin sınırlarını belirlediği tezi ile ortaya çıkmıştır. Günümüzde Shannon modelinin sınırlarına OFDM metodu, turbo kodlar, düşük-yoğunluklu eşlik-kontrol kodları (low-density parity-check code (LDPC)) veya MIMO metodlarının uygulamaya geçirilmesi ile birlikte çoktan ulaşılmıştır. Günümüzde tasarımlarda spektrum optimizasyonu giderek önemini kaybetmiş ve araştırmacılar hatların optimizasyonu yerine ağ (sistem) optimizasyonu konusu üzerine çalışmaya başlamışlardır. Spektrum ve enerji verimliliğini birlikte modelleme ve analiz etme konusu üzerine çalışmalar sürdürülmekte olup, bileşik spektrum, enerji optimizasyonu, servis kalitesi (QoS) (gecikme, derece, maliyet, vs.) araştırılan güncel konulardır [108]. Bu kapsamda yeşil haberleşme, Mobil Radyo Ağlarda Güç Verimliliği Optimizasyonu (Optimising Power Efficiency in Mobile Radio Networks (OPERANET)), EARTH ve Yeşil Radyo araştırma projeleri bulunmaktadır. Yeşil enerji kaynaklarının kapasitesinin değişken yapısı ve lokasyon bağımlı olması nedeniyle yeni tasarım kriteri enerji sürdürülebilirliği olarak belirlenmiştir [109].

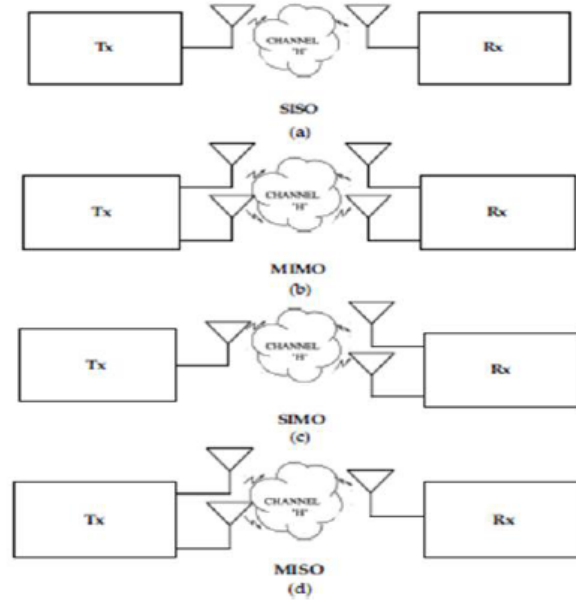
VLC tasarımlarında sistemin geliştirme maliyetlerini azaltmak ve enerji sarfiyatını önlemek için spektral verimlilik önemli bir parametredir. Daha yüksek veri hızlarına spektral verimliliği artırarak ve daha fazla bantgenişliği kullanılarak erişilebilmektedir. Fakat alıcıda, fotodiodun doğasından kaynaklanan bağıl sınırlı duyarlılığa dayanan temel bir dezavantaj mevcuttur. Ayrıca iletilen güç, LED'in dinamik aralık sınırlamaları, gözle ilgili güvenlik hususları ve güç sarfiyatı nedenleriyle kısıtlanmıştır ve bunun yanında standart aydınlatma seviyesinin de

sağlanması gerekmektedir. Araştırmacılar enerji verimliliğinin analog ortama daha fazla fonksiyon kaydırılarak da artırılabilirliğini kanıtlamışlardır. Bir çalışmada Viterbi kod çözücü gibi karmaşık bileşenlerin güç sarfiyatında 100 % oranında bir azalma sağlayarak analog ortamda geliştirilebileceğini göstermişler [110]. Başka bir çalışmada Yeşil Haberleşme kapsamında; kablosuz bir hattın bant genişliği verimliliği, alan spektral verimliliği, güç verimliliği ve yeşil verimliliğinin kapsamlı bir analizi yapılarak, uyarlanabilir bir modülasyon ve kodlama tekniği de kullanılarak maksimum yeşil verimliliğe ulaşılması üzerine çalışılmıştır [111].

Her ne kadar bir çok araştırmacı mevcut LED özelliklerinin ve kanalın sistem üzerine uyguladığı kısıtlamaların üstesinden gelerek VLC sistemlerini tasarlayabilmeyi başaramışsa da, güç verimli haberleşme ve aydınlatma halen VLC sistemlerinin tasarımının en zor yönlerinden biri olmaya devam etmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere aydınlatma kalitesi bu alanda yapılan çalışmalarda yeterince üzerinde durulmayan bir konudur ki renk kalitesi ve enerji tüketimi kısıtları yüksek veri hızlarına erişirken VLC sistem tasarımlarında sorun yaratmaktadır. Ancak tasarım aşamasında geniş banda sahip VLC sistemleri ile haberleşme sağlanırken aynı zamanda yüksek kalitede aydınlatma da sağlayabilme amacıyla kullanılan modülasyon tekniklerinin ve aydınlatma durum kontrolünün, aydınlatma kalitesi ve insan faktörleri konusunda mevcut endüstriyel standartlara uygun olarak sağlanması bir gerekliliktir [97]. Hatta enerji optimal PHY parameterelerinin enerji verimliliği üzerine etkilerinin de incelenmesi gerekmektedir.

VLC sistemlerini spektrum verimliliği ve iletim güvenilirliği açısından optimize etmek de bu alanda üzerinde çalışılması gereken bir başka konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Fakat kritik soru, VLC sistemlerinde enerji verimliliğinin optimal seviyesinin nasıl belirlenebileceğidir.

Yeni iletim teknolojilerinin, Çoklu-Giriş Çoklu-Çıkış (MIMO) [112,113,114,115,116,117,118], Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklama (OFDM) [119,120,121] tekniği, Çoklu-Kullanıcı Çoklu-Giriş Tekli-Çıkış (MISO) tekniği [122,123], optimizasyon algoritmaları gibi ileri fiziksel katman teknikleri bu sorunu çözmek için önerilmiş tekniklerdir.

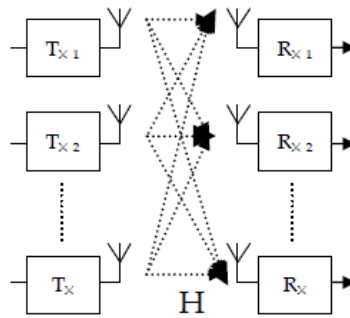


(a) SISO modu (b) MIMO modu (c) SIMO modu (d) MISO modu

Şekil 2.30: Farklı anten sistemlerinin gösterimi [56].

2.4.1.1 MIMO tekniği

VLC sistemlerinin günlük yaşamda ticari anlamda efektif olarak kullanılmasını sağlayabilmek için önemli teknolojik atılımlara ihtiyaç bulunmaktadır. Bu nedenle ışığın yönlendirilebilme özelliğini kullanarak yüksek hızlara erişebilmek, doğrusal kapasite kazançlarını artırabilmek, gürültü kaynaklarının etkisini geri çevirmek ve paralel kanalları desteklemek için emitör ve alıcı grupları kullanan optik MIMO tekniği verimli ve uygulanabilir bir paralel iletişim tekniği olarak tasarımlarda kullanılmaktadır. Gerekli aydınlatma şiddeti, birden fazla LED'in kullanımı ile karşılanabilir ki, bu durumda her bir cihaz üzerinde veya farklı emitör grupları üzerinde çeşitli tiplerde veri iletilebilir ve alıcıda bir dizi dedektör kullanımı ile veri geri alınabilir.



Şekil 2.31: MIMO haberleşme sisteminin şematik gösterimi [124].

Hata olasılığı sıfıra yakınsadığında maksimum olası iletim hızı kapasite olarak adlandırılmaktadır. MIMO kanalın kapasitesi aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$C = \max_{f(s)} I(s; Y) \quad (2.28)$$

MIMO tekniğinin sağladığı kazançlar; çeşitlilik, dizi ve çoğullama kazançlarıdır. Fiziksel olarak dedektör dizisi ve kaynak dizisi arasındaki gerekli hizalamayı azaltmakta ve elektronik sinyal işleme kullanılarak hizalamaya gerek duyulmadan yüksek veri hızında haberleşme sağlanmaktadır. Bir çalışmada MIMO tekniği görüntüleme çeşitlilik alıcısı ile birlikte uygulanmış [114] ve birkaç yüz Mbit/s'dan 1Gbit/s'a hıza erişilebilmiştir. Ancak kullanılan alıcı görüntüleme merceği ve dedektör dizisi boyutları tasarımda bazı konfigürasyonlarda pratik olmamıştır. Bu tekniğin dezavantajı, dizi verici ve alıcılar içeren çok karmaşık cihazlar gerektirmesidir.

Başka bir çalışmada Shannon kapasite teorisine dayanarak, MIMO-VLC iç mekan kanal kapasitesi LED aydınlatma dizilerinden görüntüleme alıcısına kadar incelenmiştir [115]. Araştırmacılar farklı optik MIMO kablosuz geometrilerinin performanslarını ölçmek için değişik metrikler üzerine çalışmışlar ve sonuçları simüle etmişlerdir. Ve sonuç olarak sinyal girişim gürültü oranı (signal to interference noise ratio (SINR)) en uygun metrik olarak belirlenmiştir [116].

Diğer bir çalışmada her biri 250 Mb/s hızında sinyal ileten beyaz LED'ler kullanılan 4-kanallı MIMO-OFDM hattından oluşan bir iç mekan VLC sistem tasarımı yapılmış ve 1.1 Gb/s veri hızına erişilmiştir [117]. Alıcıda 9-kanal görüntüleme çeşitliliğinde alıcı kullanılmıştır ve 1m²'de ~1000 lux oda aydınlatma seviyesinde ortalama bit hata oranı 10⁻³ olarak elde edilmiştir.

Gelişmiş çeşitliliği ve çoğullamayı birarada sağlayan MIMO-VLC sistemlerinin eksikliği alıcı çeşitliliğinin olmaması ve bu tekniğin performansının birlikte kullanıldığı optik kanal ile değişim göstermesidir. Araştırmacılar hangi tip optik sistemin en iyi optik MIMO sistemi yaratacağı konusundaki cevabı araştırmaktadırlar. Ayrıca alıcı çeşitliliğini sağlayarak ve performans varyasyonunu azaltarak VLC alıcı performansını artırmak amacıyla görüntüleme alıcısı için azami oranı birleştirme (maximal ratio combining (MRC)) tekniği olarak adlandırılan bir metod önerilmiş ve sistem pratik olarak gerçekleştirilmiştir. Kararlı bir haberleşme hattı için BER 10⁻⁶ iken alınan güç performansında gelişme sağlanabilmiştir [113]. 4

silikon (Si) LED'in ve 4 organik fotodedektör (OPDs)'ün verici ve alıcı olarak kullanılması ile, nispeten maliyet etkin bir MIMO-VLC sistem hattı tasarlanmış ve 200 kb/s veri hızına dengeleyiciye ihtiyaç duyulmadan OOK modülasyon kullanılarak erişilebilmiştir. Ayrıca alıcıda matris inversiyonu ile oluşan hatayı düzeltmek ve veri hızını artırmak için ANN kullanılarak bit hızı olarak 1.8 Mb/s'e yükseltilebilmiştir [125].

RF sistemlerinde kullanılan MIMO tekniklerinin VLC sistemlerine uygulanabileceği değerlendirilmektedir, ancak bu konuda ortaya çıkan zorluk optik MIMO kanallarını RF MIMO kanalları kadar bağıntısız olmaması ve bu nedenle alıcı dizilerinin boyutlarının RF kanallara oranla daha büyük seçilmesinin gerekmesidir. Çözüm olarak MISO tekniği önerilmiştir, bu teknik pratik iç mekan VLC sistem tasarımlarında daha fazla tercih edilmektedir [122]. Araştırmacılar iç mekan VLC sistemlerinde kullanılmak üzere, merkezde toplanmayan kullanıcıların ön-kodlamalı verisini LED dizileri ile ileterek kullanıcı terminallerinin karmaşıklığını azaltan ön-kodlamalı çok kullanıcılı (MU) MIMO sistemini önermişlerdir. Bu teknik ile sistemin güç tüketimi seviyesi düşürülmektedir. Yapılan çalışmada iç mekanda BER 10^{-6} iken 100 Mb/s veri hızı elde edilebilmiştir [126].

Kamera tabanlı görünür ışıkla iletişim sistemleri üzerinde yapılan bir çalışmada MIMO tekniğinin performansı incelenmiştir [118].

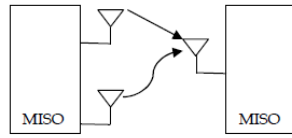
2.4.1.2 MIMO OFDM tekniği

OFDM ve MIMO tekniklerinin, çeşitlilik kazancı ve çoğullama kazancının avantajını kullanarak birlikte kablosuz haberleşme sistemlerine uygulanması ile veri hızı artırılarak servis kalitesi yükseltilir. OFDM tekniği birçok antenin desteklenmesine, daha bantgenişliklerinin artırılmasına ve en önemlisi frekans ortamında dengeleyiciyi etkinleştirerek MIMO sistemlerinde dengeleyiciyi önemli derecede basitleştirmesi ve işaretler arası girişime serbest iletim olanağı (inter-symbol interference (ISI)) sunmasıdır [119]. Nispeten azaltılmış saat hızları ile daha fazla işlem MIMO OFDM tekniği ile birlikte uygulanabilmektedir. RF modülasyon tekniklerinin, LED'lerin sınırlı modülasyon bantgenişliği, kanal dağılımından ve negatif olmayan iletilen sinyalden kaynaklanan işaretler arası girişim nedeniyle VLC sistemlerine uygulanmadan önce modüle edilmesi gerekmektedir. Bir MIMO-OFDM VLC sistemi sınırlı modülasyon bantgenişliğinden kaynaklanan zorlukları ortadan kaldırır, iletilen sinyalin gerekliliklerini sağlar ve sistemin hesaplama karmaşıklığını azaltır.

Araştırmacılar verici mimarisi, alıcı algoritması, bit hata oranı performansı, kanal kapasitesi analizi konularında çalışmalar yaparak, MIMO OFDM sistemi için simülasyon sonuçlarını ortaya koymuşlardır [120]. Bir çalışmada, beyaz LED dizisi kullanılarak alt taşıyıcı MIMO-OFDM tekniği ile tasarlanan bir VLC sistemi önerilmiş ve verinin sırasıyla 6.25 MHz ve 12.5 MHz frekanslarında iki alt taşıyıcı ile modüle edildiği bildirilmiştir. Ek olarak QPSK modülasyonu, veri hızını artırmak için kullanılmış ve frekans ön-dengeleyici kanalın dengesiz bozunumlarını kompanse etmek için kullanılmıştır [121]. MIMO-OFDM tekniği kullanılan başka bir çalışmada laboratuvar koşullarında Gb/s iletim hızlarına erişen VLC sistemi tasarlanmış ve 1000 lx aydınlatma seviyesinde, 20 cm² alıcı açıklığı ile 1 Gb/s veri hızına ulaşan bir VLC hattı önerilmiştir [117]. Ancak VLC'nin ticari alanda kullanılabilmesi için alıcının açıklık değerinin 0.1 cm²'den küçük olması gerekmektedir ve standart aydınlatma seviyesi 400 lx olsa da önerilen sistemin sağladığı aydınlatma değeri yeterli değildir. Bu nedenle ticari alanda kullanılacak VLC sistemlerinde Gb/s veri hızlarına ulaşmak konusu üzerinde çalışılması gereken bir konudur.

2.4.1.3 MU-MISO tekniği

Çoklu iletim birimlerinin çoklu kullanıcılara bilgi yayınlamak için birlikte çalıştığı çoklu-kullanıcılı çoklu-giriş tekli-çıkış (MU-MISO) tekniği RF haberleşmede kullanılmış olsa da, MU-MISO'nun VLC sistemlerinde kullanımı sinyal özelliklerinin farklı olması ve güç kısıtları nedeniyle bu alanda açık bir işlem maddesidir.



Şekil 2.32: MISO sistemi [124].

MU-MISO ve RF-MISO teknikleri bir çok yönden birbirinden farklıdır bu nedenle bu tekniklerin VLC sistemlerine uygulanması aşamasında teoriler ve metodlar VLC sinyallerinin doğası dikkate alınarak geliştirilmektedir. Örneğin ortalama optik güç VLC sistemlerinde güç kısıtıdır, ancak RF sistemlerinde kısıt ortalama elektriksel güçtür. Ayrıca sinyallerde farklıdır, örneğin RF taban-bandı sinyalleri karmaşık değerli iken, VLC sistemlerde zaman-ortamındaki sinyaller gerçel değerlidir ve negatif değildir.

Bir MISO sisteminin kapasitesi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır [127].

$$C = \log\left(1 + \frac{P_{\text{opt}}}{N_0}\right) \text{ bits/s/Hz} \quad (2.29)$$

Bir çalışmada iki ön-kodlama tekniği (linear zero forcing and zero forcing dirty paper coding (ZF-DPC)) kullanılarak her bir kullanıcıda girişimden kaynaklanan sorunların üstesinden gelinmiş ve MU-MISO iç mekan VLC sistemi için bir verici tasarlanmıştır. Ek olarak ön-kodlama ve sapma teknikleri de uygulanmış ve sistem simüle edilmiştir [122]. Ayrıca bir optimizasyon problemi kurularak, çıkış için verici birim başına optik güç kısıtı çözülmüştür.

Bir başka çalışmada MISO OFDM alt-taşıyıcı çoğullama tekniği kullanılan bir VLC sistemi önerilmiş ve tasarım beyaz LED'lerden oluşan 2×1 MISO dizisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Veri sırasıyla 6.25 MHz and 12.5 MHz frekanslarda iki alt-taşıyıcı kullanılarak modüle edilmiştir [123].

MIMO, MIMO-OFDM ve MU-MISO teknikleri kullanılarak yapılan VLC sistem tasarımlarına yönelik olarak literatürde çok az sayıda çalışma bulunmaktadır, bu tekniklerin kullanımı ile sistem tasarlanması konusu üzerinde çalışılması gereken bir konu olarak değerlendirilmektedir.

2.4.2 Fiziksel katmanlar

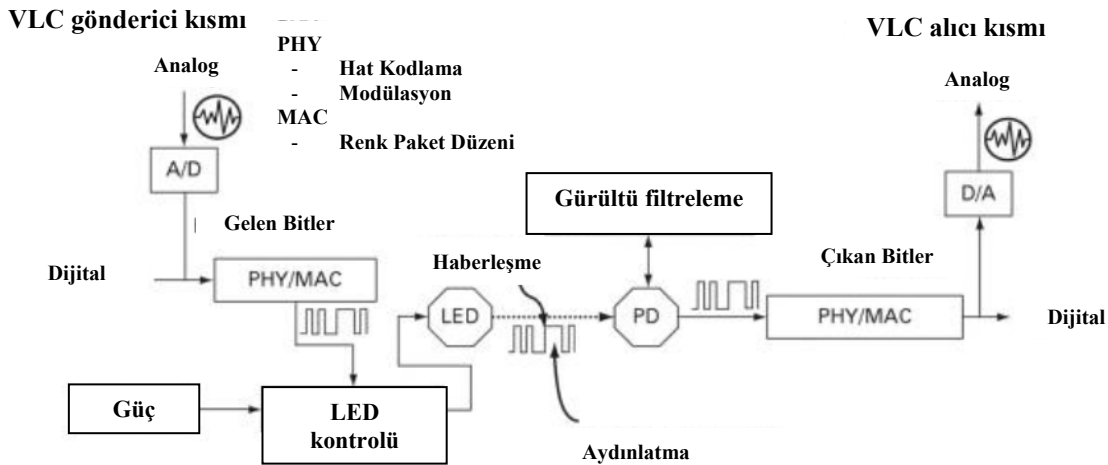
Haberleşme sistemlerinin performansı içerdikleri her bir birimin performansına bağlıdır. Bu birimler; kodlama, modülasyon, LED kaynağı (verici), ışın enerji dağılımı, ışık yayılımı, algılama ve ön-işleme olarak adlandırılmaktadır. VLC sistemlerinde ana bileşen Fiziksel Katman (Physical Layer (PHY))'dır. Diğer bileşenler LED, Fotodiod (Photodiod (PD)) ve Medya Erişim Kontrolü (Media Access Control (MAC))'dür.

Yeni nesil kablosuz haberleşme sistemlerinde artan yüksek veri hızı talepleri nedeniyle, fiziksel katmanın geliştirilmesi VLC sistemlerinde en önemli ve aynı zamanda en çok zorluk yaşanan konudur. Bu süreçte tanımlanan gereksinimler; bit başına düşen maliyetleri azaltmak, bantgenişliği ve spektral katman verimliliğini artırmaktır. PHY, cihaz ve fiziksel kanal arasındaki korelasyonu belirleyen bir birimdir. VLC sistemlerinde PHY katmanında; uzunluğu sınırlı çalıştırılan hat kodlama (run length limited line coding (RLL)), ışığın modülasyonu ve ileri hata kodlama düzeltme için kanal kodlama (forward error correction (FEC)) işlemleri

tanımlanmaktadır [106]. LED ışığın özelliklerinin modüle edilmesi ile elde edilerek iletilen bilgi, PHY katmanında hat-kodlanır, modüle edilir ve alıcı kısmında alınan mesaj demodüle edilerek çözümlenir. VLC PHY mimarisi Şekil 2.3'te gösterilmiştir [28]. VLC güvenilirliğini geliştirmek için kanal kodlama ve modülasyon önemli süreçlerdir. Işık kaynağı kullanıcı tarafından karartılırken VLC sistemi haberleşmeyi desteklemek zorundadır. Kullanıcı karartma ayarlarını değiştirdiğinde, PHY ve MAC katmanları veri ve boş zaman iletimini yeni ayarlara göre tekrar ayarlar, dolayısıyla PHY modları karartma kontrolü varlığında çalışır.

PHY'de tam çift yönlü haberleşme sağlamak için ayrı bir U/L ve D/L gereklidir. D/L için VLC hattı ve U/L için IR veya RF sinyal iletimi tercih edilmektedir. PHY'de haberleşme paketler şeklinde gerçekleşmektedir [102].

MAC katmanı ise enerjinin başladığı katmandır, enerji tüketiminin azlatılmasında önemli bir rolü vardır. Enerji verimliliği, çarpışmadan kaçınma, düşük yük, düşük gecikme süresi, yüksek verimlilik, ölçeklenebilirlik, esneklik tipik bir MAC katmanının hedefleridir. Parallellleştirilmiş protokol işleminin verimli bir şekilde yürütülebilmesi için, MAC yükseltme ve hatta PHY standardizasyonu işlemleri çoklu paralel kablosuz kanalların enerji verimliliğini efektif olarak desteklemeli ve özel donanım hızlandırıcıları ile değişebilmelidir [128].



Şekil 2.33: VLC PHY Mimarisi [28].

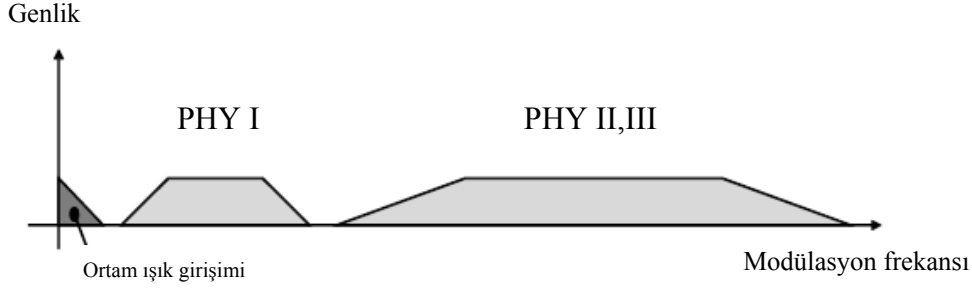
Üç farklı işletme modu; Açma-Kapama Anahtarlama (OOK), Değişken Pals-Konum Modülasyonu (Variable Pulse Position Modulation (VPPM)) ve Renk-Kaydırmalı Anahtarlama (Color Shift Keying (CSK)) iç mekan VLC sistemleri için IEEE 802.15.7 standardında modülasyon teknikleri olarak belirlenmiştir. Her bir mod nihai olarak elde edilebilecek veri hızlarına ulaşmak için çeşitli kodlama mekanizmaları ile

“bölünen” bağlantılı optik saat hızlarına sahiptir. Çeşitli PHY’lerde desteklenen veri hızları geniş aralıkta optik kaynakları ve dedektörleri desteklemek için risk yaratmayacak şekilde oldukça ölçülü olarak tasarlanmıştır.

Ayrıca IEEE 802.15.7 standardı, doğal gün ışığı ve geniş görünür ışık spektrumu boyunca beyaz ışık üreten floresan ve akkor lambaların yapay aydınlatması gibi optik gürültü kaynakları etkisi altında çalışacak şekilde tasarlanmıştır.

PHY I optik saat hızı ≤ 400 kHz olarak seçilmiş ve veri hızı 11.67’den 266.6 kb/s’a kadar tanımlanmıştır. Bu nedenle PHY I düşük hız, uzun mesafe, LED’leri sürmek için yüksek akım gerektiren ve bu nedenle anahtarlaması yavaş olan araçlar ve trafik ışıkları gibi dış mekan uygulamaları için optimize edilmiştir. Hızlı LED’lerin ihtiyaçlarını karşılamak için PHY II optik saat hızı ≤ 120 MHz olarak seçilmiş ve veri hızı 1.25’den 96 Mb/s’a ayarlanmıştır. Bu nedenle PHY II, yüksek hız, iç mekan altyapısı ve noktadan noktaya haberleşme uygulamaları için optimize edilmiştir. PHY III optik saat hızı ≤ 24 MHz seçilmiştir ve veri hızı 12’den 96 Mb/s’a ayarlanmıştır ki, bu saat hızı mevcut LED’ler tarafından desteklenen maksimum saat hızıdır. Bu nedenle PHY III iç mekan noktadan noktaya uygulamaları için optimize edilmiştir [103,129]. Öngörülen en yüksek veri hızı OOK ve CSK için 96 Mb/s ve VPPM için 24 Mb/s olarak belirlenmiştir.

PHY I ve PHY II basit bir ışık kaynağı için tanımlanmıştır ve yalnızca OOK ve VPPM’yi desteklemektedir. PHY III farklı frekanslarda (renklerde) çoklu optik kaynaklar kullanır ve CSK olarak adlandırılan özel bir modülasyon formatı ile gerçekleşir. Tüm üç PHY tipi de, haberleşme ve aydınlatmada istenmeyen bir durum olarak ortaya çıkan titremeyi azaltmak ve kararma kontrolünü desteklemek amacıyla sistemde birlikte bir arada var olabilecek şekilde tasarlanmıştır, ancak bu üç mod birlikte çalıştırılmaz [106,129]. PHY I, PHY II ve PHY III’ün spektral ortam bölgeleri Şekil 2.4’te gösterilmiştir. Frekans Bölmeli Çoklama (Frequency Division Multiplexing (FDM)), PHY I ve PHY II için bir arada çalışma mekanizmasıdır. Sadece PHY II ve PHY III için belirlenen optik saat frekansları frekans ortamında örtüşmektedir. PHY III için gereken çoklu optik frekans bantları mevcut ticari cihazların çoğunluğu tarafından desteklenmez. Bu nedenle tüm PHY III cihazları PHY II ile bir arada sistem tasarımında yer alabilmesi için PHY II cihazı kullanması gerekmektedir [103].



Şekil 2.34: PHY tiplerinin modülasyon ortamında FDM dağılımı [103].

Fiziksel katmanın çalışma frekansı, modülasyon, kanal kodlama, iletim gücü ve spektrum algılama süresi cinsinden tasarlanmalıdır. Ayrıca fiziksel katmanda ikili faz kaydırmalı anahtarlama açma-kapama anahtarlama yerine tercih edilmelidir veya sabit güç kısıtlamasını karşılamak için ek önlemler alınmalıdır [110]. Tasarımlarda yeni nesil uygulamalar için optimize edilen, paralel MAC ve PHY işlemleri için enerji verimli geliştirilmiş ileri hata kontrolü ve yeniden iletim düzenleri de kapsanmalıdır [128].

Ancak VLC teknolojisinde son zamanlarda yaşanan hızlı gelişim sürecinin de etkisiyle bu alanda yayınlanan standartlar ihtiyacı tam olarak karşılayamamaktadır. Bu nedenle VLC sistemleri alt gruplarını da içerecek şekilde daha fazla çalışma grubu oluşturularak hazırlanacak yeni standartların farklı organların işbirliği ve onayıyla bir an önce yayınlanması gerekmektedir.

2.4.2.1 Modülasyon tabanlı uygulamalar

VLC sistemlerinde kullanılan modülasyon tekniği, tasarımda Gb/s seviyesinde yüksek veri hızlarına erişirken araştırmacıların karşısına çıkan ana sorundur. Modülasyon tekniği kısıtları; LED'lerin doğrusal olmayan transfer fonksiyonu, aydınlatma özellikleri ve kanal kısıtları olarak sıralanmaktadır. LED'in doğrusal olmayan yapısı çoğunlukla analog veya alt-taşıyıcı modülasyon tekniklerini etkilemektedir. Frekans ortamında işlem gerektiren karmaşık modülasyon teknikleri ve çoklu-erişim bakış açıları LED'in doğrusal olmayan yapısı nedeniyle maliyet etkin bir çözüm olarak değerlendirilmemektedir. Beyaz LED'lerin modülasyon bantgenişliği tarafından sınırlanan VLC'nin iletim kapasitesinin geliştirilmesi için, çözüm olarak darbe teknikleri gibi spektral olarak verimli modülasyonlar kullanılması önerilmektedir.

VLC sistemlerinde kullanılan modülasyon teknikleri farklı veri hızları ve farklı karartma aralıkları arasında geçişlere izin verebilmelidir. Veri iletimi karartma mekanizması ile koordine edilebilmelidir, bu nedenle VLC sistem tasarımlarında aydınlatma fonksiyonunun karartma kontrolü ile uyumlu modülasyon tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca modülasyon tekniği optimal olarak aydınlatma ve haberleşme için çelişen gereksinimleri dengeleyebilmelidir. Modülasyonun LED aydınlatmanın parlaklığını düşürecek şekilde veya insanlar tarafından algılanacak şekilde veri çerçevesi içinde veya çerçeveler arasında titreme etkisine sebep olması istenmeyen bir durumdur. VLC kanal tepkisinin hızlı değişmesi nedeniyle ise, karar verebilmek için bir eşik değerine gerek duymayan modülasyon teknikleri araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir. Araştırmacılar tarafından VLC modülasyonları için gerekli temel tasarım konuları üzerine çalışmalar yapılmıştır [130].

Bu alanda, haberleşme performansını da göz önüne alarak aydınlatma gereksinimlerini sağlayan çok fazla sayıda farklı karakteristiklere, avantaj ve dezavantajlara sahip modülasyon metodları üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir.

Literatürde yer alan ve VLC sistem tasarımlarına uygulanan teknikler şu şekildedir: Doğrudan Algılama ile Gerilim Modülasyonu (Intensity Modulation with Direct Detection (IM/DD)), Açma Kapama Anahtarlama (On-Off Keying (OOK)), Dörtlü Genlik Kaydırmalı Anahtarlama Modülasyonu (Quaternary-Amplitude-Shift Keying Modulation (QASK)), Bindirilmiş Darbe Genlik Modülasyonu (Superposed Pulse Amplitude Modulation (SPAM)), Ortogonal Frekans Bölmeli Modülasyon (Orthogonal Frequency Division Modulation (OFDM)), Darbe Konumu Modülasyonu (Pulse Position Modulation (PPM)), Darbe Genişliği Modülasyonu (Pulse Width Modulation (PWM)), Değişken Çok-Seviyeli Dördün Genlik Modülasyonu (Variable Multi-Level Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM)), Metamerik Modülasyon (Metameric Modulation (MM)), Değişken Darbe-Konum Modülasyonu (Variable Pulse-Position Modulation (VPPM)), Çakışan Darbe Konumu Modülasyonu (Overlapping Pulse Position Modulation (OPPM)), Çoklu Darbe Konumu Modülasyonu (Multiple Pulse Position Modulation (MPPM)), Çift Eğimli Darbe Modülasyonu (Pulse Dual Slope Modulation (PDSM)), Renk Kaydırmalı Anahtarlama (Color Shift Keying (CSK)), PWM sinyali ile birlikte ayırık çok-tonlu modülasyon (Discrete Multitone Modulation with Pulse Width Modulation ((PWM-DMT)), Ters Darbe Konumu Modülasyonu (Inverse Pulse Position

Modulation (IPPM)), Anahtarlama Frekans Modülasyonu (Switching Frequency Modulation (SFM)), Taşıyıcısız Genlik ve Faz Modülasyonu (Carrierless Amplitude and Phase (CAP) Modulation), Arıtılmış Darbe Konum Modülasyonu (Expurgated Pulse-Position Modulation (EPPM)), Çakışan Arıtılmış Darbe Konum Modülasyonu (Overlapped Expurgated Pulse-Position Modulation (OEPPM)) ve Çok Katlı Arıtılmış Darbe Konum Modülasyonu (Multilevel Expurgated Pulse-Position Modulation (MEPPM))'dur.

Aşağıda söz konusu modülasyon tekniklerinin kısa açıklamaları ve bu tekniklerin kullanılması sonucunda elde edilen veri hızları ve diğer sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Modülasyon teknikleri karşılaştırılırken enerji etkin çözüm üreten ve Gb/s veri hızlarında iletme izin veren modülasyon tekniğinin belirlenmesi konusu üzerinde durulmuştur.

Doğrudan algılama ile gerilim modülasyonu (modulation with direct detection (IM/DD))

IM/DD tekniği basit ve maliyet etkin bir tekniktir. Sadece sinyalin gerilimini modüle etmekte, sinyalin faz bilgisini modüle etmemektedir. Veri dalga formu optik taşıyıcının ani gücü üzerine modüle edilmekte ve optik algılayıcı alınan ani güçle orantılı bir akım üretmektedir. IM/DD tekniği elektrik sinyalinin gerçel-değerli ve tek kutuplu (pozitif-değerli) olmasını gerektirmektedir.

Açma-kapama anahtarlama (on-off keying (OOK))

OOK tekniğinde karartma aralığı açma kapama oranı ile belirlenmektedir. Bu teknik uygulama kolaylığı ve bantgenişliği verimliliği nedeniyle VLC sistemleri tasarımında en yaygın kullanılan modülasyon tekniğidir. Karartma koşulları altında, kompanzasyon zamanı eklenerek tasarımda sabit aralık ve değişken veri hızı sağlanmaktadır [106]. Literatürde farklı uygulamaları da mevcuttur. Bir çalışmada zaman çoğullamalı OOK tekniği, yapay bitler eklenerek karartma kontrolü sağlamak için önerilmiş ve iletim verimliliği standart OOK ile karşılaştırılmıştır [100]. Önerilen tekniğin ISI'ya karşı direnci sınırlıdır. Ayrıca OOK tekniği kapasite ve yüksek kesim hızı verimliliğini sağlayabilmek için uygun olmayan asimetric girdiler de gerektirmektedir. Ancak kamera tabanlı VLC sistemlerinde kamera sensörü tarafından OOK sinyalinin algılanması zordur çünkü OOK sinyalinin frekansı kameranın çerçeve hızı ile uyumlu değildir. Bu durumda standart kamera çerçeve hızı ile frekans kaydırmalı OOK (FSOOK) kullanılarak yapılmaktadır [118].

Dörtlü-genlik anahtar kaydırmalı modülasyon (quaternary-amplitude-shift keying modulation (QASK))

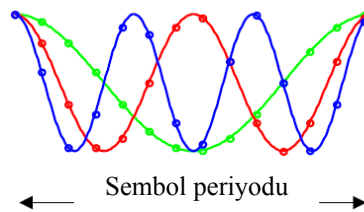
Bu teknik dijital filtreleme (uyarlanabilir kontrollü FIR dengeleyici (adaptively-controlled FIR equalizer)) ile birlikte kullanılmaktadır, bu durumda LED'in doğrudan modülasyon hızı artırılarak yüksek hızlı veri iletimine ulaşılabilmektedir. FIR dengeleyici, LED'lerin VLC sistemlerinde kullanılması sırasında ortaya çıkan ISI etkisini azaltmakta etkili bir yöntemdir. Bu tekniği kullanarak LED'in doğrudan modülasyon hızı 20 kata kadar (20 Mbit/s) artırılabilir, bu yöntemle serbest uzayda 1 m'de optik mavi filtre kullanılmadan BER performansı $< 10^{-10}$ elde edilmiştir [131]. Mavi filtre kullanılması durumunda SNR oranı ve hat mesafesi azalmaktadır, bu nedenle VLC uygulamalarında mavi filtre kullanımı tercih edilmemektedir.

Çakıştırılmış darbe genlik modülasyonu (superposed pulse amplitude modulation (SPAM))

VLC sistemlerinde kullanılan düşük maliyetli yeni bir modülasyon tekniği çakıştırılmış darbe genlik modülasyonudur [132]. Bu tekniğin avantajı LED'in doğrusal olmama özelliğinden etkilenmemesidir. Yapılan bir çalışmada LED dizisi kullanılarak, farklı mekansal pozisyonlardan çoklu optik darbeler paralel olarak iletilmiştir. BER 1×10^{-3} iken, veri hızı optik filtre ve RC ön-dengeleyici kullanılarak 120 Mbit/s elde edilmiştir.

Ortogonal frekans bölmeli modülasyon (orthogonal frequency division modulation (OFDM))

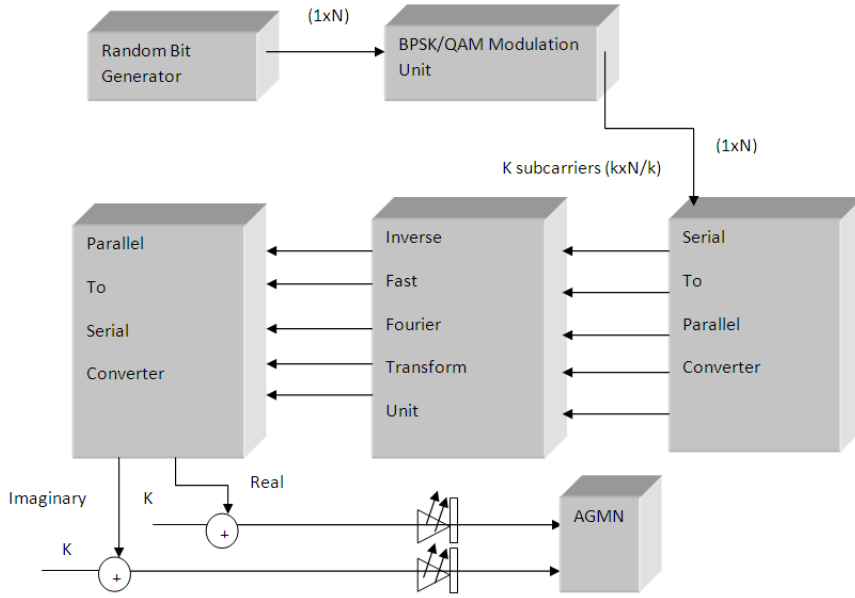
OFDM tekniği daha önce de belirtildiği üzere paralel veri iletim tekniğidir. Her biri farklı ancak harmonik olarak bağlı frekanslarda ortogonal alt-taşıyıcı kullanılmaktadır ve bu alt-taşıyıcıların iletilmesi ile yüksek veri hızlarına ulaşılabilmektedir.



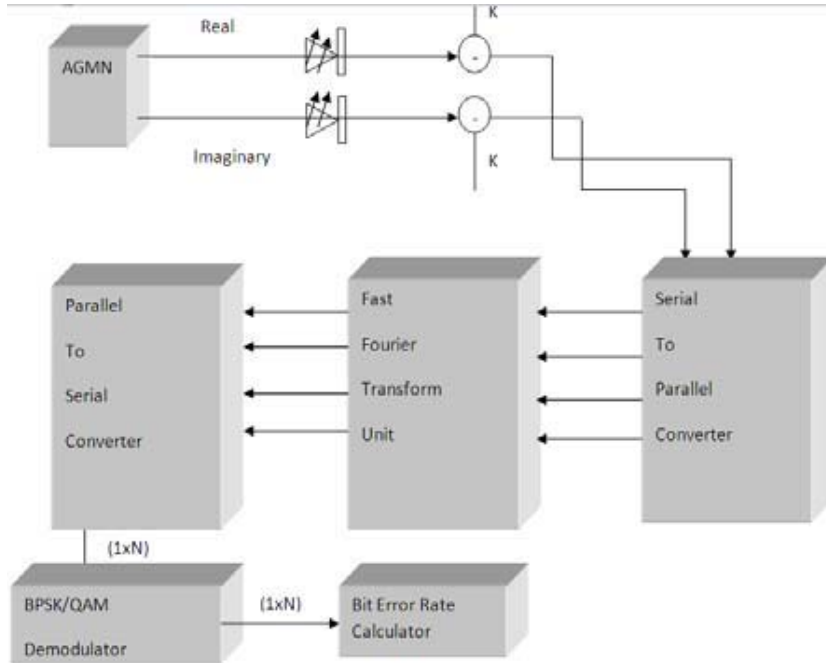
Şekil 2.35: Sinyal gösterimi [133].

$$\int_0^T \sin \frac{2\pi kt}{T} \sin \frac{-2\pi lt}{T} dt = 0, k \neq l \quad (2.30)$$

Ayrıca her bir alt taşıyıcı sinyalini farklı bir frekans ile göndererek ISI etkisinden de kaçınılmaktadır [133]. Frekanslar sinyal periyodu içinde döngülerin integral sayısını elde edecek şekilde seçilmektedir. İletilen verilerde varyasyonu sağlayabilmek için ortamdaki her bir bilgi her bir alttaşıyıcınının faz ve genliği değiştirilerek iletilmektedir.



Şekil 2.36: OFDM verici [133].



Şekil 2.37: OFDM alıcı [133].

Dağılımlı iletişim sistemlerinde yüksek hızlı veri iletim yeteneğine sahip ve spektral olarak etkin bir tekniktir. Bantgeniği kısıtlı kanallarda ise floresan aydınlatmadan kaynaklanan girişimleri önlemede etkindir. OFDM tekniğinin VLC sistemlerinde

kullanımında bazı zorluklar da mevcuttur. Örneğin LED'in güçlü doğrusal olmama özelliğinden kaynaklanan alt taşıyıcı etkileşimi formunda bir dezavantajı vardır ve bu da ortam gürültüsünün her bir alt taşıyıcı altında artmasına neden olmaktadır [20,134]. Araştırmacılar OFDM tekniğini LED'in doğrusal olmama özelliğine karşı daha dirençli olması için modifiye ederek tasarımlarında kullanmışlar veya kompensatörler tasarlayarak transfer fonksiyonunu doğrusallaştırmaya çalışmışlardır [58]. Ayrıca PAPR değeri, VLC sistemleri için kritik bir parametredir ve PAPR kontrolü OFDM sistemlerinde, CAP sinyalleri ile karşılaştırıldığında kontrol edilemez bir yapıdadır [74,135]. Bu durum çıkış sinyalinin ciddi anlamda bozunuma uğramasına neden olmaktadır, bu nedenle VLC sistemlerinde öncelikli olarak üzerinde çalışılması gereken bir konudur [20]. Bu probleme bir çözüm olarak modülasyon indeksinin azaltılması önerilmiştir [58]. Ayrıca iletim için kullanılan LED dizileri, doğrusal olmayan bozulmayı ortadan kaldırarak her bir LED için PAPR değerini azaltma avantajına sahiptir [130].

OFDM'nin iç mekan VLC sisteminde kullanımında karartma fonksiyonu ortaya çıkan bir diğer zorluktur. Karartma fonksiyonu için araştırmacılar OFDM tekniğini PWM ile birlikte kullanmışlar [136], ancak bu durumda veri hızı sınırlanmıştır ve ortaya çıkan titreme etkisi dikkate değerdir. Başka bir çalışmada OFDM, QAM tekniği ile birlikte kullanılarak ve daha yüksek kapasiteli dengesiz frekans yanıtı elde edebilmek için bit ve güç yükleme teknikleri de uygulanarak 513 Mbit/s hız elde edilmiştir [137]. Araştırmacılar, fiziksel olarak ayrılmış çoklu vericilerin ve çoklu alıcıların kullanımı ile veri iletim hızını artırarak, OFDM'yi mekansal modülasyon (spatial modulation (SM)) ile entegre etmişlerdir [138]. OFDM'nin spektral verimliliği aynı bantgenişliğinde M-ary SM ile artırılabilir, bu durumda alınan toplam güç de artırılmış olmaktadır ve bu bir eşik değerine dayanmamaktadır. SM çok kullanıcılı VLC ağ iletiminde anında erişimi desteklemek için kullanılmıştır. Ancak bu yöntemde karşılaşılan zorluk, SM'nin gölgeleme ve çok yönlü girişime duyarlılığından kaynaklanmaktadır. Çeşitli yollardan alınan sinyaller, çok dağılımlı iç mekan kanallarda alıcılardaki iletimler arasında ciddi girişimlere sebep olabilmektedir [130].

Sınırlı bant genişliğine sahip VLC kanalları üzerinde ve dengesiz frekans tepkilerinde, OFDM tekniğinin iletim kapasitesi bit ve güç yükleme teknikleri de kullanılarak gerekli BER değeri kısıtı altında maksimize edilebilir. Yapılan çalışmada BER $< 10^{-31}$ iken 1.08 Gb/s hıza erişilebilmiştir [74]. VLC sistemlerinde

OFDM tekniğinin versiyonları olan DC sapmalı optik OFDM (DC biased optical OFDM (DCO-OFDM)) ve asimetrik optik kırpmalı OFDM (asymmetrically clipped optical OFDM (ACO-OFDM)) teknikleri de modifiye edilerek kullanılmaktadır [20,134].

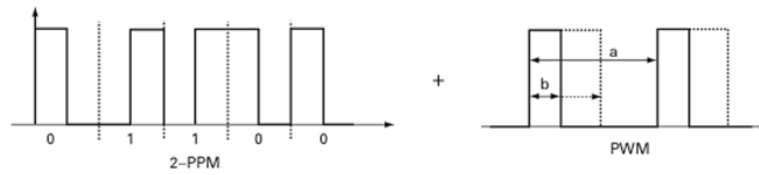
Darbe konum modülasyonu (pulse position modulation (PPM))

Darbe teknikleri, alt-taşıyıcılı modülasyon teknikleri ile karşılaştırıldıklarında yüksek spektral verimlilikleri nedeniyle doğrusal olmayan etkileri ortadan kaldırmada ciddi anlamda etkilidirler. Ayrıca darbe konum tekniğine dayanan modülasyonlar ile birlikte LED dizilerinin kullanımı da avantaj sağlamaktadır. Ayrık LED'lerin farklı zamanlarda çeşitli darbeler üretmeleri ve bu nedenle LED dizisi yapısının doğrusal olmayan bozulmayı efektif olarak ortadan kaldırması nedeniyle tercih edilmektedirler [130]. OOK ve PPM gibi darbe modülasyon tekniklerinin avantajı, kolay uygulanabilmeleri ve ISI etkisini ortadan kaldırmak için doğrusal çapraz dengeleyiciler ile uyumlu olmalarıdır [90]. PPM tekniğinin OOK tekniğine göre avantajı, eşik değerinden bağımsız algılama yapmasıdır ki, bu durumda uygulamada OOK'nın harcadığı gücün yarısını harcamaktadır. Ancak aynı zamanda bant genişliği gereksiniminde iki kat artışa da neden olmaktadır [139]. Ayrıca PPM tekniği veriyi zaman ortamında kapsama avantajına da sahiptir ki, bu durumda LED'in doğrusal olmama özelliğine daha az duyarlıdır ve aydınlatma fonksiyonunu da etkilemeden, sabit ortalama güç ile karartma desteğini de devam ettirebilmektedir [134,140]. Bunun yanında PPM verici/alıcı tasarımını da basitleştirmektedir [131,141].

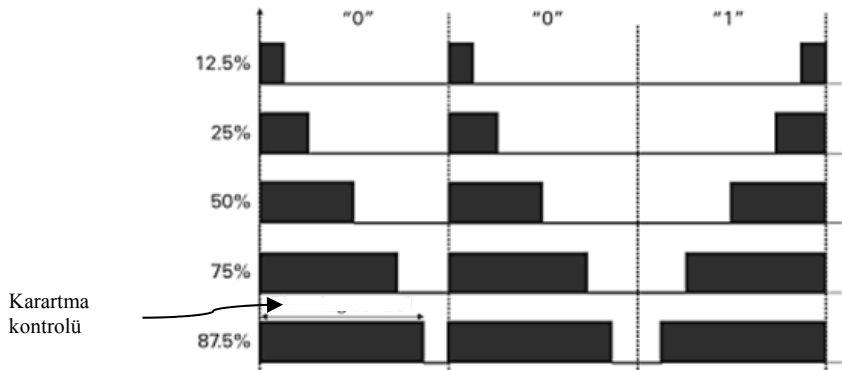
Ancak bir dezavantaj olarak, DC seviyeli darbe modülasyon tekniklerinde optik filtreleme ve bazal sapma (baseline wander (BLW))'dan kaynaklanan eşik algılama hatası nedeniyle sistem performansı ciddi anlamda etkilenir. BLW telekomünikasyonda çok bilinen bir problemdir ve bu konu ile ilgili kapalı formda gösterimler [142]'de verilmiştir. Ayrıca bu tekniğin spektral verimliliği takımyıldızı boyutu artıkça düşmektedir ve PPM yüksek hızda veri iletimi için uygun olmayan bir teknik haline gelmektedir. Sadece sistem ortalama güç sınırlı bir sistem ise, PPM tekniği güçlü arka plan aydınlatması haberleşmeyi etkilediğinde verimli bir metoddur. Tepe güç sınırlı sistemlerde Q değerini artırmak sadece sembol başına alınan enerjiyi düşürmektedir. Bu nedenle PPM'in modifiye edilmiş ve geliştirilmiş formları için çözülmesi gereken sorunlar mevcuttur [130].

Ancak PPM veya PWM gibi IEEE 802.11 standardında belirlenen tekniklerin dezavantajı, özellikle veri hızı çok düşük olduğunda veya veri iletimi arasındaki boş periyod çok uzun genişletildiğinde, fark edilebilir bir titreme etkisinin ortaya çıkmasına neden olabilmeleridir. Ayrıca senkronize bir şekilde ışığın aralıklı olarak gücünün azalıp çoğalmasına duyarlıdır, tam senkronizasyon gerektirmektedir ve düşük parlaklık aralığı nedeniyle aydınlatma gereksinimlerini de karşılayamamaktadır. Parlaklık kontrolünün bu teknikle sağlanması oldukça zordur ve bu nedenle PPM mevcut fosfor tabanlı aydınlatma sistemleri ile yüksek bantgenişliği verimliliği sağlayamamaktadır [105,134,143,144]. Yüksek PAPR'a neden olması ve DC bölge çevresinde az sayıda spektral bileşene sahip olması da dezavantajıdır [145].

Tekniğin uygulanması sırasında ortaya çıkan zorlukların çözümü için çakışan-PPM (overlapped-ppm (OPPM)), değişken-PPM (variable-PPM (VPPM)) gibi geliştirilmiş formlarda PPM teknikleri önerilmiştir [141,146].



Şekil 2.38: Değişken darbe konum modülasyonunun prensibi [28].



Şekil 2.39: Karartma kontrolü ile değişken darbe konum modülasyonu örneği [28].

Ancak araştırmacılar önemli derecede ilave BW gereksinimi nedeniyle yüksek seviyeli PPM'leri kullanmayı tercih etmemektedirler. Örneğin, aynı BW gereksinimi ile 2-PPM DC çevresinde yüksek spektral bileşen içerirken, 4-PPM az veya hiç DC bileşen içermemekte ve ayrıca düşük-frekans bileşenleri içermektedir. Ancak iç mekan optik kablosuz haberleşme hatlarında ortaya çıkan yüksek geçiren filtre

kaynaklı sapmalar 4-PPM tekniği ile daha verimli bir şekilde azaltılabilmektedir [147].

Araştırmacılar ayrıca ortalama güç kısıtlarını karşılamak, veri hızını artırmak için PPM tekniğini PWM ile birlikte kullanmışlardır. Bir çalışmada seviye kesme tekniği ile birlikte uygulanan çoklu-kodlamalı değişken darbe konum modüasyonu (multi-coded variable pulse position modulation (MC-VPPM)) performansı [148] PWM ve PPM sinyalleri kullanılarak gösterilmiştir. MC-VPPM tekniği ile veri hızı artırılarak, hata performansı düşürölmüş ve alıcının karmaşıklığı azaltılmıştır. MC-VPPM seviye kesme tekniği ile birlikte uygulandığında elde edilen sonuçlar, VPPM tekniği ile kıyaslandığında karşılaştırılabilir bir BER eğrisi ile 6 kat daha fazla veri hızı elde edilmiştir.

Mekansal darbe konum modüasyonu (spatial pulse position modulation (PPM))

Bu teknik optik uzay kaydırmalı anahtarlama (spaceshift keying (SSK)) ile PPM tekniklerinin birlikte uygulanmasıdır. Bu metod mekansal PPM (spatial PPM (SPPM)) olarak adlandırılmaktadır. Çoklu vericili bir sinyal tekniğidir, düşük karmaşıklığa sahiptir ve OFDM ile karşılaştırıldığında LED'in doğrusal olmama özelliğine daha az duyarlıdır. Bu teknik PPM tekniğinin enerji verimliliğini SSK tekniğinin yüksek spektral verimliliği ile birleştirmektedir.

Sistem parametrelerinin (örneğin verici sayısı ve M değeri) uygun değerlerde seçilmesi ile enerji verimliliği ve bantgenişliği artırılabilir. Az sayıda verici kullanılarak enerji verimliliği artırılabilir, ancak bu durumda daha fazla bantgenişliğine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrı kanallar bu teknikte bir önkoşuldur. SPPM'nin enerji ve spektral verimliliği OOK'ya göre daha iyidir [149].

Darbe genişlik modüasyonu (pulse width modulation (PWM))

PWM modüasyonu dijital karatma tekniğinin en basit örneğidir. Kısaca LED sürücü akımı devre stabilitesi için sabit olduğunda, ışık PWM sinyalinin “açık” periyodunda iletilmektedir. VLC sistemlerinde karatma kontrolü kapsamında geniş uygulama alanı mevcuttur ve basit yapısından dolayı endüstriyel alanda çoğunlukla tercih edilmektedir.

PWM tekniği, sinyalin “açık (yüksek)” ve “kapalı (alçak)” konumu arasında anahtarlama şeklinde uygulanmaktadır. Dolayısıyla PWM sinyalinin doğası gereği “kapalı (off)” periyodunda hiç ışık modüle edilememekte ve iletilememektedir. Bu

durum gönderilen bit sayısı ve veri hızında azalmaya neden olmaktadır. Veri hızının artırılması gerekmektedir. Ancak teknik yüksek veri hızlarında karartma kontrolü altında PWM sinyalin “kapalı” periyodu sırasında ortaya çıkan yüksek SNR değeri nedeniyle bozulan BER performansı gibi önemli bir dezavantaj sergilemektedir. Dolayısıyla PWM tekniği karartma kontrolü mekanizması, OOK sinyalinin haberleşme gereksinimlerini karşılamamakta ve enerji tüketimini artırmaktadır [150]. Ayrıca her bir darbeye bir bitten daha fazla veri OOK modülasyonu için gerekenden daha uzun darbelerle iletilmesi nedeniyle PWM modülasyonunun kullanımı OOK tekniğine göre avantajlı değildir.

Ancak yapılan bir çalışmada, PWM tabanlı modülasyon teknikleri ile modülasyon indeksini kontrol ederek geniş bir aralıkta parlaklık seviyesi (0 %-10%) elde edilebildiği gösterilmiştir. Burada karartma sinyali frekansı tipik olarak 100Hz’in üzerindedir. PWM sinyalin zaman periyodu sabittir, oysa görev döngüsü gerekli karartma yüzdesi ile orantılı olarak değişmektedir. Bu çalışmada karışık PWM/AM modülasyonu performansı InGaN diodlar ve fosfor-dönüştürücü beyaz diodların kullanımı ile incelenmiştir ve sonuç olarak tekniğin söz konusu diodlar üzerinde artırılmış kontrole sahip olduğu belirlenmiştir [97]. Bir başka çalışmada PWM tekniği AM ile birlikte kullanılarak, çıkışta alınan renklerde meydana gelen kaymaları daha fazla azaltmak amaçlanmıştır [98]. Farklı bir çalışmada ise PWM alt-taşıyıcı darbe konum modülasyonu (sub-carrier pulse position modulation (SC-PPM)) ile birlikte VLC sistemlerinde parlaklık kontrolünü sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Yöntemin avantajı basit olmasıdır ancak karartma frekansı, güvenilir bir veri hattı performansını garantilemek için SC-PPM frekansı tarafından sınırlandırılmıştır ve güç verimli bir teknik değildir [151].

Değişken darbe konum modülasyonu (variable pulse width modulation (VPPM))

VPPM, PPM tekniğinin modifiye edilmiş şeklidir ve karartma koşulları altında darbe genişliğini ayarlayarak sabit veri hızı ve değişken aralık sağlamaktadır [106] ve IEEE 802.15.7 standardında önerilmiş bir tekniktir.

Bu tekniğin veri gönderme şekli PPM ile benzerdir, veri göndermek için ikili PPM kullanılmaktadır ve ışık aydınlatma seviyesinin kontrol edilebilmesi için darbe genişliği değiştirilmektedir. VPPM esnek karartma kontrolü sağlamaktadır ve PPM ile karşılaştırıldığında aynı PAPR değeri için düşük spektral verimliliğe sahiptir.

Daha da fazlası çakıştırma tekniği VPPM üzerinde bant genişliği sınırlı kaynaklar için veri hızını artırmada kullanılamamaktadır [152]. ereve içinde ortaya çıkan titremeye karşı VPPM kullanışlı bir metod olarak değerlendirilmektedir. Karartma kontrolü genlik ile değil darbe genişliği ile uygulanmaktadır ve darbe genliği sürekli olarak sabittir. Bu nedenle ışık kaynağında ortaya çıkan bir renk-kayması dikkate alınmamaktadır. Bu metodun titreme etkisini ortadan kaldırma, tam parlaklık ve karartma kontrolü özellikleri avantajları arasında sayılmaktadır. 1 ve 0 bitleri üzerindeki ortalama parlaklık sabittir, bu nedenle titreme etkisi sorunu ortadan kaldırılmıştır ve zamanında darbe genişliğini kontrol ederek karartma ve tam parlaklık elde edilir. Işık kaynağının tam parlaklığı VPPM için darbe genişliğini ayarlayarak sağlanır ki, bu durumda teknik iletişim ve parlaklık üzerinde eş zamanlı kontrol sağlamaktadır. Ancak parlaklık değiştiğinde bir parça verinin iletim zamanı değişebilmektedir ve bu da haberleşme protokolünün tasarımı karmaşık hale getirmektedir [105,153].

Değerken oklu-seviyeli dörtlü genlik modülasyonu (variable multi-level quadrature amplitude modulation (M-QAM))

OFDM sinyali, sistemdeki parlaklık değerikliklerine göre modülasyon indeksini ayarlayarak BER performansının bozulmasını önlemek için değerken M-QAM tekniği ile birlikte kullanılarak VLC sistemine uygulanmıştır. Bu teknik enerji tasarruflu bir metoddur ve karartma kontrol tekniği altında gürültü gücünün artmasını önlemektedir. Veri iletiminde gerekli olan LED lamba gücü, OOK sinyali ile karşılaştırıldığında düşmektedir ve değerken M-QAM sinyali karartma kontrol mekanizması ile birlikte hem aydınlatma hem de haberleşme gerekliliklerini gücü verimliliği ile birlikte sağlayabilmektedir [150].

Metamerik modülasyon (metameric modulation (MM))

Metamerik modülasyon, armatr kullanan optik kablosuz haberleşme sistemlerinde haberleşme gereksinimlerini sağlarken, aynı zamanda renklendirmeyi de optimize ederek sabit ortam aydınlatması kontrolünü sağlayan bir metoddur. MM tekniği CSK ile karşılaştırıldığında daha fazla enerji verimlidir ve renkte meydana gelen titremeyi azaltma, renklendirmeyi geliştirme gibi avantajları da vardır. Araştırmacılar bu teknikte LED bantgenişliğinin sistem bantgenişliğini aşmaması için oklu LED'leri tercih etmişlerdir. Ancak insan gözü ve alıcı diodun farklı frekans tepkileri olması ve

bu nedenle aynı LED kaynağını farklı algılamaları bu teknik için bir dezavantajdır. İnsan gözü tarafından aydınlatmada oluşan fark algılanamazken, çoklu dalga boylarının algılanması ve ayırt edilmesi amacıyla alıcıda fotodiod tasarımı gerektirmektedir [154].

Çakışan darbe-konum modülasyon (overlapping pulse position modulation (OPPM))

PPM tekniğine dayanan bu metod, çoklu-zaman dilimleri üzerine darbeleri yayarak haberleşme üzerinde LED bantgenişliğinden kaynaklanan sınırlamayı azaltarak veri hızını ve bantgenişliğinin verimliliğini artırmaktadır ve parlaklığı sadece sonlu süreksiz seviyelere sınırlandırmaktadır [144]. Bu nedenle PPM ile karşılaştırıldığında daha iyi aydınlatma performansı olan OPPM tekniği düşük titreme etkisi ve geniş karartma aralığı sağlama avantajına da sahiptir. Ayrıca hem kapasite hem de kesim hızı konusunda OOK modülasyonunun performansını geride bırakmaktadır. Eşit olasılıkta giriş sembolleri kullanıldığında ise OPPM daha verimli bir teknik haline gelmektedir.

Kafes kodlu modülasyon (trellis-coded modulation (TCM)) tekniği ile birlikte kullanıldığında, bantgenişliğinde herhangi bir genişlemeye sebep olmadan BER performansını geliştirmekte ve ayrıca darbe konumlarının çakışmasından kaynaklanan ISI nedeniyle bozulmuş olan OPPM tekniğinin hata olasılığı sorununu da çözümlenmektedir. Ayrıca, TCM tekniği de BER performansını geliştirmek için tasarımda kullanılabilir.

Ancak teknik beyaz Gauss gürültü katkılı (additive white gaussian noise (AWGN)) kanallarda, OOK ve VPM sinyalleri ile karşılaştırıldığında aynı BER performansına erişebilmek için çok daha fazla güç gerektirmektedir. Bu nedenle enerji verimli bir teknik değildir [104,143]. Ayrıca uygulamada LED için değişken bir sürücü kullanılırken, yüksek ve istikrarlı kesim veri hızına ek olarak, tasarımda daha kesin bir alıcı senkronizasyonu da gerekmektedir.

Literatürde optik haberleşme sistemlerinde OPPM tekniğinin uygulamasına [146] ve beyaz LED'lerin kullanımı ile iç mekan VLC sistemlerinde veri hızının artırılmasına yönelik çalışmalar mevcuttur [141]. Ayrıca VLC sistemlerinde kullanılan modülasyon teknikleri ile ilgili çok fazla sayıda karşılaştırmalı çalışma da mevcuttur. Örneğin bir çalışmada OOK, PPM, OPPM ve I-PPM tekniklerinin bantgenişliği gereksinimleri, güç verimlilikleri, parlaklık performansları ve titreme etkileri

karşılaştırılmıştır [143]. Bu çalışmaların sonuçları dikkate alındığında; OPPM tekniğinin daha esnek bir aydınlatma ile daha iyi performans sergilediği görülmektedir.

Çoklu darbe konum modülasyonu (multiple pulse position modulation (MPPM))

MPPM, PPM tekniğine ek bant genişliği uygulanması sonucunda derecesi artırılarak elde edilmiştir. Daha fazla yuva (yuva numarası 2'nin üssü olmalı; aksi halde kapasite harcanmaktadır) sembol periyodu içinde tanıtılmaktadır. MPPM tekniği PPM tekniğine göre enerji verimli bir tekniktir, daha az güç gereksinimi vardır. Her bir sembol zamanında iletilen çoklu darbeler nedeniyle MPPM'nin spektral verimliliği (~ 1) değişken açma-kapama anahtarlama (variable on-off keying (VOOK)), PPM ve VPPM tekniklerine göre çok daha yüksektir [145,155].

Ancak PPM üzerinde performans iyileştirme sadece sembollerin takım yıldızı boyutunda (MPPM sembollerin takımyıldızı minimum Hamming uzaklığı 2 olmalıdır) bir artış sağlanması durumunda yapılabilmektedir, semboller arasındaki uzaklık değişikliği ile performans iyileştirmesi yapılamamaktadır. Karşılaşılan diğer bir sorun ise, bit'ten sembole iyi bir eşleştirme bulunması sorunudur, genellikle tasarımda karmaşıklığı önlemek amacıyla rastgele eşleştirme uygulanmaktadır [130]. Literatürde MPPM tekniğinin iç mekan VLC sistemlerinde uygulamasına yönelik çalışmalar mevcuttur, bir çalışmada çok yollu dağılım için MPPM önerilmiştir [155]. Sistemde kodlama mekanizması değişken karatma seviyeleri sağlayarak enerji verimliliğini artırmak için tasarıma uyarlanmış ve ayrıca dengeleme yöntemleri BER performansını artırmak için uygulanmıştır. Kullanılan kod sözcüğü uzunluğu arttıkça da daha az optik güç gerektirmektedir

Çift-eğimli darbe modülasyonu (pulse dual slope modulation (PDSM))

Bu teknik analog modülasyon tekniğidir. PSM tekniği aşırı bantgenişliği kısıtlaması olmadan, gelişmiş S/N performansı sağlamaktadır ve aynı zamanda sisteme son derece düşük bir ışık yoğunluğu uygulanabilmektedir. PDSM, PSM tekniğinin modifiye edilmesi ile elde edilmiştir. En önemli avantajı çerçeve-içi ve çerçeveler-arası titreme etkisini kompanse edebilmesidir. Tekniğin tasarımda kullanılması durumunda, veri iletimi sırasında ortalama parlaklık bitlerinin birbirlerinin aynadan yansıyan görüntüleri şeklinde iletilmesi nedeniyle parlaklık farklılıkları

gözlemlenemediği için çerçeve-içi titreme etkisi kompanse edilmiş olmaktadır. İletilen boş örnek veri çerçevesi ile aynı ortalama parlaklığa sahiptir ve boş zaman periyodunda gönderilmektedir, bu durumda çerçeveler-arasında oluşan titreme etkisi de kompanse edilebilmektedir.

PDSM tekniği karartma kontrolü üzerinde de etkin bir tekniktir. Karartma fonksiyonu değişen darbe eğimleri ile kontrol edilmektedir. Ancak, eğer minimum genlik değeri daha önceden belirlenmemiş ise sinyalin algılanması işlemi sırasında zorluklarla karşılaşılabilir. Önceden belirlenen genlik değeri parlaklık üzerinde daha fazla kontrol sağlayabilmektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi tekniğin en önemli avantajı PDSM darbenin değişme şekli nedeniyle titreme etkisinin PPM ve PWM tekniklerinden daha az belirgin olmasıdır [105].

Renk kaydırmalı anahtarlama (renk kaydırmalı anahtarlama (CSK))

Bu teknik karmaşık bir yöntem izlemektedir. Veriyi iletmek için ışığın farklı renklerini birleştirerek, çoklu spektral kaynakları kullanmaktadır. Veri kısaca ışık renk özelliği ile taşınmaktadır ve bu nedenle çıkış sinyalinin şiddeti sabit kalmaktadır. CSK tekniğinde yüksek hızlı iletim için çoklu renk ışık kaynağı (RGB LED) ve birkaç dalgaboyu (renkler), LED dizisi ve fotodedektör dizisi kullanılmaktadır. Her ne kadar bu teknik mevcut aydınlatma gereksinimlerini karşılarsa da, erişilen bit hata oranı (BER) performansı yeterli değildir ve tam parlaklık altında haberleşme özelliği kullanılamamaktadır. CSK'nın genlik tabanlı karartma kontrolü mevcuttur, ışık kaynağını süren akım değiştirilerek sistemde parlaklık kontrol edilebilmektedir. Ancak genlik karartma fonksiyonu için kullanılan sürücü akımın kontrolünde ortaya çıkacak bir uygunsuzluk durumunda, ışık kaynağında renk kaymasının meydana gelmesi olasılığı da mevcuttur. Bu nedenle CSK tekniğinin, istenmeyen renk ve yoğunluk dalgalanmalarının ortaya çıkmasına neden olabilen renklendirme sorununa bağlı eksiklikleri bulunmaktadır ki bu da tasarımda istenmeyen bir durumdur [105,154,156].

PWM sinyali ile birlikte ayırık çok-tonlu modülasyon (discrete multitone modulation with pulse width modulation (PWM-DMT))

Bu tekniğin tasarımda kullanılması, PHY üzerinde PWM karartma sinyalinin DMT sinyali ile birlikte uygulanması ile sağlanmaktadır. DMT, kanalı çoklu paralel düz

frekans kanallarına bölen teknik spektral verimliliği yüksek, ileri seviyede bir modülasyon tekniğidir. Ancak uçtan uca doğrusal sinyal tepkisi gerektirmektedir. LED'lerin frekans bağımlılığını kompanse etmek için kullanılmakta ve beyaz ışık veren LED'lerin doğrudan modülasyon hızını artırabilmektedir. Yüksek-dereceli takımyıldızlarının, sınırlı bantgenişliği üzerinde yüksek veri hızlarına ulaşmak için kullanılması önerilmektedir. Ancak yapısı eşik algılamaya izin vermemektedir. Birden fazla sayıda alt-taşıyıcıdan oluşmaktadır ve bu nedenle çok yollu yayılım ortamında artırılmış sembol sürekliliğine sahiptir. Kısaca DMT sinyali çok yollu yayılım ortamında sağlamdır ve kanalın gecikme yayılımına karşı daha toleranslı bir yapıya sahiptir. Bu tekniğin kullanıldığı tasarımlarda, koruma aralığı kullanılmasından kaynaklanan azaltılmış ISI gözlemlenmekte veya ISI etkisi tamamen ortadan kaldırılmaktadır. Basit taşıyıcı modülasyonu ile karşılaştırıldığında, sistemde kullanılan dengeleyici yapısı da basitleştirilmiştir. Alt-taşıyıcılar tarafından deneyimlenen derin sönümlenmenin üstesinden gelebilmek için ise ileri hata düzeltme (forward error correction (FEC)) kullanılmaktadır ve bu durumda sönümlenmeye karşı dayanıklılığı artırılmaktadır. Alt-taşıyıcılar elde edilebilir bit hızını zorlamakta ve bu nedenle QAM gibi spektral olarak verimli modülasyon teknikleri DMT üzerine uyarlanarak, daha yüksek veri hızları (513 Mbps) da elde edilebilmektedir [151].

Yukarıda da belirtilen dezavantajı, doğrusal sinyal tepkisi gerektirmesi sorunu doğrusal güç yükselteçleri kullanılarak çözümlenebilmektedir. Ancak bu yöntem güç verimli bir çözüm değildir. Ayrıca güç verimliliği daha yüksek yükselteç tasarımları kullanılması durumunda ise istenmeyen bir durum olarak LED'in doğrusal olmama özelliğinin artmasına meydan verilebilmektedir. Bu nedenle LED'in doğrusal olmama özelliğinden kaynaklanan bozulmanın üstesinden gelebilmek için kompanzasyon algoritmaları (dijital ön bozulma) sistem ile birlikte kullanılmakta ve aydınlatma cihazlarının yapı blokları için daha küçük ve daha az güçlü LED dizileri kullanılmaktadır [18]. Ancak bir başka dezavantajı, DMT'nin gerçek zamanlı uygulamalarda hem vericide hem de alıcıda sinyal işleme gereksinimi nedeniyle tercih edilmemesidir [90]. Bir çalışmada DMT tekniğinin tasarımda WDM gibi ek yöntemler ile birlikte kullanılması ile VLC hattında 1.25 Gbit/s veri hızı, standard aydınlatma seviyelerinde FEC $2 \cdot 10^{-3}$ limitleri içinde RGB LED'ler kullanılarak elde edilebilmiştir [157].

Ters darbe konumu modülasyonu (inverse pulse position modulation (IPPM))

Bu teknik zaman ortamında veri haberleşmesine olanak sağlamaktadır ve genlik ortamı performansını da etkilememektedir. Bu durumda haberleşme sistemin aydınlatma özelliğini etkilemeden yapılabilmektedir ve bu da tasarımın LED'in doğrusal olmama özelliğine göre az duyarlı olması anlamına gelmektedir. Aynı zamanda haberleşmenin kalitesini etkileyen ISI etkisinin azaltılmasına da katkıda bulunmaktadır. Teknik kapsamında, mesaj bitleri T-saniye için iletilen güç tarafından, olası zaman değişimlerinin birinde bulunan delik hariç olacak şekilde kodlanmaktadır. Her ne kadar bu teknik tam bir senkronizasyon gerektirse de, gerekli olan BER değerini elde etmekte uygun saat fonksiyonu tam bir senkronizasyon sağlamak için kritiktir. Hatta fosfor tabanlı aydınlatma sistemlerinin zaman cevabı oldukça yavaştır, bu durumda ışık kaynağının modülasyon hızı da oldukça düşüktür ve sonlu bir tepki süresi vardır ki, bu nedenle bu durum haberleşmede yüksek veri hızlarına erişmede önemli bir kısıt olarak tanımlanmaktadır. Modülasyon bant genişliğinin artırılması gerekmektedir [134].

Anahtarlama frekans modülasyonu (switching frequency modulation (SFM))

Bu teknik aydınlatma fonksiyonunun önemli bir parametresi olan karartma kontrolünü ve haberleşmeyi birbirinden bağımsız ve eşzamanlı olarak kontrol etme özelliğine sahiptir. Parlaklık kontrolü sürücü devrenin anahtarlama frekansından daha çok sadece görev döngüsü tarafından kontrol edilmektedir. Bu nedenle diğer yöntemlerin aksine bu teknik haberleşme fonksiyonu ve karartma kontrolü üzerinde ayrı ayrı kontrol sağlamaktadır. Sadece iki farklı frekansta gözlemlenen LED'in küçük ışık dalgaları hariç olmak üzere LED ışığın anahtarlanması SFM tekniğini etkilememektedir. Bu nedenle titreme etkisi sorunu kolaylıkla bu tekniğin kullanılması ile çözümlenebilmektedir [144].

Taşıyıcısız genlik ve faz modülasyonu (carrierless amplitude and phase (CAP) modulation))

CAP tekniği, yüksek spektral verimliliğe sahip bir modülasyon tekniğidir. OFDM ile karşılaştırıldığında, basit uygulaması ve düşük maliyeti nedeniyle CAP tekniği yeni nesil optik kablosuz ağ iletiminde rekabetçi performansı ile VLC sistem tasarımlarında kullanıma aday alternatif bir methodur. Bu teknik sınırlı bant genişliği altında kapasiteyi artırmak için basit bir yöntemdir. Ayrıca CAP tekniği düşük güç tüketimi potansiyeline de sahiptir. CAP sinyalleri, ayrık Fourier

dönüşümü (discrete fourier transform (DFT)) ve ters ayrık Fourier dönüşümü (inverse discrete fourier transform (IDFT)) uygulamasını gerektirmeyen iki adet ortogonal taban bantlı sinyalden meydana gelmektedir. CAP modülasyonu kullanılarak yapılan deneylerde gigabit sınıfında veri hızına erişilmiştir. Literatürde az da olsa bu teknikle ilgili çalışma mevcuttur. Örneğin bir çalışmada $BER < 10^{-3}$ değerini elde etmek için mavi LED kullanılarak CAP ve OFDM sinyalleri ile sırasıyla maksimum veri hızı olarak 1.32 ve 1.08 Gb/s elde edilmiştir. Dalgaboyu bölme (WDM) tekniği kapasiteyi daha da fazla artırmak veya kısıtlı bantgenişliğine sahip LED'in veri hızını artırmak için VLC sistemlerinde OFDM ve CAP sinyalleri ile birlikte uygulanmıştır. Yapılan çalışmada RGB LED kullanılmış ve RGB LED'lerin sürücü sinyalleri ayrı ayrı optimize edildikten sonra maksimum veri hızları sırasıyla, CAP ve OFDM teknikleri için 3.22 ve 2.93 Gb/s olarak elde edilmiştir. CAP sinyalleri ile yapılan bir çalışmada ise ön-vurgu ve DFE teknikleri de ek olarak tasarımda kullanılarak dengesiz sistem yanıtından kaynaklanan ISI etkisi ciddi anlamda azaltılmıştır ve basit kanal veri hızı mavi LED kullanılarak 1.32 Gb/s olarak elde edilmiştir [74,158].

Arıtılmış darbe konum modülasyonu (expurgated pulse-position modulation (EPPM))

Çakışan EPPM darbe tekniği PPM tekniğinin genelleştirilmiş şeklidir ve iç mekan aydınlatmada kaynaklar tepe güç değeri ile sınırlı olduğunda karartma fonksiyonu için gerekli olan çok geniş aralıkta PAPR değerini sağlayabilmektedir . Ayrıca PAPR değeri takımyıldız boyutundan bağımsız seçilebilmektedir [159].

Bantgenişliği sınırlı LED'lerin aydınlatma kaynağı olarak kullanıldığı sistemlerde veri hızını artırmak için önerilmiş bir tekniktir. EPPM bir sembol süresi içinde bir darbe yerine çoklu darbeler iletmektedir ve bu nedenle PPM ile karşılaştırıldığında titreme etkisini azaltma potansiyeli daha iyidir. Hatta her bir semboldeki zaman dilimlerinin sayısı süreleri kısaltılarak artırıldığında, ışık şiddeti dalgalanmaları insan gözü tarafından daha az fark edilebilir düzeye gelmektedir [130].

Tasarımlarda ayrıca ek olarak serpiştirme (interleaving) işlemi de dağıtıcı VLC kanallarda ISI etkisini ve hatta hata olasılığını azaltmak için EPPM üzerine uygulanmakta ve EPPM tekniğinin PPM tekniğine göre üstünlüğünü artırmaktadır [152].

Çakışan arıtılmış darbe konum modülasyonu (overlapped expurgated pulse-position modulation (OEPPM))

Çakışan darbeler tekniği EPPM ile birlikte VLC sistemlerinde kullanılarak çakışan EPPM (overlapped EPPM (OEPPM)) tekniği önerilmiştir ve bu teknikle EPPM ile elde edilen veri hızı artırılmıştır. Daha önce belirtildiği şekilde tasarımda ek olarak serpiştirme tekniği kullanılarak kanal tarafından sisteme uygulanan girişim azaltılmıştır. Sistemde çok katlı dalga biçimi kullanılması nedeniyle LED dizisi tercih edilmiştir. Sistemde karatma kontrolü dengeli tamamlanmamış blok tasarımı (balanced incomplete block design (BIBD)) kodunu değiştirerek yapılabilmektedir. Ayrıca uygun bir kod ağırlığı ve kod uzunluğu kullanılarak istenen aydınlatma seviyesi elde edilebilmektedir [160].

Çok katlı arıtılmış darbe konum modülasyonu (multilevel expurgated pulse-position modulation (MEPPM))

Serpiştirme tekniği ve LED dizilerinin de kullanımı ile birlikte EPPM'nin çok katlı varyasyonları daha yüksek veri hızlarına erişmek için tasarımlarda kullanılmaktadır. Bu yeni tekniğe çok katlı EPPM (multilevel EPPM (MEPPM)) adı verilmektedir [160]. Bu teknikle geniş aralıkta PAPR değerleri, yani karatma seviyeleri LED'in doğrusal olmaması nedeniyle desteklenmektedir. Bir zaman aralığından diğerine daha az şiddetli olarak değişen ortalama ışık yoğunluğu nedeniyle MEPPM tekniğinin titreme etkisini azaltma özelliği EPPM ile karşılaştırıldığında çok daha iyidir. Ayrıca aydınlatma varyasyonlarının insan gözü tarafından daha az algılanması için seviyelerin sayısı artırılabilir ve zaman dilimlerinin süresi azaltılabilir. Tekniğin bir diğer avantajı ise, EPPM'de olduğu gibi MEPPM'de de PAPR değerinin takımıydızı boyutundan bağımsız seçilebilmesidir. Çakışan darbe ve darbe-serpiştirme tekniklerinin kullanımı ile MEPPM'nin spektral verimliliği (>1) daha fazla artırabilmekte ve bu durumda VLC sistemlerinde Gb/s seviyesinde yüksek veri hızları elde etmede kullanılabilir. Ayrıca SM tekniği ile birlikte veri hızını daha fazla artırmak için de kullanılabilir.

2.3.2.2 Modülasyon tekniklerinin karşılaştırılması

OFDM, SM ve PPM tekniği modifiye edilerek elde edilen modülasyon tekniklerinin karşılaştırılması Çizelge 2.7'de verilmiştir [130].

Çizelge 2.7: Modülasyon tekniklerinin karşılaştırılması [130].

Modülasyon	Karartma Kontrolü Desteği	Doğrusal Olmama Özelliğine Duyarlılık	Spektral Verimlilik	Renk Solması ve Gölgelemeye Karşı Duyarlılık	ISI Etkisine Karşı Duyarlılık	Titreme Etkisi
OFDM	Hayır	Yüksek	3-4	Yüksek	Düşük	Orta
SM	Hayır	Alçak	2	Yüksek	Orta	Yüksek
VPPM	Evet	Alçak	<1	Düşük	Yüksek	Orta
MPPM	Evet	Alçak	<1	Düşük	Orta	Düşük
EPPM	Evet	Alçak	<1	Düşük	Yüksek	Düşük
MEPPM	Evet	Alçak	2-3	Orta	Düşük	Çok Düşük

Çizelge 2.7 de dikkate alınarak modülasyon teknikleri arasında bir karşılaştırma yapıldığında; MEPPM, OFDM ve CAP tekniklerinin VLC sistemlerinde Gb/s veri hızlarına ulaşmak için potansiyellerinin yüksek olduğu görülmektedir.

OFDM tekniği ile, kaynak ve kanal bozunumları söz konusu olmadığında daha yüksek spektral verimliliğe ulaşılabilmektedir. Ancak aydınlatma fonksiyonları açısından değerlendirildiğinde; OFDM'nin karartma kontrolünün zor olması ve ancak diğer tekniklerle birlikte kullanıldığında karartma kontrolü sağlayabilmesi ve ayrıca titreme etkisinin standart değerlere göre oldukça fazla olması aydınlatma fonksiyonu açısından uygun bir teknik olmadığını göstermektedir. Hatta PAPR değerinin CAP sinyallerine göre oldukça yüksek olması OFDM'nin en önemli dezavantajı olarak ortaya çıkmaktadır.

MEPPM'in avantajı ise, LED'in doğasından kaynaklanan doğrusal olmama özelliğine karşı duyarlı olmaması ve sistemin aydınlatma fonksiyonu için önemli bir parametre olan karartma kontrolünü geniş bir aralıkta sağlayabilmesidir. İlave tekniklerle birlikte kullanılarak MEPPM'nin veri hızı daha fazla artırılabilir.

CAP tekniğinin uygulamasının basit olması, spektral verimliliğinin ilave teknikler ile artırılabilir olması ve Gb/s hızlara erişilebilmesi nedeniyle OFDM sinyallerin yerine uygulamada tercih edilmektedir.

Ayrıca bu tekniklerin yeni nesil LED'lerle, (örneğin uzak-fosfor LED) kullanılması durumunda veri hızının sistemin enerji verimliliği ile birlikte artacağı da değerlendirilmektedir. Ancak VLC sistemlerinde üzerinde çalışılması gereken konu, sistemde iletilen veriyi modüle etmek için modülasyon teknikleri tasarlanırken, aynı zamanda modülasyon tekniğinin aydınlatma parametreleri üzerindeki etkilerinin de göz önüne alınmasıdır.

Yukarıda kısaca tanımlanan ve uygulama örnekleri verilen modülasyon tekniklerinin avantaj ve dezavantajları Çizelge A.1'de verilmiştir.

2.5 Organik VLC Uygulamaları

OLED'ler kullanılarak yapılan uygulamalara ilişkin özet bilgi bir önceki bölümde aktarılmıştır, bu bölümde uygulamalar daha detaylı olarak ele alınarak, organik fotodiod uygulamaları da kapsama dahil edilecektir.

Organik VLC görünür ışıkla haberleşme sistemlerinin bir alt kolu olarak gelişme sürecinde olan ve çevreye duyarlı yapısı nedeniyle de üzerinde durulması gereken önemli bir alandır. Sistem tasarımlarında organik fotonik bileşenler verici ve/veya alıcı olarak kullanılmaktadır.

OLED'lerin geleneksel LED'ler yerine araştırmalarda tercih edilmesinin nedeni, geleneksel LED'lerin yüksek hızda veri iletimi sağlayabildikleri halde, bilinen epitaksiyel geliştirme yöntemleri kullanılarak oluşturulan kırılğan kristaller içermeleri nedeniyle çok fazla sayıda LED kullanılmadan geniş bir alanın aydınlatılmasının mümkün olmaması ve bu yöntemin de maliyeti önemli ölçüde artırmasıdır. Bu nedenle araştırmacılar VLC sistemlerinde kullanabilmek amacıyla alternatif LED tipleri araştırmışlar ve OLED'leri tasarımlarında bir çözüm olarak kullanmışlardır.

Elektriksel ışımaya yayan katmanı organik filminden meydana gelen OLED'ler, VLC sistemleri için doğal bir alternatif bileşendir. Diğer katı hal aydınlatma cihazları ile karşılaştırıldığında, doğasından kaynaklanan düşük yük taşıma mobilitesi nedeniyle düşük modülasyon bantgenişliğine (~150 kHz) sahiptirler. Ancak bir çalışmada tasarımda ek olarak analog ön dengeleyicilerin de kullanılması ile OLED kesim frekansı 150 KHz'den ~1 MHz'e artırılabilmiştir [161]. Ayrıca OLED'lerin kullanımı cihaz boyutları üzerinde herhangi bir sınırlama gerektirmez, cihaz boyutu sadece kullanıcılara basit elektronik sistemlerle basit bir girişten geniş bir alanı sürme imkanı sağlayan fabrikasyon aparatının boyutları tarafından sınırlanmaktadır [161,162,163] ve üretim prosesleri LED'lere göre daha maliyet etkindir. OLED'lerde ışık çıkışı, nokta kaynak özelliği bulunan LED'ler ile karşılaştırıldığında gözü daha az yorar ve bu nedenle OLED'lerin göz güvenliği ile ilgili düzenlemelere uymak zorunluluğu bulunmamaktadır. OLED'ler yüksek kalitede renklendirme özelliği sağlarlar, geliştirilmiş parlaklık, daha iyi güç verimliliği, kontrol edilebilirlik, düşük modülasyon bant genişliği, gerekli ek optiklere ihtiyaç duymadan aydınlatma sağlama ve içerdiği maddelerin çözünürlüğü nedeniyle düşük maliyet ile üretilebilmeleri avantajlarıdır. VLC sistemlerinde OLED'ler kullanıldığında yüksek

SNR değeri elde edilmekte ve güvenilir haberleşme hattı garanti edilebilmektedir. OLED'ler ayrıca geniş alanda Lambertian ışınım özelliğine sahiptir ve düşük bant genişliklerine rağmen, OLED'ler ticari olarak kullanılan cihazlardan daha yüksek bantgenişliği sağlayabilmektedirler [163]. Ancak VLC sistemlerinde kullanıldıklarında, gerekli bantgenişliğinin elde edilmesi konusunda tasarımda sorun yaratmaktadır ve üzerinde çalışılması gereken bir konudur.

93 kHz bantgenişliğine sahip OLED'i kaynak olarak kullanarak yapılan bir çalışmada organik bir VLC hattı tasarlanmış ve sırasıyla 4-PPM, OOK, 2-PPM modülasyonları uygulanarak 2.7, 2.2, 1.25 Mb/s veri hızları elde edilmiştir. Devrede ayrıca ek olarak alıcı dengeleme tekniği olarak çok katmanlı algılayıcı ANN (MLP-ANN) kullanılarak, veri hızlarının megabit seviyesine artırılması sağlanmıştır [164]. Bir başka çalışmada aydınlatma verimliliği 23 lm/W ve bantgenişliği 93 kHz olan bir OLED verici olarak kullanılarak bir VLC hattı tasarlanmış, 4-PPM ve OOK modülasyonu uygulanarak sırasıyla 2.7 Mb/s ve 2.15 Mb/s veri hızları elde edilmiştir [162]. 10MHz bantgenişliği olan OLED'in kullanıldığı bir başka çalışmada ise 100 Mb/s veri hızını destekleyen iç mekan veri hattı tasarlanmış, tasarımda ayrıca basit bir sinyal işleme ve dengeleyici kullanılmıştır. Bu çalışmada ayrıca geometrik tasarım yapısının da haberleşme performansında önemli etkisi bulunduğu ve hollow (delikli) dizayn ile tüm odanın 99% 'unun istenen düzeyin de üzerinde aydınlatıldığı belirtilmiştir [92].

Önceki bölümde de belirtildiği üzere, OLED tabanlı VLC sistemlerin avantajlarının yanında dezavantajları da bulunmaktadır; örneğin eşik değeri algılamasının başarısız olması, bantgenişliğinin sınırlı olması ve semboller arası girişimin sorun yaratması karşılaşılan önemli zorluklardır. Bu nedenle OLED'ler kullanıldığında tasarımda ek olarak dengeleyici kullanılmasına da ihtiyaç duyulmaktadır [162]. Ayrıca diğer teknik sorunlar OLED'in anahtar karakteristikleri arasında sayılabilecek özelliklerinden de kaynaklanmaktadır ki, bu özellikler cihaz ömrü, yapısı, organik katmanların bozunumudur. Ayrıca maliyet henüz çözümlenememiş en önemli sorunlardan biridir [164].

Organik VLC sistemlerinde OLED'ler dışında tasarımlarda organik fotodiodlar (organic photodetector (OPDs)) da alıcı olarak kullanılmaktadır. Aktif polimer tabakası yapısına sahip organik "bulk heterojunction" opto-elektronik cihazların keşfi VLC sistemleri için önemli bir gelişme aşaması olarak değerlendirilmektedir

[165]. Organik opto-elektronik bileşenlerin geniş cam ve plastik yüzeyler üzerine kaplanarak basit üretim teknikleri ile üretilebilmeleri nedeniyle gelecekte elektronik tabanlı uygulamalarda sıklıkla kullanılacakları değerlendirilmektedir [166]. Organik olmayan muadilleri ile karşılaştırıldıklarında OPD'ler esnek yapıları, düşük ağırlıkları, küçük boyutları ve uygun maliyetleri ile tasarımda tercih edilmektedirler. Teknik özellikleri, örneğin dış kuantum verimlilikleri (external quantum efficiency (EQE)) diğer organik karışımlar ile karşılaştırıldığında %76 oranında daha yüksektir ve modülasyon bantgenişlikleri 1 MHz'e erişmektedir. Duyarlılıkları (R) ~ 0.25 (A/W), spesifik algılama değerleri (D^*) 7×10^{12} cm Hz^{1/2}/W ve eşdeğer gürültü güçleri (noise equivalent power (NEP)) 2.8×10^{-14} W/Hz değerlerindedir [167]. OPD'lerin bantgenişliği dinamik yapıdadır ve gelen ışığın yoğunluğuna bağlıdır ($W \cdot \text{cm}^{-2}$). Ancak OPD'lerin bant genişliği, organik yarı iletkenlerdeki düşük yük taşıyıcı mobilitesi özelliği nedeniyle Si cihazların bantgenişliğinden daha düşüktür ki, özellikle VLC uygulamalarında bu durum sorun yaratmaktadır [139].

Bunun yanında OPD'lerin görünür bantta çok küçük bir ters öngerilim uygulanması durumunda ortaya çıkan, Si fotodedektörlere göre üstün duyarlılıkları nedeniyle VLC sistemlerinde kullanılmaları da önerilmektedir. Ayrıca OPD'ler Si fotodedektörler (~ 1.16 eV) ile karşılaştırıldıklarında P3HT (~ 2 eV)'nin geniş bant aralığı nedeniyle ~ 620 nm'de keskin kesim dalga boyuna da sahiptirler. Ancak 2 eV değerinde bant aralığı nispeten yüksek bir değerdir ve 620 nm (kırmızı dalgaboylarında) etrafında kesim dalgaboyuna sahiptir ki bu durum WDM tekniği avantajını kullanan VLC uygulamaları için sorun da yaratmaktadır [167].

Yukarıda belirtilen dezavantajlarına rağmen OPD'lerin yakın gelecekte optik haberleşmede silikon (Si) fotodiodların güçlü pazar konumu ve geniş kullanım alanları nedeniyle, Si fotodiodların yerini alması beklenmemektedir. Gelecekteki uygulamalarda OPD'lerin, Si fotodiodların kullanım için uygun olmadığı durumlarda kullanılabilmesi değerlendirilmektedir. Ayrıca oda sıcaklığında sprey kaplama uygulaması ile maliyetlerinin önemli ölçüde düşürülmesi nedeniyle maliyet sorunun ortadan kalkabileceği ve kullanımlarının daha cazip hale geleceği de değerlendirilmektedir [139].

Yapılan bir çalışmada gerçek zamanlı bir VLC sistemi, alıcı olarak polimer karbon türevi (Poly3-Hexylthiophene:Phenyl-C61-Butyric Acid Methyl Ester (P3HT:PCBM)) (790 kHz OPD bant genişliği) aktif katmanları ile üretilen organik bulk heterojunction (organic bulk heterojunction (BHJ)) fotodedektör ve verici

olarak yüksek güçte paralel bağlanmış beyaz LED'ler kullanılarak tasarlanmıştır [167]. Alıcıda birinci dereceden basit analog dengeleyici de kullanılarak, tasarlanan sistem bilgisayar tarafından üretilen bir ses sinyali ile test edilmiş ve veri hızını artırmak için dijital modülasyon formatı olarak sıfıra dönüşsüz açma kapama anahtarlama (non- return-to-zero on-off keying) kullanılarak ses sinyali iletilmiştir. Opto-elektriksel özellikleri bulunan organik fotodetektör -6 V'da 0.18 A/W duyarlılık ve 790 kHz modülasyon tepkisi göstermiştir. Bu VLC tasarımında daha karmaşık yapıda modülasyon tekniklerinin kullanılması durumunda daha yüksek veri hızlarına erişilebileceği öngörülmektedir. Bir başka çalışmada beyaz fosfor LED'ler ve düşük bantgenişliğine sahip OPD'ler sırasıyla alıcı ve verici olarak kullanılarak VLC sistem tasarımı yapılmış ve 3.75 Mbits/s ve 1 Mbit/s veri iletim hızları yüksek ve düşük ışık yoğunluğu koşullarında elde edilmiştir. Semboller arası girişimin etkileri nedeniyle azalan veri hızını artırmak için, kanal hakkında bir ön bilgiye ihtiyaç duymayan yüksek performanslı bir dengeleyici olan yapay sinir ağları (ANN) kullanılmıştır. ANN dengeleyici performansı ile, 4-PPM ve OOK teknikleri ile sırasıyla 3.75 Mbits/s ve 2.8 Mbits/s veri hızları elde edilmiştir. Dengeleyici kullanılmadığında 4-PPM ve OOK ile elde edilen veri hızları 200 and 300 kbits/s'dır, sonuçlardan görüldüğü üzere dengeleyici kullanılmadığında 4-PPM'in performansı OOK'ya göre düşmektedir [139].

Gelecekteki uygulamalarda, organik bileşenleri nedeniyle VLC reseptörlerinin günlük kullandığımız kıyafetler üzerine monte edilebilir olması sağlanarak, bu cihazların kullanımı ile VLC sistemlerinin iç mekan ve dış mekan mobilite uygulamalarında önemli ölçüde kolaylık sağlanacağı değerlendirilmektedir.

2.6 Mobilite Uygulamaları

Kablosuz haberleşme sistemlerinin kapsama alanını ifade eden mobilite, VLC sistemlerinin gelecekteki uygulamaları için üzerinde önemle durulması gereken önemli bir özelliktir. VLC sistemlerine mobilite özelliği kazandırıldığında ağ iletimi daha aktif olacak ve bu durumda sistemin günlük hayatta kullanımında önemli avantajlar sağlanacaktır. Ancak VLC teknolojisi henüz gelişme safhasında olan bir teknolojidir ve özellikle mobilite konusunda yapılan araştırmalar henüz istenen seviyeye ulaşabilmiş değildir. Ayrıca VLC sistemlerinin çok yönlü sistem özelliği nedeniyle mobiliteyi sağlamak zor bir konudur. VLC sistemlerinde bu kapsamda

yayınlanan çok az sayıda yayın [69-168] ve patent [169] mevcuttur. Örneğin; bir çalışmada alıcıda değişen görüş alanı ile sistem performansı mobilite açısından incelenmiştir [69]. Araştırmacılar mobilite konusundaki sınırı ortaya çıkarabilmek için çalışmalarını sürdürmektedirler. VLC sistemlerinde mobilite için düzgün aydınlatma tercih edilmektedir ve alıcının FOV değeri kritik bir seçim faktörü olarak ortaya çıkmaktadır. Yapılan çalışmada her bir deneyde bir FOV değeri elde edilmiştir ki bu değer herhangi bir artışın mobilite üzerinde daha fazla bir kazanç sebep olmadığı değerdir. Çakışan (düzgün aydınlatma) ve çakışmayan (spot aydınlatma) aydınlatma durumları için ayrı ayrı yapılan çalışmada mobil VLC cihazları arasında koordinasyonu ve işbirliğini sağlayan yeni bir teknik önerilmiştir [168].

Başka bir çalışmada VLC ağ iletiminde VLC cihazlarının mobilitesini belirlemek için bir hücresel tasarım metodu [169] geliştirilmiştir. Bu metod ilk hücrede VLC cihazına veri iletmeyi kapsamaktadır. Ayrıca VLC cihazından gelen cevabın ikinci hücrede alınmasını ve VLC cihazının birinci hücreye komşu olan ikinci hücrede oluşturduğu tepkiyi de ölçmektedir. Bu metod ile VLC cihazının birinci hücreden ikinci hücreye kadar olan haberleşmede oluşan değişime bağlı olarak mobiliteyi ölçmek hedeflenmektedir.

Kanalın oda boyutu, parlak yüzeyler ve engeller tarafından belirlenmesi nedeniyle mobilite konusunda VLC sisteminin kanal karakteristikleri önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle VLC sistemlerinin mobilite performansı değişimi, sistem farklı yerlerde kullanıldığında ciddi anlamda sorun yaratmaktadır.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

3.1 VLC Sistemleri Konusunda Üzerinde Çalışılması Gereken Konular ve Karşılaşılan Zorluklar

VLC sistemleri uygulamada ve teoride henüz gelişme sürecinde olan bir teknolojidir ve bu nedenle VLC araştırma alanı cevaplanmayan soruları ile son zamanlarda araştırmacıların ilgisini çeken bir teknoloji olmaya devam etmektedir. Bu alanda elde edilecek başarı çevreyle dost, yüksek hızlı, kolay erişilebilir ve maliyet etkin VLC sistemlerinin günlük yaşamımızda kullanılmasını sağlayacaktır. Gelecekte ise önemli ölçüde enerji verimliliği ve bakım kolaylığı sağlayan VLC sistemlerinin büyük ölçekli düşük maliyetli ticari uygulamaları hayata geçirilebilecektir.

VLC sistemlerinin tasarlanmasında temel yaklaşım diğer sistemlerde de olduğu gibi, endüstriyel ve akademik alanda da son zamanlarda üzerinde önemle durulan, geleceğimiz açısından hayati önemi olduğu vurgulanan enerji tüketiminin ve teknolojinin çevreye olan zararlarının minimize edilmesidir. Bu nedenle minimum enerji tüketimi hedeflenerek tasarım yapılması konusu bu alanda da üzerinde çalışılması gereken bir konudur.

Tez kapsamında enerji tüketimi ve aynı zamanda aydınlatma fonksiyonu baz alınarak VLC sistemlerinde kullanılan modülasyon teknikleri ve yeni nesil LED aydınlatma armatürlerindeki son gelişmeler gözden geçirilmiştir. Görülen şudur ki, VLC çalışmalarında aydınlatma parametreleri çalışmalarda tek tek veya bir arada ele alınarak tasarımda etkileri incelenmişse de, çoğunlukla çalışmalar yüksek hızda güvenilir veri iletimi üzerine yoğunlaşmış, amaç Gb/s veri hızlarına ulaşarak sistemi mevcut kablosuz haberleşme sistemleri ile rekabet edebilir düzeye getirerek sistemin günlük yaşamda kullanımı amaçlanmıştır. Ancak burada eksik olan nokta, aydınlatma parametrelerinin tümüyle ele alınarak optimize edilmemesi ve kullanıcı konforunu ve hatta sağlığını da etkileyen aydınlatma fonksiyonunun kalitesine ilişkin sorunların tasarımda detaylı olarak incelenmemesidir. Bu nedenle VLC sistemlerde modülasyon ve kodlama tekniklerinin aydınlatmanın tüm isterlerini karşılayacak

şekilde ve aynı zamanda sistemin enerji tüketimini de azaltarak yüksek hızda veri iletimine erişilebilecek şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Diğer bir eksik nokta ise, sistemin gelişme sürecinde olması nedeniyle VLC çalışmalarında teorik çalışmalara ağırlık verilmesidir. SSL teknolojisindeki gelişmeler de dikkate alındığında, teorik çalışmalarda elde edilen sonuçların pratik uygulamalara uyarlanması ve sistemin bir an önce ticari anlamda hayata geçirilerek işletme giderlerinin düşürülmesi konusu önem arz etmektedir.

Tüm bu hususlar dikkate alındığında, VLC sistemlerinde tasarımda karşılaşılan zorluklar; haberleşmenin kapsama alanı, ortaya çıkan girişimler, kullanılan aydınlatma kaynağının renk kalitesi, çift yönlü haberleşmenin ve mobilitenin sağlanması şeklinde tanımlanabilmektedir. Gelecekte bu sistemin günlük yaşamda kullanılabilmesi için, Gb/s iletim hızına optimize edilmiş tasarımlarla ulaşılması gerektiği değerlendirilmektedir. Ayrıca mobilite yönetimi konusu da sistemin pratikte kullanımı konusunda bir engeldir ve üzerinde çalışılması gereken bir konudur.

Bu alanda bir diğer eksiklik, mevcut standartların ihtiyacı karşılamaması, yayınlanan standartların gelişmelere paralel olarak güncellenmemesi veya yeni standartların teknolojinin gelişimine paralel olarak ortaya çıkarılamamasıdır. Yeni modülasyon tekniklerini içeren ve yüksek kalitede aydınlatma ortamı/kontrolü sunan yeni standartların yayınlanması gerekmektedir. Bu nedenle VLC sistemlerinin mevcut alt gruplarının da dahil edilmesi ve farklı organların işbirliği ile daha fazla çalışma grubu oluşturulması bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca VLC sistemlerinin yeşil haberleşme kapsamında değerlendirilen bir teknoloji olması nedeniyle sistemlerin tasarım aşamasında tasarım zorluklarına çözüm üretirken çevreye duyarlılık konsepti ön planda tutulmalıdır. Akademik çalışmalarda her ne kadar enerji tüketimini azaltmak üzerine çalışmalar mevcut olsa da, VLC tasarımında minimum enerji tüketimini baz alarak sistem tasarlamak konusu henüz üzerinde yeterince durulmayan bir sorundur. Ayrıca olumsuz çevresel etkilerin daha fazla minimize edilebilmesi için Organik VLC çalışmalarına da ağırlık verilmesi gerekmektedir.

Bir diğer husus bu alanda yapılan araştırmalarda, akıllı SSL teknolojisinde yaşanan gelişmelerin izlenmesi ve bu sektörle işbirliği içinde olunması zorunluluğunun önem arz etmesidir. Araştırmacılar çoğunlukla mevcut aydınlatma fonksiyonunu etkilemeden, güç sarfiyatı düşük Gb/s veri hızında iletim sağlamaya çalışmaktadırlar.

Ancak mevcut LED'lerin ve kanalın özellikleri nedeniyle sorunlar yaşamaktadırlar. Yeni nesil LED üreticileri LED teknolojilerinin gelişim sürecinde, VLC sistemlerinde çift yönlü kullanım sunarak karşılaşılan zorlukların üstesinden gelebilmeye yönelik çözümler üretmeye çalışmaktadırlar ki, son zamanlarda ortaya çıkarılan ürünler bu anlamda umut vaat edicidir.

Görünür Işıklı Konumlandırma (Visible Light Positioning (VLP)) konusu ise gelişme sürecinde olan bir diğer alandır. VLC sistemlerinin, VLP teknolojilerini kullanarak tasarlanabilmeleri üzerine çalışılması gerekmektedir. Ayrıca RF iletişimin tamamlayıcısı olarak da VLC teknolojisinin kullanımı konusunda çalışmalar yapılması gerekmektedir.

3.2 Önerilen LED Tabanlı ve Modülasyon Tabanlı Çalışmalar

Tasarımda ideal metod, gönderilecek verinin zaman ortamında kapsanmasıdır ki, bu durumda LED'in doğasından kaynaklanan doğrusal olmama sorunundan çözüm metodu daha az etkilenmekte ve genlik ortamındaki performansı (aydınlatma fonksiyonu) etkilenmemektedir. Yüksek hızlı haberleşme yöntemlerini analiz ederken tüm sistem parametrelerinin de hesaba katılması gerekmektedir.

Katı hal aydınlatma sistemlerinde son teknoloji olarak değerlendirilen uzak fosfor LED teknolojisini verici olarak ve güneş pillerini alıcı olarak kullanan bir VLC sistem tasarımının pratikte gerçekleşmesinin çevreye daha duyarlı bir çözüm olacağı değerlendirilmektedir.

Ayrıca VLC sistemlerinde kullanılan modülasyon teknikleri incelenerek bir karşılaştırma yapıldığında; MEPPM ve CAP tekniklerinin Gb/s veri hızlarına ulaşmak için potansiyellerinin yüksek olduğu görülmektedir. MEPPM, doğrusal olmama özelliğinden etkilenmeden, geniş bir aralıkta karatma kontrolü sağlamaktadır ve ilave tekniklerle birlikte kullanıldığında veri hızı daha fazla artırılabilir. CAP tekniği ise basit uygulanan bir tekniktir ve optik kablosuz ağ iletiminde rekabetçi performansı ile VLC sistem tasarımlarında kullanıma aday alternatif bir metoddur. Spektral verimliliğinin ilave teknikler ile artırılarak Gb/s veri hızlarına erişebilir olması da tekniğin bir diğer avantajıdır .

Söz konusu tekniklerin yeni nesil LED'lerle, örneğin uzak-fosfor LED'lerle kullanılması durumunda veri hızının, sistemin enerji verimliliği ile birlikte artacağı

ve çevreye duyarlı pratikte uygulanabilir çözümler üretilebileceği değerlendirilmektedir.

3.3 Çalışmanın Uygulama Alanı

Günümüzde az da olsa günlük hayatta kullanımı mevcut olan bir teknolojidir, ancak halen gelişme süreci akademisyenlerin de ilgilerini her geçen gün daha fazla çekerek hızla devam etmektedir.

Gelecekte VLC'nin kullanılması planlanan uygulama alanları; internet veya veri hatları üzerinden ses verisi gönderilmesi (voice over IP (VoIP)), akılcı görüntü ve müzik aktarımı (streaming video and music), ve ağ iletişimine bağlı depolama (network attached storage (NAS)), makinalar arası iletişim (machine to machine (M2M)), ethernet üzerinden besleme (power over ethernet (PoE)), kablosuz sensör ağ iletişimi, gerçek zamanlı bantgenişliği yoğunluklu uygulamalar, aynı zamanda her yerde mevcut olan ağ iletişimi ve artırılmış gerçekliktir [24,25].

Bu yetenekler sisteme kazandırıldığında; VLC sistemleri kişisel alan haberleşmesinde, yer belirlemede, görüntü sensörleri ile haberleşmede, hastane ve ticari uçaklarda, askeri uygulamalarda, su altı uygulamalarında, petrol gibi maddelerin bulunduğu RF iletişimin kullanılmadığı alanlarda kullanılabilir.

Görünür ışıkla haberleşme sistemlerinin, Türk Silahlı Kuvvetlerinde de özellikle gizlilik ve emniyetin ön planda olduğu haberleşme faaliyetlerinde kullanılmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **IEA, Lights Labours Lost: “Policies for Energy-Efficient Lighting, Energy Efficiency Policy Profiles”, 2006.**
- [2] **G. P. Fettweis and E. Zimmermann, “ICT energy consumption-trends and challenges”, in Proc. 11th Int. Symp. Wireless Personal Multimedia Commun. (WPMC’08), Lapland, Finland, Sept. 2008.**
- [3] **Murat Kocaoglu, Derya Malak, and Ozgur B. Akan, “Fundamentals of Green Communications and Computing: Modeling and Simulation”, Koc University, Turkey.**
- [4] **Url: <<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:KuOaJEm2dQ EJ:https://www.ictearth.eu/+cd=1hl=trct=clnkg1=tr>>, alındığı tarih: 22.12.2013.**
- [5] **Jinsong Wu, Sundeep Rangan, Honggang Zhang, “Green Communication: Theoretical Fundamentals, Algorithms and Applications”, sf:127-129.**
- [6] **Url: <<http://aaemonline.org/emfr fposition.html>>, alındığı tarih: 29.12.2013.**
- [7] **Visible Light Communications Consortium, www.vlcc.net, 2008.**
- [8] **JEITA: CP-1221 Visible Light Communications System, 2007.**
- [9] **JEITA: CP-1222 Visible Light ID System, 2007.**
- [10] **Dominic C. O’Brien, Lubin Zeng, Hoa Le-Minh, Grahame Faulkner, Joachim W. Walewski, Sebastian Randel, “Visible Light Communications: challenges and possibilities”, University of Oxford (UK); Siemens AG, Corporate Technology, Information and Communications, Munich (Germany).**
- [11] **Url:<<http://ec.europa.eu/research/fp7/indexen.cfm>>, alındığı tarih: 29.12.2013.**
- [12] **PLASA: <http://www.plasa.org/>, alındığı tarih: 29.12.2013.**
- [13] **Url:<<http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>>,alındığı tarih: 07.01.2014.**
- [14] **I.Jamieson, “Visible Light Communication (VLC) Systems”, Available: <http://bemri.org/visiblelight-communication.html>, alındığı tarih: 10.01.2014.**
- [15] **Lee Chia Ching, Tan Ching Seong and Wong Hin Yong of Multimedia University and Mazlaini Yahya of TM Innovation Centre, “Visible Light Communication (VLC) and Its Future Prospective”.**
- [16] **Eun Tae Won, Dongjae Shin, D.K. Jung, Y.J. Oh, Taehan Bae, Hyuk-Choon Kwon, Chihong Cho, Jaeseung Son, Dominic O’Brien, Tae-Gyu Kang, Tom Matsumura, Company Samsung Electronics Co.,LTD, University of Oxford, ETRI (4) VLCC (28 Members), Project: IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs), “Visible Light Communication : Tutorial”, Date Submitted: [9 March 2008].**
- [17] **Mohammad Noshad, Student Member, IEEE, and Mae Brandt- Pearce, Senior Member, IEEE, “Can Visible Light Communications ProvideGb/s Service?”.**
- [18] **Jovicic, A.; Li, J.; Richardson, T.,87. Jovicic, A.; Li, J.; Richardson, T.,**

- “Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market”, Communications Magazine, IEEE, Volume: 51, Issue: 12 Publication Year: 2013, Page(s): 26 – 32.
- [19] **Url:** <<http://www.renesas.com/edgeol/features/10/index.jsp>>, alındığı tarih: 07.01.2014.
- [20] **Elgala, H. ;Mesleh, R.; Haas, H.**, “Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the art”, Communications Magazine, IEEE Volume:49, Issue: 9, 2011, Page(s): 56 - 62 Cited by: Papers (30).
- [21] **L. Hanzo, H. Haas, S. Imre, etal.**, “Wireless Myths, Realities, and Futures: From 3G/4G to Optical and Quantum Wireless”, Proc. IEEE, vol. 100, pp. 1853-1888, May 2012.
- [22] **Komine-T, Haruyama-S, and Nakagawa-M:** “ Bidirectional visible-light communication using corner cube modulator”, Proc. Wireless and Optical Communication (WOC). Banff, Canada. IASTED. 2 4 July 2003.
- [23] **Christian Pohlmann**, “Visible Light Communication”, Seminar Kommunikations standards in der Medizintechnik, 29 Juni 2010.
- [24] **H. Elgala, R. Mesleh and H. Haas**, “Indoor Broadcasting via White LEDs and OFDM”, Proc. IEEE 2009.
- [25] **Url:**<<http://globenewswire.com/newsrelease/2013/10/09/579255/10051902/en/Visible-Light-Communication-VLC-Li-Fi-Technology-Free-Space-Optics-FSO-Market-2013-018.html?print=1>>,alındığı tarih:07.01.2014.
- [26] **Prof. Yewen Cao, Lecture:** “ Principle of Communications, School of Information Science and Engineering Shandong University”, <<http://202.194.26.100/caoyewen/>>.
- [27] **Alex Ryer**, “Light Measurement Handbook”, 1998, International Light Inc.
- [28] **Shlomi Arnon, John Barry, George Karagiannidis, Robert Schober, Murat Uysal**, “Advanced Optical Wireless Communication Systems”.
- [29] **Z. Ghassemlooy, W. Popoola, S. Rajbhandari** “Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB®”, SF 446.
- [30] **Url:**<<http://people.bu.edu/helgala/research.html>>, alındığı tarih:05.05.2014.
- [31] **Rick Roberts [Intel], Zhengyuan Xu [University of California Riverside]**, Project: IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs), “Update on VLC Link Budget Work”, Date Submitted: September 2009.
- [32] **Joseph C. Palais** (1988), “Fiber Optic Communications”, second edition, Prentice Hall.
- [33] **F.J.Lopez Hernandez**,“Low-Cost Diffuse Wireless Optical Communication System based on White LED”, in Proc. IEEE ISCE’06, Sept. 2006, St. Petersburg, Russia, pp. 1-4.
- [34] **A. Zukauskas**, et.al. “Introduction to Solid-State Lighting”.
- [35] **John Risch**, Rischenterprizes, Ece 323 term papers, “The photodiode”, February 26, 2006, <http://www.rischenterprizes.com/Photodiode.pdf>.
- [36] **Durgesh Gujjari**, “Visible Light Communication”, Dalhousie University Halifax, Nova Scotia, August 2012.
- [37] **Url:** <<http://www.newport.com/images/webclickthru-EN/images/2226.gif>>, alındığı tarih: 04.05.2014.
- [38] **Url:** <<http://focus.ti.com/lit/an/sboa060/sboa060.pdf>>, al.tarih:28.04.2014.

- [39] **Url:** <http://www.washingtonpost.com/blogs/blogpost/post/alexander--l-,-graham-bell-sketches-his-electrical-speech-machinephotos/2011/05/20/AFo0qn7G_blog.htm>, alındığı tarih:29.04.2014.
- [40] **J. Korvascus**, “The Future is Illuminating”, Available: <http://bigthink.com/humanizingtechnology/the-future-is-illuminating>, alındığı tarih: 20.01.2014.
- [41] **Matt Laherty**, “Lighting Transformed: How Innovation Will Create New Opportunities in Lighting”, Cisco.
- [42] **Sau Koh, Willem Van Driel, and G. Q. Zhang**, “Degradation of light emitting diodes: a proposed methodology”; Vol. 32, No. 1, Journal of Semiconductors January 2011.
- [43] **Philip Smallwood**, “Global 60W Replacement Lamp Market”, LED Lighting Evolution Conference, Boston, Massachusetts, USA, June 2012.
- [44] **Url:**<<http://www.maximintegrated.com/appnotes/index.mvp/id/5383>>, alındığı tarih: 20.01.2014.
- [45] **Url:**<<http://www.electrooptics.com/news/newsstory.php?newsid=1920>>, alındığı tarih: 20.01.2014.
- [46] **Xiaohan Liu ; Makino, H. ; Maeda, Y.**, “Basic study on indoor location estimation using Visible Light Communication platform”, Engineering in Medicine and Biology Society, 2008. EMBS 2008. 30th Annual International Conference of the IEEE, 2008, Page(s): 2377-2380, Cited by: Papers (5).
- [47] **Xiaohan Liu ; Umino, E. ; Makino, H.**, “Basic study on robot control in an intelligent indoor environment using Visible light Communication”, Intelligent Signal Processing, 2009. WISP 2009. IEEE International Symposium on, Publication Year: 2009, Page(s): 323-325.
- [48] **Jaesung Kim; Daechun Lee; Ki-Doo Kim; Youngil Park**, “Performance improvement in visible light communication by using spread spectrum coding”, Optoelectronics and Communications Conference (OECC), 2010 15th, Publication Year: 2010, Page(s): 278-279.
- [49] **Rajbhandari, S.; Haigh, P.A. ; Ghassemlooy, Z.; Popoola, W.**, “Wavelet-Neural Network VLC Receiver in the Presence of Artificial Light Interference”, Photonics Technology Letters, IEEE, Volume: 25, Issue: 15, Publication Year: 2013, Page(s):1424-1427.
- [50] **Borogovac, T.; Little, T.D.C.**, “Laser visible light communications”, Photonics Society Summer Topical Meeting Series, 2012 IEEE, 2012, Page(s): 117-118.
- [51] **Hongseok Shin; Park, S.-B. ; Jung, D.K. ; Lee, Y.M.; Seoksu Song ; Jinwoo Park**, “VLC transceiver design for short-range wireless data interfaces”, ICT Convergence (ICTC), 2011 International Conference on, 2011, Page(s): 689-690.
- [52] **Watson, S. ; Mingming Tan; Najda, S.P. ; Perlin, P. ; Leszczynski, M.; Targowski, G. ; Grzanka, S. ; Kelly, A.E.**, “High frequency modulation of a 422 nm GaN laser diode”, Transparent Optical Networks (ICTON), 2013 15th International Conference on, 2013, Page(s): 1 – 4.
- [53] **Y. Tanaka, S. Haruyama, and M.Nakagawa**, “Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links in

- Personal, Indoor and Mobile Radio Communications”, 2000. PIMRC 2000. The 11th IEEE International Symposium on, 2000, pp. 1325-1329 vol.2.
- [54] **US Department of Energy**, “Energy Efficiency and Renewable Energy, Building Technologies Program, Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications”, January 2012.
- [55] **Url**: <<http://www.ecnmag.com/articles/2013/07/whatremains-biggest-challenge-current-ledtechnology>>, alındığı tarih: 18.01.2014.
- [56] **Nishant Bharti, Nishant Gupta, R Kritika, Saurabh Singh**, “Visible Light Communication”, A Project in Partial Fulfillment of the Requirements for Awards of Bachelor of Engineering in Electronics and Communication Engineering, 2011-2012 academic year.
- [57] **Z. Li, J. Waldron, T. Detchprohm, C. Wetzel, R. F. Karlicek Jr. and T. P. Chow**, “Monolithic integration of light-emitting diodes and power metaloxide-semiconductor channel high-electron-mobility transistors for light-emitting power integrated circuits in GaN on sapphire substrate”, published online 16 May 2013.
- [58] **R. Mesleh, H. Elgala, and H. Haas**, “LED nonlinearity mitigation techniques in optical wireless OFDM communication systems”, J. Opt. Commun. Netw., vol. 4, no. 11, pp. 865-874/875, Nov. 2012.
- [59] **Kamalakis, T.; Walewski, J.W.; Ntogari, G.; Mileounis, G.**, “Empirical Volterra-Series Modeling of Commercial Light-Emitting Diodes”, Lightwave Technology, Journal of Volume: 29, Issue: 14, 2011, Page(s): 2146-2155, Cited by: Papers (1).
- [60] **Stepniak, G. ; Siuzdak, J. ; Zwierko P.**, “Compensation of a VLC Phosphorescent White LED Nonlinearity by Means of Volterra DFE”, Photonics Technology Letters, IEEE Volume: 25, Issue: 16, Publication Year: 2013, Page(s): 1597-1600.
- [61] **Khalid, A.M. ; Cossu, G. ; Corsini, R. ; Choudhury, P. ; Ciaramella, E.**, “1-Gb/s Transmission Over a Phosphorescent White LED by Using Rate-Adaptive Discrete Multitone Modulation”, Photonics Journal, IEEE ,Volume:4 , Issue: 5, 2012 , Page(s): 1465 - 1473, Cited by: Papers (5).
- [62] **Chao Ma; Hongming Zhang; Kaiyun Cui; Minyu Yao; Zhengyuan Xu**, “Effects of LED lighting degradation and junction temperature variation on the performance of visible light communication”, Systems and Informatics (ICSAI), 2012 International Conference on, 2012, Page(s): 1596 – 1600.
- [63] **Chen, H. ; Tan, S.; Hui, S.**, “Color Variation Reduction of GaN-Based White Light-Emitting Diodes via Peak-Wavelength Stabilization”, Power Electronics, IEEE Transactions on, Volume: PP, Issue: 99, 2013, Page: 1.
- [64] **Modepalli, K.; Parsa,L.**, “Dual purpose HB-LED driver for illumination and Visible light communication”, Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE, 2013, Page(s):875- 880.
- [65] **Chow, C.W.; Yeh, C.H.; Liu, Y.F.; Liu, Y.**, “Improved modulation speed of LED visible light communication system integrated to main electricity network”, Electronics Letters Volume:47, Issue:15, 2011, Page(s):867-868,Cited by: Papers (5).

- [66] **V. M. Thumar, G.P. S. Tej, T. Nadkar, U. B. Desai, and S. N. Merchant**, “Power allocation, bit loading and sub-carrier bandwidth sizing for FDM based cognitive radio”, *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, vol. 2011, p. 87, Sep.2011.
- [67] **Vucic, J. ; Kottke, C. ; Nerreter, S. ; Langer, K.-D. ; Walewski, J.W.**, “513 Mbit/s Visible Light Communications Link Based on DMT-Modulation of a White LED”, *Volume: 28, Issue: 24, 2010, Page(s): 3512-3518*, Cited by: Papers (24).
- [68] **Do Tronghop; Junho Hwang; Souhwan Jung; Yoan Shin; Myungsik Yoo**, “Modeling and analysis of the wireless channel formed by LED angle in visible light communication”, *Information Networking (ICOIN), 2012 International Conference on, 2012, Page(s): 354 – 357*.
- [69] **Burton, A. ; Le Minh, H.; Ghasemlooy, Z. ; Rajbhandari, S.**, “A study of LED lamination uniformity with mobility for visible light communications”, *Optical Wireless Communications (IWOW), 2012 International Workshop on, Publication Year: 2012, Page(s): 1-3*.
- [70] **Kwonhyung Lee ; Hyuncheol Park ; Barry, J.R.**, “Indoor Channel Characteristics for Visible Light Communications”, *Communications Letters, IEEE Volume: 15, Issue: 2, 2011, Page(s): 217 – 219*, Cited by: Papers (13).
- [71] **Url:** <<http://growblu.com/research-and-development/evaluating-light>>, alındığı tarih:02.05.2014
- [72] **L. Zeng, D.C.O’Brien, H. Minh, G. Faulkner, K. Lee, D. Jung, Y. Oh, and E. T. Won**, “High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting”, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 27, no. 9, pp. 1654-1662, 2009.
- [73] **Vučić, J., Kottke, C., Nerreter, S., Buttner, A., Langer, K.-D., and Walewski, J.W.**: “White light wireless transmission at 200 + Mb/s net data rate by use of discrete-multitone modulation”, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2009, 21, pp. 1511-1513.
- [74] **Wu, F.M. ; Lin, C.T. ; Wei, C.C. ; Chen, C.W.; Chen, Z.Y. ; Huang, H.T; Sien Chi**, “Performance Comparison of OFDM Signal and CAP Signal Over High Capacity RGB-LED-Based WDM Visible Light Communication”, *Photonics Journal, IEEE, Volume: 5, Issue: 4, 2013, Article: 7901507*.
- [75] **Le Minh, H., O’Brien, D., Faulkner, G., Zeng, L., Lee, L., Jung, D., Oh, Y., and Won, E.T.**: “100-Mb/s NRZ visible light communications using a postequalized white LED”, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2009, 21, pp. 1063-1065.
- [76] **Hao Le Minh; O’Brien, D. ; Faulkner, G.; Lubin Zeng; Kyungwoo Lee ; Daekwang Jung; Yunje Oh**, “High-Speed Visible Light Communications Using Multiple-Resonant Equalization”, *Photonics Technology Letters, IEEE Volume:20, Issue:14, Publication Year: 2008, Page(s):1243-1245*, Cited by: Papers (31).
- [77] **Li, H. ; Chen, X. ; Huang, B. ; Tang, D. ; Chen, H.**, “High Bandwidth Visible Light Communications Based on a Post-Equalization Circuit”, *Photonics Technology Letters, IEEE, Volume: PP, Issue:99, Publication Year: 2013, Page(s): 1*.

- [78] **Elgala, H.; Mesleh, R.; Haas, H.**, “Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the art”, *Communications Magazine*, IEEE Volume:49, Issue: 9 Publication Year: 2011, Page(s): 56-62 Cited by: Papers (30).
- [79] **J. Vucic, C. Kottke, K. Habel, K.-D. Langer**, “803 Mbit/s Visible Light WDM Link Based on DMT Modulation of a Single RGB LED Luminary”, *OFC/NFOEC '11*, Mar. 2011, pp. 1-3.
- [80] **G. Cossu, A. M. Khalid, P. Choudhury, R. Corsini, and E. Ciaramella**, “3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED”, *Opt. Express*, vol. 20, no. 26, pp. B501â~A ,SB506, 2012.
- [81] **Url:** <<http://cool.conservation-us.org/byorg/usdoe/colorqualityofwhiteleds.pdf>>, alındığı tarih: 18.01.2014.
- [82] **Tarik Borogovac, Michael Rahaim and Jeffrey B. Carruthers**, “Spotlighting for Visible Light Communications and Illumination”, Department of Electrical and Computer Engineering Smart Lighting Engineering Research Center Boston University, Boston, Massachusetts 02215.
- [83] **McKendry, J.J.D.; Massoubre, D.; Zhang, S.; Rae, B.R.; Green, R.P.; Gu, E.; Henderson, R.K.; Kelly, A.E. ; Dawson, M.D.**, “Visible-Light Communications Using a CMOS-Controlled Micro- Light Emitting-Diode Array”, *J. Lightwave Tech.*, vol. 30, no. 1, Jan. 2012, pp. 61-67.
- [84] **J.J.D. McKendry et al.**, “High-Speed Visible Light Communications Using Individual Pixels in a Micro Light-Emitting Diode Array, *IEEE Photon.Tech.Lett.*, vol. 22, no. 18, 2010, pp. 1346-1348.
- [85] **Shuailong Zhang; Watson, S. ; McKendry, J.J.D. ; Massoubre, D. ; Cogman, A. ; Erdan Gu ; Henderson, R.K. ; Kelly, A.E., Dawson, M.D.**, “1.5 Gbit/s Multi-Channel Visible Light Communications Using CMOS-Controlled GaN-Based LEDs”, *Lightwave Technology, Journal of Volume: 31, Issue: 8, Publication Year: 2013, Page(s): 1211-1216, Cited by: Papers (2).*
- [86] **Url:** <<http://www.techthefuture.com/technology/wirelessdata-transfer-over-visible-light-sets-newrecord-at-10-gbs/>>, alındığı tarih: 18.01.2014.
- [87] **Chia-Lung Tsai; Chih-Ta Yen; Wei-Jhih Huang; Zhong-Fan Xu; Sun-Chien Ko**, InGaNBased Resonant-Cavity Light-Emitting Diodes Fabricated With a Distributed Bragg Reflector and Metal Reflector for Visible Light Communications, *Display Technology, Journal of, Volume: 9, Issue: 5,2013, Page(s): 365 – 370.*
- [88] **Linning Peng; Haese, S.; Helard, M.**, “Frequency Domain LED Compensation for Nonlinearity Mitigation in DMT Systems”, *Photonics Technology Letters, IEEE Volume: 25, Issue: 20,2013 , Page(s): 2022 â~A ,S 2025, Cited by: Papers (1).*
- [89] **Haigh, P.A. ; Ghassemlooy, Z. ; Rajbhandari, S. ; Papakonstantinou, I.**, “Visible light communications using organic light emitting diodes”, *Communications Magazine, IEEE, Volume: 51, Issue:8, 2013, Page(s): 148-154, Cited by: Papers (1).*
- [90] **Haigh, P.A. ; Ghassemlooy, Z. ; Papakonstantinou, I. ; Hoa Le Minh**, “2.7 Mb/s With a 93-kHz White Organic Light Emitting Diode and Real Time ANN Equalizer”, *Photonics Technology Letters, IEEE, Volume:25, Issue: 17, 2013, Page(s): 1687-1690.*

- [91] **H. Le Minh, Z. Ghassemlooy, A. Burton, and P. Haigh**, “Equalization for organic light emitting diodes in visible light communications”, in Proc. GLOBECOM Workshop, 2011, pp. 828-832.
- [92] **Hyunchae Chun ; Chien-Jung Chiang ; Monkman, A. ; O’Brien, D.**, “A Study of Illumination and Communication using Organic Light Emitting Diodes”, *Lightwave Technology, Journal of Volume: 31, Issue: 22, 2013, Page(s): 3511-3517.*
- [93] **Hyunchae Chun; Chien-Jung Chiang; O’Brien, D.** “Visible light communication using OLEDs: Illumination and channel modeling”, *Optical Wireless Communications(IWOW), 2012 International Workshop on Pub.Year: 2012, Page(s):1-3, Cited by: Papers (1).*
- [94] **Liu, Y.F. ; Yeh, C.H. ; Chow, C.W.**, “Alternating-Signal-Biased System Design and Demonstration for Visible Light Communication”, *Photonics Journal, IEEE, Volume: 5, Issue: 4, 2013, Article: 7901806.*
- [95] **D. Allen**, “LED assemblies and light strings containing”, U.S. Patent 2 006 000 767 9A1, Feb. 21,2006.
- [96] **Sung-Man Kim; Ji-San Won**, “Simultaneous reception of visible light communication and optical energy using a solar cell receiver”, *ICT Convergence (ICTC), 2013 International Conference on, Publication Year: 2013, Page(s): 896 – 897.*
- [97] **Gancarz, J. ; Elgala, H. ; Little, T.D.C.**, “Boston University, Impact of Lighting Requirements on VLC Systems”, *Volume: 51, Issue: 12, 2013, Page(s): 34 – 41.*
- [98] **S. Beczkowski and S. Munk - Nielsen**, *LED Spectral and Power Characteristics Under Hybrid PWM/AM Dimming Strategy, 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE, 2010.*
- [99] **Jin-Yuan Wang; Jun-Bo Wang; Ming Chen; Xiaoyu Song**, “Dimming scheme analysis for pulse amplitude modulated visible light communications”, *Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2013 International Conference on, 2013, Page(s): 1 – 6.*
- [100] **Youngsuk Suh; Chang-Hoi Ahn; Jae Kyun Kwon**, “Dual-Codeword Allocation Scheme for Dimmable Visible Light Communications,” *Photonics Technology Letters, IEEE, Volume: 25, Issue: 13, Publication Year: 2013, Page(s): 1274-1277.*
- [101] **Park, H. ; Kim, J.**, “A Coding Scheme for Visible Light Communication with Wide Dimming Range”, *Photonics Technology Letters, IEEE, Volume:PP, Issue:99, Publication Year: 2014, Page(s): 1.*
- [102] **M. V. Bhalerao, S. S. Sonavane, V. Kumar**, “A Survey Of Wireless Communication Using Visible Light”, *International Journal of Advances in Engineering and Technology, Jan. 2013. ISSN: 2231-1963.*
- [103] **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks–Part 15.7: “Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light”, IEEE Std 802.15.7-2011, 2011, Page(s): 1-309.**
- [104] **Bo Bai; Zhengyuan Xu; Yangyu Fan**, “Joint LED dimming and high capacity visible light communication by overlapping PPM”, *2010,vol.,no., pp.1-5, Cited by: Papers (4).*

- [105] **Minseok Oh**, “A flicker mitigation modulation scheme for visible light Communications”, Advanced Communication Technology (ICACT), 2013 15th International Conference on, 2013, vol., no., pp. 933-936.
- [106] **Rajagopal, S. ; Roberts, R.D. ; Sang-Kyu Lim**, IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support”, Communications Magazine, IEEE Volume: 50, Issue:3.
- [107] **Butala, P.M. ; Chau, J.C. ; Little, T.D.C.**, “Metameric modulation for diffuse visible light communications with constant ambient lighting”, 2012, vol., no., pp.1-3 .
- [108] **Dohler, M.; Heath, R.W. ; Lozano, A. ; Papadias, C.B. ; Valenzuela, R.A.**, “Is the PHY layer dead?”, Communications Magazine, IEEE, Volume: 49, Issue: 4, 2011, Page(s):159 - 165, Cited by: Papers (27).
- [109] **Shen, X.**, “Green wireless communication networks [Editor’s note], Network, IEEE Volume:27, Issue: 2, 2013, Page(s): 2-3.
- [110] **M. Mirz**, “Analog Signal Processing in Forward Error Correction Decoders” Ph.D. thesis, Technical Univ. Munich, 2007.
- [111] **Liqiang Zhao; Jian Cai; Hailin Zhang**, “Radio-Efficient Adaptive Modulation and Coding: Green Communication Perspective”, Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd, 2011, Page(s): 1-5, Cited by: Papers (1).
- [112] **Saha, Nirzhar; Mondal, Ratan Kumar; Yeong Min Jang**, “Receiver performance improvement utilizing diversity in MIMO VLC”, ICT Convergence (ICTC), 2013 International Conference on, 2013, Page(s): 546 – 549.
- [113] **Yang Hong; Jian Chen; Zixiong Wang; Changyuan Yu**, “Performance of a Precoding MIMO System for Decentralized Multiuser Indoor Visible Light Communications”, Photonics Journal, IEEE, Volume: 5, Issue: 4, 2013, Article: 7800211.
- [114] **L. Zeng, D. C. O’Brien, H. L. Minh, G. E. Faulkner, K. Lee, D. Jung, Y. Oh, and E.T. Won**, “High data rate MIMO optical wireless communications using white LED lighting”, IEEE J. Sel. Areas Comm., vol. 27, 2009.
- [115] **Xie Zhang; Kaiyun Cui; Hongming Zhang; Zhengyuan Xu**, “Capacity of MIMO visible light communication channels”, Photonics Society Summer Topical Meeting Series, 2012 IEEE, 2012, Page(s): 159 – 160.
- [116] **Tuan-Anh Tran ; O’Brien, D.C.**, “Performance metrics for Multi-Input Multi-Output (MIMO) visible light communications”, Optical Wireless Communications (IWOW), 2012 International Workshop on, 2012, Page(s):1 - 3, Cited by: Papers (1).
- [117] **Azhar, A.H.; Tran, T.; O’Brien, D.**, “A Gigabit/s Indoor Wireless Transmission Using MIMO-OFDM Visible-Light Communications, Photonics Technology Letters, IEEE, Volume:25, Issue: 2, 2013, Page(s): 171 - 174, Cited by: Papers (3).
- [118] **Mondal, R.K. ; Saha, N. ; Yeong Min Jang**, “Performance enhancement of MIMO based visible light communication”, Electrical Information and Communication Technology (EICT), 2013 International Conference on, Publication Year: 2014 , Page(s): 1 – 5.
- [119] **Swati Chowdhuri, Dr. Arun Kumar Mondal, Dr. P. K. Banerjee**, “Implementation of MIMO-OFDM system in Mobile AD-Hoc Networks”, International Journal of Engineering Research and

Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622 www.ijera.com, Vol. 1, Issue 3, pp.753-757.

- [120] **Liang Wu; Zaichen Zhang; Huaping Liu**, “MIMO-OFDM visible light communications system with low complexity”, Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on, 2013, Page(s):3933 – 3937.
- [121] **Fang Yan; Yuanquan Wang; Yufeng Shao; Yiguang Wang; Li Tao; Nan Chi; Minglun Zhang**, “Experimental demonstration of subcarrier multiplexing-based MIMO-OFDM system for visible light communication”, Communications (APCC), 2012 18th Asia-Pacific Conference on, Publication Year:2012, Page(s): 924 – 926.
- [122] **Zhenhua Yu, Robert J. Baxley, G. Tong Zhou**, Technical Univ. Munich, 2007, “Multi-User MISO Broadcasting for indoor visible light communication”, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 30332 USA, Georgia Tech Research Institute, Atlanta, GA, 30332 USA.
- [123] **Yiguang Wang; Minglun Zhang; Yuanquan Wang; Wuliang Fang; Li Tao; Nan Chi**, “Experimental demonstration of visible light communication based on sub-carrier multiplexing of multiple-input-single- output OFDM”, Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), 2012, 17th, 2012, Page(s): 745 – 746.
- [124] **Akhilesh Kumar, Anil Chaudhary**, “Channel Capacity Enhancement of Wireless Communication using Mimo Technology”, International Journal of Scientific & Technology Research Volume 1, Issue 2, March 2012.
- [125] **Haigh, P.A. ; Ghassemlooy, Z. ; Papakonstantinou, I. ; Tedde, F.; Tedde, S.F. ; Hayden, O. ; Rajbhandari, S.**, “MIMO-ANN system for increasing data rates in organic visible light communications systems”, Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on, 2013, Page(s): 5322 – 5327.
- [126] **Yang Hong; Jian Chen; Zixiong Wang; Changyuan Yu**, “Performance of a Precoding MIMO System for Decentralized Multiuser Indoor Visible Light Communications”, Photonics Journal, IEEE, Volume: 5, Issue: 4, 2013, Article: 7800211.
- [127] **Url:** <www.eecs.berkeley.edu/.../Fundamentals_Wireless_Communication_chapter5.pdf>, alındığı tarih:02.05.2014.
- [128] **Peter Smulders**, Eindhoven University of Technology, “The Road to 100Gb/s Wireless and Beyond: Basic Issues and Key Directions”.
- [129] **Roberts, R.D. ; Rajagopal, S. ; Sang-Kyu Lim**, IEEE 802.15.7 “Physical layer summary”, GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2011 IEEE Publication Year: 2011, Page(s): 772 – 776.
- [130] **Mohammad Noshad, Student Member, IEEE, and Ma’it’e Brandt-Pearce**, Senior Member, IEEE, “Can Visible Light Communications Provide Gb/s Service?”.
- [131] **C. H. Yeh, Y. F. Liu, C. W. Chow, Y. Liu, P. Y. Huang, and H. K. Tsang**, “Investigation of 4-ASK modulation with digital filtering to increase 20 times of direct modulation speed of white-light LED visible light communication system”, Opt. Express, vol. 20, no. 15, pp. 16218-16223, Jul. 2012.

- [132] **J. F. Li, Z. T. Huang, R. Q. Zhang, F. X. Zeng, M. Jiang, and Y. F. Ji**, “Superposed pulse amplitude modulation for visible light communication”.
- [133] **Akassh A. Mishra and Neelesh S. Salian**, “Internet using Visible Light Communication”, IACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol. 3, No. 5, October 2011.
- [134] **Arnon, S.**, “The Effect Of Clock Jitter in Visible Light Communication Applications”, Lightwave Technology, Journal of Volume:30, Issue:21, 2012, Page(s): 3434 – 3439.
- [135] **G. Cossu, A. M. Khalid, P. Choudhury, R. Corsini, and E. Ciaramella**, “3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED”, Opt. Express, vol. 20, no. 26, pp. 501-506, 2012.
- [136] **G. Ntogari, T.Kamalakis, J.Walewski, and T.Sphicopoulos**, “Combining illumination dimming based on pulse-width modulation with visible-light communications based on discrete multitone”, IEEE J. Opt. Commun. Netw., vol. 3, no. 1, pp. 56-65, 2011.
- [137] **Vucic, J. ; Kottke, C. ; Nerreter, S. ; Langer, K.-D. ; Walewski, J.W.**, “513 Mbit/s Visible Light Communications Link Based on DMT-Modulation of a White LED”, Volume: 28, Issue: 24, 2010, Page(s): 3512-3518, Cited by: Papers (24).
- [138] **X. Zhang, S. Dimitrov, S. Sinanovic, and H. Haas**, “Optimal power allocation in spatial modulation OFDM for visible light communications”, 75th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2012.
- [139] **Zabih Ghassemlooy, Paul Anthony Haigh, Francesco Arca, Sandro Francesco Tedde, Oliver Hayden, Ioannis Papakonstantinou, and Sujan Rajbhandari**, “Visible Light Communications: 3.75 Mbits/s data rate with a 160 kHz bandwidth organic photodetector and artificial neural network equalization”.
- [140] **Hyung-Joon Jang, Joon-Ho Choi, Z.Ghassemlooy, and Chung Ghiu Lee**, “PWM-based PPM Format for Dimming Control in Visible Light Communication System”, 8th IEEE, IET International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, 2012.
- [141] **A.Y. Yang, X. Li, T. Jiang**, “Enhancement of LED indoor communications using OPPM-PWM modulation and grouped bit-flipping decoding”, Opt. Exp., vol. 20, no. 9, pp. 10170-10179, Apr 2012.
- [142] **A. M. Street, K. Samaras, D. C. O’Brien, and D. J. Edwards**, “Closed form expressions for baseline wander effects in wireless IR applications”, Electron. Lett., vol. 33, no. 12, pp. 1060-1062, Jun. 1997.
- [143] **Xiaoxue Ma; Kyujin Lee; Kyesan Lee**, “Appropriate modulation scheme for visible light communication systems considering illumination”, Electronics Letters Volume:48, 2012, pp.1137-1139.
- [144] **Zong,Sheng; Wu, Jiande;He,Xiangning**, “A novel method for illumination and communication using white LED lights”, Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012), 6th IET International Conference on.
- [145] **Haigh, P.A. ; Ghassemlooy, Z. ; Rajbhandari, S. ; Papakonstantinou, I.**, “Visible light communications using organic light emitting diodes”,

- Communications Magazine, IEEE, Volume: 51, Issue: 8, 2013, Page(s): 148-154, Cited by: Papers (1).
- [146] **I. Bar-David and G. Kaplan**, “Information rates of photon-limited overlapping pulse position modulation channels”, IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 30, no. 3, pp. 455-464, 1984.
- [147] **P. A. Haigh, Z. Ghassemlooy, H. Le Minh, S. Rajbhandari, F. Arca, S. F. Tedde, O. Hayden, and I. Papakonstantinou**, “Exploiting equalization techniques for improving data rates in organic optoelectronic devices for visible light communications”, J. Lightwave Technol. 30, 3081-3088 (2012).
- [148] **Jong-Ho Yoo; Sung-Yoon Jung**, “Multicoded variable PPM with level cutting for high data rate visible light communications”, Communications (APCC), 2012 18th Asia-Pacific Conference on, 2012, Page(s): 703-708.
- [149] **W. O. Popoola, E. Poves, and H. Haas**, “Spatial pulse position modulation for optical communications”, J. Lightwave Technol. 30(18), 2948-2954 (2012).
- [150] **Zixiong Wang; Jian Chen; Wen-De Zhong; Changyuan Yu; Wei Chen**, “User-oriented visible light communication system with dimming control scheme”, Optical Communications and Networks (ICOON), 2012, 11th International Conference on.
- [151] **Z. Ghassemlooy, W. Popoola, S. Rajbhandari**, “Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB”.
- [152] **M.Noshad and M.Brandt-Pearce**, “Application of Expurgated PPM to Indoor Visible Light Communications - Part I: Single-User Systems”, submitted to J. Lightw. Tech., 2013.
- [153] **Zong, Sheng; Wu, Jiande; He, Xiangning**, “A novel method for illumination and communication using white LED lights”, Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012), 6th IET International Conference on.
- [154] **Butala, P.M. ; Chau, J.C. ; Little, T.D.C.**, “Metameric modulation for diffuse visible light communications with constant ambient lighting”, 2012, vol., no., pp.1-3.
- [155] **Jinwoo Kim; Kwonhyung Lee**; “Power efficient visible light communication systems under dimming constraint”, Hyuncheol Park Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2012 IEEE 23rd International Symposium on.
- [156] **Bo Bai; Qunfeng He; Zhengyuan Xu; Yangyu Fan**, “The color shift key modulation with non-uniform signaling for visible light communication”, Communications in China Workshops (ICCC), 2012, 1st IEEE International Conference on.
- [157] **Kottke, Christoph; Hilt, Jonas; Habel, Kai; Vucic, Jelena; Langer, Klaus-Dieter**, “1.25 Gb/s Visible Light WDM Link based on DMT Modulation of a Single RGB LED Luminary”, Euro. Conf. and Exhibition on Opt. Commun., OSA Tech. Dig. (online), 2012, paper We.3.B.4.
- [158] **L.Tao, T.Wang, Y.Gao, A. P. Tao-Lau, N. Chi, and C. Lu**, “Experimental demonstration of 10 Gb/s multilevel carrier-less amplitude and phase modulation for short range optical communication systems”, Opt. Exp., vol. 21, no. 5, pp. 6459-6465, Mar. 2013.

- [159] **M. Noshad and M. Brandt-Pearce**, “Expurgated PPM using balanced incomplete block designs”, IEEE Commun. Lett., vol. 16, no. 7, pp. 968-971, 2012.
- [160] **Proceeding of IEEE Global communications conference (GLOBECOM)**, Anaheim, CA, “Multilevel pulse-position modulation based on balanced in- complete block designs”, Dec. 2012.
- [161] **H. Le Minh, Z. Ghassemlooy, A. Burton, and P. Haigh**, “Equalization for organic light emitting diodes in visible light communications”, in Proc. GLOBECOM Workshop, 2011, pp. 828–832.
- [162] **Haigh, P.A. ; Ghassemlooy, Z. ; Papakonstantinou, I. ; Hoa Le h, Min** “2.7 Mb/s With a 93-kHz White Organic Light Emitting Diode and Real Time ANN Equalizer”, Photonics Technology Letters, IEEE, Volume: 25 , Issue: 17, 2013 , Page(s): 1687 – 1690.
- [163] **Hyunchae Chun; Chien-Jung Chiang; O'brien, D.**, “Visible light communication using OLEDs: Illumination and channel modeling Optical Wireless Communications(IWOW)”, 2012 International Workshop on 2012, Page(s):1-3, Cited by: Papers (1).
- [164] **Haigh, P.A.; Ghassemlooy, Z.; Rajbhandari, S.; Papakonstantinou, I.**, “Visible light communications using organic light emitting diodes”, Communications Magazine, IEEE, Volume: 51 , Issue: 8, 2013, Page(s): 148-154, Cited by: Papers (1).
- [165] **C. J. Brabec, N. S. Sariciftci, and J. C. Hummelen**, “Plastic solar cells”, Adv. Funct. Mater. 11, 15–26 (2001).
- [166] **Url:** <http://webcache.googleusercontent.com/search?hl=tr&q=cache:LzhETrG7Mt8J:http://tr.wikipedia.org/wiki/Organik_g%25C3%25BCne%25C5%259F_pili%2Bheterojunction+nedir&gbv=2&ct=clnk>, alındığı tarih 17.04.2014.
- [167] **Belén Arredondo, Beatriz Romero, José Manuel Sánchez Pena, Agustín Fernández-Pacheco, Eduardo Alonso, Ricardo Vergaz, and Cristina de Dios**, “Visible Light Communication System Using an Organic Bulk Heterojunction Photodetector”, Sensors (Basel). 2013 September; 13(9): 12266–12276.
- [168] **Vegni, A.M.; Little, T.D.C. on**, "Handover in VLC systems with cooperating mobile devices, Computing, Networking and Communications (ICNC), 2012 International Conference 2012, Page(s): 126 - 130, Cited by: Papers (2).
- [169] **Patent Application Publication**, Apr. 19, 2012, Sheet 4 Of 7 US 2012/0093517 A1

EKLER

EK A : Modülasyon tekniklerinin avantaj ve dezavantajları.

EK B : VLC sistemleri tarihsel gelişim süreci.

EK A

Çizelge A.1 : Modülasyon tekniklerinin avantaj ve dezavantajları.

Modülasyon Tekniği	Avantajları	Dezavantajları
Doğrudan Algılama ile Şiddet Modülasyonu <i>(Intensity Modulation with Direct Detection (IM/DD))</i>	Maliyet etkindir. Uygulaması basittir.	Gerçek değerli ve tek kutuplu sinyaller gerektirir.
Açma-Kapama Anahtarlama <i>(On-Off Keying (OOK))</i>	Uygulaması ve alıcıda çözümlenmesi kolaydır. Senkronizasyon gerektirmez. LED'in doğrusal olmama özelliğinden etkilenmez.	Sabit eşik değeri ile standardın altındadır. Gürültülü kanallarda performansı iyi değildir. Sönümlü kanallarda uyarlanabilir eşik değeri gerektirir. Aydınlatma kontrolü ve veri akışı için uygun değildir. Karartma kontrolü altında enerji tüketimi artmaktadır.
Ortogonal Frekans Bölmeli Modülasyon <i>(Orthogonal Frequency Division Modulation (OFDM))</i>	Spektral verimliliği iyidir. Karmaşık kanal dengeleyiciler gerektirmez. Yüksek kapasite sağlar ve FLI girişimini azaltır. İletim kapasitesi bit ve güç yükleme teknikleri ile artırılabilir. Çoklu erişim teknikleri PWM, QAM, SM..vb. ile birlikte uygulanabilir.	Dijital sinyal işleme gerektirir. OFDM modülatörün çıkışı uygulama yapmak için oldukça karmaşıktır. LED'in doğrusal olmama özelliğinden kaynaklanan ve her bir alt taşıyıcıda gürültünün artmasına neden olan alt taşıyıcı etkileşimi şeklinde bir sakıncası vardır. Karartma kontrolü zordur, PWM ile birlikte kullanıldığında karartma kontrolü daha iyidir. Titreme etkisi oldukça fazladır. CAP sinyalleri ile karşılaştırıldığında yüksek PAPR değeri vardır.
Darbe Konum Modülasyonu <i>(Pulse Position Modulation (PPM))</i>	OOK ve NRZ ile karşılaştırıldığında yüksek güç verimliliği sağlar. High spectral efficiency compared to subcarrier modulation schemes. DC ve spektrumun alt frekansını önler. Sabit ortalama gücü ile karartma kontrolünü korur. Sönümlü kanallarda uyarlanabilir eşik değeri gerektirmez. Bileşenlerinin doğrusal olmaması sorun yaratmaz. PWM ile birlikte veri hızını artırmak için kullanılabilir.	Gürültülü kanallarda performansı iyi değildir. Senkronizasyon gerektirir. Yüksek bantgenişliği verimliliği sunmaz. Veri hızı çok yavaş olduğunda hissedilebilen bir titreme algılanabilir. Düşük parlaklık aralığına sahiptir. Senkronizasyon titreşimine karşı duyarlıdır. DC bölgesinde birkaç spektral bileşene sahiptir.

	Analog formatta veri gönderebilir ve uygulaması basittir.	
Darbe Genişlik Modülasyonu	Karartma seviyesini ayarlama işlemi, şiddet/genlik modülasyonu tabanlı karartma mekanizmasındaki akım değişimlerinden kaynaklanan dalgaboyu kaymasından etkilenmez.	Gürültülü kanllarda performansı iyi değildir ve VLC sistemlerin veri taşıyıcı gereksinimleri ile çatışır.
<i>(Pulse Width Modulation (PWM))</i>	Modülasyon indeksini (0% - 10%) kontrol ederek parlaklık seviyesi elde edilebilir.	
	Kromasite kaymasına karşı duyarlılığı azdır.	
	Yayılan ışığın reklemdirmesini etkilemez.	
Değişken Çoklu-Seviyeli Dörtlü Genlik Modülasyonunun OFDM sinyali ile birlikte kullanılması	İletilen güç OOK'ya göre azdır.	
<i>(Variable Multi-Level Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) applied with OFDM signal.)</i>	Karartma kontrolü altında gürültü gücündeki artışı önler.	Senkronizasyon gerektirir.
	M-QAM OFDM'nin sembol hızları her zaman için orijinal sembol hızlarından küçüktür, bu durumda karartma kontrolünün uygulaması kolaydır.	
Çoklu Darbe Konum Modülasyonu	Veri iletimi için yüksek frekansta alt taşıyıcı gerektirmez.	Veri hızı tüm parlaklık değerlerinde aynı değerde değildir.
<i>(Multiple Pulse Position Modulation (MPPM))</i>	Parlaklık kontrolü için PWM sinyale ihtiyaç duymaz.	Bilgi taşıma kapasitesi zaman-diliminin toplam sayısından ve sembol periyodu başına darbe dilimlerinin sayısından etkilenir.
	VOOK ve VPPM'ye göre spektral verimliliği (~1) daha yüksektir.	Karmaşıklık bit'den sembole eşleme veya rastgele bir eşleme ile önlenir.
	Enerji verimliliği kodlama tekniği eklendiğinde artırılabilir.	
	BER performansı dengeleme metodları ile artırılabilir.	
Değişken Darbe Konum Modülasyonu	PPM'ye göre esnek, değişken aralıkta karartma desteği sağlar.	Aynı PAPR değeri için PPM ile karşılaştırıldığında düşük spektral verimliliğe sahiptir.
<i>(Variable Pulse-Position Modulation (VPPM))</i>	Sabit veri hızı sağlar.	Veri hızını artırmak için çakıştırma teknikleri VPPM'ye uygulanamaz.
	Çerçeve içi titreme etkisini azaltır.	Renk kayması söz konusu değildir.
	Tam parlaklık özelliğine sahiptir.	
Çakışan Darbe Konum Modülasyonu	Yüksek ve istikrarlı kesim verim hızına sahiptir.	
<i>(Overlapping Ppulse Position Modulation (OPPM))</i>	Bantgenişliği verimliliği yüksektir.	Parlaklığı sadece sonlu süreksiz seviyelere sınırlandırır.
	Esnek geniş karartma aralığı sağlar.	Tasarımda daha kesin bir alıcı senkronizasyonu gerektirir.
	PPM'ye göre düşük titreme etkisi vardır.	OOK ve VPPM'nin BER performansını sağlayabilmek için güç tüketir, enerji verimli değildir.
	Bantgenişliğinde artışa neden olmadan, TCM tekniği ile BER performansı artırılabilir.	
	Geniş parlaklık karartma aralığı da dahil olmak üzere tüm karartma seviyeleri altında sabit titreme şiddeti sağlar.	
	Büyük ve istikrarlı kesim veri hızı sağlar.	

	SSK ve PPM'in birleşimidir.	
	Düşük karmaşıklığa sahiptir.	
Mekansal PPM (<i>Spatial PPM (SPPM)</i>)	LED'in doğrusal olmama özelliğine OFDM'ye göre daha az duyarlıdır.	Veri hızında artış kullanılan verici sayısı ve sinyal takımıyla ilgili olarak doğru orantılıdır.
	Enerji verimlidir ve spektral verimliliği yüksektir.	Ancak az sayıda verici kullanılması ile enerji verimliliği yükseltilebilir bu durumda bantgenişliği ihtiyacı artar.
	OOK ve PPM'ye göre veri hızı artırılmıştır..	
		Sadece RGB tip LED'lerle kullanılabilir.
Renk Kaydırmalı Anahtarlama (<i>Color Shift Keying (CSK)</i>)	Haberleşme sırasında tüm CSK çoklu ışık kaynakları arasında yayılan ortalama optik gücün ve ortalama optik rengin sabit olmasını sağlar.	Sürücü akımının uygunsuz kontrolünden dolayı renk kaymasına neden olabilir.
	Yüksek optik saat hızlarına (MHz) erişilebilir.	Verici ve alıcı tasarımı karmaşıktır.
		Erişilen BER performansı yeterince iyi değildir.
		Veri iletimi tam parlaklık altında imkansızdır.
		Genlik değişimlerine bağlı olarak ortaya çıkan herhangi bir titreme sorunu yoktur.
Metamerik Modülasyon (<i>Metameric modulation (MM)</i>)	Sabit ortam aydınlatma durum kontrolü sağlar.	
	CSK'ya göre enerji verimlidir.	Çoklu dalgaboylarının algılanması ve ayırt edilmesi için alıcı fotodiyod tasarımı gerektirir.
	Renk titreme etkisini azaltma ve renklendirmeyi artırma yeteneğine sahiptir.	
	Sistemin bantgenişliği LED'in sinyal bantgenişliğini aşabilir.	
Frekans Anahtarlama Modülasyonu (<i>Switching Frequency Modulation (SFM)</i>)	Parlaklık görev döngüsü ile kontrol edilir ve bu durumda haberleşme ve karartma kontrolü birbirinden bağımsız ve eş zamanlı olarak yapılabilir.	
	LED'in mutlak anahtarlama hızına bağlı değildir ve bu durumda titreme etkisi sorunu kolaylıkla çözümlenir.	
Ayrık Çok Tonlu Modülasyon (<i>Discrete Multitone Modulation (DMT)</i>)	PWM ve DMT tekniklerinin birleşimidir.	Yüksek veri hızları için yüksek seviyeli takımıyla ilgili olarak kullanılmalıdır.
	Eşik değeri algılanmasına izin vermez.	
	Spektral olarak verimli ileri seviyede bir modülasyon formatıdır.	Uçtan uca doğrusal sinyal tepkisi gerektirmektedir ki bu durumda doğrusal yükselteçler kullanılır ve enerji tüketimi artar.
	LED'in modülasyon hızını artırır.	Kompanzasyon algoritmaları ile birlikte kullanılmalıdır.
	Artan sembol süresi vardır ve çok yönlü yayılım ortamına dayanıklıdır.	Verici ve alıcıda ciddi anlamda sinyal işleme ihtiyacı olması nedeniyle gerçek zamanlı uygulamalar için tercih edilmemektedir.
	Kanal gecikme yayılımına karşı toleranslıdır.	LED'in doğrusal bölgesinde sürülmesi için ayrı bir modülasyon akımı gerekmektedir.
	Sönümlenmeye karşı dirençlidir.	

Ters Darbe Konum Modülasyonu <i>(Inverse Pulse Position Modulation (IPPM))</i>	Veri haberleşmesi zaman ortamında sağlanır ve bu durumda genlik ortamındaki performans etkilenmez. LED'in doğrusal olmama özelliğine duyarlılığı düşüktür.	Tam bir senkronizasyon gerektirir.
Çift Eğimli Darbe Modülasyonu <i>(Pulse Dual Slope Modulation (PDSM))</i>	Çerçeve içi ve çerçeveler arası titreme etkisini kompanse eder. Karatma kontrolü üzerinde etkin bir tekniktir, darbelerin eğimlerini değiştirerek karatma kontrolü sağlar. Aşırı bantgenişliği kısıtlaması olmaksızın gelişmiş S/N performansına sahiptir. Düşük aydınlatma şiddetinde de uygulanabilir. Önceden belirlenen genlik değeri parlaklık üzerinde daha fazla kontrol sağlar.	Eğer minimum genlik değeri daha önceden belirlenmemiş ise sinyalin algılanması işlemi sırasında zorluklarla karşılaşılır.
Ters Darbe Konum Modülasyonu <i>(Inverse Pulse Position Modulation (IPPM))</i>	LED'in doğrusal olmama özelliğine duyarlılığı düşüktür. Haberleşme aydınlatma performansını etkilemeden sağlanır.	Uygun saat fonksiyonu kritiktir. Gerekli BER değeri ancak doğru senkronizasyon ile elde edilebilir.
Dörtlü Genlik Kaydırmalı Anahtarlama <i>(Quaternary Amplitude Shift Keying Modulation)</i>	20 kata kadar LED'in doğrudan modülasyon hızını artırır.	LED'in modülasyon hızını artırmak ve ISI etkisini azaltmak için dijital filtreleme ile birlikte kullanılır Mavi filtre ile BER performansı artırılabilir ancak SNR ve hat mesafesi azalır.
Taşıyıcısız Genlik ve Faz Modülasyonu <i>(Carrierless Amplitude And Phase (CAP) Modulation)</i>	Spektral verimliliği yüksektir. Basit ve maliyet etkin bir dizaynı vardır. Bant sınırlı durumlarda kapasiteyi artırır. Düşük güç tüketimi vardır. Veri hızı WDM tekniği ile birlikte kullanıldığında daha fazla artırılabilir. DFT ve IDFT uygulaması gerektirmez.	-----
Arıtılmış Darbe Konum Modülasyonu <i>(Expurgated Pulse-Position Modulation (EPPM))</i>	Karatma kontrolü için geniş aralıkta PAPR değeri sağlar. Veri hızı Gb/s seviyesindedir. PPM'nin aksine serpiştirme tekniği ile birlikte kullanılabilir. Semboller arasındaki Hamming uzaklığı BIBD kodları ile artırılabilir. Alıcı ve verici karmaşıklığı azaltılmıştır. PPM'e göre titreme etkisini daha iyi azaltır.	PPM gibi düşük spektral verimlilikten zarar görür. PPM'de olduğu gibi, dağıtıcı kanallarda ISI etkisi sorun yaratır. Bu nedenle ISI'yı ve hata oranını azaltmak için serpiştirme tekniği ile birlikte kullanılmalıdır.

	EPPM'ye göre sembol hızı artırılmıştır.	
Çakışan EPPM <i>(Overlapped EPPM (OEPPM))</i>	Çakışan darbe ve serpiştirme teknikleri ile birlikte uygulanabilir. Karatma BIBD kodu değiştirilerek kontrol edilir. Spektral verimliliği artırılmıştır. PAPR takımıyıldızı boyutundan bağımsız olarak seçilebilir.	Çok seviyeli dalga formları için LED dizilerinin kullanımını gerektirir.
	Spektral verimliliği <1 'dir ancak çakışan darbe ve darbe-serpiştirme tekniklerinin kullanımı ile (>1) olacak şekilde daha fazla artırılabilir.	
Çok seviyeli EPPM <i>(Multilevel EPPM (MEPPM))</i>	Yüksek seviyede karatma kontrolü ile yüksek veri hızlarına ulaşmak için artırılmış takımıyıldızı boyutuna sahiptir. Geniş aralıkta PAPR değerini destekler ve PAPR değeri takımıyıldızı boyutundan bağımsız seçilebilir. Serpiştirme teknikleri ile birlikte kullanılır. LED'in doğrusal olmama özelliğinden bağımsızdır. EPPM'ye göre daha iyi titreme etkisi azaltma performansına sahiptir.	-----

EK B

Çizelge B.1 : VLC sistemleri tarihsel gelişim süreci [29].

Yıl	Süreç
2004	Japonya’da, yüksek hızda veri iletimi için LED aydınlatma sistemlerinin kullanılmasına ilişkin ilk deneylerin yapılması.
2005	Japonya’da, VLC sistemleri kullanılarak mobil telefonlara bilgi iletilmesi için arazi denemelerinin yapılması ve floresan aydınlatma ile 10 kbps ve LED aydınlatma ile birkaç Mbps hızın elde edilmesi
2007	Japonya’da, ışık üzerinden PDA’ya bilgi iletirken LED aydınlatma sıvı kristal ekran (LED-backlit liquid crystal display (LCD)) televizyonların denenmesi.
2007	VLCC’nin Japonya’da kurulması ve iki standart yayınlanması; Görünür Işıklı Haberleşme Sistem Standardı ve Görünür Işık ID Sistem Standardı JEITA’nın bu standartları JEITA-1221 ve JEITA-1222 olarak kabul etmesi.
2008	Avrupa Birliği tarafından desteklenen OMEGA tarafından, OWC, IR ve VLC teknolojilerinin kullanımını içeren, iç mekan ağ iletimi için uluslararası standartların yayınlanması. Birkaç metre mesafesi olan, 5 LED içeren, > 100 Mbps veri hızında, LOS özellikli sistemin denenmesi.
2008	Amerika’da, Japonya’dan VLCC ve Uluslararası Kızılötesi Veri Kuruluşu (International Infrared Data Association (IrDA))’nun birlikte çalışarak standartlar belirlemesi.
2009	VLCC’nin, IrDA şartnamesini geliştirerek ve birleştirerek VLC’nin ilk Şartname Standardını yayınlaması ve görünür ışık dalgaboylarının kullanımına izin verilmesi için spektrumun tanımlanması.
2010	Amerika’da, haberleşme alanında geniş çapta elektronik cihazlarla VLC’nin kullanımının sağlanması için VLC teknolojisinin geliştirilmesi, örneğin; yüksek çözünürlüklü televizyonlar, bilgi ekranları, kişisel bilgisayarlar, kişisel dijital yardımcı akıllı telefonlar ve diğer ürünler.
2010	Japonya’da VLC sisteminin iç mekan global konumlandırma sistemi (GPS) ile birlikte kullanımının denenmesi.
2010	Siemens ve Heinrich Hertz Enstitüsü Almanya’da, FM-VLED sistem ile 500 Mbps hızla 5m mesafede iletim sağlanması.
2011	IEEE Kablosuz Kişisel Alan Ağ İletimi çalışma grubu 802.15.7 Görev Grubu 7 tarafından VLC teknolojileri için standart yayınlanması ve VLC’nin fiziksel ve medya erişim katmanlarının standardize edilmesi.
2011	İngiltere’de Edinburg Üniversitesi tarafından fosfor tabanlı beyaz LED kullanılarak, OFDM tabanlı VLC sistemi ile 124 Mbps gerçek zamanlı iletim sağlanması.
2012	PLASA’nın Kontrol Protokolleri Çalışma Grubu yeni Amerikan Ulusal Standart projesini yayınlamıştır.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Dilek ŞENYER

Doğum Yeri ve Tarihi: İzmir/ 22.10.1973

Adres: Hava Harp Okulu Komutanlığı Yeşilyurt / İSTANBUL

E-Posta: dsenyer@hho.edu.tr

Lisans: Dokuz Eylül Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Mesleki Deneyim ve Ödüller: -

Yayın ve Patent Listesi: -

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Kablosuz Yeşil Haberleşmenin Önemi ve Görünür Işıklı Haberleşmede LED Teknolojisi Uygulamaları