

**T.C.
NUH NACİ YAZGAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TEK-DALLI OPTİK LOS KANALLARDA MODÜLASYON
TEKNİKLERİ VE GÜÇ ANALİZİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Cihangir ÇÖRTEN**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Asuman SAVAŞCIHABEŞ**

**Mart 2023
KAYSERİ**

**T.C.
NUH NACİ YAZGAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TEK-DALLI OPTİK LOS KANALLARDA MODÜLASYON
TEKNİKLERİ VE GÜÇ ANALİZİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Cihangir ÇÖRTEN**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Asuman SAVAŞCIHABEŞ**

**Mart 2023
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmada elde etmiş olduğum tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde sonuçlanması amacıyla çalışma yaptığımı beyan ederim ve aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Cihangir ÇÖRTEN

İmza

X

YÖNERGEYE UYGUNLUK ONAYI

“Tek-Dallı Optik Los Kanallarda Modülasyon Teknikleri ve Güç Analizi” adlı Lisans tezi, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan
Cihangir ÇÖRTEN
İmza

Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Asuman SAVAŞCIHABEŞ
İmza

KABUL ONAY SAYFASI

Dr. Öğr. Üyesi Asuman SAVAŞCIHABEŞ danışmanlığında Cihangir ÇÖRTEN tarafından hazırlanan “Tek-Dallı Optik Los Kanallarda Modülasyon Teknikleri ve Güç Analizi” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

...../...../.....

JÜRİ:

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Asuman SAVAŞCIHABEŞ

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Bahadır ÇETİNKAYA

Üye : Doç. Dr. Mehmet BİLİM

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Kurulunun tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

...../...../.....

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Üniversitede akademik çalışmalarım esnasında bilimsel katkıları ve farklı bakış açıları ile bana yön veren ve bu tez çalışmasının olgunlaşmasında bana destek olan sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Asuman SAVAŞCIHABEŞ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca; çalışmalarım esnasında desteklerini esirgemeyen üniversitedeki diğer değerli hocalarıma, daima yanımda olan aileme, değerli arkadaşım İpek'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Cihangir ÇÖRTEN

İmza



TEK-DALLI OPTİK LOS KANALLARDA MODÜLASYON TEKNİKLERİ VE GÜÇ ANALİZİ

Cihangir ÇÖRTEN

Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Mart 2023

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Asuman SAVAŞCIHABEŞ

ÖZET

Günümüzde Optik kablosuz iletişim teknolojileri (OWC), radyo frekansı (RF) iletişimi için en önemli alternatif iletişim yöntemlerinden biridir. Radyo Frekansı (RF) haberleşmesinin kısıtlı olması nedeniyle özellikle son yıllarda yüksek hızlı kablosuz haberleşme sistemlerine olan talep ve ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Radyo frekansı (RF) haberleşme sistemlerinin; kontrolsüz radyasyon yayını, sınırlı bant genişliği, düzenlenmiş frekans gibi sınırlamaların bulunması ve hareketli (mobil) kullanıcı sayısındaki artışa hitap edememesi nedeniyle radyo frekansı (RF) tabanlı iletişim, son yıllarda ciddi bir spektrum sorunu ile karşı karşıya kalınmasına neden olmaktadır. Bunun yanında Görünür ışık iletişimi (VLC), radyo frekansı (RF) ile karşılaştırıldığında, görünür ışık iletişimi (VLC); iletim ortamı için görünür ışık spektrumunda daha yüksek frekans bantları kullanır. Bant genişliği avantajı nedeniyle görünür ışık spektrumunu kullanan VLC, yüksek elektromanyetik parazitlere karşı güçlü direnç ve yüksek iletim hızı sunduğundan daha avantajlıdır. Bu açıdan optik kablosuz iletişim sistemleri (OWC), yeni nesil kablosuz iletişim sistemleri için umut verici bir çözüm olarak görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Görünür Işık İletişimi (VLC), Optik Kablosuz İletişim (OWC), LOS Kanalı, Alınan Güç, Kanal Modelleme, Işın İzleme.

MODULATION TECHNIQUES AND POWER ANALYSIS IN WIRE-BRANCHED OPTICAL LOS CHANNELS

Cihangir ÇÖRTEN

Nuh Naci Yazgan University, Graduate School of Sciences

Master Thesis, March 2023

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Asuman SAVAŞÇIHABEŞ

ABSTRACT

Today, Optical Wireless Communication technologies (OWC) are one of the most important alternative communication methods for radio frequency (RF) communication. Due to the limited Radio Frequency (RF) communication, the demand and need for high-speed wireless communication systems has been increasing day by day, especially in recent years. Radio frequency (RF) communication systems; Radio frequency (RF)-based communication has caused a serious spectrum problem in recent years due to the presence of limitations such as uncontrolled radiation emission, limited bandwidth, regulated frequency and not being able to address the increase in the number of mobile users. Besides, Visible Light Communication (VLC) compared to Radio Frequency (RF), Visible Light Communication (VLC); It uses higher frequency bands in the visible light spectrum for the transmission medium. Due to its bandwidth advantage, VLC using the visible light spectrum is more advantageous as it offers strong resistance to high electromagnetic interference and high transmission speed. In this respect, optical Wireless Communication Systems (OWC) are seen as a promising solution for next generation wireless communication systems.

Key Words: Visible Light Communication (VLC), Optical Wireless Communication (OWC), LOS Channel, Received Power, Channel Modeling, Ray Tracing

İÇİNDEKİLER

TEK-DALLI OPTİK LOS KANALLARDA MODÜLASYON TEKNİKLERİ VE GÜÇ ANALİZİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK ONAYI	iii
KABUL ONAY SAYFASI	iv
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv

1. BÖLÜM: GÖRÜNÜR IŞIK İLETİŞİMİ (VLC)

1.1. Giriş	1
1.2. Çift Yönlü VLC	10
1.3. Sistem açıklaması.....	15
1.3.1. VLC Sistem Modeli.....	17
1.3.2. OWC- Optik Kablosuz İletişim Temelleri	19
1.3.3. Kanal Modeli	25
1.3.4. Kanal Gecikme Yayılımı (RMS).....	39
1.4. Ev Erişim Ağı	41
1.5. İç Mekan Yerleşimi.....	45

2. BÖLÜM: GÖRÜNÜR IŞIK İLETİŞİMİ (VLC) MODÜLASYON TEKNİKLERİ

2.1. Giriş.....	52
2.2. ON-OFF Anahtarlama (OOK) FEC İle Hata Düzeltmesi	53

2.3. Bit Aç Modülasyonu (BAM)	55
2.4. Darbe Modülasyon şemaları (PAM)	56
2.5. Ayırık Çok Tonlu Modülasyonlu (DMT) PWM	59
2.6. Çok Düzeyli PWM-PPM	63
2.7. NRZ-OOK ile PWM	66
2.8. Çok Girişli ,Çok Çıkışlı (MIMO) VLC	67
2.9. Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklama (OFDM)	72

3. BÖLÜM: GÖRÜNÜR IŞIK İLETİŞİMİ İÇİN KANAL MODELLEME VE KARAKTERİZASYON

3.1. Giriş	74
3.2. Kanal Modelleme Metodolojisi.....	77
3.2.1. İç Ortamın Modellenmesi.....	78
3.2.2. Sıralı Olmayan Işın İzleme.....	81
3.2.3. Kanal Dürtü Yanıtı'nın (CIR) Belirlenmesi	81
3.2.4. Kanal Karakterizasyonu	81
3.3. Mevcut Modellerle Karşılaştırma	83
3.4. Çeşitli İç Mekân Ortamları için VLC Kanal Özellikleri.....	89
3.4.1. Verici ve Alıcı Arasındaki Mesafenin Etkisi.....	90
3.4.1.1. Kanal DC Kazancı.....	91
3.4.1.2. RMS Gecikme Yayılımı	91
3.4.1.3. Tutarlılık Bant Genişliği	92
3.4.2.Çoklu Vericilerin Etkisi, Verici/Alıcının Konumu, Dönüşü Ve Nesnelerin Varlığı	93
3.4.2.1. Çoklu Verici Dağıtımının Etkisi.....	93
3.4.2.2. Alıcının Konumunun/Dönüşünün Etkisi.....	94
3.4.2.3. Çevredeki Nesnelerin Etkisi	95
3.5. Sonuç	97

4. BÖLÜM: SİMİLASYON SONUÇLARI VE PERFORMANS ANALİZİ	
4.1. SNR Analizi	98
5. BÖLÜM:SONUÇLAR VE TARTIŞMA	
5.1. Sonuçlar ve Tartışma.....	105
KAYNAKLAR	107



TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 1.1. Görünür Işık İletişimi İçin Tarihsel Gelişim Zaman Çizelgesi.....	7
Tablo 1.2. VLC, IR ve RF İletişim Teknolojileri ile Kısa Menzilli Kablosuz Teknolojileri ve Standartlarının Karşılaştırılması.....	12
Tablo 1.3. Kısa Menzilli Kablosuz Teknolojiler ve Standartlar	14
Tablo 1.4. Mevcut ve Geleceğin Kablosuz Teknolojiler	21
Tablo 1.5. LED Malzeme ve İlgili Optik Işıma Dalgaboyu Değerleri.....	24
Tablo 1.6. VLC Bağlantısı İçin Sistem Parametreleri.....	34
Tablo 1.7. Ev Erişim Ağı Teknolojileri.....	42
Tablo 1.8. Tek Boyutlu VLC Hücreli Sistem için Bağlantı Bütçesi.....	45
Tablo 2.1. VOOK Kod Kelimesi.....	55
Tablo 2.2. Bir Dizi VLC MIMO Sistemi İçin Simüle Edilmiş Veriler.....	72
Tablo 3.1. Kanal Modelleme İçin Farklı Yaklaşımların Karşılaştırması	83
Tablo 3.2. [252]'de Yer Alan Senaryo Parametreler	85
Tablo 3.3. Tamamen Dağınık Yansımalarda Farklı k Değerleri İçin Ortalama Aşırı Gecikme, RMS Gecikme Yayılımı ve Kanal DC Kazancı.	86
Tablo 3.4. Karışık Yansımalar Durumunda Farklı k Değerleri İçin Ortalama Fazla Gecikme, RMS Gecikme Yayılımı ve Kanal DC Kazancı.	88
Tablo 3.5. Çoğunlukla Speküler Yansımalar Durumunda Farklı k Değerleri İçin Ortalama Fazla Gecikme, RMS Gecikme Yayılımı ve Kanal DC Kazancı	89
Tablo 3.6. Farklı Sayıda Verici İçin kanal Parametreleri	94
Tablo 3.7. Detektörün Farklı Dönüş Açıları İçin Kanal Parametreleri.	95
Tablo 3.8. Boş Oda ve Mobilyalı Oda İçin Kanal Parametreleri.	96

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. LED'leri kullanarak beyaz ışık üretmeye yönelik iki yaklaşım	4
Şekil 1.2. VLC'nin temel özellikleri.....	14
Şekil 1.3. (a) Görünüş Işık İletişim bağlantısı, (b) Osram Ostar beyaz ışık LED'inin LED optik spektrumu (Dalgaboyu (mm) ve Bağlı Yoğunluk grafiği) ve (c) mavi filtreli ve mavi filtrelemesiz modülasyon bant genişliği (Frekans (MHz) ve Bağlı Yoğunluk (dB) grafiği)	16
Şekil 1.4. WPLED güç-akım yanıtı (Sürücü Akımı(mA) ve Modülasyon Bantgenişliği (MHz) grafiği).....	16
Şekil 1.5. Görünür Işık İletişim sistemleri için ışık kaynakları tipi.	17
Şekil 1.6. Elektromanyetik spektrumda görünür ışık dalga boyları ve bunlara karşılık gelen enerjiler gösterilmektedir	24
Şekil 1.7. IM/DD OWC Sistem blok Şeması.....	26
Şekil 1.8. IM/DD OWC temel bant eşdeğer modeli	27
Şekil 1.9. Görüş Hattı (LOS) yayılımı kanal geometrisi.....	29
Şekil 1.10. İç ortam için Görüş Hattı (LOS) kanal kazancı ($k_x=10$; $k_y=10$; $k_z=5$; k metre cinsinden oda boyutudur)... ..	29
Şekil 1.11. Görünür ışık iletişimi (VLC) iç mekân kullanım durumu..	31
Şekil 1.12. IM/DD ile VLC kanalının modellenmesi	35
Şekil 1.13. PSD (sol eksene karşılık gelen düz çizgi), alçı ve plastik duvarın (kesik noktalı çizgi), zeminin (kesik çizgi) ve tavanın (Noktalı çizgi) ölçülen spektral yansımalarıyla (sağ eksene karşılık gelir) karşılaştırılır	37
Şekil 1.14. Alınan P_r gücün yansımalarla dağılımı	39
Şekil 1.15. (a) (2.5, 2.5)' da konumlanmış tek bir verici ve (b) (1.25, 1.25), (1.25, 3.75), (3.75, 1.25), (3.75, 3.75)' da konumlanmış dört verici için RMS gecikme dağılımı.	40
Şekil 1.16. Ev erişim ağı.....	42
Şekil 1.17. Tek boyutlu bir optik kablosuz hücresel sistem: (a) blok şeması ve (b) bir BS/UT modülünün fonksiyonel blok şeması	44

Şekil 1.18. Tek boyutlu bir hücresele VLC sistemi için bağlantı marjına karşı BER	46
Şekil 2.1. OOK yoğunluk modülasyonlu bir Görünür Işık İletişim sisteminin şematik diyagramı	54
Şekil 2.2. VLED karartma kontrolü için BAM sinyalleri için zaman dalga biçimleri.	56
Şekil 2.3. Darbe genişlik modülasyonu (PWM) ve darbe genlik modülasyonunu (PPM) blok şemaları: (a) dijital, (b) analog dalga biçimleri, (c) PWM dalga biçimleri ve (d) PWM frekans spektrumu.....	57
Şekil 2.4. PWM-DMT blok şeması: (a) verici, (b) alıcı ve (c) DMT (OFDM) spektrumu	60
Şekil 2.5. %80 karartma seviyesi ve PWM örnekleme DMT zaman dalga formu ile PWM dalga formu	63
Şekil 2.6. Çok düzeyli PWM-PMM şeması: (a) sistem blok diyagramı ve (b) zamanlama dalga biçimleri	64
Şekil 2.7. PWM-OOK sistemi: (a) blok şeması ve (b) dalga biçimleri.....	65
Şekil 2.8. Ölçülen sinyal dalga biçimleri: (a) Darbe genişlik modülasyonu (PWM) için %70 görev döngüsü ile alınan PWM-OOK, göz diyagramı ve (b) kurtarılan NRZ-OOK veri sinyali	67
Şekil 2.9. MIMO: (a) görüntüleme ve (b) görüntüleneme.....	68
Şekil 2.10. VLC MIMO sistemi ve (b) VLC MIMO modelinin şeması	69
Şekil 2.11. MIMO için verici ve alıcıda simüle edilmiş dalga biçimleri	71
Şekil 3.1. Kanal modelleme ve karakterizasyonundaki adımlar	78
Şekil 3.2. (a) Görünür Işık (VL) bandında ve (b) Kızılötesi (IR) bandında çeşitli malzemelerin spektral yansıması	78
Şekil 3.3. (a) Tamamen dağınık yansımalar. (b) Speküler yansımalar. (c) Karışık yansımalar	79
Şekil 3.4. (a) Cree Xlamp® MC-E Beyaz LED ve (b) OSRAM® SFH 4283 IR 880 nm'nin bağıl spektral güç dağılımı.....	79
Şekil 3.5. (a) Üç boyutlu ortam. (b) Kaynağın emisyon modeli	85
Şekil 3.6. Önerilen yaklaşımın [252] ile karşılaştırılması.....	86

Şekil 3.7. Karışık yansımalar ve tamamen dağınık yansımalar varsayımları altında kanal dürtü yanıtlarının (CIR) karşılaştırılması	87
Şekil 3.8. Çoğunlukla speküler yansımalar ve tamamen dağınık yansımalar varsayımları altında kanal dürtü yanıtlarının (CIR) karşılaştırılması	88
Şekil 3.9. (a) Mesafeye karşı kanal DC kazancı. (b) RMS gecikmesine karşı mesafe. (c) Tutarlılık bant genişliğine karşı mesafe. (d) Tutarlılık bant genişliğine karşı RMS gecikme yayılımı.....	90
Şekil 3.10. Çoklu ışık kaynakları ile konfigürasyon	93
Şekil 3.11. Alıcının çeşitli dönüşleri ile konfigürasyon	95
Şekil 3.12. (a) az mobilya ve (b) çok mobilya ile konfigürasyon	96
Şekil 4.1. SISO Kanalda yüzey uzunluğu ve yüzey genişliği parametrelerine karşın sistem çıkış gücü değişimi.	99
Şekil 4.2. 2x2 MIMO kanal yüzey uzunluğu ve yüzey genişliği parametrelerine karşın güç yoğunluğu.....	100
Şekil 4.3 2x2 MIMO Sistemde LED yüzey görüntüsü ve toplam alınan güç	101
Şekil 4.4. SISO Sistemde LED yüzey görüntüsü ve toplam alınan güç.	101
Şekil 4.5. 2x2 MIMO Sistemde girişimsiz güç analizi	103

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$\hat{H}_{i-1,WIFA}$	i - 1. çerçevenin CFR
$\hat{H}_{i,LS}$	LS yöntemi ile belirlenen i. çerçevenin kanal frekans yanıtı
δ	0 ile 1 arasındaki ağırlıklı faktörü
k_{min}	Modüle edilmiş minimum alt taşıyıcı
k_{max}	Modüle edilmiş maksimum alt taşıyıcı
X_i	İletilen eğitim sembollerin frekans alanı
Y_i	Alınan eğitim sembollerin frekans alanı
H	Kanal vektörü
σ_s	Normalleştirilmiş sinyal gücü varyansı
σ_n	Gürültü sinyal gücü varyansı
s	İletilen sinyal
r	Alınan sinyal
$\overline{\sigma_{n,j}^2}$	j'inci alıcı için ortalama kare gürültü akımı
β_c	Alıcı görüş açısı
β_{ijk}	Alıcıya geliş açısı
A_{pd-rj}	Alıcının toplama alanı
A_{ppm}	PPM sinyal genliği
A_{pwm}	PWM sinyal genliği
B_{sc}	En yüksek alt taşıyıcının frekansı
C_n	$p_{pwm}(t)$ 'nin Fourier bileşenleri
$p_{pwm}(t)$	Periyodik PWM sinyali
s_k	k'inci alt taşıyıcı kanalında iletilen sembol
N_{op}	Kod sözcüğü ağırlıklı bir ikili n-demet vektörü
N_{sc}	Alt taşıyıcı sayısı
$J_k(x)$	k dereceli birinci türden bir Bessel fonksiyonu
ω_c	Referans (taşıyıcı) sinyal frekansı
ω_m	Giriş sinyali
$P_{ref,j}$	Yansıtılan j'den alınan optik güç
$P_{dir,i}$	i'nci doğrudan yoldan alınan optik güç

N	Alıcıya yansıma yollarının sayısı
M	Alıcıya giden doğrudan yolların sayısı
j	Yansıtıcı yüzeyden N segmentinin indeksini temsil eder
c	Işık hızı
ψ_r	Yansıtıcı yüzeyden geliş açısıdır
Φ_r	Yansıtma noktasına olan ışınlım açısı
P_t	Zaman ortalamalı güç
P_{Min}	Zemin seviyesinde alınan minimum optik güç
$p_{pwm}(t)$	Periyodik PWM sinyalıdır
d_{max}	Verici ile alıcı arasındaki maksimum mesafe
Φ_{Max}	Maksimum ışınlım açısı
k	Yansımaların sırası
i	LED'in indeksi
β_{ir}	Alıcıya olan ışınlım açısı
α_{ir}	Yansıtma noktasına olan ışınlım açısı
ρ	Yansıtma faktörü
n_{com}^2	Optik yoğunlaştırıcının kırılma indisi
A_{PD}	PD yüzey alanı
d	LED ile aradaki mesafe
ψ_{con}	FOV
$g(\psi)$	Yoğunlaştırıcı kazancı
$T_s(\psi)$	Filtre iletim katsayısı
ψ	Alıcı yüzeyine normal eksene göre geliş açısı
$\Phi_{1/2}$	LED'in yarım aydınlatmasındaki yarı açısı
m_l	ışık demeti yönlülüğü
I	ışık akısı
E_g	Yarıiletken elemanın içi boş band enerjisi
$I_p(t)$	Alıcıda üretilen fotoakım
h_{ij}	i. verici ile j. alıcı arasındaki kanal durum
k	Boltzmann sabiti
T	Sıcaklık
T	DMT sembolünün süresi
$\Delta\lambda$	Dalga boyu
y	Alıcıdaki sinyal

G_{oc}	Optik alıcının kazancı
$\otimes$	Evrişim operatörü
$h(t)$	Temel bant kanal darbe yanıtı
$n(t)$	Çift yönlü güç spektral yoğunluğu ve beyaz gauss gürültüsü
n	Alıcı gürültüsü
r	Alıcı sayısı
t	Verici sayısı
τ_0	Ortalama gecikme
τ	Süre
R	Tepki fonksiyonu
$x(t)$	Sinyal gücü
N_0	Spektral gürültü yoğunluğu
$H(0)$	Kanalın DC kazancı
R	Fotodiyot duyarlılığı
P_r	Ortalama alınan optik
$P_t(t)$	Anlık optik sinyal
D_{RMS}	Kök ortalama kare gecikme yayılımı
Ω	Uzaysal aç parametresi
V_{dc}	DC voltajı
$\emptyset$	ışık açısı
K_m	Maksimum görünürlük
$V(\lambda)$	Parlaklık
$\Phi_e(\lambda)$	Enerji akısı
P_t	Optik verici gücü
$I(0)$	Merkez ışık şiddeti
$P_i(t)$	Sürekli optik sinyal
P_{rT}	Toplam alınan güç
P_i	i ışınının gücü
τ_i	i ışının yayılma zamanı
δ	Dirac delta işlevi
N_r	Detektörlerden alınan ışınların sayısı
τ_0	Ortalama gecikme
Δf	Alt Taşıyıcı Aralığı
B_c	Tutarlılık bant genişliği

RMS	Gecikme yayılımı
d_{TX-RX}	DC kazancı
μ	Ortalama fazla gecikme
γ	Karartma faktörüdür
d	Veri bitleri
$d(t)$	Giriş veri dizisi
T_c	Darbe
m_b	Parlaklık indeksi
N_{op}	Optik darbe sayısı
$N_{op-maks}$	Toplam karartma seviyesi sayısı
$\Delta\tau$	Tepeden tepeye darbe genişliği modülasyonu
Δt	Zaman çözünürlüğü

Kısaltmalar	Açıklama	Açıklama
AWGN	Additive White Gauss Noise	Ek Beyaz Gauss Gürültüsü
BER	Bit Error Rate	Bit Hata Oranı
BPSK	Binary Phase Shift Keying	İki Fazlı Kaydırmalı Anahtarlama
LWT	Lifting Wavelet Transform	Kaldırma Dalgacık Dönüşümü
CAD	Computer Aided Design	Bilgisayar destekli Tasarım
DMT	Discrete Multi-Tone	Ayrık Çoklu Ton Modülasyon
MIMO	Multiple Input Multiple Output	Çoklu Giriş Çoklu Çıkış
MMSE	Minimum Mean-Squared Error	Minimum Ortalama Kare Hatası
M2M	Machine To Machine	Makineler Arası İletişim
SNR	Signal to Noise Ratio	Sinyal Gürültü Oranı
SINR	Signal to İnterference Plus Noise Ratio	Parazit Ağırlıklı Sinyal Gürültü Oranı
IC	Identity Coding	Kimlik Kodlama
ZF	Zero Forcing	Sıfır Zorlama
DWT	Discrete Wavelet Transform	Ayrık Dalgacık Dönüşümü
LOS	Line-Of-Sight	Görüş Hattı
LCD	Liquid Crystal Display	Likit Kristal Ekran
PLC	Power Line Communications	Güç Hattı İletişimleri
PWM	Pulse Width Modulation	Darbe Genişlik Modülasyonu
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio	Yüksek Tepe-Ortalama Güç Oranı
GPS	Global Positioning System	Küresel Konumlandırma Sistemi
HPF	High Pass filter	Yüksek Geçiş Filtresi
HS	Hermitian Symmetry	Hermitian Simetrisi
NLOS	Non-Line-Of-Sight	Görüş Hattı Dışı
AoD/AoA	Angle of Departure/Angle of Arrival	Kalkış Açısı/Varış Açısı
FFT	Fast Fourier Transform	Hızlı Fourier Dönüşümü
FEC	Fixed Error Counts	Düzeltilen Hata Kodu
RF	Radyo Frequency	Radyo Frekansı
RFID	Radyo Frequency Identification	Radyo Frekansı Tanımlama
RSSI	Received Signal Strength Indacator	Alınan Sinyal Gücü Göstergesi

RSS	Received Signal Strength	Alınan Sinyal Gücü
RSM	Radian Source Model	Radyant Kaynak Modeli
IRC	Infrared Communication	Kızılötesi iletişim
VLC	Visible Light Communication	Görünür Işık İletişimi
OWC	Optical Wireless Communication	Optik Kablosuz İletişim
IoT	Internet Of Things	Nesnelerin İnterneti
IEEE	Wireless Personal Area Networks Working Group	Kablosuz Kişisel Alan Ağları Çalışma Grubu
JEITA	Japan Electronics and Information Technology Industries Association	Japom Elektronik ve Bilgi Teknolojileri Endüstrisi Topluluğu
WLAN	Wireless Local Area Network	Kablosuz Yerel Alan Ağları
Wi-Fi	Wireless Fidelity	Kablosuz İletişim
Li-Fi	Light Fidelity	Işıl İletişimi
5G	Fifth Generation	5. Nesil iletişim
4G	Fourth Generation	4. Nesil İletişim
UV	Ultraviolet	Ultraviyole
UT	User Terminal	Kullanıcı Terminali
VL	Visible Light	Görünür Işık
IR	Infrared	Kızılötesi
RoF	Radio Over Fiber	Fiber Üzerinden Radyo
FSO	Free Space Optics	Boş Alan Optikleri Üzerinden Radyo
SDM	Space Division Multiplexing	Uzay Bölmeli Çoğullama
SSL	Solid State Lighting	Katı Hal Aydınlatması
WDM	Wide Wavelength Division Multiplexing	Geniş Dalga Boyu Bölmeli Çoğullama
LED	Light Emitting Diode	Işık Yayan Diyot
LD	Light Diode	Işıl Diyodu
(IM/DD)	Direct Sensing Intensity Modulation	Doğrudan Algılama Yoğunluk Modülasyonu
BAM	Bit Angle Modulation	Bit Açısı Modülasyonu
PAM	Pulse Modulation Schemes	Darbe Genlik Modülasyonu

QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Dördün Genlik Modülasyonu
DMT	Discrete Multitone Modulation	Ayrık Çok Yönlü Modülasyon
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama
DCO-OFDM	DC Biased Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing	DC-Eğilimli Optik Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama
ACO-OFDM	Asymmetrically Clipped Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Asimetrik Olarak Kırılmış Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama
FWHM	Full Width At Half Maximum	Yarım maksimumda Tam Spektral Bant Genişlik
IMP	Intermodulation Product	Intermodülasyon Ürünü
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform	Ters Hızlı Fourier Dönüşümü
FFT	Fast Fourier Transform	Hızlı Fourier Dönüşümü
CIR	Channel Impulse Response	Kanal Dürtü Yanıtı
CPC	Compound Parabolic Concentrator	Bileşik parabolik yoğunlaştırıcı
RMS	Root Mean Square Delay Spread	Kök Ortalama Kare Gecikme Yayılımı
SF	Scatter Fraction	İstifleyici Fraksiyon
S/P	Serial To Parallel	Seriden Paralele
PD	Positioning Accuracy	Konumlandırma Doğrulama
FOV	Field Of View	Görme Alanı
DC	Direct Current	Doğru Akım
AC	Alternative Current	Alternatif Akım
OOK	ON OF Key	Açma Kapama Anahtarlama
TOA	Time of Arrival	Variş Zamanı
TDOA	Time Difference of Arrival	Variş Zamanı Farkı
AOA	Angle of Arrival	Variş Açısı
POA	Phase of Arrival	Variş Aşaması
PDOA	Phase Difference of Arrival	Variş Faz Farkı

VLLC	Visible Light Communication Consortium	Görünür Işıık İletişimi Konsorsiyumu
WPLED	White Phosporus LED	Beyaz Fosforlu LED
OLED	Organic LED	Organik LED
RGBLED	Red Green Blue LED	Kırmızı Yeşil Mavi LED
RCLED	Resonant Cavity LED	Rezonans Boşluklu LED
CQD	Colloidal Quantum Dots	Koloidal Kuantum Noktaları
ISI	Inter Symbol Interference	Semboller Arası Girişim



1. BÖLÜM: GÖRÜNÜR IŞIK İLETİŞİMİ (VLC)

1.1. Giriş

Optik kablosuz iletişim (OWC) alanı; iç ve dış ortamlarda optik radyasyon ile kablosuz biçimde iletişimi kapsar. Görünür ışık iletişimi (VLC), genellikle optik kaynak (LED veya Lazer) görünür dalga boyu bandında (380 nm–780 nm) yayıldığında ve aynı zamanda aydınlatma/gösterim için kullanıldığında ilkinin ifade etmek için kullanılır. Görünür Işık iletişim teknolojisi ilk olarak 20 yıl önce Japonya'da tanıtıldı. VLC, Wi-Fi'nin aksine ışık doğrultusu yani (Li-Fi) olarak da bilinmektedir. Son birkaç yılda, VLC'de veri iletişimi, iç mekân yerelleştirme ve algılama için büyüyen bir araştırma konusu olmuştur. Ortaya çıkan bu Görünür Işıklı İletişim teknolojisinin arkasındaki ana güç, katı hal aydınlatmasının (SSL) artan popülaritesidir. Günümüzde SSL, mevcut (akkor, CFL vb.) aydınlatma kaynaklarını; akkor ampullere kıyasla estetik açıdan hoş aydınlatma, daha yüksek parlaklık, daha uzun ömür, yüksek enerji verimliliği ve en önemlisi yüksek hızlı anahtarlama yeteneği sunan LED aydınlatma ile değiştirmektedir. LED'lerin sunduğu güvenilirlik seviyesi ve güç verimliliği, günümüzde aydınlatma için kullanılan geleneksel akkor ışık kaynaklarından çok daha üstündür. Aslında, SSL'nin Avrupa ve dünyanın diğer ülkelerinde akkor ampullere getirilen son yasakla birlikte çok daha fazla gündelik hayatta yerini alması beklenmektedir. LED'lerin sunduğu çoklu işlevler arasında (bunlarla sınırlı olmamak üzere); evler, ofisler, uçaklar, trenler, hastaneler, imalathaneler, fabrikalar, su altı araçlar, trafik ışıkları yönetimi ve iç mekân algılama alanlarındaki aydınlatma altyapıları için yüksek hızlı veri iletişimi olarak sıralanabilir.

VLC'deki son araştırmalarda, kısa bir iletim aralığında 10 Gbps'nin üzerinde veri iletimini başarılı bir şekilde sağlanmış ve daha da yüksek veri ve bağlantı hızına ulaşılabileceği öngörülmüştür [1]. Devam eden araştırma ve geliştirme faaliyetlerinde, VLC'de öne çıkan ve gelecekteki zorlukları ele alacağı ve özellikle tamamlayıcı

radio/mikrodalga iletişim sistemleri ve aydınlatma teknolojilerinde yeni olasılıklar açacağı tahmin edilmektedir. Bu bölüm, temel teorik arka planı, cihazları, modülasyon ve karartma tekniklerini ve sistem performans analizini vurgulayarak VLC teknolojisine genel bir bakış sunar. Bununla birlikte MIMO yani çok girişli, çok çıkışlı sistemleri ve hücreli VLC sistemleri de bu bölümde ele alınmaktadır.

Bir iletişim aracı olarak görünür ışık kavramının evveliyatı 1870'lere kadar uzanır. O yıl Alexander Graham Bell yaptığı çalışmalarda; bir kişinin sesiyle titreşen bir ayna kullanarak bir ses sinyalinin iletimini başarıyla sağlamıştır. Fotofon olarak adlandırılan, kaynak olarak güneş ışığını kullanan VLC'nin bu ilk deneysel gösterimi, 1880'de gerçekleşti. Bell ve yardımcısı Tainter, yaklaşık 213 metrelik bir bağlantı boyunca iletimi sağladı. Yapay aydınlatmadaki bir sonraki önemli gelişme, 1907'de Henry Joseph Round tarafından elektrolüminesansın keşfiydi. Bir silikon karbür (SiC) yarı iletkeninden elektrik akımı geçirerek ışık verdiğini gösterdi [2]. 1962 yılına gelindiğinde yarı iletken teknolojisi olgunlaştı ve arkasındaki fizik kapsamlı bir şekilde incelenmeye başlandı. Gelişmiş yarı iletken laboratuvarı GEC'den Nick Holonyak, Jr. ve S. F. Bevacqua; Applied Physics'te galyum arsenit fosfit (GaAsP) kullanarak ilk p-n bağlantılı kırmızı görünür ışık yayıcı veya LED hakkında bir makale yayınladılar [3]. Bu çalışma piyasada bulunan ilk kırmızı LED cihazı oldu. Böylece SSL'lerde yeni dönem başlamış oldu ve Optik Kablosuz İletişimin (OWC) ve daha da önemlisi VLC'nin yeniden ortaya çıkmasına yol açtı. LED'e dayalı ilk VLC, 1999'da Pang tarafından gösterildi [4]. Bunu, uygulamaların, veri hızlarının, iletim aralığının ve hareketliliğin sınırlarını daha önce görülmemiş seviyelere çıkaran, küresel ölçekte büyüyen bir araştırma ve geliştirme hareketi izledi. Bu noktada Japon araştırmacıların mavi LED'lerin geliştirilmesinde öncü olduklarını ve görünür ışık iletişim konsorsiyumunu (VLCC) kurduklarını belirtmekte fayda var [5]. VLCC, ortaya çıkan bu yeni ve yeşil teknolojiyi tanıtmak için endüstriden ve akademiden insanları bir araya getirdi. Kısa adı IEEE yani Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü olan bu birlik; 2011'de Görünür Işıklı Haberleşmenin ticarileşme umutlarını daha da geliştirmek için IEEE 802.15.7 VLC standardını üretti [6,7]. Bu standart günümüzde halen kullanılmakta ve yenilenmektedir.

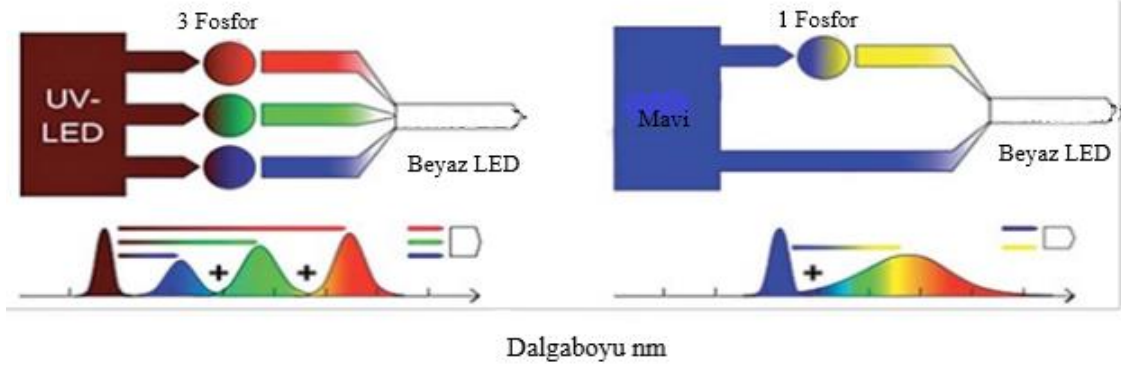
VLC, katı hal elektrolüminesansı yoluyla ışık üretme kavramı olan SSL'nin ortaya çıkışından yararlanan bir teknolojidir. SSL nispeten kısa bir geçmişe sahiptir.

1990'larda, genel aydınlatma amacıyla yüksek parlaklıkta LED'ler piyasaya sürüldü. Galyum nitrür (GaN) yarı iletken malzemelerde yapılan ilerlemelerle 1993 yılına kadar ilk pratik mavi LED'ler yapılmadı [8]. Görünür Işık iletişimi'nde benimsenen iki tip III-nitrür beyaz LED, fosfor dönüştürülmüş LED'ler ve kırmızı (~625 nm)-yeşil (525 nm)-mavi (~470 nm) LED'lerdir (RGB-LED'ler) (Şekil 1.1.) 1996 yılında, dünyanın ilk beyaz LED'i, beyaz fosforla dönüştürülmüş LED'ler (WPLED) yapmak için mavi ışık yayan bir elemanın üzerine sarımsı bir fosfor tabakasının yerleştirilmesiyle üretildi [9,10]. Sadece birkaç yıl içinde, LED'lerin ışık etkinliği 0,1 lm/W'nin altından 230 lm/W'ın üzerine ve 100.000 saate kadar yüksek bir kullanım ömrüyle hızla iyileştirildi [2,3,8]. 1990'ların sonlarına doğru, ilk ticari yüksek güçlü LED'ler, 5 mm gösterge lambası öncüllerinden 20 kat daha fazla güç seviyelerinde çalışan 1 W Luxeon cihazlarında kullanıma sunuldu [11,12]. Bununla birlikte, her iki beyaz LED türü de düşük modülasyon bant genişliğine ve yüksek çalışma voltajına sahipti [13]. ZnSe II-VI yarı iletkenlerine dayalı beyaz LED'ler ilk kez [14]'te rapor edilmiştir; burada beyaz ışık, çoklu kuantum kuyusu aktif bölgesinden gelen mavi emisyon ve n-tipi iletken ZnSe substratından gelen sarımsı emisyon ile birleştirilmiştir. Geleneksel InGaN beyaz LED'lere kıyasla avantajları; (i) fosfora gerek olmaması, (ii) III-nitrür beyaz LED'lere kıyasla 0,5–1V daha düşük çalışma voltajı, (iii) kromatiklik enjekte edilen akımdan neredeyse bağımsızlığı [15] ve (iv) daha yüksek bant genişliği (30 MHz)'dir. RGB-LED'ler, tipik olarak, üç yayıcı ve birleştirici optik içeren tek bir paketten oluşur. Genellikle değişken renk emisyonunun gerekli olduğu bir uygulamada kullanılır. Bu cihazlar, dalga boyu bölmeli çoğullama (WDM) olanağı sundukları için VLC teknolojisi için caziptir [1,16].

Daha sonraki yıllarda artık SSL için organik LED'in (OLED) tanıtımını görüyoruz. OLED'ler; normal LED'lere kıyasla nispeten düşük parlaklık etkinliğine (~100 lm/W) ve kısa bir ömre sahiptir [17,18]. Bu durum şu aşamada çeşitli renkli ekranlar ve genel aydınlatma için uygulamaları sınırlar. Yine de OLED'lerin, iletişim ve genel alan aydınlatması için alternatif bir çözüm olarak kullanılabileceği öngörülmektedir.

Aydınlatma için kullanılan geleneksel akkor (ışık etkinliği 52 lümen/W ile sınırlı) ve flüoresan (ışık etkinliği 90 lümen/W ile sınırlı) lambalarla karşılaştırıldığında

[19–21], beyaz LED'lerin tepe verimliliği 260 lümen/W'dir (bu, teorik olarak tahmin edilen 425 lm/W kadar ulaşan ışık etkinliğinden çok daha düşüktür) [19–21].



Şekil 1.1. LED'leri kullanarak beyaz ışık üretmeye yönelik iki yaklaşım [267].

Önümüzdeki yıllarda, aydınlatma LED'lerinin sunduğu performans düzeyini göz önüne alırsak, kullanımda giderek artan bir eğriye tanık olacağımız aşıkardır. Çevre açısından bakıldığında, SSL, önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlaması ve doğa dostu bir teknoloji olması bu açıdan önemlidir. Aşağıda SSL'nin avantajlarından bazıları şu şekilde sıralanabilir [19–21]:

- daha uzun ömürlü,
- neme karşı daha yüksek tolerans,
- cıva içermez,
- daha küçük, kompakt boyut ve şekil,
- çok daha yüksek bir enerji dönüştürme verimliliği (200 lm/W'den daha yüksek ışık etkinliğine sahip beyaz LED'ler artık mevcuttur),
- diğer tüm aydınlatma kaynaklarına kıyasla minimum ısı üretme özellikleri,
- daha düşük güç tüketimi,
- farklı renkler,
- ve en önemlisi, veri iletişimleri için hızlı anahtarlama.

Aydınlatma gereksinimlerinin karşılanmasında, yüksek ışık verimliliğine sahip tek bir LED, yalnızca sınırlı bir alan üzerinde sınırlı ışık akısı sağlayabilir. Bu nedenle, çok daha geniş bir ortamı aydınlatmak için mekansal olarak dağıtılmış LED kümelerine ihtiyaç duyulacaktır [17,22]. Lokalize aydınlatma sağlama kabiliyetini etkinleştirmek için, ışığı uygun şekilde sınırlamak/dağıtmak için difüzörler, reflektörler veya kolimatörler şeklindeki ön uç optikler kullanılmalıdır. Bu yaklaşım, evlerde ve işyerlerinde renk, konum aydınlatması ve ışık akısı dağılımı açısından verimli aydınlatma efektleri elde etmede iyi bir seçenek sunar [23,24].

SSL için kullanılan WPLED'leri hızla açıp kapatarak ve RGB tabanlı beyaz LED'leri kullanarak yüzlerce Mbps veri hızlarına ulaşmak mümkün hale gelmiştir [26]. Rezonans boşluklu LED'ler (RCLED'ler) daha da yüksek veri hızları sunar. Rezonant boşluk tabanlı LED'ler, Bragg reflektörlerini kullanır. Böylece ayna görevi gören reflektör ışığın daha iyi yayılmasını sağlar. Buna ek olarak, RCLED'ler; geleneksel LED'lere kıyasla daha yüksek spektral saflık sunarak iletişim yeteneklerini daha da geliştirir. İlk yüksek hızlı WPLED tabanlı VLC sistemi, bant genişliğini ve dolayısıyla iletim veri hızını artırmak için vericinin frekans yanıtıyla eşleşen rezonans devrelerinin tanıtılmasına dayanıyordu [26]. Rezonant tahrik devresi; sistem frekans yanıtının farklı bölgelerini eşitlemek için her biri farklı rezonans frekanslarına sahip üç alt sürücünden oluşur. WPLED'in ham bant genişliği düşük (birkaç MHz) olduğundan, mavi filtre kullanılarak bant genişliği 14–20 MHz'e kadar genişletilebilir. Tek bir WPLED (yalnızca 2,5 MHz'lik bir ham bant genişliği) ve açma-kapama anahtarlama (OOK) kullanarak, 40 MHz'lik eşitlenmiş bir bant genişliği elde edilebilir, böylece 10^{-6} 'lık bir BER'de 80 Mbps'lik bir iletim hızı elde edilir [27]. WPLED'lerin toplam frekans tepkisi ile rezonansa giren bir sürücü devresi ile WPLED'lerin $N \times N$ matrisini benimseyerek, iletim aralığı uzatılabilir. Daha sonra, vericideki rezonans devreleri kaldırılarak ve alıcıda bir analog yüksek geçiş filtresi (HPF) kullanılarak, karmaşıklığı çok azaltılmış bir 100 Mbps WPLED VLC bağlantısı (10^{-9} 'luk BER) elde edildiği yayınlamıştır [28]. Bununla birlikte, eşitleme için kullanılan HPF'nin önemli bir dezavantajı vardır. Bu dezavantaj ise bir temel bant modülasyon formatının düşük frekanslı bileşenleri, kuplaj kapasitörleri ve HPF'ler tarafından zayıflatıldığında ortaya çıkan taban çizgisi gezinme (BLW) fenomeninin ortaya çıkmasıdır. BLW, literatürde yapılan araştırmalar sonucunda Gauss dağılmış gürültü varyansı ile rastgele bir gürültü olarak ele alır [29–31].

VLC'nin birincil işlevlerinden biri, aydınlatma seviyesinden bağımsız olarak (tamamen karanlıkta bile) tam bağlantı sağlaması gereken veri iletişimidir. Aydınlatma seviyesi, doğru akım (DC) yönlendirmesi ile kolayca ayarlanabilir. Bu, cihazın lineer bölgenin dışında yanlış bir şekilde bastırılması durumunda istenmeyen sinyal bozulmasına yol açabilen LED elektro-optik yanıtı (yani güç-akım karakteristiği) dikkate alındığında daha fazla zorluk teşkil eder. İç ortamlarda hem aydınlatma hem de veri iletişimi sağlamak için LED yerine fosfor difüzörlü bir mavi lazer diyodunun da kullanılabileceğini unutulmamalıdır. Tablo 1.1'de Görünür Işık İletişimi için tarihsel gelişim zaman çizelgesini vermektedir.

VLC'deki tek ve en önemli faktör, LED'lerin yayılan optik güç/yoğunluklarına ilişkin verileri etkilemeyi mümkün kılan hızlı anahtarlama özellikleridir. Verilerle optik güç/yoğunluk modüle etme işlemi, örneğin Radyo frekansı iletişimindeki modülasyona nispeten daha az karmaşıklık ve maliyete sahiptir.

Yüksek hızlı bir VLC sistemi tasarlarken aşağıda sıralandığı gibi problemler ile karşılaşılabilir;

- bir LED'in düşük modülasyonlu bant genişliği
- LED'in doğrusal olmayan güç-akım özellikleri
- Semboller arası girişim (ISI)
- Kısmi ve veri iletişimi
- Engelleme ve gölgeleme
- Mevcut ağlarla uyumluluk
- Yukarı bağlantı
- Kapsam ve bağlantı aralığı
- Yönlülük
- Ağ ve diğer daha yüksek tasarım katman gereksinimleri

Tablo 1.1. Görünür Işık İletişimi İçin Tarihsel Gelişim Zaman Çizelgesi [267]

Görünür Işık İletişimi İçin Tarihsel Gelişim Zaman Çizelgesi	
1999	Ses ve diğer bilgileri yayınlamak için LED'lerin trafik ışıklarında kullanılması [4]
2004	Mobil bilgi işlem cihazlarından, yüksek hızlı veri iletimi sağlanması husunda LED ışık sistemlerinin kullanılabileceğinin ortaya çıkması, Japonya
2005	Bir LED ve floresan ışığı kullanarak yaklaşık 10 kb/sn ve birkaç Mb/sn hızında bir veriyi cep telefonlarına iletmek için VLC iletişiminin arazi denemeleri, Japonya
2007	Bir LED arkadan aydınlatmalı likit kristal ekran (LCD) televizyonun ışık yoluyla bir PDA'ya bilgi aktarırken gösterimi, Fuji Television, Japonya. Visible Light Communications Consortium (VLCC) Japonya'da 2007 yılında iki standart önermesi: Görünür Işık Kimlik Sistemi Standardı Görünür Işık İletişim Sistemi Standardı Japan Elektronik ve Bilgi Teknoloji Endüstrileri Derneği yani kısa adı ile JEITA; bu standartları JEITA CP-1221 ve JEITA CP-1222 olarak kabul etmiştir.
2008	IR ve VLC teknolojilerini kullanan OWC'nin kullanımı da dahil olmak üzere ev ağları için küresel standartların geliştirilmesi, Avrupa Birliği tarafından finanse edilen OMEGA Doğrudan görüş hattı (LOS) kullanılarak birkaç metrelik daha uzun mesafelerde >100 Mbps veri hızına sahip beş LED kullanılarak VLC'nin gösterilmesi. Avrupa Birliği tarafından finanse edilen OMEGA, LOS dışındaki duvarlardan yayılan ışık kullanılarak daha düşük bulaşma seviyeleri meydana gelebilirdi.
2008	Japonya'da VLCC ve ABD'de spesifikasyon standartları üzerinde birlikte çalışan Uluslararası Kızılötesi Veri Derneği (IrDA) [32]
2009	VLCC, görünür ışık dalga boylarının kullanımına izin vermek için temel IrDA özelliklerini ve tanımlanmış spektrumu birleştiren ve genişleten ilk Spesifikasyon Standardını yayınladı.

Tablo 1.1. Görünür Işık İletişimi İçin Tarihsel Gelişim Zaman Çizelgesi (devamı)

2010	Akıllı telefonlar, kişisel bilgisayarlar, yüksek tanımlı televizyonlar, bilgi kioskuları ve kişisel dijital asistanlar gibi çok çeşitli elektronik ürünler arasındaki iletişim için VLC teknolojisinin geliştirilmesi, California Üniversitesi, ABD
2010	GPS (İç mekân küresel konumlandırma sistemi) ile VLC'nin gösterimi, Japonya
2010	Siemens ve Heinrich Hertz Enstitüsü, Almanya.
2010	IEEE Kablosuz Kişisel Alan Ağları çalışma grubu 802.15.7 Görev Grubu 7 tarafından VLC teknolojileri için bir standart geliştirilmesi
2010	St. Cloud, Minnesota, VLC'yi ticari olarak kuran ilk şehir oldu [33], ABD
2011	OFDM tabanlı VLC'nin 124 Mbps gerçek zamanlı gösterimi, piyasada hazır fosforlu beyaz LED kullanılarak, Edinburgh Üniversitesi, BK
2012	RGB LED'lere dayalı 3,4 Gbps görünür optik kablosuz iletim [34]
2013	WPLED VLC sistemi, OOK ve yapay sinir ağı ekolayzır kullanan 170 Mbps, OCRG, Northumbria Üniversitesi, Birleşik Krallık [35]
2014	• Tek bir μLED ve uyarlanabilir veri yükleme tekniği kullanılarak 3 Gbps'ye ulaşıldı [36] • Hibrit zaman-frekans uyarlamalı eşitleme algoritmasına dayalı kırmızı, yeşil ve mavi (RGB) LED kullanımı 4,22 Gbps [37] • $\geq 1,5$ m iletim aralığında 5,6 Gb/sn aşağı bağlantı ve 1,5 Gb/sn yukarı bağlantı [38]
2015	• Bir görüntüleme alıcısı ve gecikme uyarlama tekniği ile bir lazer diyodu kullanan 5 Gbps mobil iç mekân VLC sistemi [39] • Yüksek dereceli CAP modülasyonu ve hibrit post-ekolayzır ile 8 Gb/sn RGBY LED tabanlı WDM VLC sistemi [40]
2013– 2017	• 5,4 m menzile sahip 200 Mbps gerçek zamanlı OOK mikro LED [41]. • 750 Mbps OOK gerçek zamanlı monokromatik LED tabanlı VLC, 1,7 m üzerinde basamaklı bir post-ekolayzır [42] • 1 m menzilde 1 Gbps ultra paralel görünür ışık iletişimi, Birleşik Krallık Mühendislik ve Fiziksel Araştırma Konseyi tarafından finanse edildi [43] • 3 m'den fazla menzile sahip 1,3 Gbps gerçek zamanlı OOK VLC [44]

	• 0,5 m menzile sahip 1,7 Gbps OOK gerçek zamanlı mikro LED VLC [45] • 2,4 Gbps gerçek zamanlı OOK mikro-LED [46] • Mikro LED kullanan 5 Gbps tek kanallı VLC [45] • 7 Gb/sn MIMO VLC sistemi [47] • WDM kullanarak 10 Gb/sn [1]
--	--

Yüksek hızlı bir VLC sistemi tasarlarken yukarıda sıralanan sorunları ortadan kaldıran bir dizi çözüm vardır:

- Mavi optik filtrelerin kullanımı [45]
- LED'in çip yapısının optimizasyonu [27]
- Eşitleme öncesi ve sonrası ve uyarlamalı eşitleme ve frekans alanı ekolayzırları (FDE) [27,48,49,37,50–54]
- Çok seviyeli ve uzamsal modülasyon [55,56]
- Polarizasyon modülasyonu
- Çok taşıyıcılı iletim şeması-Ortogonal frekans bölmeli çoğullama (OFDM) [57–59]
- Paralel iletim-Renk gruplu çoklu giriş, çoklu çıkış (MIMO) şeklinde [34,47,60,61]
- Doğrusal olmayan telafi [62–64]
- WDM [34,65–68]
- Yüksek hızlı LED—Mikro LED'ler. Büyük sürücü kapasiteli kompakt boyutlu mikro-LED'ler [45,69] ve nanotel LED'ler [70], veri bant genişliğini artırmak için alternatif bir adaydır.
- Yeni renk dönüştürücü: koloidal kuantum noktaları (CQD'ler) [71,72] ve organik konjuge polimerler [73]. [73]'te, 1.68 Gbps VLC bağlantısını uygulamak için sarı bir flüoresan kopolimer ile birleştirilmiş bir mikro LED kullanıldı.
- Geniş görüş alan alıcısı [74,75].
- Görünür lazer diyotları (LD'ler)—LED'lerle, modülasyon ve aydınlatma performanslarını pratik olarak sınırlayan yüksek akım enjeksiyon seviyelerinde verimlilik düşer [76,77]. Bu nedenle, bu sorunu çözmek için, LED'lere kıyasla daha geniş modülasyon bant genişliği ve daha yüksek pompalama verimliliği gibi avantajlar sunan VLC sistemlerinde görünür LD'lerin kullanımı araştırılmaktadır. [78]'de, 20 km tek modlu fiber ve 15 m boş alan üzerinden iletim için kırmızı bir LD kullanan çift yönlü 2.5 Gbps 16-QAM OFDM VLC bağlantısına dayalı kırmızı bir LD gösterilmiştir.

[79]'da 4-QAM OFDM verileri ile yoğunluk modülasyonlu lazer işaretçi tabanlı bir VLC rapor edilmiştir. [80]'de, mavi LED'ler ve LD'ler arasındaki ekonomi ve giriş gücü yoğunluğuna bağlı güç dönüştürme verimlilikleri rapor edilmiştir. [81]'de dört renkli LD'ler ve bir difüzör kullanılarak beyaz bir aydınlatıcı rapor edilmiştir. [82]'de, 2.5 Gbps'de doğrudan modüle edilmiş mavi LD tabanlı bir VLC sistemi gösterilirken, [83]'te 5 m iletim aralığında 9 Gbps'de 450 nm GaN LD tabanlı QAM-OFDM VLC rapor edilmiştir. Eşzamanlı aydınlatma için ticari RGB LD'lerin kullanılması ve bireysel LD'nin 4 Gbps'nin üzerindeki bir veri hızında kullanılmasıyla veri iletimi [84]'te bildirilmiştir. LD tabanlı VLC'nin potansiyeli [85]'te mavi lazer diyodu ve uzak fosfor tekniği kullanılarak üretilen beyaz ışık kullanılarak 10 Gbps'lik bir veri hızıyla gösterilmiştir.

Bu şemaların bazılarında karmaşık hesaplama ve donanım gereklidir; bu ise maliyeti artırır. Buna ek olarak, çoğu VLC sisteminde, yüksek dereceli modülasyon şemaları bir laboratuvar ortamında çevrim dışı olarak işlenir. Gerçek pratik sistemler için, yüksek hızlı uzun menzilli gerçek zamanlı VLC bağlantılarının düşük maliyetli ve daha az karmaşık olması beklenir.

1.2. Çift Yönlü VLC

İç mekân çift yönlü VLC bağlantısında, bir LOS iletimi; yüksek kaliteli ve yüksek hızlı hizmet sunacaktır. Bununla birlikte, LOS yolları, insanların, nesnelerin veya insan yapımı cisimlerin hareketi nedeniyle genellikle engellenir. Bu durum optik gölgeleme olarak bilinen bir etkiye neden olur. LOS (yani, NLOS konfigürasyonları) yokluğunda, VLC sistemlerinin performansı (yani, veri hızı, BER, vb.) önemli ölçüde düşer. Özellikle yukarı bağlantı iletimi için, bu bozulma, yukarı bağlantı cihazlarının tasarım kısıtlamaları ve sınırlı optik güç seviyeleri nedeniyle şiddetli hale gelir. Engelleme ve gölgeleme altında performans düşüşünü telafi etmek için önerilen birkaç teknik vardır. Bu teknikler şunlardır: (i) kapsama alanını artırmak ve her zaman bağlantı kullanılabilirliğini sağlamak için bir optik çift yönlü işaretin (yani, ışık kaynağı), optik Rx'ler ve renk filtresinden oluşan bir optik rejeneratör kullanılması; (ii) hareketliliği sağlamak için seçimleri birleştiren açı çeşitliliği alıcıları [52]; ve (iii) dağıtılmış aydınlatma kaynaklarıdır.

Şu anda, VLC sistemleri hakkında rapor edilen çalışmaların çoğu, modülasyon teknikleri, kapasite ve kapsam açısından uydu-yer hattı iletişimlerini geliştirmeye yöneliktir. Bununla birlikte, yer-uydu hattı iletişimleri için az sayıda ileri görüşlü yaklaşımlar rapor edilmiştir. Genellikle, çift yönlü VLC iletişimindeki yukarı bağlantı, RF (Wi-Fi) kablosuz, optik kablosuz (yani görünür veya IR) veya hem RF hem de optik kablosuzun bir kombinasyonuna dayalı ayrı bir özel kanal gerektirir. Ancak RF teknolojisi kullanıldığında kanal kapasitesi (yani veri hızı) optik kanaldan daha düşük olacaktır. Geniş ışın profiline sahip LED tabanlı yer-uydu bağlantısı, bağlantı bütçesinden ve kanal bant genişliğinden taviz verilmesini gerektirir. Öte yandan, yer-uydu bağı için ışık kaynağı olarak bir lazer diyodu kullanmak, ışın yönlendirmeyi gerektirecek, dolayısıyla gecikme süresine ve karmaşık alıcı donanımına yol açacaktır.

Aşağıda VLC'nin potansiyelini gösteren bir dizi ilginç nokta sıralanabilir:

- VLC’de yer alan LED’ler; arabalarda, otobüslerde, uçaklarda, trenlerde, trafik ışıklarında vb. kullanılmaktadır. Beyaz LED’ler yavaş ama emin adımlarla evlerde, ofislerde ve hatta sokak lambalarında verimsiz ampullerin yerini almaktadır. Bu değişim rüzgârı, yüksek parlaklıkta SSL cihazlarının düşük maliyetli hale gelmesiyle devam edecektir.
- Çoklu dizi/eleman da dahil olmak üzere düşük maliyetli verici ve alıcı cihazların mevcudiyeti.
- SSL ve aslında VLC; ofislerde, evlerde vb. mevcut (yerel) elektrik hattı ve aydınlatma altyapılarından yararlanabilir. Böylece, hibrit güç hattı iletişimleri (PLC) ve VLC'yi benimseyerek son sayaç erişim ağı konsepti gerçeğe dönüşecektir.
- VLC; mevcut RF tabanlı kablosuz iletişim sistemlerine asla müdahale etmez ve bilinen herhangi bir sağlık sorunu oluşturmaz. Bu nedenle hastaneler, uçak kabinleri, petrokimya endüstrileri, nükleer enerji santralleri, madenler vb. gibi kendinden güvenli ortamlar için idealdir.
- VLC'ye özgü güvenlik; bankacılık, perakende satış, üretim, sağlık hizmetleri, askeriye vb. sektörlerde oldukça istenen bir özelliktir.
- Enerji tasarruflu—VLC, enerji tasarruflu optik kaynaklara dayalıdır, özellikle LED ve ışık kapatıldığında VLC kapatılır.

VLC'nin temel özellikleri Şekil 1.2'te ve Tablo 1.2'de gösterilmektedir [53].

Tablo1.3, çoğunlukla IEEE 802.11 a/b/g Wi-Fi teknolojisi tarafından desteklenen köklü ve olgunlaşmış RF teknolojilerinin hâkim olduğu mevcut ve gelecekteki kısa menzilli kablosuz teknolojileri göstermektedir. 802.11 a, sıkışık 2,5 GHz bandında çalışan 802.11 b/g'ye kıyasla daha düşük etkin menzile sahip lisanssız 5 GHz bandını kullanır. Protokolün yalnızca 1,5–54 Mbps veri hızlarına izin verdiği unutulmamalıdır. Ancak b/g, küçük monitörler, kablosuz klavyeler, Bluetooth ve hatta mikrodalga fırınlar gibi aynı 2,5 GHz bandında çalışan diğer cihazlardan kaynaklanan RF girişiminden zarar görecektir. Öte yandan b/g, b ve c için 11 Mbps ve g için 54 Mbps ile çok daha yüksek bir verim sunar [86]. RF iletişimiyle karşılaştırıldığında, yakın kızılötesi ve görünür spektrum kullanan optik spektrum (350–950 nm dalga boyu bandı), [87]'de bildirilen 30 Gbps veri hızıyla mevcut bant genişliğinde önemli bir artış sunar.

Tablo 1.2. VLC, IR ve RF İletişim Teknolojileri ile Kısa Menzilli Kablosuz Teknolojileri ve Standartlarının Karşılaştırılması [267]

VLC, IR ve RF İletişim Teknolojileri ile Kısa Menzilli Kablosuz Teknolojileri ve Standartlarının Karşılaştırılması			
Özellik	VLC	IR	RF (Wi-Fi)
Çalışma frekansı	Çok yüksek (> THz)	Çok yüksek (> THz)	2,4 GHz ve WiFi için 5–5,9 GHz
Bant Genişliği	Sınırsız,400–700 nm	Sınırsız,800–1600 nm	Düzenlenmiş ve sınırlı
Veri hızı	Orta ila yüksek (Mbps to >10 Gbps)	Yüksek (>10 Gbps)	Orta (Wi-Fi için 150 Mbps)
Veri yoğunluğu	Yüksek	Yüksek	Düşük
Elektromanyetik girişim ve Tehlike	Hayır	Hayır	Evet
Görüş hattı (LOS)	Evet	Evet	Hayır
Mesafe	Kısa	Kısadan uzuna (dış mekân)	Kısadan uzuna (dış mekân)

Tablo1.2. VLC, IR ve RF İletişim Teknolojileri ile Kısa Menzilli Kablosuz Teknolojileri ve Standartlarının Karşılaştırılması (devamı)

Cihaz-Cihaz Bağlantısı	Yüksek	Yüksek	
Güvenlik	Mükemmel—optik radyasyon çok iyi sınırlandırılmıştır ve duvarlardan geçmez.	Mükemmel—optik radyasyon çok iyi sınırlandırılmıştır ve duvarlardan geçmez.	Zayıf
Yol kaybı	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Çok yollu sönümleme	Hayır (iç ortam hem LOS hem de LOS olmayan yollarla oldukça statiktir)	Hayır (iç ortam hem LOS hem de LOS olmayan yollarla oldukça statiktir)	Evet
Bağlantı marjı	Zayıf (tutarsız algılama)	Zayıf (tutarsız algılama)	Mükemmel (tutarlı algılama)
Işın deseni	Mercekler ve kırınım elemanları ile yüksek derecede kontrol	Mercekler ve kırınım elemanları ile yüksek derecede kontrol	Anten boyutunu sınırlama zorluğu
Engel Girişimi	Orta	Orta	Düşük
Standartlar	Çalışmalar devam Ediyor (IEEE 802.15.7 Görev Grubu)	İç ortam için iyi geliştirildi (IrDa). Dış ortam için çalışmalar devam ediyor.	(WiFi için IEEE 802.11)
Hizmetler	Aydınlatma, İletişim, iç mekân yerleştirme, algılama	İletişim, algılama	İletişim, dış mekân yerleşme
Gürültü kaynakları	Güneş ışığı + diğer ortam ışıkları	Güneş ışığı + diğer ortam ışıkları	Tüm elektrikli/elektronik cihazlar
Güç tüketimi	Nispeten düşük	Nispeten düşük	Orta
Mobilite	Sınırlı (iç mekân)	Sınırlı (iç mekân)	İyi
Kapsam	Dar ve geniş	Dar ve geniş	Çoğunlukla geniş

Tablo 1.3. Kısa Menzilli Kablosuz Teknolojiler ve Standartlar [267]

Teknoloji	Hız	Veri yoğunluğu
	Kablosuz—Şu Anda	
Kablosuz (IEEE 802.11N)	150 Mb/sn	*
Bluetooth	3 Mb/sn	*
IrDa	4 Mbps	***
	Kablosuz—Gelecek	
Wi-Gig (IEEE 802.11ad)	2 Gbps @ 60 GHz; bir oda içinde 10 m	**
Beyaz Wi-Fi (IEEE 802.11af ve IEEE 802.11ah)	24 Mbps @54 ve 790, 900 MHz	* (geniş bir alan, yani birkaç km)
Giga-IR	1 Gb/sn	***
VLC (IEEE 802.15.7)	>10 Gb/sn; bir odanın içinde birkaç metre	****



Şekil 1.2. VLC'nin temel özellikleri [267].

IEEE 802.15.7r1 standardı 2011 yılında yayınlanmıştır. Şu anda VLC'nin IEEE802.11 standartlar grubuna dahil edilmesi için çalışmalar devam etmektedir.

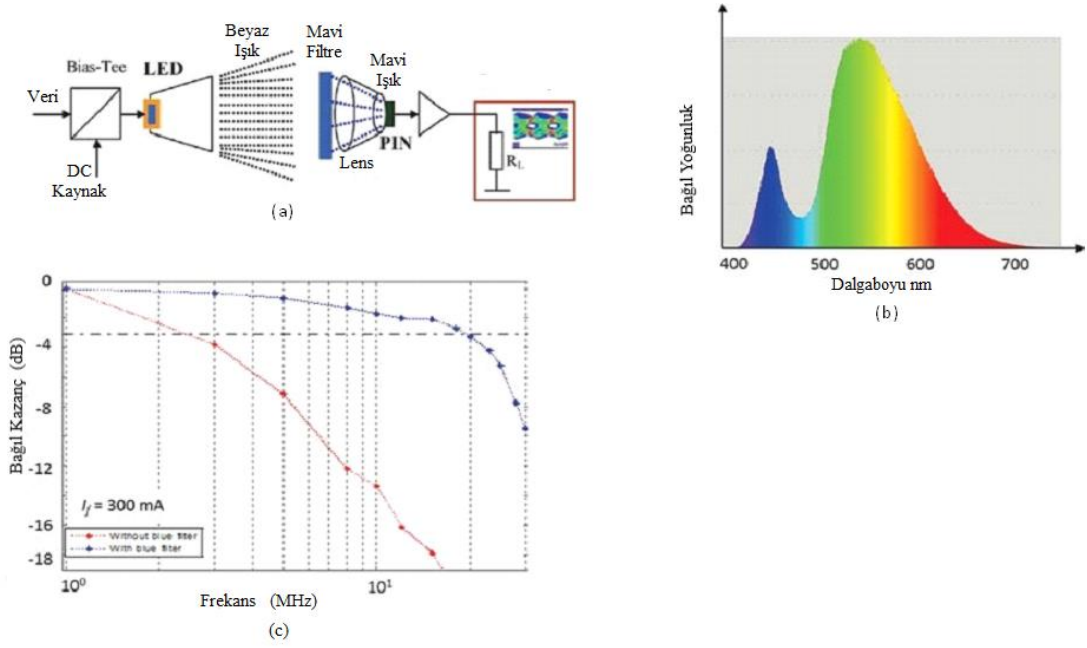
1.3. Sistem Açıklaması

Bir VLC'nin ışık kısma ile uyumlu olması beklenir. Önümüze çıkan sorunlardan bir tanesi olan karartma sorununu çözmeyi amaçlayan araştırmaların çoğu, optik kaynak tahrik akımını modüle etmeye odaklanmıştır. Ortalama optik güç çıkışını kontrol etmenin standart yoluda, (PWM) darbe genişlik modülasyonudur. Darbe genişlik modülasyonu (PWM); gerekli optik güç seviyesine kolayca ulaşılabilmesi için görev döngüsünü kontrol eder. Ancak darbe genişlik modülasyonu (PWM) sinyali herhangi bir bilgi taşımaz. Bu nedenle bilgi iletimini çeşitli aydınlatma seviyelerinde sürdürmek için PWM sinyaline OOK, PPM ve ayrık çoklu ton DMT gibi modülasyon şemaları eklenmiştir [88–91].

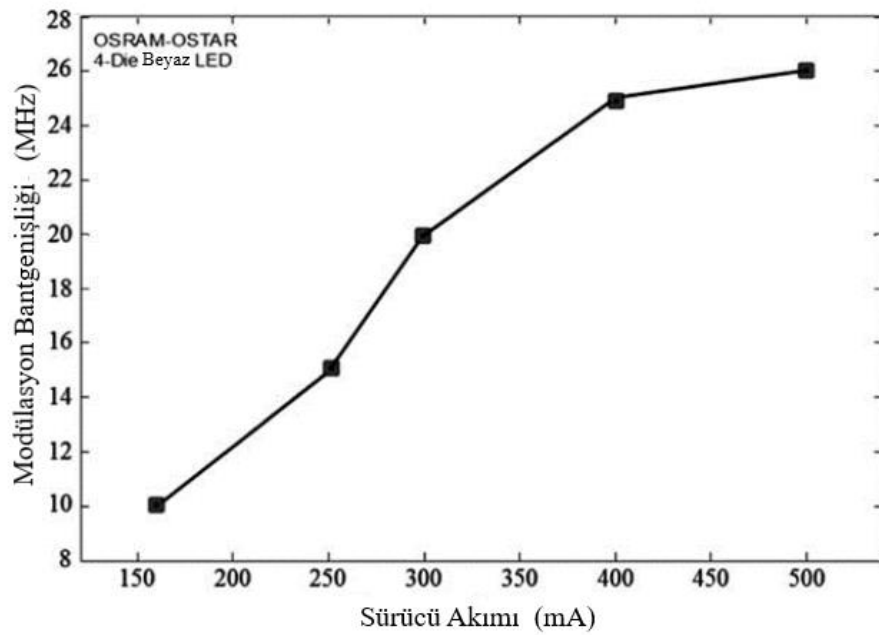
Akkor ve gazlı lambalarda hassas kısma işlemi zor görünmektedir. Oysa LED'lerde, karartma seviyesini doğru bir şekilde kontrol etmek ve düşük karartma seviyesinde bile iletişim sağlamak oldukça uygundur. Bunun nedeni, açma-kapama anahtarlama işlemine LED'lerin çok kısa sürede yanıt vermesi (birkaç on nanosaniye) önemli bir avantajdır. LED'lerin insan gözünü rahatsız etmemesi için sürücü akımını nispeten yüksek bir frekansta modüle edilmelidir. LED'den yayılan ışık, tekrarlayan bir yüksek frekans ve düşük ortalama güç darbe akışı biçimindedir.

Bir LED tarafından yayılan ortalama ışık akısı, kısma sinyalinin göreceli genişliği ile doğrusal olarak orantılıdır. Uygulamaya ve güvenlik gerekliliklerine bağlı olarak verici, LD veya LED olabilir. Uygulama, VLC tabanlı bir sistemde olduğu gibi, aydınlatma, veri iletişimi, iç mekân yerleştirme ve algılamanın çoklu önerisi içinse, LD yerine LED tercih edilebilir.

Bu aşamada ışık kaynaklarından bahsedecek olursak, WPLED'li tipik bir VLC sistemi Şekil 1.3.(a)'da gösterilmektedir. WPLED'ler, daha düşük maliyetleri ve karmaşıklıkları nedeniyle yaygın olarak piyasada kullanılanlardır. Bununla birlikte, fosforun yavaş tepkisi, WPLED'lerin modülasyon bant genişliğini birkaç MHz ile sınırlar [92].



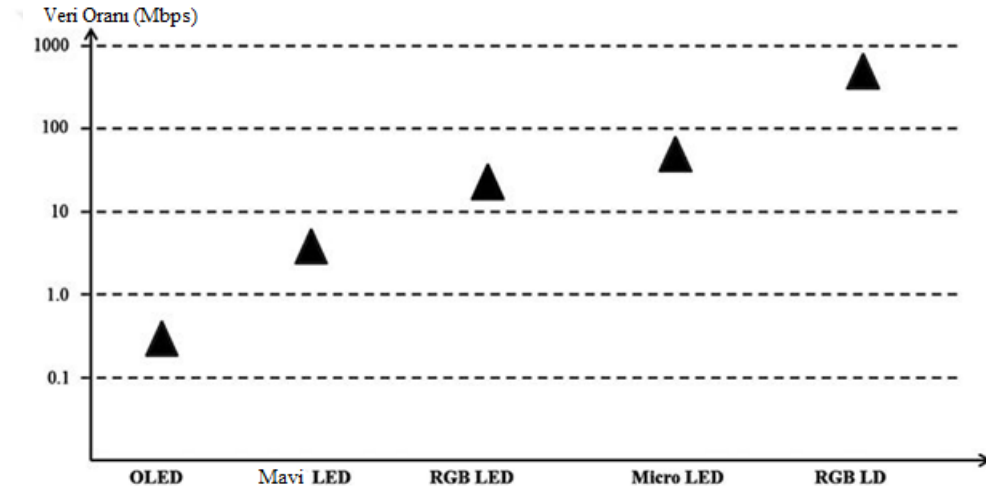
Şekil 1.3. (a) Görünüş Işık İletişim bağlantısı, (b) Osram Ostar beyaz ışık LED'inin LED optik spektrumu (Dalgaboyu (nm) ve Bağıl Yoğunluk grafiği) ve (c) mavi filtreli ve mavi filtrelemesiz modülasyon bant genişliği (Frekans (MHz) ve Bağıl Yoğunluk (dB) grafiği) [267].



Şekil 1.4. WPLED güç-akım yanıtı (Sürücü Akımı(mA) ve Modülasyon Bantgenişiği (MHz) grafiği) [267].

Bir optik filtre kullanılarak; alıcıda alınan optik ışıktan, mavi ışık çıkarılabilir. Şekil 1.3(b) ve (c)'de, Osram Ostar WPLED'in ölçülen modülasyon bant genişliğini ve yayılan beyaz ışığın optik spektrumunu göstermektedir. Bahsekonu LED için, 3 dB kesme frekansı, 300 mA sürücü akımında ~2,5 MHz'dir, yalnızca mavi yanıtı için ~20 MHz'dir (Şekil 1.3(c)). WPLED'in küçük sinyal modülasyon bant genişliği, Şekil 1.4'te gösterildiği gibi LED sürücü akımına bağlıdır [93].

Şekil 1.5'te ulaşılabilir veri hızlarına sahip Görünür Işıklı İletişim sistemlerinde kullanılacak ışık kaynaklarının türü gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Görünür Işıklı İletişim sistemleri için ışık kaynakları tipi [267].

1.3.1 VLC Sistem Modeli

Son yıllarda, kablosuz internet kullanıcılarının; yüksek çözünürlüklü TV'ler, video konferanslar, akıllı mobil cihazlar, akıllı telefonlar ve bunlarla ilgili uygulamalar için kablosuz yüksek hızlı iletişim ve bant genişliği talebinde bir artışa neden olduğu gözlemlenmektedir. Akıllı mobil ve stabil cihazların yaygınlaşması, yeni nesil Nesnelerin İnterneti (IoT; Internet Of Things) ve akıllı telefon uygulamalarının hızla büyümesiyle birlikte bu cihazlar için gerekli olan yeterli bant genişliği arayışı da hızla artmaktadır. Ana kaynak (source) veya servis sağlayıcı (server)'den son kullanıcıya kadar; hibrit koaksiyel, bakır tel ve fiber optik kablolar, radyo frekans (RF) vasıtası

erişim ağları ile (son metre ve son mil ... vb.) nihai noktadaki kullanıcıların iletişim ve bilgi transferi (data) ihtiyaçlarını karşılayabilecek bir dizi teknoloji tabanlı kablosuz sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, mevcut iletişim sistemlerinin, küresel bant genişliği talebi hızla artmaya devam ederken, koaksiyel/bakır kablolar ve radyo frekans (RF) hücresel/mikrodalga teknolojilerinin bant genişliklerinin sınırlı olması, yüksek düzeyde düzenlenmiş ve sıkışık spektrumlarının bulunması ve kısıtlı kullanılabilirlikleri nedeniyle gelecekteki iletişim ve veri akışı ihtiyaçlarını karşılayamayacağı açıkça ortaya çıkmaktadır. Ayrıca bu teknolojilerin yüksek kurulum maliyetlerine neden olması, yüksek lisans ücretleri gerektirmesi ve güvenlik sorunları ayrı bir dezavantajdır. Bu nedenle günümüzde birçok ülkede yer alan ağ operatörleri, yukarıda sayılan dezavantajları gidermek ve müşterilerine daha iyi bir hizmet sunmak amacı ile, yeni fiber optik tabanlı erişim ağları kurarak mevcut bant genişliğini artırma eğilimindedir.

Günümüzde; Optik Kablosuz İletişim sistemleri ve uygulaması (OWC: Optical Wireless Communication), Görünür Işık İletişimi (VLC: Visible Light Communication), yüksek veri aktarım kapasitesi, yüksek bant genişliği ve elektromanyetik parazitlere karşı direnci ile radyo frekansı (RF) tabanlı iletişim uygulamalarına bir alternatiftir. Görünür Işık İletişimi (VLC) için olması greken standardizasyon ve tanımlar, IEEE 802.17.7 alışma grubu tarafından yapılmıştır ve bu çalışma grubu tarafından Optik Kablosuz Haberleşme sistemlerinin önemli uygulama esasları tespit edilmiştir. Optik Kablosuz Haberleşme Sistemlerindenin ana prensipleri; optik ışık kaynaklarının seçimi, modülasyon teknikleri; Görünür Işık İletişimi (VLC) sistem tasarımı, modellemesi ve kanal modelleri olarak sıralanabilir. Görünür Işık İletişimi (VLC) sistemlerinin uygulama alanları arasında; hava alanlar, alışveriş merkezleri, otel, okul, hastane vs gibi yerlerde kullanılmak üzere bina içi kablosuz yerel alan ağları (WLAN) gibi altyapı gerektiren yapılar ve alanlar bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, kablosuz haberleşme sistemlerinden Optik Kablosuz İletişimin (OWC) uygulama temelleri ve esasları araştırılmıştır. Bu kapsamda görünür ışıkla iletişim sağlayan, fiziksel katman algoritmaları kullanılarak yüksek hızda veri iletimini amaçlayan, i ve dış etkenlerden fazla etkilenmeyen sistemlerin temel yapıları üzerine araştırmalar sunulmaktadır. İkinci bölümde, Optik Kablosuz İletişimin (OWC) temel ilkeleri anlatılmaya çalışılmıştır. Dedektörler ve optik ışık kaynakları üçüncü

bölümde ele alınmıştır. Görünür Işık İletişim (VLC) kanal modelleri hakkında bilgi dördüncü bölümde verilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

1.3.2 OWC-Optik Kablosuz İletişimin Temelleri

Optik tabanlı ağların genellikle sınırsız bant genişliği sunduğu düşünülse de halihazırda mimari seçenekler, ağa bağlı cihazların ve bu cihazlara ait bileşenlerin uyumluluğu, ağ ekipmanlarının performans kısıtlamaları ve tüm sistemin kurulumu gibi nedenler ile son kullanıcılara sınırlı kapasite teklifleri sunar. Dünya genelinde; sabit ve mobil, insanlar ve cihazlar arasındaki bağlantı ve iletişim ile ilgili olarak, kablosuz iletişim teknolojisinin yaygın olarak uygulanmasını sağlayan önemli gelişmeler kaydedilmektedir. Bu gelişmeler birbirinden farklı nesneler arasında iletişim kurmak için genişletilebilecek ve böylece nesnelerin interneti (IoT)'nin yapısına önemli ölçüde etki edecektir. Bu uygulamalar esas olarak; makineden makineye, insandan insana, terminalden terminale, makineden insana ve insandan makineye kablosuz iletişim biçiminde olabilir.

Radyo frekansı (RF) tabanlı kablosuz iletişim teknolojisi kullanıldığında genellikle kentsel bölgelerde spektrum tıkanıklığı gözlemlenir, bu ise ağa sınırlı erişime neden olur. Özellikle çok yoğun alanlarda kuplaj performansını etkileyen çok yol kaynaklı sönmüleme ve saçılmalara yol açmaktadır. Bu ise kablosuz veri trafiğinin yaklaşık %70'inin kapalı alan içerisinde olduğu düşünüldüğünde, kapalı ortamlarda heterojen cihazların verimli çalışması için bant genişliğinin yetersiz kalması anlamına gelmektedir. Radyo frekansı (RF) spektrumu üzerindeki yoğunluğu, bir başka ifade ile stresi azaltmak için, bazı mobil veri trafiği, femtocell tabanlı teknolojilere ve kablosuz bağlantıya (Wi-Fi; wireless fidelity) indirgenebilir. Kablosuz iletişim teknolojileri; düşük gecikme süresi ve yüksek veri hızları ile sorunsuz iletişim sağlaması, verilen hizmetin düşük maliyetli ve son derece güvenilir olmasını gerektirir [108]. Ancak kablosuz bağlantı (Wi-Fi) etkin noktalarının yoğun dağıtımı; bant genişliği darboğazlarıyla karşı karşıya kalınmasına neden olur.

Beşinci nesil (5G) iletişim sistemlerinin ve radyo frekansı (RF) tabanlı kablosuz teknolojilerin önümüzdeki dönemde yukarıda bahsedilen problemleri çözmesi veya en azından iyileştirmesi beklenmektedir. Ancak 5G ve 5G dışındaki kablosuz ağlarda

hücreler arası ve katmanlar arası girişim ve spektral kaynakların yeniden kullanılması gibi ek kısıtlamalarında olacağı açıktır. Bunlara alternatif olarak, yaklaşık son otuz yıldır piyasada kullanılmakta olan radyo frekans (RF) kablosuz iletişim sistemleri yerine, yenilikçi ve tamamlayıcı teknoloji olan optik kablosuz iletişim (OWC) sistemleri kullanılabilir.

Optik Kablosuz iletişim (OWC); mevcut hem iç hemde dış ortamlarda düşük gecikme ve düşük maliyet ile yüksek kapasite sağlamak üzere geliştirilebilir. Bu noktada Optik Kablosuz iletişim (OWC); düşük güç kullanımı, yüksek hızı, fiziksel katmanda yüksek güvenliği, lisanssız oluşu, uygun maliyeti ile radyo frekansı (RF) tabanlı kablosuz iletişim teknolojilerinin önüne geçmektedir. Ayrıca Optik Kablosuz İletişim (OWC); radyo frekans (RF) tabanlı elektromanyetik girişime karşı bağışık ve yüksek derecede uzaysallık nedeniyle sınırsız frekansın yeniden kullanım imkanı sunduğu gibi, esnek ve ölçeklenebilir kablosuz ağ çözümlerinde önümüze koyar. Video ve eğlence, ses ve veri, aydınlatma ve data iletişimi, kamusal bağlantı, algılama teknolojileri ve sensörler, tıbbi meteryaller, arama/kurtarma, gözetim, yerelleştirme vesaire gibi bir dizi uygulama için güvenli sınırlama ve iletişim kolaylığı sağlar. Optik Kablosuz İletişim (OWC) teknolojisinde haberleşme için yüksek bant genişliği sağlamak amacıyla; üç bantlı ultraviyole (UV), görünür ışık (VL) ve kızılötesi (IR) kullanılmaktadır. Optik Kablosuz İletişimde (OWC)'de kullanılan optik sinyaller benzersiz özellikler gösterir, bundan dolayı, iç mekanlarda ve ortamındaki optik ayak izi tam olarak tanımlanabilir. Böylece küçük bir alanda çok sayıda cihaz bulundurulabilir. Ayrıca optik kablosuz iletişim (OWC), yeni nesil bilgi aktarım ortamlarında, radyo frekansı (RF) sistemlerini tamamlayıcı bir teknoloji olarak önemli bir rol oynayacak ve Beşinci Nesil (5G) haberleşme genel altyapısına uyum sağlayacaktır.

Günümüzde, iletişim ve data transferine olan talep yoğunluğu, yeni veri servis ve uygulama sayısının artması, mobil iletişimde bant genişliğine olan talebide hızla artırmaktadır. Moore yasası olarak bilinen yasada; veri trafiğinin her beş yılda bir on kat artması öngörülmektedir. Özellikle son yıllarda internet trafiğine olan talebin katlanarak artması, Moore yasasının öngördüğü veri trafiğinin çok daha üzerinde gerçekleşeceği anlamına gelmektedir. Dünya genelinde mobil data trafiği 2012 yılında ayda yaklaşık 820 petabayt (PB) ile %70'ler civarında iken, 2013 yılında ayda yaklaşık 1,5 eksabayt ile %81'e yükseldi. 2014 yılına gelindiğinde ise ayda 2,5 eksabayt ile bu

oran %69'a yükselmiştir. 2000 yılında tüm küresel internetin boyutunu 30 kat artırdı[267].

Tablo 1.4. Mevcut ve Geleceğin Kablosuz Teknolojileri [108]

Teknoloji	Kablosuz Veri Hızı (bps)
	Şu anda
Wi-Fi (IEEE 802.11n)	150 Mbps
Bluetooth	3 Mbps
IrDa	4 Mbps
	Gelecekte
Wi-Gig (IEEE 802.11ad)	2 Gbps @60GHz; (oda içinde)
Beyaz Wi-Fi (IEEE 802.11af & IEEE 802.11ah)	24 Mbps @54 ve 790,900MHz
Giga-IR	1 Gbps
LiFi	>10 Gbps; (oda içinde)

Dünya genelinde mobil cihazlar ve bağlantıları 2013'te 6,9 milyar iken 2014'te 7,4 milyara yükseldi. Bu artışın %88'i akıllı telefonlar kategorisinde meydana geldi. 2016 yılına kadar ise 3,4 milyar internet kullanıcısına ve 19 milyar sabit ve kablosuz global ağ bağlantısına sahip olunması bekleniyordu. Toplam mobil yani hareketli kullanıcı data trafiğinin 2012'ye göre 14 kat artarak 2019'a gelindiğinde ayda 24,3 eksabayta çıkması bekleniyor idi. Aynı dönemde hücresel hareketli ağ bağlantısı, download yani aşağı yönlü akış hızları 2013'te 1,4 Mbps'den 2014'te 1,7 Mbps'ye yükseldi [108].

2020 yılına gelindiğinde; her şey [insanlar, nesneler (IoT), makineler (M2M)] farklı ihtiyaçları karşılayacak şekilde, esnek, hareketli ve daha hızlı bir biçimde iletişim ağına bağlıdır. Dünya Bankası verilerine göre, ihtiyaç duyulan genişbant penetrasyonu, düşük, orta ve yüksek gelirli ekonomilerde sırasıyla %1,38 ve %1,21'e varan ek GSYİH büyümesi sağlayabilir [267]. Ayrıca mobil servislerinin; geniş bant gerektiren uygulamalara geçişi ve 1 km'den büyük, mikro hücrelere geçişle birlikte, mobil ağ altyapısına, özellikle baz istasyonlarında “backhaul” bağlantılarına ihtiyaç duyulmuştur. Mikrodalga radyo, mevcut sistemler ve yaklaşık 10-20 km'lik BS ayrımları ile veri

bağlantıları veya "mobil ana taşıyıcı ağı" sağlayan birincil teknoloji olmuştur. Halihazırda mikrodalga radyo, tekil kullanıcılar için birkaç Mbps'ye kadar veri hızlarını işleyebilirken, tahmin edilen daha yüksek veri hızlarını kaldıramayacak ve bu da "backhaul darboğazına" neden olacaktır.

Beşinci nesil (5G) ve Dördüncü nesil (4G) haberleşme ağlara geçiş artık yalnızca taşıma, yönlendirme ve anahtarlama teknolojilerine dayanmayacak, bunun yanında verilen hizmeti güvenli bir şekilde organize etmek ve geliştirmek için de birleşik bir altyapıda daha açık ve esnek olacaktır. Eşzamanlı olarak bilgi işlem ve depolama kaynaklarını içerecektir [109,110,111]. Beşinci nesil ve ötesi kablosuz teknolojilerin, düşük gecikme ve büyük kapasite ile 10 Gbps'nin üzerindeki veri aktarım hızlarında bir performans göstermesi beklenmektedir. Bu ihtiyaçları karşılayabilmek için, mevcut işlemdeki makro hücreler bir dizi küçük hücrelere bölünmelidir. 4G / 5G teknolojileri, pikoseller ve femtoseller ile bağlantılı olarak yüksek spektral verimlilik için daha gelişmiş modülasyon tekniklerini benimseyecektir. Böylece bu teknolojiler daha fazla aboneyi kapsayacak ve daha yüksek kapasiteli, daha geniş bant hizmetleri sağlayacaktır. Bununla birlikte, BS'nin bağlanması için RoF (radio over fiber) yani fiber ile radyo veya FSO (free space optics) yani boş alan optikleri üzerinden radyo yoluyla elde edilebilecek daha güçlü, çok yüksek kapasiteli ve enerji açısından verimli çözümlerin geliştirilmesi gerekecektir. Bu, bilgisayar ağı uygulamaları (100 Mbps'ye kadar), ultra yüksek çözünürlüklü TV (UHDTV 4-20 Mbps) hizmetleri, mobil video telefonları gibi çok çeşitli kablosuz geniş bant hizmetleri gerektiren iletişim teknolojilerini desteklemek için çok yüksek bir kapasite sunar. Bu uygulamalar örneğin; hareket halindeyken video konferansı yapabilme, yüksek hızlı internet erişimi sağlanması, cihazlar arası veya makineler arası iletişim, oyun hizmetleri ve kablosuz her türlü bağlantılardır. 2019 yılına gelindiğinde beklenti 4G teknolojisinin toplam bağlantıların %26'sını oluşturması ve toplam veri trafiğin %68'ini taşıması idi. Ancak 2019 yılına gelindiğinde, ağa entegre tüm mobil cihazların yüzde 50'den fazlasını ve mobil veri trafiğinin %97'sini "akıllı" cihazların oluşturduğu tespit edildi [108].

Nesnelerin interneti (IoT) kullanımı ile oluşturulan veri miktarı ve bulut kullanımıyla üretilen veri miktarı, halihazırdaki iletişim kapasitesini dolduracaktır. Şu hâlde önemli olan, tüm kanalların; tamamen sinyal spektrumu tarafından işgal edilmesi halinde, telekomünikasyon altyapısının oluşan yeni duruma ve hıza uyum sağlayıp

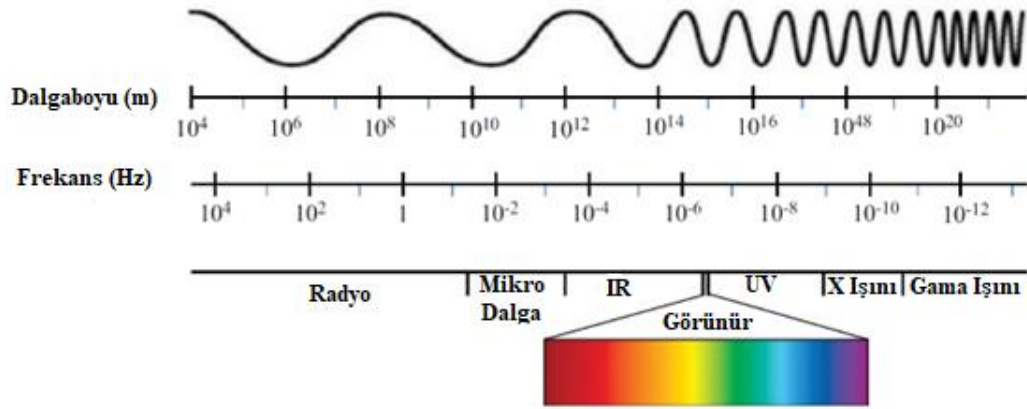
sağlayamacağı ve operatörlerin iletim kapasitelerini artırıp artıramayacağıdır [112]. Kablosuz internet erişim ağlarında, geniş bant RF/mikrodalga, optik fiber, bakır ve koaksiyel kablolar kullanılmaktadır. Bu teknolojilerin (koaksiyel kablolar, bakır kablolar ve geniş bant RF/mikrodalga) sıkışık spektrum, pahalı lisanslama, güvenlik sorunu, daha düşük veri hızı ve yüksek kurulum maliyeti gibi dezavantajları vardır. Diğerlerine nazaran sabit fiber iletişimde, yüksek seviyeli modülasyon tekniklerine dayalı olarak yüksek veri hızları (yaklaşık fiber hat başına 100-400 Gbps) elde edilebilir. Örneğin daha yüksek veri hızları (onlarca Tbps ve üstü) uzay bölmeli çoğullama (SDM; Space Division Multiplexing) teknolojileri kullanılarak da elde edilir [161]. Geniş dalga boyu bölmeli çoğullama (WDM; Wide Wavelength Division Multiplexing), uzun mesafeli iletişim ve haberleşmede veri hızını artırmak için yaygın olarak kullanılan bir kanal modelidir.

Bir seçenek olarak, "son mil" erişim ağlarına kadar yeni fiberlerin kurulması aşırı maliyetli ve zaman alıcıdır. Başka bir alternatif, sinyal bant genişliğinin (önerildiği gibi 50 GHz ITU ağları içinde kalması koşuluyla) fiber başına daha yüksek bant genişliği tüketimini göze alarak iletim hızını artırmak olabilir [162,163].

Optik iletişim sistemlerinde kullanılan, ışık kaynakları bir takım temel teknik özelliklere sahip olmalıdır [164]. Bunlar yüksek hızlı bağlantılar için hızlı tepki süresi ve stabilite, uygun dalga boyu ve dar hat genişliği ile yüksek enerji verimliliğidir. Bu noktada LED'lerden kısa bir bilgi vererek konu bütünlüğü içerisinde devam etmek gerekir. LED'ler monokrom, uyumlu ve tek yönlüdür ve bu nedenle iç mekân uygulamalarından ziyade dış mekân uygulamaları için daha önemli bir çözüm ortağıdır. Ayrıca LED'ler, uzun iletim bağlantıları için, iletilecek bilginin enerjisi, yüksek zayıflamaya neden olabilecek olumsuz hava koşullarına dayanacak biçimde, çok hassas bir şekilde ayarlanmış bir ışık huzmesi içinde yönlendirilmelidir.

LED'ler ve LD'ler, elektromanyetik spektrumun kızılötesi (IR) bölgesinden görünür bölgesine kadar çok çeşitli dalga boylarında veya renklerde ışık yayar.

Tablo 1.5. yaygın olarak kullanılan LED malzemelerini ve bunların optik radyasyon dalga boylarını göstermektedir.



Şekil 1.6. Elektromanyetik spektrumda görünür ışık [108], dalga boyları ve bunlara karşılık gelen enerjiler gösterilmektedir.

Tablo 1.5. LED malzeme ve ilgili optik ışıma dalgaboyu değerleri [108]

LED (substrat)	Dalgaboyu (nm)
AlGaIn/GaN	230-350
InGaIn/GaN	360-525
ZnTe/ZnSe	459
SiC	470
GaP	470
GaAs _{0.15} P _{0.85}	589
AlGaInP/GaAs	625-700
GaAs _{0.35} P _{0.65} /GaAs	632
GaAs _{0.6} P _{0.4} /GaAs	650
GaAsP/GaAs	700
Ga _{1-x} Al _x As/GaAs	650-900
GaAs	910-1020
InGaAsP/InP	600-1600

LED'ler, elektronik stimülasyona maruz kaldıklarında kendiliğinden emisyon yoluyla dağınık ışık yayar. Elektronik uyarım, pn jonksiyonu boyunca bir ileri ön gerilim voltajı uygulanarak elde edilir.

Foton emisyon hızı ve dalga boyu kullanılarak şu şekilde hesaplanır [165]:

$$I(E = hf) \propto \sqrt{E - E_g} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), E = E_2 - E_1 = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

$$\lambda = \frac{hc}{E(eV)} \mu m \quad (1.2)$$

Yukarıda (1.1) formülünde geçen E_g ; yarıiletken elemanın içi boş bant enerjisini ifade etmektedir. k değeri Boltzmann sabitidir, T ise sıcaklık ifade eder.

Buradan yola çıkarak Dalga Boyu aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\Delta\lambda = \frac{1.8kT}{hc} \quad (1.3)$$

LED'ler daha geniş bir spektral genişliğe sahiptir, çünkü $\Delta\lambda$ için bu 30-60 nm'dir ve 850 nm'lik λ 'da sırasıyla yaklaşık 170 nm ve 1300 nm'dir.

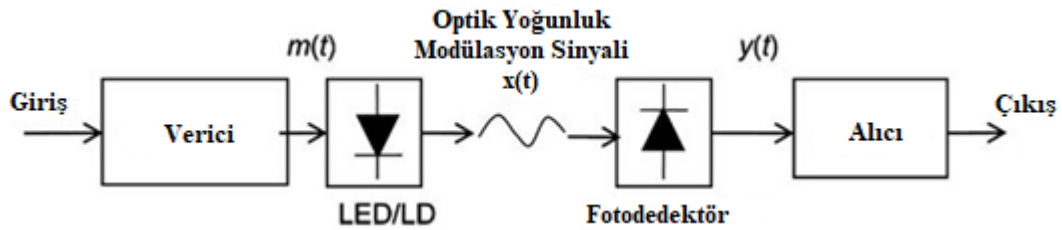
Elektronik devre elemanlarında oluşan fotonların rastgele yönlerde yayıldığı bilinmektedir. Bu elektronik devre elemanlarında oluşan fotonların bir kısmı istenilen yönde ışık oluşturur [169]. Emisyonun tepe dalga boyu, yarı iletken malzemeye ve p-n bağlantısının enerjisine bağlıdır.

1.3.3. Kanal Modeli

Tam çift yönlü mod Optik Kablosuz İletişim (OWC) sistemlerinde, kanalları elde etmek için; çok kullanıcıli erişim girişimi, çok yollu girişim, ağ şemaları ve doğru kanal modeli seçimi gereklidir. Verimli bir optik iletişim sistemini sağlamak; kanal özelliklerinin iyi anlaşılması, uygulanması ve işletilmesi ile mümkün olabilir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan iç mekân optik kablosuz iletişimde birçok topoloji vardır. Bahsekonu bu topolojiler, iç mekân yapılandırmalarında dikkate alınacak bir dizi parametre ile konfigüre edilir [164]. Örnek verecek olursak, vericilerin yönlülüğü, vericiler ve alıcılar arasında doğrudan bir görüş hattının (LOS) varlığına

bağlı olarak şekillenebilir [166]. Bu noktada doğrudan algılama yoğunluk modülasyonu (IM/DD; Direct sensing intensity modulation) asıl uygulama yöntemidir. Doğrudan algılama yoğunluk modülasyonu (IM/DD); temel olarak düşük karmaşıklığı ve düşük maliyeti nedeni ile optik kablosuz sistemlerde uygulanan bir yöntemdir. Doğrudan algılama yoğunluk modülasyonu (IM / DD) Optik kablosuz İletişim (OWC) Sisteminin blok şeması Şekil 1.7'de gösterilmektedir. Doğrudan algılama yoğunluk modülasyonu (IM/DD); Optik Kablosuz İletişim (OWC) sistemlerinde, bir optik kaynağın sürücü akımı ILED'i, modülasyon sinyali $m(t)$ tarafından doğrudan modüle eder. Bu da sırayla yoğunluğu değiştirir. Optik kaynak $x(t)$; yani, iletim optik gücü (P_t) ILED ile orantılıdır.

Alıcı, yanıtı optik sinyalden on binlerce kat daha kısa dalga boyu entegrasyonunda olan ve bir fotoakım çıkışı $y(t)$ üreten bir fotodetektör kullanır. Bu fotoakım, anlık optik güç ile doğru orantılıdır [169-172]. Fotoakımı, alınan elektrik alanının karesiyle doğru orantılıdır. Şekil1.8'te verilen Doğrudan algılama yoğunluk modülasyonu (IM/DD) tabanlı optik kablosuz sistem eşdeğer bir temel bant modelini ifade eder. Bu ise optik taşıyıcının yüksek frekans yapısını korur. Doğrudan algılama yoğunluk modülasyonu (IM/DD) Optik Kablosuz İletişim (OWC) sisteminin giriş-çıkış parametreleri aşağıdaki gibidir [167].



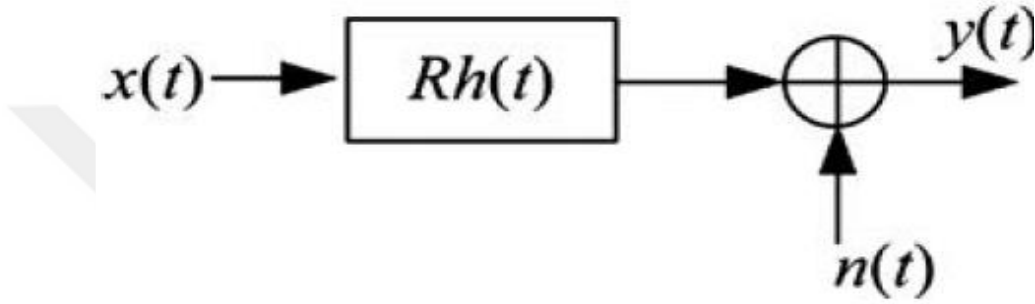
Şekil 1.7. IM/DD OWC Sistem Blok Şeması [108]

Bir IM/DD OWC sisteminin giriş/çıkış parametreleri aşağıdaki gibi formulüze edilebilir:

$$y(t) = G_{oc}Rx(t) \otimes h(t) + n(t) \quad (1.4)$$

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} R h x(\tau) h(t - \tau) d(\tau) + n(t) \quad (1.5)$$

Buradaki G_{oc} ifadesi optik alıcının kazancıdır, $\otimes$ işlemi ise evrişim operatörüdür. R değeri, fotodedektörün dalga boyuna özgü bir tepki fonksiyonunu temsil etmekte olup fotodedektöre gelen ışığın spektral güç dağılımına bağlıdır.



Şekil 1.8. IM/DD OWC temel bant eşdeğer modeli [108]

Formülüne edecek olursak; Şekil1.8’te yer alan R ifadesi fotodetektör yanıtıdır, $h(t)$ ise temel bant kanal darbe yanıtıdır. $n(t)$ çift yönlü güç spektral yoğunluğu ile ilave Beyaz Gauss gürültüsü (AWGN; Additive White Gaussian Noise) olarak modellenen, sinyalden bağımsız kanal gürültüsünü temsil eder.

Bu formüllerdeki $h(t)$, kapalı iç mekân Optik Kablosuz İletişim (OWC) kanallarında çok yollu dağıtımın etkilerini analiz eden ve Bapst ve Gfeller tarafından tanımlanan kanal işlevidir:

$$h(t) = f(x) = \begin{cases} \frac{2t_0}{t^3 \sin^2(FOV)} & t_0 \leq t \leq \frac{t_0}{\cos(FOV)} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (1.6)$$

Minimum kanal zaman gecikmesi yani $h(t)$; (1.6) formülündeki gibi ifade edilir. Eşdeğer model, temel bant IM/DD OWC kanalında $x(t)$ sinyal gücünü temsil eder. $x(t)$ gönderici tarafındaki sinyal gücü hesaplanırken pozitif olmalıdır. [168-173].

$$P_{max-giriş} \geq x(t) \geq 0 \quad (1.7)$$

Optik kablosuz bağlantılarda SNR, ortalama optik sinyal gücünün karesiyle orantılıdır.

$$P_{max} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt \quad (1.8)$$

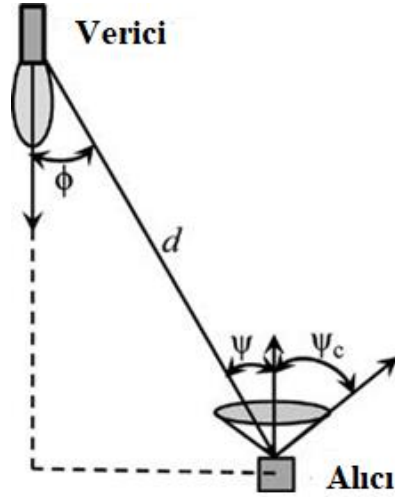
$$SNR = \frac{R^2 H^2(0) P_r^2}{R_b N_0} \quad (1.9)$$

Bu ifadede N_0 spektral gürültü yoğunluğunu, $H(0)$ ise (1.10)'de verilen kanalın DC kazancını ifade etmektedir. Bir optik kanalda yüksek optik verici gücü gerekli olmakla birlikte, yalnızca sınırlı yol kaybı tolere edilebilir.

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad (1.10)$$

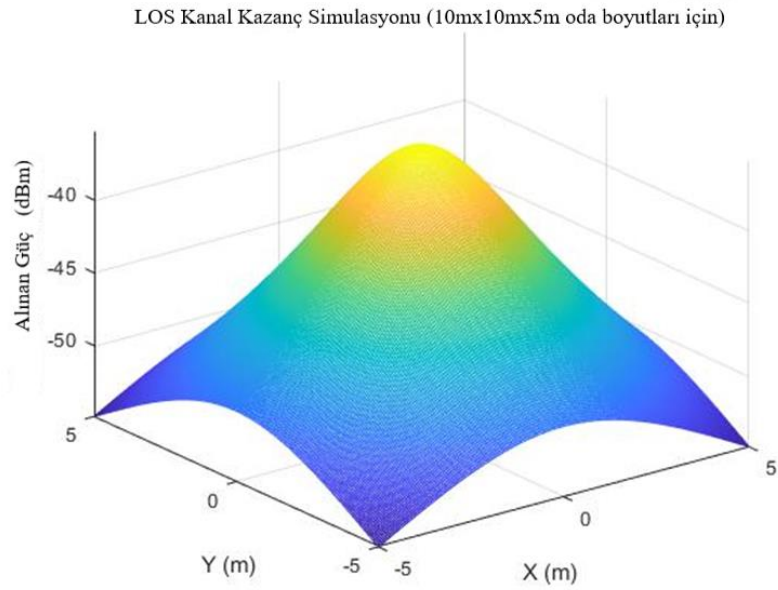
Kablosuz iletişim sistemlerinde gönderici ve alıcı arasında Görüş Hattı varken, alınan sinyal Görüş Hattı bileşeni olarak bilinen karmaşık üstel ve dar bant Gauss yapısının toplamı olarak ifade edilir.

$$H_{optik\ kanal} = H_{LOS}(f) + H_{NLOS}(f) \quad (1.11)$$



Şekil 1.9. Görüş Hattı (LOS) yayılımı Kanal Geometrisi [108]

Şekil 1.10, verilen iç mekân oda boyutuyla ($k_x=10$; $k_y=10$; $k_z=5$; k , metre cinsinden oda boyutudur) bu tezde kullanılan iç ortam için bir Görüş Hattı (LOS) kanal kazancını göstermektedir. Burada MATLAB simülasyonu kullanılarak, verilen bu senaryo için alınan güç 43dBm olarak elde edilmiştir.



Şekil 1.10. İç ortam için Görüş Hattı (LOS) kanal kazancı ($k_x=10$; $k_y=10$; $k_z=5$; k metre cinsinden oda boyutudur) [267].

LED'ler birden fazla aydınlatma, veri iletişimi, iç mekân konumlandırma ve algılama için kullanılabileceğinden, ışık yoğunluğunun tanımlanması ve optik gücün iletilmesi gereklidir. Bir LED'in parlaklığını ifade etmek için Işık yoğunluğu ifadesi kullanılır. Kısaca açı başına ışık akısı olarak tanımlanır.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1.12)$$

Burada Ω uzamsal açıdır ve Φ [94] tarafından verilen enerji akısı Φ_e 'den hesaplanabilen ışık akısıdır.

$$\Phi = K_m \int_{380}^{780} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (1.13)$$

Burada K_m maksimum görünürlüktür ve $V(\lambda)$ standart parlaklık eğrisidir, yani $\sim 683 \text{ lm/W}$ 555 nm dalga boyunda.

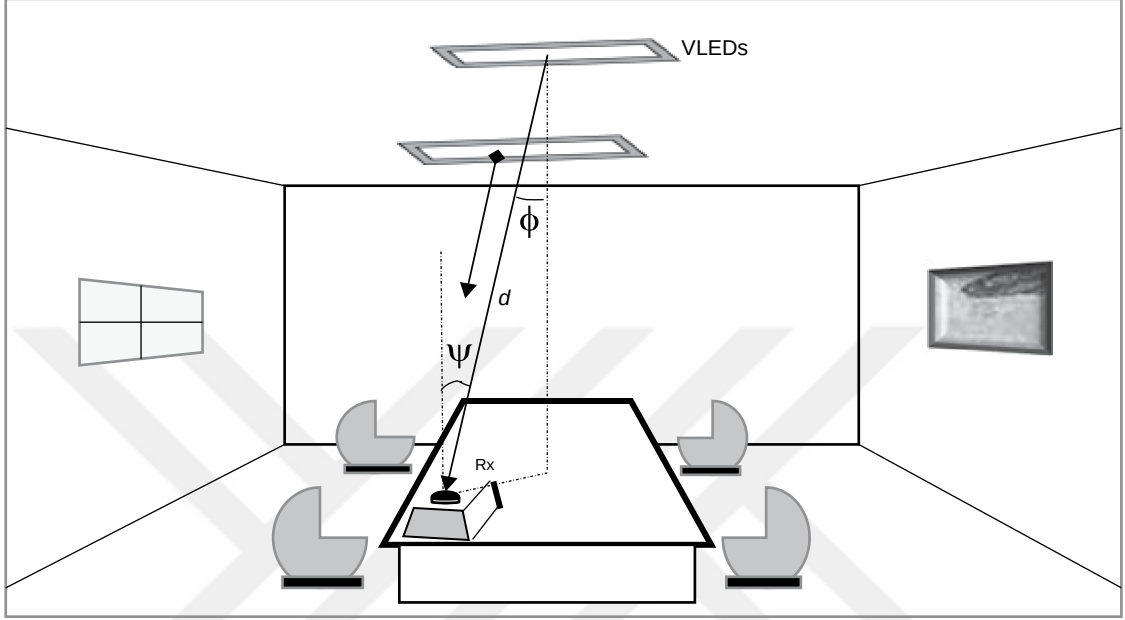
Bir LED'den yayılan toplam enerjiyi gösteren iletim optik gücü P_t , şu şekilde verilir:

$$P_t = K_m \int_{\Lambda_{min}}^{\Lambda_{max}} \int_0^{2\pi} \Phi_e d\theta d\lambda \quad (1.14)$$

Burada Λ_{min} ve Λ_{max} , PD'nin tepki eğrisinden belirlenir.

Şekil 1.11'de tipik bir ofis ortamını göstermektedir ve odada LED tabanlı aydınlatma panellerine mevcuttur. Bu senaryoda kullanıcılara kablosuz bağlantı baskın iletim modu LOS ile sağlanır. LED'ler tarafından bir Lambertian radyasyon modeli varsayıldığında, bir masa yüzeyindeki radyasyon yoğunluğu şu şekilde ifade edilir;

$$I(\phi) = I(0) \frac{m_l + 1}{2\pi} \cos^{m_l}(\phi) \quad (1.15)$$



Şekil 1.11. Görünür ışık iletişimi (VLC) iç mekân kullanım durumu [108]

Burada ϕ , verici yüzeyine dik olan eksene göre ışınlam açısıdır, $I(0)$ ise merkez ışık şiddeti ve m_l bir ölçüsü olan Lambert emisyonunun sırasıdır. Işık demeti yönlülüğü, şu şekilde tanımlanır:

$$m_l = \frac{\ln(2)}{\ln(\cos \Phi_{1/2})} \quad (1.16)$$

Burada $\Phi_{1/2}$, bir LED'in yarım aydınlatmasındaki yarı açıdır.

LOS yolu için, bir (x, y, z) noktasındaki yatay aydınlık/yoğunluk ve alıcıdaki alınan güç şu şekilde verilir:

$$I_{hor} = I(0) \cos^{m_l}(\phi) / d^2 \cos(\psi) \quad (1.17)$$

$$P_r = P_t \frac{(m_l + 1)A_{PD}}{2\pi d^2} \cos^{m_l}(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \quad 0 \leq \psi \leq \psi_{con} \quad (1.18)$$

Formülde ψ alıcı yüzeyine normal eksene göre geliş açısıdır, $T_s(\psi)$ filtre iletim katsayısıdır, $g(\psi)$ ve ψ_{con} sırasıyla yoğunlaştırıcı kazancı ve FOV'dur. d LED arasındaki mesafedir ve A_{PD} ise bir PD yüzey alanıdır. Alıcıdaki optik yoğunlaştırıcının kazancı [95] 'de tanımlanır.

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n_{con}^2}{\sin^2 \psi_{con}}, & 0 \leq \psi \leq \psi_{con} \\ 0, & 0 \geq \psi_{con} \end{cases} \quad (1.19)$$

Burada optik yoğunlaştırıcının kırılma indisi n_{con}^2 ile ifade edilir.

LOS'un olmadığı veya dağınık yollar için, ışık önce yansıtıcı bir yüzeye çarpmalıdır (bu senaryoda bir oda içindeki diğer katı nesneler veya duvar) ve ardından PD'ye ulaşır (Şekil 1.11). Bu nedenle, yüzeyin yansıtıcılığı veya gelen ışığın yüzde kaçını geri yansıtılır ve yüzey tarafından yakalanır dikkate alınmalıdır. Ayrıca yüzeylerden yansımaların da olabileceğine dikkat edilmelidir. Lambert modellerine [96] sahiptir ve sonlu bir dA_r alanına sahiptir. Bu nedenle, dağınık ışımadan gelen aydınlatma yol [96,[97] tarafından tanımlanır.

$$dD = \rho \frac{m_l + 1}{2\pi^2} \frac{\cos^{m_l}(\phi) \cos(\beta) \cos(\psi)}{d_1^2 d_2^2} dA_r \quad (1.20)$$

d_1 ve d_2 , sırasıyla bir LED ile bir yansıtma noktası arasındaki ve bir yansıtma noktası ile bir PD arasındaki mesafelerdir. ρ yansıtma faktörüdür, α_{ir} ve β_{ir} sırasıyla bir yansıtma noktasına olan ışınım açısı ve bir alıcıya olan ışınım açısıdır. Böylece, yayılan kanal için, toplam aydınlatma, tam yansıtıcı yüzey alanı üzerinden integral alınarak ve tüm LED kaynakları toplanarak verilir.

$$E_{horDiffuse} = \sum_i \int_{wall} dD_i \quad (1.21)$$

Burada i , LED'in indeksidir. Daha yüksek dereceli sekmeleri belirlemek için, [97] tarafından verilen özyinelemeli bir işlem kullanılabilir.

$$dD_b = \int_{wall} \frac{dD_{k-1}}{\pi d^2} \rho \cos(\beta) \cos(\psi) \quad (1.22)$$

Burada k ifadesi yansımaların sırasındır. Gerçek yansımalar hem yayılma hem de speküler mekanizmaları içerir [98]. Ancak akustik döşemeli duvarlar, alçı duvarlar, cilasız ahşap yüzeyler ve halı gibi malzemelerin deneysel değerlendirmesi, bunların Lambertian reflektörler olarak iyi bir şekilde tahmin edilebileceğini göstermiştir [99]. NLOS'lu çoğu Görünür Işık İletişim sisteminde, genellikle ilk yansımanın dikkate alındığını ve katkıları önemsiz olduğundan daha yüksek dereceli yansımaların göz ardı edildiği unutulmamalıdır [100].

Tek kaynaklı bir Görünür Işık İletişim sisteminde, geniş bir sapma açılı LED'in kullanılması, geniş kapsama alanı elde etmenin uygun bir yoludur. Bununla birlikte, geniş sapma açıları, çoklu yol kaynaklı ISI'nın artmasına yol açarak maksimum iletim veri hızını önemli ölçüde sınırlayabilir. Bu sorunun üstesinden gelmek ve daha yüksek bir veri iletim hızı ile daha düzgün bir optik güç dağılımı elde etmek için LED'lerin sapma açılarının dikkatle seçilmesi gerekir.

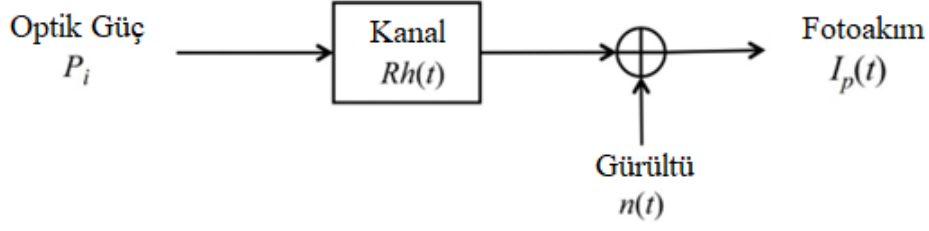
Çok dizili bir LED için LOS yolundan $P(x,y)$ noktasındaki toplam yatay aydınlatmayı belirlemek için, LED ışıklarının her birinden gelen tüm katkılar (yani tüm aydınlatma) dikkate alınmalıdır. Çok kaynaklı dağıtılmış LED dizisi sistemleri, iki nedenden dolayı daha pratiktir: (i) odalar; yeterli aydınlatmayı sağlamak için birden fazla ışık kaynağı kullanır ve (ii) uzamsal çeşitliliği sağlamak; böylece engellemeler ortadan kalkar. Bununla birlikte, dağınık OWC bağlantılarında olduğu gibi, çoklu kaynaklar, özellikle daha yüksek veri hızlarında, belirli bir iç ortamda elde edilebilecek maksimum veri iletimini sınırlayacak olan çok yol kaynaklı ISI'dan zarar görecektir. Bu

sorunun üstesinden gelmek için; örneğin, ışık kaynağı düzenini değiştirmek, alıcının görüş alanını azaltmak, kodlama ve eşitleme tekniklerini benimsemek ve ayrıca çoğullama şemaları kullanmak gibi hususlar sıralanabilir.

Tablo 1.6, Görünür Işıklı İletişim sistem modellemesinde kullanılabilecek standart bir oda ortamı için temel parametreleri göstermektedir.

Tablo1.6. VLC bağlantısı için sistem parametreleri [267]

	Sistem Parametreleri	Değer
Oda	Boyutlar	5x5x3m ²
	Yansıma katsayısı	0.8
Kaynak	Konum (4LED)	(1.25,1.25,3) (1.25,3.75,3) (3.75,1.25,3) (3.75,3.75,3)
	Konum (1LED)	(2.5,2.5,3)
	Yarım güçte yarı açısı (FWHM)	70
	İletim gücü (LED başına)	20mW
	Dizi başına LED sayısı	60x60(3600)
	Merkez ışık şiddeti	300-910 lx
Alıcı	Zemin üzeri düzlem alınan	0,85m
	Aktif alan (A _{PD})	1 cm ²
	Yarım açısı FOV	60 ⁰
	Yükseklik	90 ⁰
	Azimut	0 ⁰
	Δt	0.5ns
Optik Filtre	Kazanç	1.0
PD'de bir Lens	Kırılma indisi	1.5



Şekil 1.12. IM/DD ile VLC kanalının modellenmesi [267].

Geleneksel Radyo Frekanslı bağlantılardan farklı olarak, bir LED'den gelen iletim optik gücü doğası gereği negatif olmamalıdır. Özetle sürekli optik sinyal $P_i(t) \geq 0$ olmalıdır. Bu nedenle, zaman ortalamalı güç P_t şu şekilde verilir:

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P_i(t) dt \quad (1.23)$$

Bir IM/DD VLC sisteminin şematik diyagramına göre (Şekil 1.12) alıcıda (yani PD) üretilen fotoakım şu şekilde verilir:

$$I_p(t) = RP_t \otimes h(t) + n(t) \quad (1.24)$$

Burada $P_i(t)$ bir optik sinyalin anlık iletimidir, $h(t)$ CIR'dir, $n(t) = (0, \sigma^2)$ $n(t) \sim N(0, \sigma^2)$ beyaz sinyalden bağımsız katkı maddesidir. Gauss gürültüsü (AWGN) ve “ $\otimes$ ” sembolü evrişim işlemini gösterir.

Ortalama alınan optik güç yani P_r , $H(0)$ 'a eşittir. Burada P_t , $H(0)$ kanalın DC kazancıdır. Kanal modelinde yüzeylerin yansıtıcılığı farklıdır, dolayısıyla farklı gecikme yayılmasına ve ISI'ya yol açar. Duvarların yansıtıcılığı, dalga boyuna ve bir odada kullanılan malzemelere bağlıdır. Speküler yansımalar parlak nesnelerden veya aynalardan meydana gelebilse de çoğu yansıma tipik olarak dağınıktır ve çoğu Lambertian olarak modellenmiştir [100-101]. Kwonhyung ve diğerleri tarafından

yapılan çalışmalar (Şekil 1.13); yansıtmanın, yansıtan yüzeylerin dokusuna ve dalga boyuna (optik kaynağın geniş hat genişliği nedeniyle) bağlı olduğunu göstermiştir [100]. Ancak görünür ışıktaki yüzeyin yansıtıcılığının, IR ışımasına göre genel olarak daha az olduğu görülmektedir. Alçı duvar en yüksek yansıtıcılığa sahiptir, bunu sırasıyla zemin ve tavan takip eder. Duvarlardan yansıma göz önüne alındığında, alınan güç, hem yönlendirilmiş $H_{dir}(0)$ hem de yansıtılan kanal DC kazancı cinsinden tanımlanır. $H_{ref}(0)$ tarafından verilen yol [22]:

$$P_r = \sum^{N_{LEDS}} \left\{ P_t H_{dir}(0) + \int_{Reflections} P_t dH_{ref}(0) \right\} \quad (1.25)$$

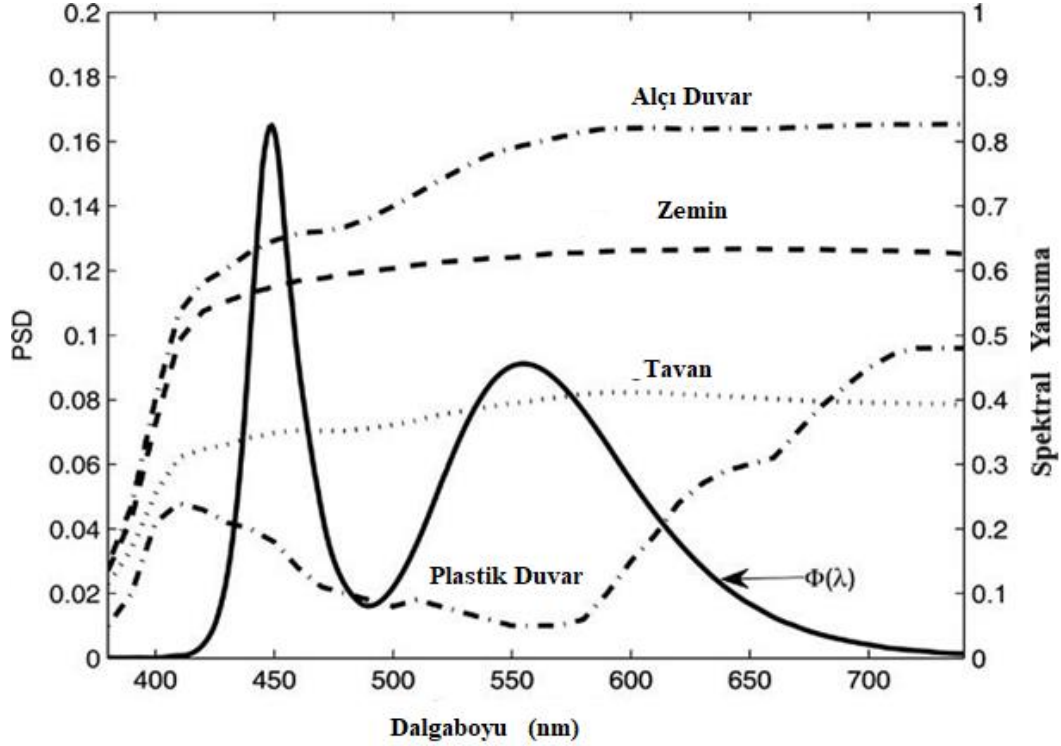
LOS kanalı için DC kazancı [80] ile tanımlanır.

$$H_{dir}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A_{PD}}{2\pi d_i^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (1.26)$$

1^s yansımasının DC kanal kazancı [96] tarafından verilmiştir.

$$H_{ref}(0) = \begin{cases} \frac{A_{PD}(m_l+1)}{2(\pi d_1 d_2)^2} \rho d A_r \cos^{m_l}(\Phi_r) \cos(\alpha_{ir}) \cos(\beta_{ir}) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi_r), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \text{başka yerde } \psi_r \leq \psi_c \end{cases} \quad (1.27)$$

Burada Φ_r yansıtma noktasına olan ışınım açısıdır ve ψ_r yansıtıcı yüzeyden geliş açısıdır.



Şekil 1.13. PSD (sol eksene karşılık gelen düz çizgi), alçı ve plastik duvarın (kesik noktalı çizgi), zeminin (kesik çizgi) ve tavanın (noktalı çizgi) ölçülen spektral yansımaları (sağ eksene karşılık gelir) karşılaştırma [100].

Görünür Işık İletişim sisteminin tanımlanmış kanal kazançları, frekans seçici olmayan olarak kabul edilir. Kanal kazançlarında; ortalama alınan güç, dedektörün aktif alanıyla orantılıdır ve frekansla ters orantılıdır. Bu oran kaynak ve alıcıyı ayıran mesafenin karesidir. Bir optik kanalın zaman alanlı kanal karakteristiği, zamanla değişmeyen CIR tarafından tanımlanır [102-103]. Kanal dürtü Yanıtını (CIR) etkileyen üç faktör vardır: (i) alıcının sapma açısı ve toplama özellikleri (yani FOV) gibi kaynağın yayma özellikleri; (ii) alıcının çeşitli konumları ve yönelimi, vericiye ve cisimden yansımali reflektörler (iii) her bir yansımanın neden olduğu farklı gecikmeler. Belirli bir kaynak $S(x, y, z)$ ve dedektör $D(x, y, z)$ için kanal dürtü yanıtı (CIR), ölçeklendirilmiş Dirac delta fonksiyonu [104] LOS kanalı için, CIR [105];

$$h^0(t; S, D) \approx H(0) \text{rect}\left(\frac{\psi}{FOV}\right) \delta\left(t - \frac{d_i}{c}\right) \quad (1.28)$$

Burada c , ışık hızını belirtir ve dikdörtgen fonksiyon şu şekilde tanımlanır:

$$rect(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 1 \\ 0, & 1 < x < 0 \end{cases} \quad (1.29)$$

İlk sıçramadan dürtü yanıtının hesaplanması [105] tarafından verilir.

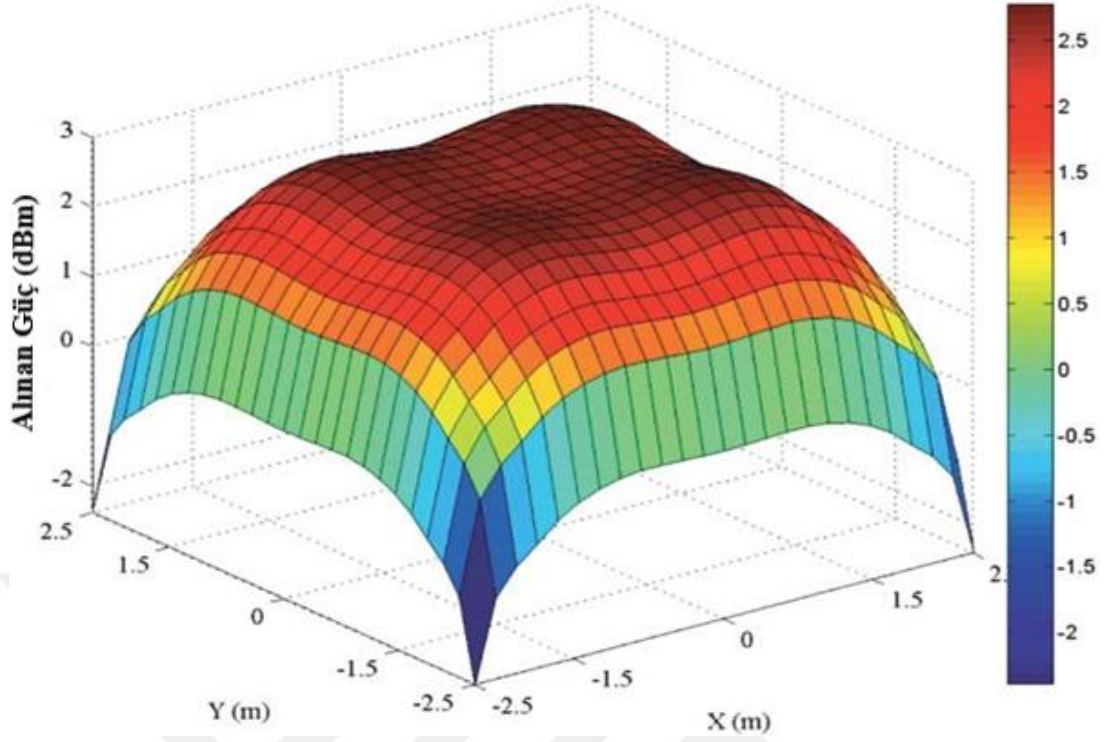
$$h^1(t; S, D) = \sum_{j=1}^N dH_{ref}(0) rect\left(\frac{\Psi}{FOV}\right) \delta\left(t - \frac{d_1 + d_2}{c}\right) \quad (1.30)$$

j , yansıtıcı yüzeyden N segmentinin indeksini temsil eder. Bu nedenle, LOS ve yaygın bileşenlerin toplamı olarak toplam dürtü yanıtları [22,100,105] tarafından verilir.

$$h(t; S, D) = \sum_{j=1}^N \sum_{k=0}^{\infty} h_j^k(t; S, D) \quad (1.31)$$

Burada k basitçe yansımaların sırasıdır.

Program 1.2'de duvarlardan yansımalarından kaynaklanan güç dağılımını gösteren Matlab kodları verilmiştir. Şekil 1.14, alınan P_r gücün dağılımını, yansımaların etki dikkate alınarak gösterir. Gösterildiği gibi, tüm oda için alınan güç $-2,8-4,2$ dBm'dir. Yansıma dahil alınan ortalama güç, yönlendirilmiş alınan ortalama güçten yaklaşık 0.5 dB daha büyüktür.



Şekil 1.14. Alınan P_r gücün yansımalarla dağılımı [267].

1.3.4. Kanal Gecikme Yayılmı (RMS)

Hem doğrudan hem de birinci dereceden yansıyan yollar için bir noktada alınan optik güç (1.25)'de verilmiştir. Çok yollu senaryo için, toplam alınan güç şu şekilde verilir:

$$P_{rT} = \sum_{i=1}^M P_{dir,i} + \sum_{j=1}^N P_{ref,j} \quad (1.32)$$

Burada M ve N , vericilerden belirli bir alıcıya giden doğrudan yolların sayısını ve aynı alıcıya yansıma yollarının sayısını temsil eder, $P_{dir,i}$, i 'nci doğrudan yoldan alınan optik güçtür ve $P_{ref,j}$, yansıtılan j 'den alınan optik güçtür.

Kanal dürtü yanıtının çok yollu zamansal dağılımı, kök ortalama kare (RMS) gecikme yayılımı yoluyla ifade edilebilir. Bu, kanalın semboller arası girişime ne kadar duyarlı olduğunu tahmin etmeyi sağlayacaktır.

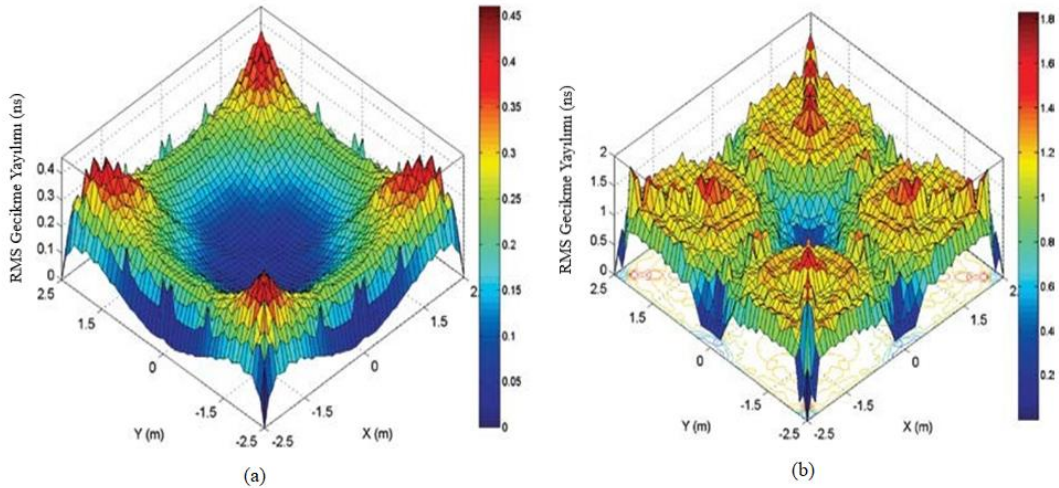
$$D_{RMS} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} (t - \tau_0) h^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt}} \quad (1.33)$$

Burada ortalama gecikme τ_0 ile ifade edilir [106].

$$\tau_0 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t h^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt} \quad (1.34)$$

Ortalama fazla gecikme şu şekilde tanımlanır:

$$\mu = \frac{(\sum_{i=1}^M P_{d,i} t_{d,i} + \sum_{j=1}^N P_{ref,j} t_{ref,j})}{P_{rT}} \quad (1.35)$$



Şekil 1.15. (a) (2.5, 2.5)' da konumlanmış tek bir verici ve (b) (1.25, 1.25), (1.25, 3.75), (3.75, 1.25), (3.75, 3.75)' da konumlanmış dört verici için RMS gecikme dağılımı [267].

RMS gecikme yayılımı şu şekilde de tanımlanabilir:

$$D_{RMS} = \sqrt{\mu^2 + (\mu)^2} \quad (1.36)$$

Burada;

$$\mu^2 = \frac{(\sum_{i=1}^M P_{d,i} t_{d,i}^2 + \sum_{j=1}^N P_{ref,j} t_{ref,j}^2)}{P_{rT}} \quad (1.37)$$

RMS gecikme yayılımını hesaplamak için Matlab kodu Program 1.3'te verilmiştir. Şekil 1.15(a), maksimum ve ortalama 0,4597 ns ve 0,2053 ns değeri gösteren, (2,5, 2,5) ve 70°'lik bir yarı açıda konumlandırılan tek bir verici durumu için RMS gecikme yayılım dağılımını göstermektedir. Sırasıyla (1.25, 1.25), (1.25, 3.75), (3.75, 1.25), (3.75, 3.75) konumlu dört verici ve 70°'lik bir yarı açısı için RMS gecikme yayılma dağılımı Şekil 1.15(b)'de gösterilmektedir. Bu durum için maksimum ve ortalama değerler 1,8284 ns ve 1,096 ns'dir.

Bu nedenle, NRZ OOK modülasyonunu kullanan optik kanal boyunca, eşitlemeye ihtiyaç duymadan izin verilen maksimum bit hızı [107] tarafından verilir.

$$R_b \leq \frac{1}{10D_{RMS}} \quad (1.38)$$

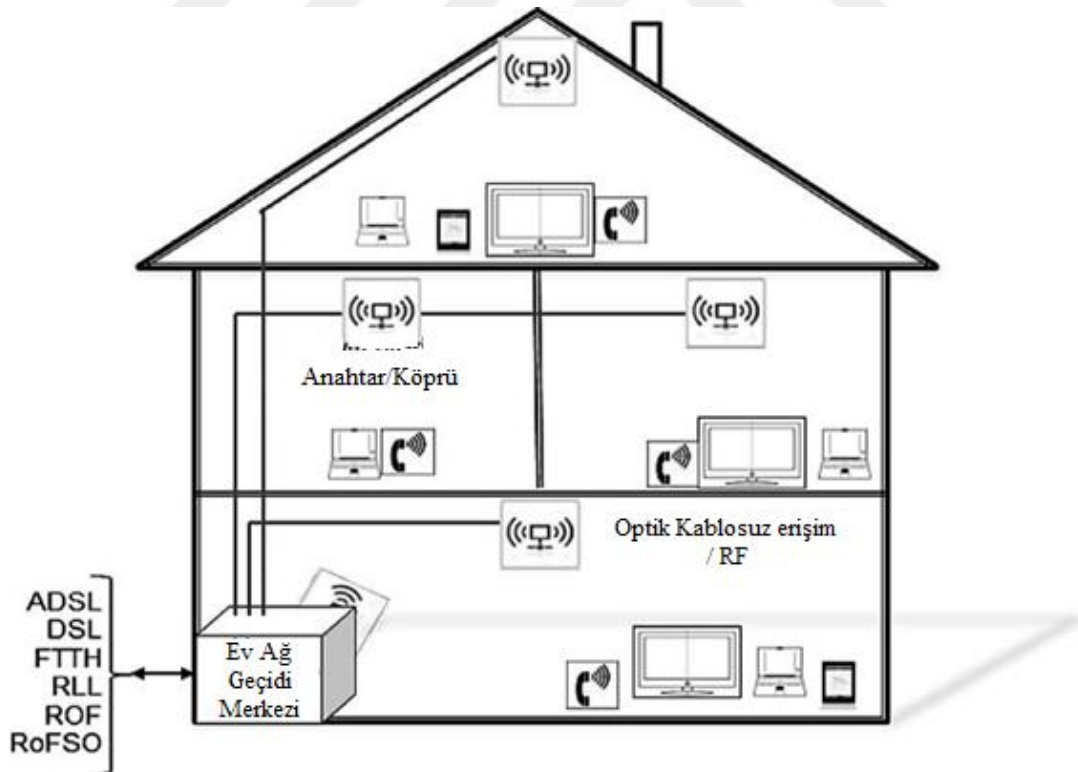
1.4. Ev Erişim Ağı

Evlerde, ofislerde vb. artan yüksek veri trafiğini ele almak için saniyede gigabit veya daha yüksek veri hızlarında multimedya hizmetleri sunmaya ihtiyaç vardır. Radyo Frekans (RF) [192], güç hattı iletişim (PLC) [193], Görünür Işık İletişim (VLC) [194] ve kızılötesi iletişim (IRC) dahil olmak üzere ev erişim ağlarında kullanılan teknolojiler; Şekil 1.16 ve Tablo 1.7'de görülebilir. Bu teknolojiler birbirine bağlıdır ve akıllı bir MAC katmanı tarafından kontrol edilir. Ayrıca MAC katmanı, en iyi bağlantı

performansını korurken kesintisiz iletişim elde etmek için en uygun iletişim teknolojisini seçer [195]. Radyo Frekans (RF) ve PLC teknolojileri, gelen yüksek veri hızlarına sahip bilgileri ev ve ofisler içindeki bir dizi konuma dağıtmak için omurga bağlantıları olarak kullanılır. Her iki kablosuz teknoloji de (RF ve VLC), baz istasyonları ve son kullanıcılar arasındaki bağlantıyı sağlar.

Tablo1.7. Ev erişim ağı teknolojileri [267]

Ev Erişim Ağı Teknolojileri	
Teknoloji	Data Oranı
RF—60 GHz LOS	1 Gbps—Bidirectional
PLC	100 Mbps—Bidirectional
VLC	>100 Mbps—Broadcast
IRC	1 Gbps—Bidirectional



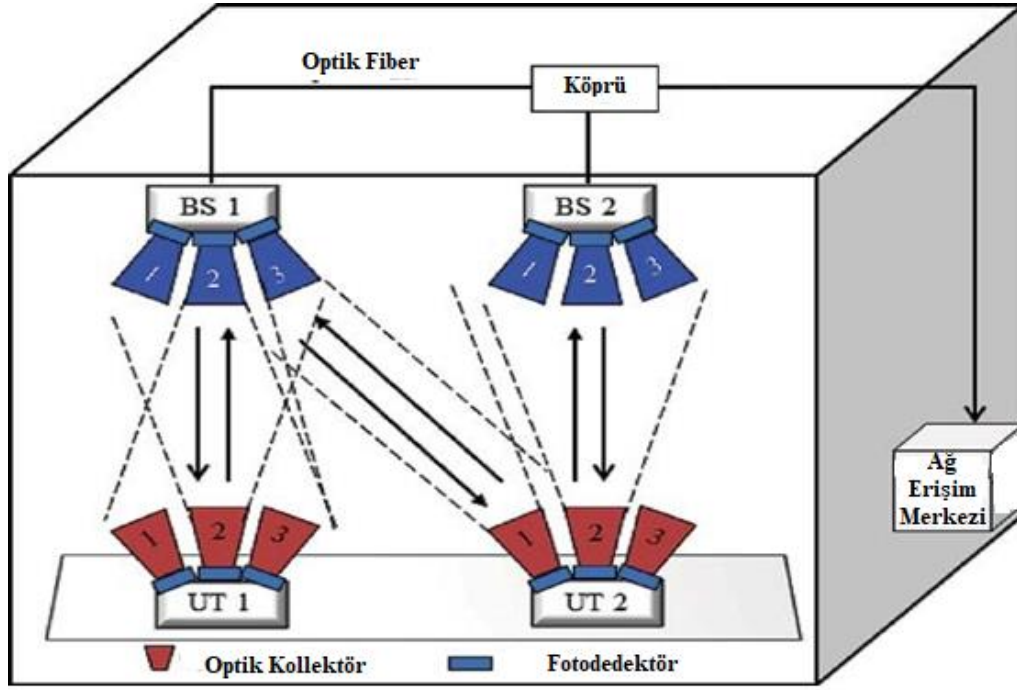
ŞEKİL 1.16. Ev erişim ağı [267].

Görünür Işık İletişim (VLC) sisteminin mimarisi genellikle üç ortak katmandan oluşur: (i) fiziksel, (ii) MAC ve (iii) uygulama. MAC katmanı [120]'yi destekler.

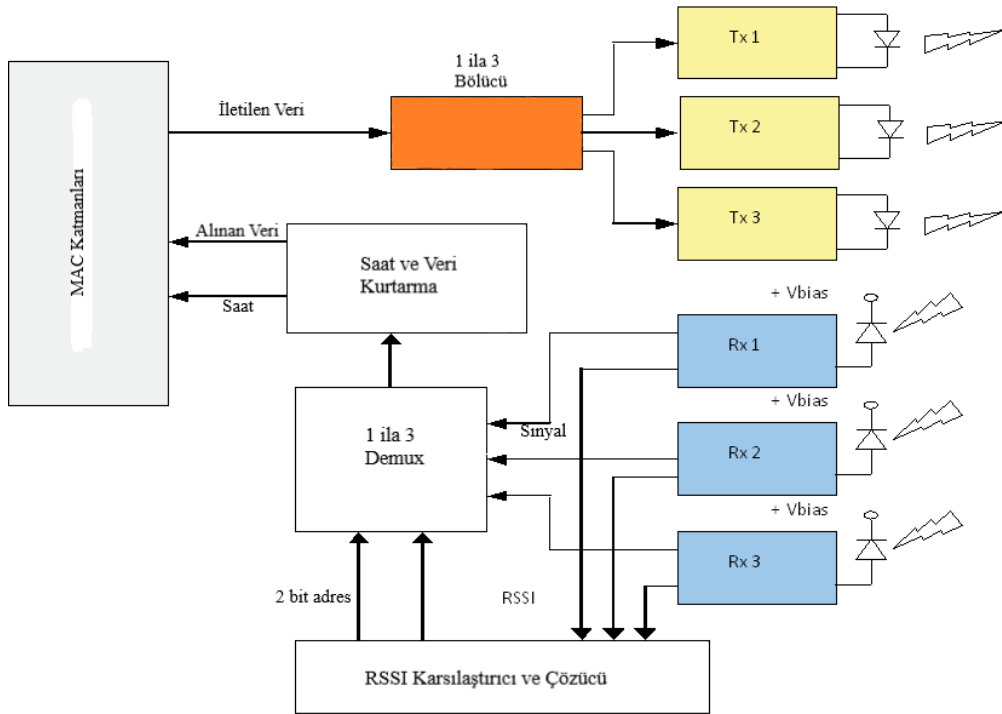
- | | | |
|--|--|--|
| • Hareketlilik | • Karartma | • Görünürlük |
| • Güvenlik | • Titremenin azaltılması | • Renk işlevi |
| • Ağ işaretleri üretimi
cihaz bir koordinatör ise | • VPAN bağlantısının
kesilmesi ve iştirak | • Güvenilir bir bağlantı
sağlamak eş MAC
varlıkları arasında |

IEEE 802.15.7'de Görünür Işık İletişim'in (VLC) üç farklı fiziksel uygulaması tanımlanmıştır. PHY I, PHY II ve PHY III için hesaplanan veri hızları sırasıyla 11,67-266,6 kbps, 1,25-96 Mbps ve 12-96 Mbps'dir. 802.15.7 tarafından desteklenen farklı kanal kodlama şemaları, PHY I için evrişimli kodlar ve Reed Solman (RS) kodları ve titreme azaltma ve DC dengesini ele alan PHY II (iç mekân kullanımı için amaçlanan) için çalışma uzunluğu sınırlı (RLL) kodudur.

Şekil 1.17(a)'da tek boyutlu bir optik kablosuz erişim ağı şematik diyagramı gösterilmektedir. Üç vericiden oluşan baz istasyonu (BS), $\sim 25 \times 8^\circ$ sürekli açısal kapsama sağlar; birbirine ve ağ geçidi hub'ına bir köprü aracılığıyla bağlanır. Her kullanıcı terminalinde (UT), her biri verici kanalıyla eşleşen bir görüş alanına (FOV) sahip üç alıcı bulunur. Bunlar birlikte, BS vericisinini ile eşleşen genel bir alım görüş alanı oluşturur. UT'ler hareket ettikçe kapsama alanı içinde, bir veya muhtemelen daha fazla BS'nin görüş alanı içinde olacaklardır. Elbette, doğru alıcı ve verici kanallarının gerekli bağlantı performansı ölçütleriyle seçilmesini sağlamak için bir tür kontrol şeması gerekir.



(a)



(b)

ŞEKİL 1.17. Tek boyutlu bir optik kablosuz hücresel sistem: (a) blok şeması ve (b) bir BS/UT modülünün fonksiyonel blok şeması [267].

Tablo 1.8. Tek Boyutlu VLC Hücresel Sistem için Bağlantı Bütçesi [267]

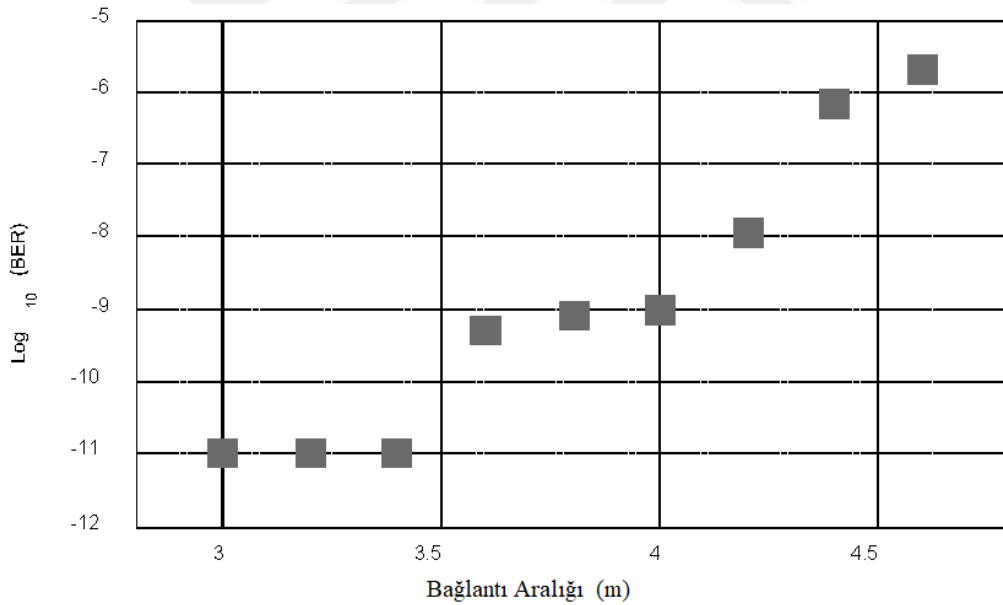
Tek Boyutlu VLC Hücresel Sistem için Bağlantı Bütçesi	
Parametre	Hücre Merkezi
Ortalama iletim gücü	+14 dBm (25 mW)
3 m'de alınan yoğunluk	-23 dBm/cm ²
Tahmini toplama alanı (eksen üzerinde)	0.63 cm ²
Mevcut güç	~-25 dBm
Ek alıcı kaybı	~7 dB
Mevcut APD alınan hassasiyet	~35dBm
Ölçülen sistem marjı	~3dB

Şekil 1.17(b), BS'lerin ve UT'lerin fiziksel katmanının fonksiyonel blok diyagramını göstermektedir [196]. MAC'den gelen iletim verileri bölünür ve ışık kaynaklarının yoğunluğunu modüle etmek için kullanılır. Alıcıların çıkışları, 'aktif alıcıyı seçmek için alınan sinyal gücü göstergesi (RSSI) karşılaştırıcısına ve çıkışı 3'e 1 çoklayıcıya bir kod çözücü modülü uygulanır. Belirli bir alıcıyı seçmek için basit bir güç eşik seviyesi uyarlanmıştır. İki alıcının RSSI değerlerinin eşik seviyesinden büyük olduğu bir durumda, verilen indeks numarası (örn. Rx1) daha düşük olan alıcı seçer. "Yeterince iyiyi seç" yaklaşımı olarak adlandırılan bu teknik, maksimum oranlı birleştirme veya en iyiyi seç şemalarıyla karşılaştırıldığında yetersizdir, ancak uygulanması oldukça basittir. Tablo 1.8, sistem için bağlantı bütçesini göstermektedir.

1.5. İç Mekân Yerleşimi

Akıllı ortamlar kavramının ortaya çıkması ve buna bağlı olarak kablosuz sensör ağlarının ve nesnelerin internetinin (IoT) gelişmesiyle birlikte, özellikle iç ortamlarda, konumlandırma sistemlerinde yüksek düzeyde araştırmalara tanık oluyoruz. RF tabanlı küresel konumlandırma sisteminin (GPS), dış ortamlarda yaygın olarak kullanılan en güvenilir konumlandırma tekniklerinden biri olduğu genel olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, GPS tabanlı sistemlerin; (i) kapalı ortamlarda, tünellerde vb. kullanılamaması; (ii) düşük konumlandırma doğruluğu (birkaç metre); (iii) yüksek maliyet ve (iv) yüksek binaların LOS'u kapattığı, kullanımı zor kentsel alanlarda uydulardan gelen sinyal iletiminin zor olması, gibi dez avantajları sıralanabilir. İç

mekân uygulamaları için GPS'i tamamlamak üzere; (i) RF tanımlama (RFID), Wi-Fi, çoklu yol ve uzun yanıt süresi nedeniyle düşük konumlandırma doğruluğu (PA) sunan ZigBee ve Bluetooth ve (ii) yüksek uygulama maliyeti pahasına yüksek PA sunan ultra geniş bant ve kızılötesi teknikleri kullanılabilir [197–199]. Kızılötesi radyasyona ve ultrasona dayalı iç mekân konumlandırma sistemleri (IPS'ler) ek kaynaklara ihtiyaç duyar. Alternatif olarak, her ikisinden de büyük ilgi gören beyaz LED ışıklara (yani VLC) dayalı son derece doğru ve güvenilir IPS'ler akademik ve endüstriyel olarak; (i) yüksek konumlandırma doğruluğu (santimetre altı); (ii) lisanssız operasyon sunması (iii) her yerde kullanılabilmesi (iv) insan sağlığına zararlı olmaması; (v) radyo frekansı (RF) tabanlı girişim olmaması ve (vi) ek vericilere ihtiyaç duymadan düşük maliyetli ön uçlarda ikili işlevsellik sağlaması avantajlar olarak sıralanabilir [200–202]. Ek olarak, düşük bant genişliğine sahip RF tabanlı sistemler, özellikle iç mekân senaryolarında hem düşük kaliteli iletişim hizmetleri hem de düşük konumlandırma doğruluğu sunar.



Şekil1.18. Tek boyutlu bir hücreli VLC sistemi için bağlantı marjına karşı BER [267].

Şekil 1.18, ideal bir oda için ideal olan 4 m bağlantı açıklığına kadar hatasız çalışmayı ($BER < 10^{-9}$) gösteren eksen üstü bağlantı aralığına karşı bit hata oranı (BER) performansını gösterir.

VLC tabanlı konumlandırma sistemleri; az bir değişiklik uygulanarak halihazırda LED tabanlı aydınlatma sistemlerini (yani ışık baz istasyonu) kullandıkları

için ucuz bir şekilde kurulabilir. Alıcı uça; kimlik kodları (IC) veya verici baz istasyonunun (yani LED'ler) coğrafi konumu ve herhangi konumlandırma süreci için diğer ilgili bilgiler bulunur. Bir mobil cihazın konumunun belirlenmesi için LED lambaların konumunda bilinmesi gerekir. Bu durumda, alıcı (yani bir mobil cihaz), bir oda içindeki LED ışıkların konumlarını içeren (önceden yüklenmiş) bir veritabanından IC'ye erişmesi gerekir. Alıcı olarak bir IS (yani bir kamera) kullanıldığında, VLC IPS'ler, robotik görüş veya artırılmış gerçeklik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan görüş tabanlı yerelleştirmeye neredeyse benzer. İki teknik arasındaki temel fark, bir mobil cihazın (yani alıcının) konumlandırma verilerini elde etme şeklidir. IS tabanlı VLC IPS'lerde, birden fazla LED, tanımlayıcılarını veya koordinat bilgilerini iletir. Alıcı tarafında, birden fazla LED'den alınan bilgilerin (yani IC'ler veya koordinat verileri) kodunu çözmek ve LED'lere göre konumunu ve yönünü belirlemek için bir kamera kullanılır. Vizyon tabanlı IPS'lerde ise veriler; belirli bir ortamın yer işaretlerinin işlenmiş görüntülerinden elde edilir. Aslında LED'ler yapay yer işaretinin bir parçası olabilir. Ancak bu LED'ler yalnızca modüle edilmemiş ışık yayar ve bunlar hiçbir bilgi içermeyen sinyallerdir. IS tabanlı VLC IPS'lerde, tüm süreç (i) kameranın bilinmeyen konumunu belirlemek için referans noktalarından (yani LED'ler) alıcıya (yani bir kameraya) olan mesafe ölçümü ve (ii) LED'ler tarafından iletilen LED koordinatları veya IC bilgisi şeklinde özetlenebilir.

Görünür ışık konumlandırma, radyo frekansının (RF) yetersiz kaldığı birçok yerde güvenle kullanılabilir. Örneğin, hastanede MRI tarayıcılarına herhangi bir müdahaleye neden olmadan kullanılabilir. Görünür Işık İletişime (VLC) benzer şekilde, VLC tabanlı konumlandırma hastanede devreye alınabilir. Ayrıca VLC tabanlı konumlandırma; imalat sanayi, yer altı ve su altı madenleri gibi RF'e uygun olmayan diğer ortamlarda da kullanılabilir.

Son yıllarda bir dizi uygulama için, ışık tabanlı IPS'den yararlanma konusunda artan araştırma faaliyetleri görmekteyiz. [200,203,204]'de yer alan çalışmalar dahil olmak üzere VLC-IPS için uyarlanabilecek bir dizi konumlandırma tekniği vardır;

- i. (1) alınan sinyal gücü (RSS) [205,206] (2) varış zamanı (TOA) [207], (3) varış zamanı farkı (TDOA) temelinde üçgenleme yöntemleri (veya görüntüleme dışı) [208,209], (4) varış açısı (AOA) ve (5) varış aşaması (POA) veya faz farkı varış

(PDOA) [210]. Bunlar, konum kimliği ve LED sinyalinin alınan gücü için PD tabanlı IPS sistemlerinde yaygın olarak benimsenmiştir.

ii. Bir sahnenin parmak izine ve geçmiş konumuna dayalı sahne analizi. Görüntü tabanlı IPS'nin PA'sı (yani bir kamera kullanarak), görüntüleme olmayan konumlandırma şemalarından daha yüksektir. Bununla birlikte, konumlandırma algoritması karmaşıktır. Ayrıca konumlandırma hızı, görüntü işleme tekniği ile sınırlıdır.

iii. Yakınlık algoritmaları. Basittir ancak doğruluğu sistemin çözünürlüğü kadar iyidir [197]

iv. 3B; gerçek dünyanın bir kameranın 2B görüntüsüne yansıtılması ile oluşan geometriyi analiz etmeye dayanan bir programdır. Bilgisayarla görme, IS poz tahmini, 3B nesneyi yeniden oluşturma, nesneyi tanıma ve izleme, hareket tahmini vb. için kullanılabilir. (1) tek görünüm geometrisi olarak sınıflandırılır ve gerekli verileri çıkarmak için tek bir görüntü kullanılır. Fotoğraf çekerken kameranın her 3B koordinat noktasını bir 2B görüntü noktasına eşlediği unutulmamalıdır ve (2) birden fazla kameradan alınan bir dizi görüntü veya tek bir kamera kullanılarak birden çok görüntü ile oluşturulan çoklu görünüm geometrisi kullanılır. Tahmini tamamlamak için bilgisayarla görme tekniklerinin ve optik kamera iletişiminin birlikte kullanılabileceği unutulmamalıdır. Kameranın bilinmeyen konumu ve yönü bu aşamada önemlidir.

Geometrik özellikleri kullanan üçgenleme yöntemi; ışık kaynaklarının yoğunluk modülasyonuna ve doğrudan algılamasına (IM/DD) dayalı olarak RSS, TOA, TDOA kullanarak iletim mesafesini (yani konumu) tahmin eder [200]. En basit ve yüksek tahmin doğruluğu sunan ve özellikle MIMO-VLC tabanlı IPS için en yaygın şekilde benimsenen yöntemdir [211]. Ancak, alıcının konumunu doğru bir şekilde tahmin etmek için en az üç vericiye erişim gerektirir [211]. RSS'de, mesafeleri doğru bir şekilde tahmin etmek için, optik alıcının birden fazla vericiden parazit olmadan sinyal alması gerekir [204,212]. [210]'da 4–10 cm'lik gelişmiş PA ile RSS elde etmek için iki PD kullanan, diferansiyel algılamaya dayalı bir IPS önerilmiştir. [213]'te, bir iç ortamdaki mobil hedeflerin izlenmesi için RSS kullanan VLC tabanlı bir IPS önerilmiştir. Ayrıca, trilaterasyon ile hesaplanan PA'yı (yani 3,4 cm) iyileştirmek için bir Kalman filtresi kullanılmıştır. [214]'te, izleme yaklaşımı olan bir IPS RSS ve genişletilmiş bir Kalman filtresinin bir kombinasyonu; düşük SNR seviyelerinde, iç mekandaki beklenen gücün önceden bilinmesine dayalı olarak önerilmiştir. Bu düzgün olmayan güç dağılımları ve

aralıklı ölçümler sunar. Ancak RSS tabanlı üçgenleme yönteminde; kapalı ortamdaki insanlar ve sabit (veya mobil) nesneler nedeniyle vericiler geçici veya kalıcı olarak engellenebilir. Bu, üçgenleme algoritmasının uygulanmasında alıcıya (kullanıcıda) yetersiz bilgi aktarımına ve hatalı konumlandırmaya neden olur. Hem TDOA/TOA hem de POA/PDOA teknikleri, vericiler arasında çok doğru bir zaman senkronizasyonu gerektirir [215]. [216]'da IPS, tanımlama amaçları için her LED'in önceden atanmış bir frekansta benzersiz bir monoton sinyal ilettiği birden çok LED kullanmıştır. Bu şemada, verici ve alıcı arasındaki bağlantı kazancını tahmin etmek için alıcıdaki iletim gücünün bilinmesi gerekmez. Ayrıca farklı LED'lerden alınan sinyalin mükemmel senkronizasyonu gerekli değildi, çünkü sadece sinyal yoğunlukları konumlandırma için farklı frekans noktaları gerektirir. [217]'de, PA'nın alıcı sayısı ile arttığı AOA'yı ölçmek için dairesel PD dizilerinin bir kombinasyonu önerilmiştir. [218]'de, mekansal olarak farklı VLC ağları için belirtilen tahmin ve hareket izleme, verici konumlarının ve yönelimlerinin bilindiği ve her bir armatürden gelen sinyallerin ayrı ayrı ölçüldüğü varsayılarak, armatürler ve iç mekân konumlandırması arasındaki geçişin araştırıldığı rapor edilmiştir.

Birden fazla LED kullanımının, adresleme gerektiren hücreler arası girişime yol açtığını unutulmamalıdır. [219,220]'de, çoklu LED'lerin varlığından kaynaklanan hücreler arası girişimi azaltmak için kod bölmeli çoklu erişim yoğunluk modülasyonu LED'lerine dayalı IPS kullanılmıştır. AOA'ya ve maksimum olasılık ilkesine dayanan üç boyutlu (3D) VLC IPS'nin (artan karmaşıklık pahasına) 10 cm'lik bir doğruluk sunduğu gösterilmiştir [221]. [222]'de ters bir 3D VL IPS RSS ve genetik algoritmaya dayalı, yüksek hassasiyetli konumlandırma (artan hesaplama karmaşıklığı) çalışması gösterildi. [219]'da RSS ve değiştirilmiş parçacık sürüsü optimizasyon algoritması kullanan bir 3D VL IPS, 3,9 mm'lik bir PA ile rapor edilmiştir, ancak bu LED'ler için oldukça kararlı ışık gücü seviyeleri gerektirmektedir. [223]'te, 1 cm'den daha az simüle edilmiş bir PA ile RSS ve tabu aramasına dayalı bir 3D IPS rapor edilmiştir. Bununla birlikte, her bir IPS yüksek hacimli hesaplama içerdiğinden, konumlandırma süresi ideal değildir ve bu nedenle gerçek sistemlerde uygulanması zordur. Hem konumlandırma süresi hem de PA dikkate alınarak, 20 cm'lik bir PA ve 0,36 s'lik bir konumlandırma süresi maliyeti ile bir 3D VL IPS [224]'te raporlanmamıştır. Birleşik parmak izi ve K-en yakın komşuyu kullanan VL IPS'ye dayalı bir 3B konumlandırma [225]'te bildirilmiştir.

Ancak çok yüksek bir hesaplama süresinde ve K'yi elde etmek için bilinen tüm numunelere olan mesafesini belirlemelidir [226].

Yakınlık yöntemi, bilinen konumlara ve benzersiz kimliklere sahip yoğun LED dizilerinden yararlanan ve konumlandırma için RSS ölçümlerini kullanan bu yaklaşımların en pahalısıdır [227]. Parmak izi analizine dayalı yöntemlerde, gerçek zamanlı ölçümler parmak izi veritabanıyla eşleştirilerek hedefin konumu belirlenir [228]. Bu şemanın dezavantajı, ortamdaki değişiklikler ve parmak izi veri tabanının düzenli olarak güncellenmemesi nedeniyle konumlandırma doğruluğunun tehlikeye girmesidir. Yakınlık yöntemi çok basittir, ancak doğruluk yalnızca sistemin çözünürlüğü kadar iyidir [203]. Ancak, kablosuz iletişim için ek görüntü işleme yetenekleri gerektirir ve veri hızı, görüntü işleme hızına bağlıdır.

Görüntü tabanlı IPS; karmaşık bir konumlandırma algoritması, daha yüksek bellek (tekrarlayan görüntü yakalama için), görüntülenmeyen IPS'ye kıyasla yüksek PA için kameralar, LED'ler ve varış açısı (AOA) tekniğini kullanır [229]. Bu şemada, döner deklanşörü [230], koordinat kodlayıcı ve küresel deklanşörü temel alır [231]. Bu nedenle, konum hataları, düşük piksel çözünürlüğünden ve mercekten kaynaklanır. Yukarıda belirtilen şemaların, engelleme ve gölgeleme gibi iç ortam koşullarından etkilenmemek için en az üç Tx kullanımını gerektirdiğini unutulmamalıdır. Görüntü konumlandırma yöntemini kullanarak, bir iç mekânda hem alıcının konumu hem de yönü ölçülebilir. [232,233-235] dahil çoğu araştırma çalışmasında, aslında gerçek dünyadaki LED'lerin koordinatlarının bilinmediği, alıcının konumunu belirlemeden önce bilindiğinin varsayıldığına dikkat edilmelidir. [235]'te, daha fazla referans ışık kaynağı yakalamak için balık gözü lens donanımlı bir kamera kullanan bir VL IPS sisteminin çok daha iyi olduğu rapor edilmiştir. [236]'da ortalama 3D PA ile geleneksel LM tabanlı konumlandırma algoritmasından 80 kata kadar daha hızlı ve daha güvenilir olan, yinelemesiz konumlandırma algoritmasına sahip bir akıllı telefon kamerası kullanan bir VL IPS sistemi 160 cm'lik bir test yüksekliği için 8,5 cm olarak rapor edilmiştir [237].

Alan bölmeli çoğullama özelliklerine sahip parazitsiz LED'lerin görüntülerini kullanan IS tabanlı IPS'de, her bir LED'in algılanan parlaklık seviyesi RSS'ye çevrilir. Bununla birlikte, (i) farklı aydınlatma seviyelerine sahip LED'ler ve (ii) iletişimi güç konum, yani uzun koridorlar, küçük odalar vb. gibi bir dizi sorun vardır. Herhangi bir zamanda konum için yalnızca iki LED ışığı yeterlidir [231,238].

IS tabanlı IPS'de birbirini takip eden iki görüntüyü 'çıkarak', düzlemsel hareket vektörleri hesaplar. İlk görüntüde bulunan birçok özelliğin ikinci görüntüde yeniden tanınabilmesi için iki görüntünün üst üste binmesi gerekir; bu da elbette yeterince yüksek kare hızına, net ve keskin görüntüler için iyi optik özelliklere sahip bir kamera gerektirir. [239]'da bir web kamerası kullanan bir monoküler robot görüş sistemi ve dönüşü ve ötelemeyi algılayabilen ve aracın hareketini aktif olarak düzelten bir dizüstü bilgisayar raporlanmıştır. Ancak bu tür sistemler çok hantal, maliyetli ve enerji tüketen sistemlerdir. [240]'ta, analog bir pusula, bir optik bilgisayar faresi ve küçük bir PIC mikrodenetleyicisinden oluşan hafif bir sistem rapor edilmiştir. Ancak bu sistem robotun hızından daha yüksek hızlarda çalışmayabilir. Yürüme hızında alışveriş vb. İç mekân uygulamalarında kullanılmak üzere düşük maliyetli ve enerji verimli RFID okuyucu önerilmiştir.

2. BÖLÜM: GÖRÜNÜR IŞIK İLETİŞİMİ (VLC) MODÜLASYON TEKNİKLERİ

2.1. Giriş

Bilinen geleneksel aydınlatma sistemlerinde (flüoresan ve akkor lambalar), normalde tek bir lambayı veya birkaç lambayı kontrol etmek için bir anahtar kullanılır. Bununla birlikte, ışığı kontrol etmeye yönelik bu tür şemalar, her biri farklı bir aydınlatma seviyesi gerektiren birkaç LED'in kullanılabileceği LED aydınlatma durumları için uygun olmayabilir. Bu nedenle, her birine bir anahtar koymak uygulamada pratik olmayacaktır. Dolayısıyla LED, farklı aydınlatma kontrol mekanizmalarına ihtiyaç duyar.

Bit açısı modülasyon, darbe genişliği modülasyonu vb. gibi birçok seçenek kullanılarak, hedef konumlarda çok sayıda LED ile istenen aydınlatma seviyesini sağlamak için merkezi denetleyici (CC) kullanılır. LED aydınlatma, görev döngüsünün ürünü ve belirli bir konumdaki alınan sinyalin genliği ile karakterize edilir. Sinyal görev döngüsü göz önüne alındığında, tahmin edilebilir ışık sinyalinin genliğidir. Sensör sinyali işleme (SSP) modülünün görevi, her bir LED'in aydınlatma seviyesini tahmin etmektir. CC, SSP çıkışına ve her bir LED'in renk bilgisine dayanarak, gerekli aydınlatma seviyesini elde etmek için LED'ler uygun görev döngülerini belirler ve her bir LED'in yoğunluğu farklı şekilde modüle edilir.

Günümüz binalarında, otomatik açma/kapama ve karartma, yaygın olarak kullanılan temel özelliklerdir. Karartma kontrol işlevselliğine olan ilgi, sürekli artan

teknolojinin ardından daha da artmıştır. Küresel enerji tüketiminin önümüzdeki 25 yıl içinde %60 daha artması beklenmektedir [113].

LED ışıkların aynı anda hem aydınlatma hem de veri iletişim kaynağı olarak kullanılabilmesi için, karartma ve iletişim sinyalleri bağımsız olmalı ve birbirini engellememelidir. LED'lere gelen akımın bu nedenle hem kısma hem de veri iletişim sinyallerini taşıması gerekir. Karartma seviyesini kontrol etmek için görünür LED'lerde, yaygın olarak kullanılan bir dizi karartma kontrol mekanizmaları vardır [114,115]. Genlik modülasyonuna dayalı karartma en basit yaklaşımdır, burada LED'e enjekte edilen DC akım yoğunluğu modüle eder, yayılan ışık akısını kontrol eder [116]. Ancak bu yaklaşım, yayılan ışığın renk koordinatlarında değişikliklere neden olabilir. Darbe zaman modülasyonu (PWM, SWFM, vb. gibi) hem karartma hem de veri iletişimleri için bu nokta çok ilgi çekicidir. Burada PWM ile alt taşıyıcı darbe konum modülasyonu (SC-PPM), LED parlaklığını kontrol etmek için alternatif bir tekniktir ve uygulaması basittir [117]. Ancak kısma frekansı; güvenilir veri bağlantı performansını garanti etmek için SC-PPM frekansı, buna ek olarak, PPM'ye dayalı sinyal formatı ile sınırlıdır [118]. İlerleyen bölümde, bir dizi karartma düzeni açıklanacaktır.

2.2. ON-OFF Anahtarlama (OOK) FEC ile Hata Düzeltmesi

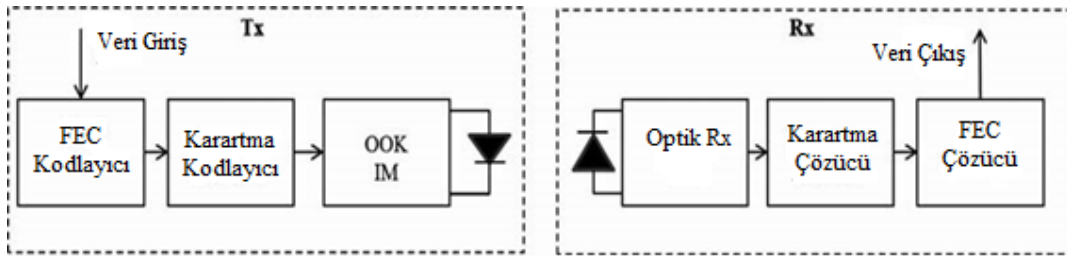
Maliyeti ve basitliği nedeniyle IM/DD, OWC'de tercih edilen ideal bir sinyal iletim ve alım yöntemidir. Bu nedenle, OOK-NRZ kullanan temel bant modülasyon teknikleri, VLC için en popüler ve en çok bildirilen modülasyon tekniklerindendir [22,26–28,119]. 0 ve 1 bitlik akışların eşit olasılıkla, OOK VLC'deki karartma seviyesi %50'dir ve bu, LED sürücü akımı ile (yani, 0 ve 1 sinyal seviyelerini değiştirerek) değiştirilebilir. Ancak, mevcut seviyenin değiştirilmesi renk kaymalarına yol açabilir. Daha yüksek akım seviyesi, LED'in doyumuna ve doğrusal olmamasına neden olabilirken, daha düşük akım seviyeleri, azaltılmış SNR (yani, daha yüksek BER) ve iletim aralığı ile sonuçlanacaktır. İleri hata düzeltme kodunun (FEC) ve karartma modüllerinin seri birleşimine sahip OOK yoğunluk modülasyonlu bir Görünür Işık İletişim sisteminin şematik diyagramı Şekil 2.1'de verilmektedir.

En basit VLC sistemlerinde, kullanıcı tarafından ayarlanan isteğe bağlı karartma seviyesine ulaşmak için FEC kodlu veri çerçevesine 0 veya 1 değerli telafi sembollerinin eklendiği telafi süresi karartması benimsenir [120]. Alıcıda, bir karartma

kod çözücü, (hata düzeltme için) FEC kod çözmeden önce kodlanmış veri çerçevesini kurtarmak için telafi sembollerini kaldırır. Bu şemanın dezavantajı, istenen karartma seviyesini elde etmek için dolgu görevi gören telafi sembolleri herhangi bir yararlı bilgi taşımadığından, azaltılmış veri çıkışıdır. Karartma kontrolü elde etmek, verim azalmasının üstesinden gelmek ve tahmin edilen verim sınırına ulaşmak için bir ters kaynak kodlama (ISC) şeması kullanılabilir [90]. Ancak bu kazanç oldukça gürültülü bir kanalda bir FEC koduyla kullanıldığında sistem bit hata oranı (BER) performansına neden olur. Kaynak kodlamada (yani, bir veri sıkıştırma şeması), kaynak entropisini en üst düzeye çıkarmak için denkleştirilemeyen bitler veya semboller içeren önyargılı bir girdi veri akışının eşlenebilir 0 ve 1 bitlere dönüştürüldüğü unutulmamalıdır.

OOK (VOOK) değişkeninde her bir bit birden fazla yuvaya bölünür ve bunlar daha sonra kısma faktörüne ve kod sözcüğüne göre 1'ler veya 0'lar ile doldurulur. VOOK kod sözcükleri Tablo 2.1'te gösterilmektedir, burada γ karartma faktörüdür ve d veri bitleridir.

$$\gamma_{VOOK} = \begin{cases} \frac{1}{2} \delta_d & 0 < \gamma \leq 0.5 \\ \frac{1}{2} \delta_d & 0.5 \leq \gamma < 1 \end{cases} \quad (2.1)$$



Şekil 2.1. OOK yoğunluk modülasyonlu bir Görünür Işık İletişim sisteminin şematik diyagramı [267]

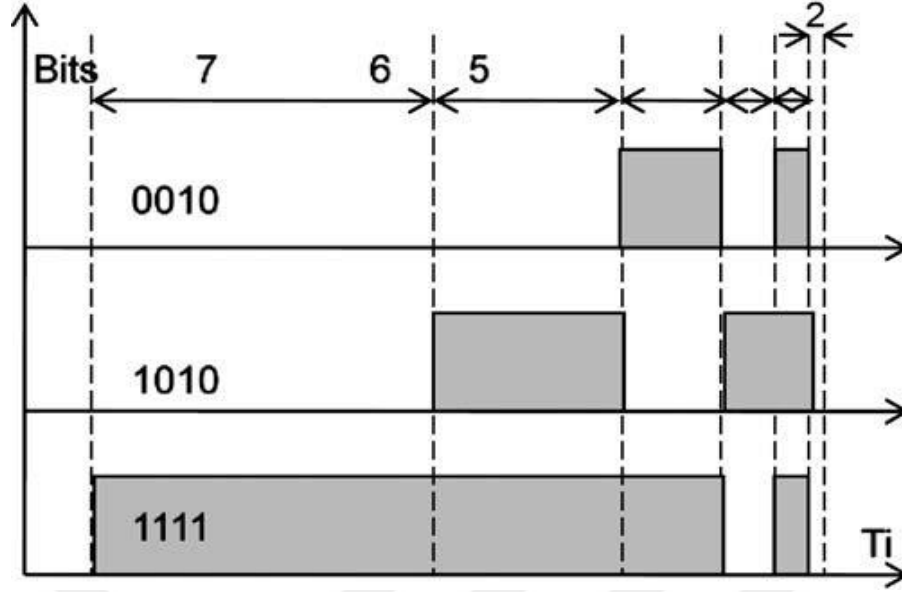
Tablo 2.1 VOOK Kod Kelimesi [267]

VOOK kod kelimesi			
		VOOK	
γ	δ	δ_d	Kelime kodu
1.0	1.0	0.0	1111111111
0.9	0.9	0.2	dd11111111
0.8	0.8	0.4	dddd111111
0.7	0.7	0.6	dddddd1111
0.6	0.6	0.8	ddddddd11
0.5	0.5	1.0	dddddddddd
0.4	0.4	0.8	ddddddd00
0.3	0.3	0.6	dddddd0000
0.2	0.2	0.4	dddd000000
0.1	0.1	0.2	dd00000000
0.0	0.0	0.0	0000000000

VOOK kısma kontrolü $P_r \{d = 0\} = P_r \{d = 1\} = 0,5$ gerektirir [89]

2.3. Bit Açı Modülasyonu (BAM)

BAM aynı zamanda ikili kod modülasyonu olarak da adlandırılır ve LED kısma seviyelerini kodlamak için ikili veri modelini kullanır [121]. Şekil 2.2 gösterildiği gibi BAM darbe dizisindeki her bit, ikili kod sözcüğüyle eşleşir. Örneğin, 8 bitlik bir BAM sisteminde, en önemli bit yani, b_7 , 2^7 genişliğindeki darbeye eşleşir, bit 6, 2^6 genişliğindeki darbeye eşleşir. En önemsiz bit (yani, b_0) bir birim genişliğin darbe genişliği ile eşleşir. Bu şema uygulanması kolaydır ve azaltılmış titreme efekti sunar.



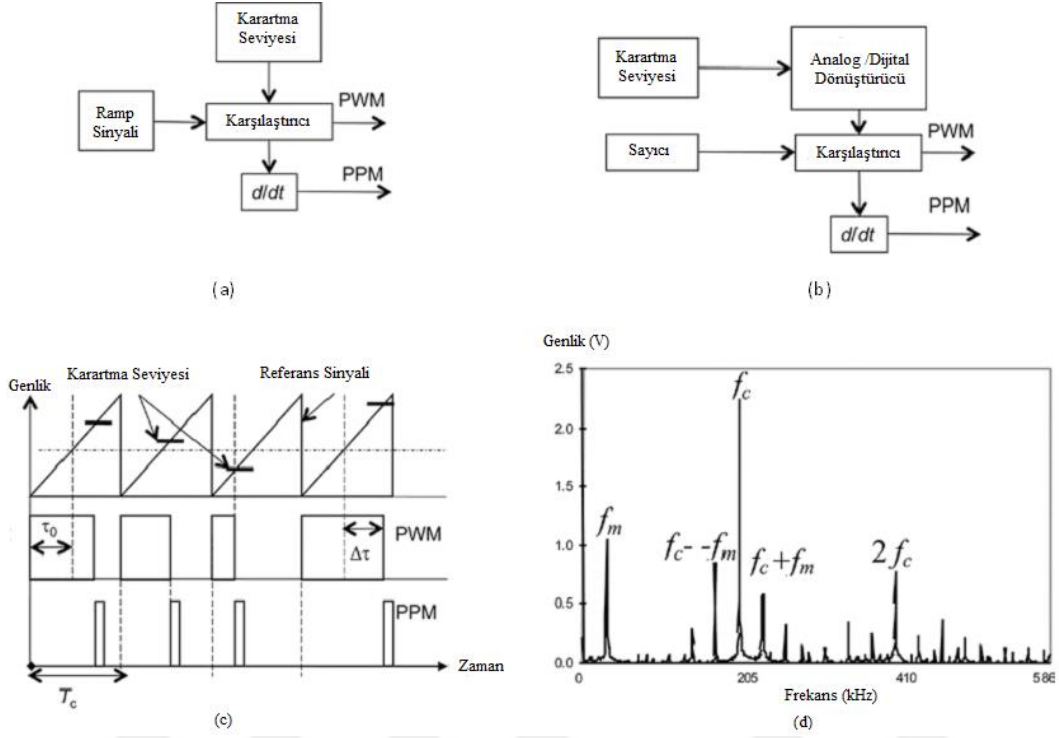
Şekil 2.2. VLED karartma kontrolü için BAM sinyalleri için zaman dalga biçimleri [267].

2.4. Darbe Modülasyon Şemaları (PAM)

Veri iletimi ile karartma elde etmenin geleneksel yöntemi, darbe genlik modülasyonunu (PAM) ve darbe genişlik modülasyonunu (PWM) birleştirmektir [122,114–116]. Darbe süresinin LED sürücü akımını kontrol etmek ve böylece karartma seviyesini (parlaklık) ayarlamak için kullanıldığı PWM tabanlı karartma şemaları; yoğunluk/genlik modülasyonuna dayalı karartma mekanizmalarındaki akım değişimi nedeniyle dalga boyu kaymasından zarar görmez [116]. PWM tabanlı şemalarda, modülasyonu basitçe kontrol ederek çok çeşitli parlaklık seviyelerine (0–100%) ulaşılabilir. Kısmi sinyali frekansı tipik olarak 100 Hz'nin üzerindedir; bu nedenle insan gözü anahtarlamayı algılayamaz [114,115].

Darbe genişlik modülasyonu (PWM), yayılan ışığın rengini etkilemeden ışığın parlaklığını değiştirmek için bir kare dalganın ön veya arka kenar modülasyonunun kullanıldığı iletişim sistemlerinin yanı sıra güç mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır [123]. Şekil 2.3.(a, b)'de gösterildiği gibi, darbe genişlik modülasyonu (PWM) sinyali analog veya dijital alanlarda üretilebilir, ikincisi çok daha iyi karartma seviyesi çözünürlüğü sağlar. Şekil 2.3.(c)'deki kth plus'ın süresi, şu şekilde verilir:

$$\tau_k = \tau_0 [1 + M_{pwm} m(kT_c)] \quad (2.2)$$



Şekil 2.3. Darbe genişlik modülasyonu (PWM) ve darbe genlik modülasyonu (PPM) blok şemaları: (a) dijital, (b) analog dalga biçimleri, (c) PWM dalga biçimleri ve (d) PWM frekans spektrumu [267].

Burada τ_0 , $M_{pwm} m(kT_c) = 0$ 'ı temsil eden modüle edilmemiş darbe genişliğidir ve $M_{pwm} = 2\Delta\tau/T_c$, modülasyon indeksidir ($0 < M_{pwm} < 1$). $\Delta\tau$ tepeden tepeye darbe genişliği modülasyonudur, T_c darbedir ve $m(t)$ girişi teklidir. Doğal olarak örneklenmiş PWM dalga formunu modüle eden bir arka kenarın frekans spektrumu şu şekilde ifade edilebilir:

$$V_{ns}(t) = \frac{1}{2} + \frac{M_{pwm}}{2} \sin \omega_m t + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\omega_c t)}{n\pi} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{j_0(n\pi M_{pwm})}{n\pi} x \sin(n\omega_c t - n\pi) - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=\pm 1}^{\pm \infty} \frac{J_k(n\pi M_{pwm})}{n\pi} x \sin[n\omega_c + k\omega_m)t - n\pi] \quad (2.3)$$

ω_m , ω_c sırasıyla giriş sinyali ve referans (taşıyıcı) sinyal frekanslarıdır. $J_k(x)$, k dereceli birinci türden bir Bessel fonksiyonudur. Giriş sinyali olmadığında (yani $m(t) = 0$), bu seri kare taşıyıcı dalganın Fourier serisine indirgenir. Şekil 2.3(d), giriş sinyalini, referans frekansını, harmonikleri ve bir dizi yan ton $f_c \pm f_m$ içeren PWM frekans spektrumunu gösterir.

Örtüşen PPM (OPPM) olarak bilinen alternatif bir modülasyon şeması, daha yüksek kapasite ve esnek kısma sunar [124]. Fiziksel katmanda PWM'ye dayalı veya modülasyon derinliğini değiştirerek aydınlatma ve veri iletişimi için, çift amaçlı bir karartma yöntemi de kullanılabilir [117]. Verilerin her biri; log k -bitlik gruplara ayrıldığı ve her grup için yalnızca tek bir darbenin tahsis edildiği alt taşıyıcı PPM'ye dayanır. [117]'deki örnek, istenen parlaklığı elde etmek için 4,8 kb/s'lik çok düşük bir veri hızı ve uygun bir DC seviyesi ile 28,8 kHz'lik bir alt taşıyıcı frekansı kullanmıştır. Hem güç hem de bant genişliği verimliliği sunan, değişen kanal koşullarında hem aydınlatma hem de veri iletimi için, PAM ve PPM'ye dayalı, ayarlanabilir bir hibrit modülasyon şeması da benimsenebilir [125].

IEEE 802.15.7 tarafından önerilen PPM tabanlı bir sistem, düşük veri hızı kapasitesine sahip başka bir şemadır. PPM sinyali, darbe genişlik modülasyonu (PWM) kısma kontrol sinyalinin üzerine bindirilir [91]. Bu şemalar, bant genişliği verimliliği ve güç verimliliği sağlar. Değişken oranlı çok darbeli PPM (MPPM) ayrıca parlaklık kontrolü ve gelişmiş bant genişliği verimliliği sunar. Ancak veri iletimi için yüksek frekanslı alt taşıyıcılar gerektirmez ve parlaklık kontrolü için PWM sinyaline ihtiyaç duymaz [126–129]. Bununla birlikte, MPPM'nin, sunulan iletim veri hızının tüm parlaklık seviyeleri için aynı olmaması bir dezavantajdır. MPPM'de bilgi taşıma kapasitesi, toplam zaman dilimi sayısından ve sembol periyodu başına darbeli yuva sayısından etkilenir. J -yuvalarının bir slot süresi ve $(i-j)$ boş slot sayısı tarafından işgal edildiği sembol başına i -yuvası için, olası farklı kombinasyonların sayısı $k_j^i = \frac{i!}{j!(i-j)!}$ dir.

$i \in \{1, 2, \dots, i-1\}$, $j = 1$ ve $j = i-1$ 'in sırasıyla minimum ve maksimum parlaklık değerine karşılık gelen parlaklık kontrolüne izin verir. Aydınlatma seviyesi şu şekilde tanımlanır: parlaklık indeksi $m_b = j/i$. Bu iki durum için veri iletimi mümkün olmadığından j 'nin iki olası değerinin, yani $j = 0$ (ışık kapalı) ve $j = i$ (ışık her zaman açık) kullanılmadığına dikkat edilmelidir. MPPM'de karartma kontrolü, maksimum optik darbeli yuvaların sabitlenmesi ve karartma seviyesine uyacak şekilde optik

darbelerin yani N_{op} sayısının değiştirilmesi ile yönetilir. Karartma faktörü [89]'de verilmiştir.

$$\gamma_{MPPM} = \frac{N_{op}}{\omega_{op-max}} \quad (2.4)$$

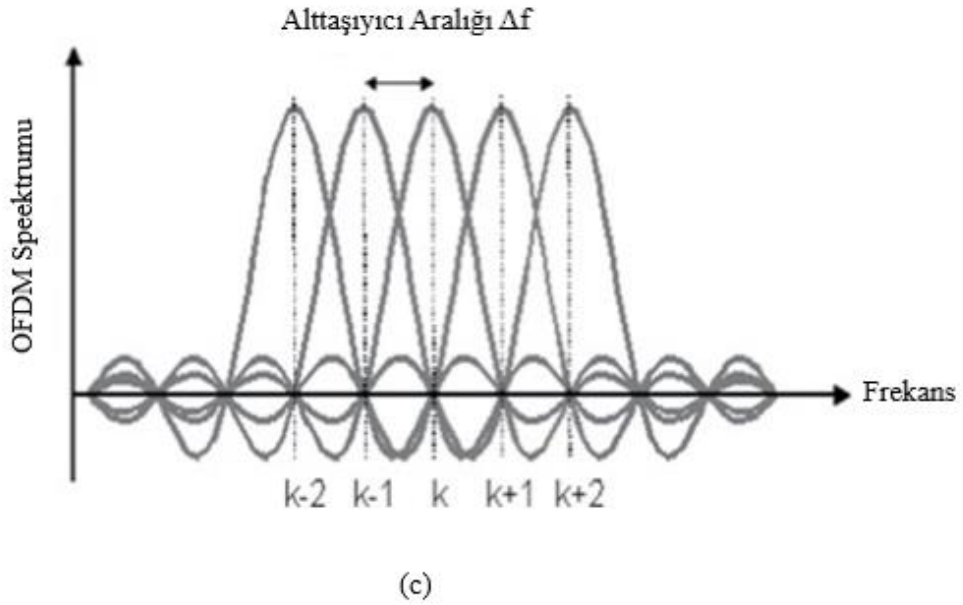
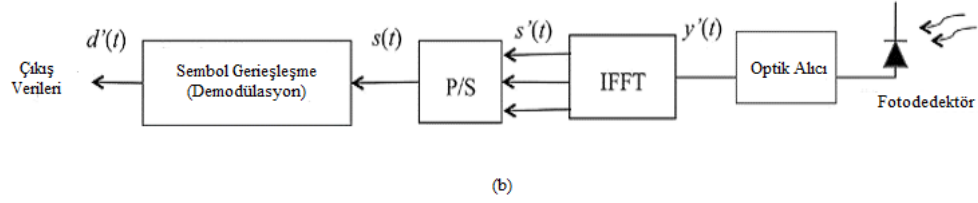
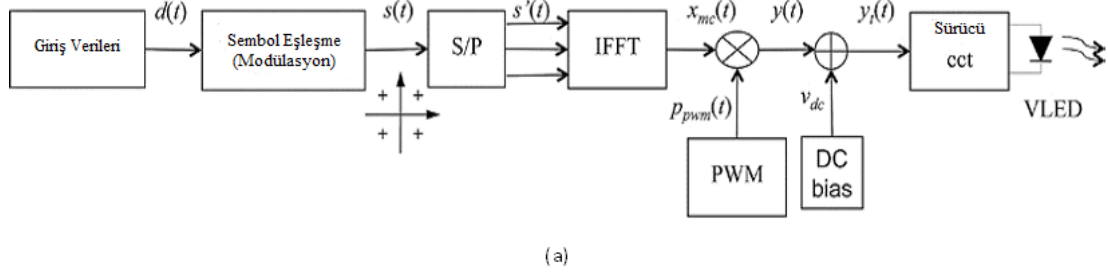
Toplam karartma seviyesi sayısı N_{op-max} 'tır ve buna karşılık gelen karartma seviyeleri 1, $(N_{op-max}-1) / N_{max-op}$, ..., $1/ N_{max-op}$ 'tur. İletilen MPPM sinyali [89] tarafından verilmiştir.

$$x(t) = a \sum_{i=0}^{n-1} c_i \text{rect}\left(\frac{n}{T}t - 1\right) \quad (2.5)$$

Burada a sabit bir değer (nP/N_{max-op}) olarak seçilir, böylece tam aydınlatma sırasında ortalama optik güç P olur. $c = [c_0, c_1, \dots, c_{n-1}]$ vektörü, N_{op} kod sözcüğü ağırlıklı bir ikili n -demet vektörüdür.

2.5. Ayrık Çok Tonlu Modülasyonlu (DMT) PWM

Alternatif olarak, fiziksel katmanda PWM karartmayı DMT tabanlı VLC ile birleştirerek, karartma kontrolü ve veri iletimi ayrıştırılabilir [88]. DMT alt taşıyıcılarında dördün genlik modülasyonu (QAM) gibi spektral olarak verimli modülasyon şemalarının benimsenmesiyle, 513 Mbps'lik daha yüksek veri hızlarına ulaşılmıştır [130]. DMT, LED'in frekans bağımlılığını telafi etmek için kullanılır. Yüksek frekans bileşenleri içeren PWM spektrumu ile (Şekil 2.3(c)), PWM için referans (taşıyıcı) sinyali, düşük alt taşıyıcı girişimi sağlamak için DMT'nin en yüksek alt taşıyıcı frekansının en az iki katı olmalıdır. Daha yavaş PWM oranları için, önemli spektral örtüşme olacaktır. Şekil 2.4'te temel PWM-DMT VLC sisteminin bir blok diyagramı gösterilmektedir. Giriş veri dizisi $d(t)$, bir seriden paralele (S/P) uygulanmadan önce, örneğin daha yüksek spektral verimlilik sunan çok seviyeli QAM kullanılarak bir sembol dizisine dönüştürülür.



Şekil 2.4. PWM-DMT blok şeması: (a) verici, (b) alıcı ve (c) DMT (OFDM) spektrumu [267].

Modülatör ve demodülatör, sırasıyla ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) ve hızlı Fourier dönüşümü (FFT) kullanılarak gerçekleştirilir. IFFT'nin çıktısı, şu şekilde verilen çok taşıyıcılı bir sinyaldir:

$$x(t) = Re \left\{ \sum_{k=1}^{N_{sc}-1} s_k \exp(-j\omega_k t) \right\} \quad 0 \leq t \leq T \quad (2.6)$$

Burada s_k , k'inci alt taşıyıcı kanalında iletilen sembol, $\omega_k = 2\pi k/T$, N_{sc} alt taşıyıcı sayısı ve T, DMT sembolünün süresidir.

DMT sisteminin avantajları; (i) çok yollu yayılma ortamında sağlamlık, (ii) kanal gecikme yayılımına karşı daha toleranslı, (iii) birçok alt taşıyıcının kullanılması sembolü artan kanal gecikme yayılımına göre süre, (iv) koruma aralığının kullanılması nedeniyle ISI'nın yok olması veya azalması, (v) tek taşıyıcılı modülasyona kıyasla basitleştirilmiş eşitleme ve (vi) çok yol kaynaklı sönmüleme olarak sıralanabilir. Optik kablosuz kanaldaki sönmülemenin RF kanalındaki kadar şiddetli olmadığı, bu nedenle farklı şekilde ele alınması gerektiği unutulmamalıdır. Bunun nedeni, optik kablosuz kanalın (çoğunlukla iç mekân), LOS yolları olasılığı yüksek olan oldukça kararlı bir ortam olmasıdır. Alt taşıyıcılar tarafından yaşanan solmanın üstesinden gelmek için ileri hata düzeltmesi kullanılabilir. Işığı yönlendirmek için LED kaynağının yoğunluk modülasyonundan önce çarpanın çıkışına bir DC voltajı v_{dc} eklenir. Bu, LED'i çalıştıran $x_{mc}(t)$ sinyalinin her zaman pozitif olmasını sağlamak içindir. Bu bileşik sinyal olarak verilir;

$$y_t(t) = x_{mc}(t)p_{pwm}(t) + v_{dc} \quad (2.7)$$

Burada $p_{pwm}(t)$ periyodik PWM sinyalidir. Karartma seviyesi M_{pwm} ile aynıdır.

Şekil 2.5, %80 karartma düzeyine sahip bir darbe genişlik modülasyonu (PWM) dalga biçimini ve PWM örneklenmiş DMT zaman dalga biçimini göstermektedir. Darbe genişlik modülasyonu (PWM) sinyali olmadan, optik sürücü devresine uygulanan elektrik sinyali;

$$y_t(t) = x_{mc}(t) + v_{dc} \quad (2.8)$$

LED'in $f_{3dB} \gg$ sinyal bant genişliği ile doğrusal bölgede çalıştığını varsayarsak, yayılan optik güç sürücü akımı $y_t(t)$ ile orantılıdır. DMT'de alt taşıyıcıların toplanabileceği unutulmamalıdır. Yapıcı bir şekilde, yüksek tepe güçlerine ve sonuç olarak daha yüksek tepe-ortalama güç oranına (PAPR) sahip bir iletim sinyaline yol açar. Yüksek PAPR, LED'in sınırlı doğrusal aralığı (veya doğrusal olmaması) nedeniyle yayılan sinyalde doğrusal olmayan bozulmalara (alt taşıyıcı frekansının harmonikleri ve intermodülasyon ürünleri (IMP)) neden olabilir ve bundan kaçınılmalıdır [131]. Bununla birlikte, LED'in tam dinamik aralığından başarılı bir şekilde yararlanmak ve sistem performansını iyileştirmek ve ayrıca DAC'lerin ve ADC'lerin sınırlı çözünürlüğünü artırmak için, DAC'den önce kırpma kullanılabilir. Kırpma, PAPR'yi azaltacak ve ortalama AC gücünü artıracaktır, bu ise daha yüksek bir SNR'ye yol açacaktır [132,133]

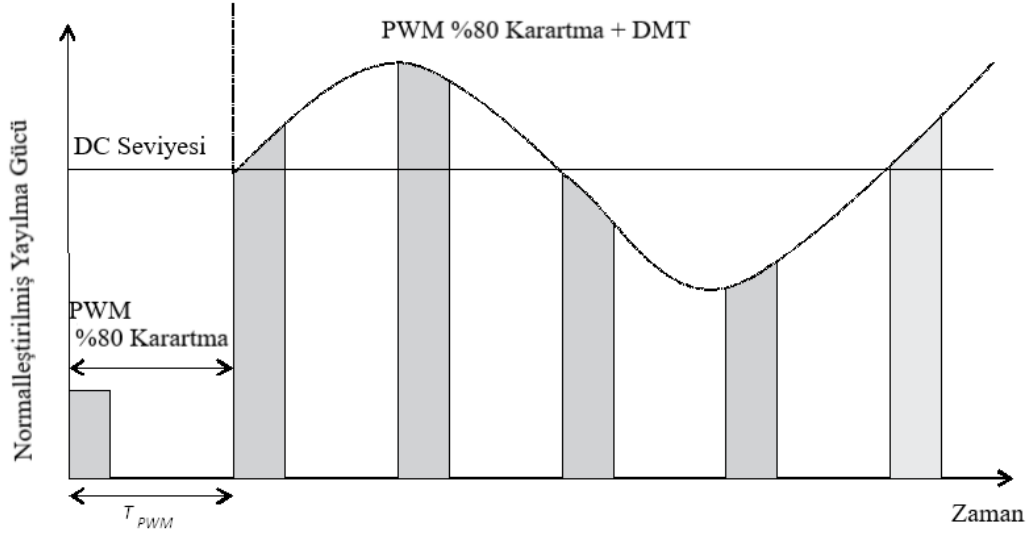
Alıcıda, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, vericinin tam tersi gerçekleştirilir. Fotodetektör çıkışı, FFT modülünden geçirilir ve elde edilen temel bant sinyali, paralelden seriye (P/S) dönüştürücü aracılığıyla tekrar seri biçime dönüştürülür, tahmini iletilen veri $d'(t)$ 'yi yeniden oluşturmak için sembol eşleştirmesi kullanılır.

LED'i çalıştıran hibrit PWM-DMT sinyal akımı, iki sinyal formatının ürünü olarak ifade edilebilir [88].

$$y(t) = x_{dmt}(t)P_{pwm}(t) \quad (2.9)$$

Bileşik sinyal $y(t)$ 'nin spektrumu genel terimlerle şu şekilde ifade edilebilir:

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} dy(t)e^{-j2\pi ft} \quad (2.10)$$



ŞEKİL 2.5. %80 karartma seviyesi ve PWM örnekleme DMT zaman dalga formu ile PWM dalga formu [267].

$Y(f)$ aynı biçimde (2.11)'deki gibi de ifade edilebilir:

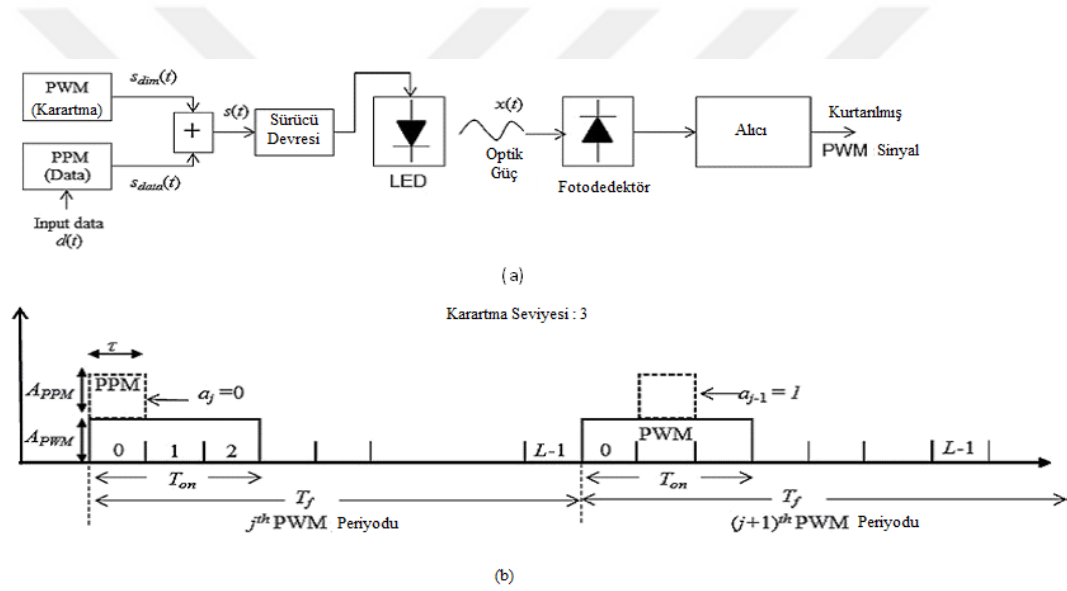
$$Y(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n X_{dmf}(f - nf_{pwm}) \quad (2.11)$$

Burada C_n , $p_{pwm}(t)$ 'nin Fourier bileşenleridir. Dijital örneklemede olduğu gibi, $Y(f)$, orijinal spektrum $X_{dmf}(f)$ 'nin yer değiştirmiş versiyonlarının ağırlıklı toplamından oluşur. Bir DMT sinyalinin frekansı $f \in [-B_{sc} B_{sc}]$ sınırları dahilinde bağlıdır, burada B_{sc} en yüksek alt taşıyıcının frekansıdır. Dolayısıyla, PWM frekansı B_{sc} 'nin iki katı olacak şekilde seçilirse, o zaman $C_n(f - nf_{pwm})$ spektrumu herhangi bir örtüşme yaşamaz.

2.6. Çok Düzeyli PWM-PPM

Aynı anda veri iletimini ve aydınlatmayı desteklemek için PWM-PPM formatlarına dayalı birçok seviyeli modülasyon tekniği de kullanılabilir (Şekil 2.6). Bu şemada, τ süreli kısa bir PPM darbesi, $A_{ml} = A_{ppm} + A_{pwm}$ çok seviyeli darbe genliği ile T_f uzunluğundaki bir PWM sembolü ve T_{on} değerindeki bir darbe süresi üzerine bindirilir. Belirli bir kısma seviyesinde, PPM darbesinin konumu tek bir PWM çerçevesi, giriş veri modeline bağlıdır (Şekil 2.6(b)). M_{pwm} (veya görev döngüsü)

karartma seviyesiyle değişir ve PPM darbesinin dahil edilmesi, LED parlaklığında herhangi bir titremeye ve yanıp sönmeye neden olmaz. Bunun nedeni, PPM için bit hızının insan gözünün algılayamayacağı kadar yüksek olmasıdır. Hem PPM hem de PWM, aynı çerçeve uzunluğuna (T_f) sahiptir ve tamamen senkronize edilmiştir. PPM çerçeve uzunluğu $L = 2^M$ dir. Burada M , giriş verisi bit çözünürlüğüdür ve $\log_2 L$ veri bitlerinin her bloğu, L olası yuvalardan birine eşlenir ($\tau = T_f/L$). Burada $M=1$ ve $L=2$ olur. PPM çerçevesi, ikili verileri kodlamak için kullanılır. Bu nedenle, $(L-2)\tau$, PPM verileri olmadan koruma süresidir. Ortalama güç tüketimi biraz daha yüksek olacaktır, ancak çerçeveler arası karartma PPM darbesi, her bir PWM çerçevesine eklendiğinden kritik olarak etkilendir. Yüksek parlaklık için M_{pwm} tabi ki yüksek olmalıdır.



Şekil 2.6. Çok düzeyli PWM-PPM şeması: (a) sistem blok diyagramı ve (b) zamanlama dalga biçimleri [267].

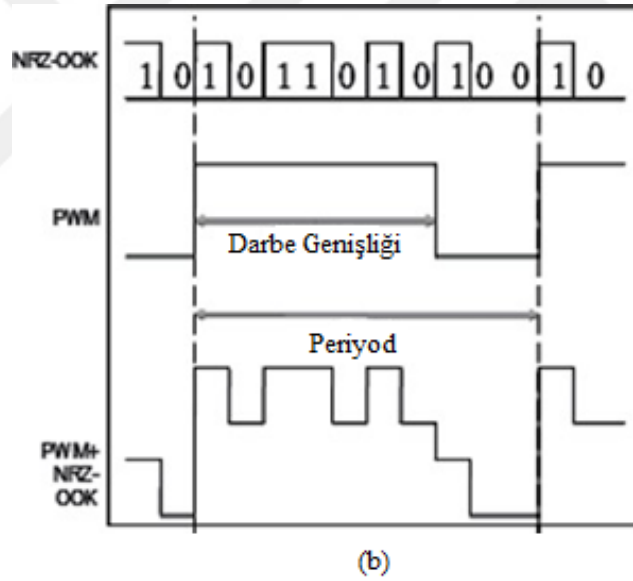
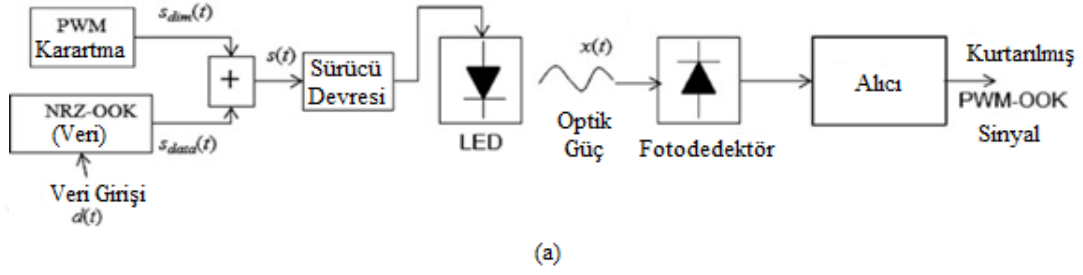
Şekil 2.6(b)'de, a_j 'li j 'inci ve $(j + 1)$ 'inci PWM çerçeveleri için veriler 3'ün karartma seviyesi T_f/N üzerinde a bir mantık sıfırını temsil eder ve a_{j+1} , 3 ile zaman kaydırmalıdır. Hibrit sinyal şu şekilde verilir:

$$s(t) = s_{dim}(t) + s_{data}(t) \quad (2.12)$$

Karartma ve veri sinyali sırasıyla şu şekilde ifade edilir:

$$s_{dim}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{pwm} p_1(t - nT_f) \quad (2.13)$$

$$s_{data}(t) = A_{ppm} \sum_{n=-\infty}^{\infty} p_2(t - nT_f) \quad (2.14)$$



Şekil 2.7. PWM-OOK sistemi: (a) blok şeması ve (b) dalga biçimleri [267].

A_{pwm} ve A_{ppm} , PWM ve PPM sinyallerinin genliğidir, $M_{pwm} = T_{on}/T_f$ ve $p_1(t)$ ve $p_2(t)$, sırasıyla verilen bir birim genliğın kare darbeleridir.

$$p_1(t) = \Pi \left(\frac{t - \frac{M_{pwm}T_f}{2}}{M_{pwm}T_f} \right) \quad (2.15)$$

$$p_2(t) = \Pi\left(\frac{t - \frac{\tau}{2}}{\tau}\right) \quad (2.16)$$

T_{on} 'un karartma seviyesiyle orantılı olduğu ve $T_f = M\tau$ olduğu unutulmamalıdır.

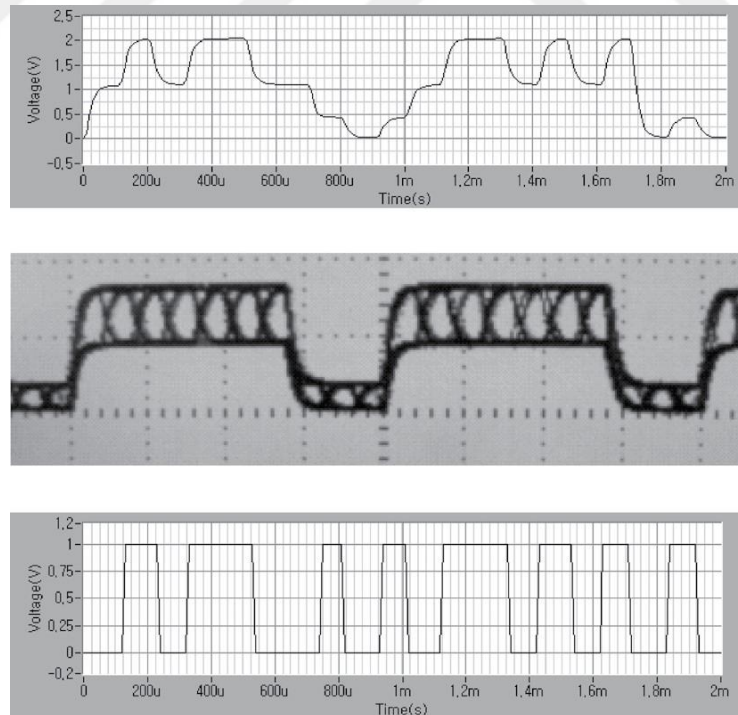
2.7. NRZ-OOK ile PWM

PWM-PPM şemasında, veri hızı ciddi şekilde sınırlıdır ve sistem o kadar esnek değildir. Bu nedenle T_o , PWM kısma süresi içindeki veri hızını artırmak için, basit NRZ-OOK sinyal formatı kullanılabilir [118]. Şekil 2.7(a) ve (b), bir PWM–OOK VLC bağlantısının bir blok diyagramını ve zaman dalga biçimlerini göstermektedir. NRZ-OOK veri sinyali, darbe genişlik modülasyonu (PWM) karartma sinyaline senkronize bir şekilde eklenir. Bu durumda NRZ-OOK sinyalinin periyodu darbe genişlik modülasyonundan (PWM) 10 kat daha kısadır. Veri modelinin, darbe genişlik modülasyonu (PWM) karartma sinyalinin kapalı durumunda bile var olduğuna dikkat edilmelidir. Darbe genişlik modülasyonu (PWM) görev döngüsü, farklı ortamlar ve koşullar için gerekli sinyali üretecek şekilde ayarlanabilir. Şekil 2.8(a), PWM için %70 görev döngüsü ile ölçülen PWM-OOK sinyalini göstermektedir. PWM-OOK için veri diyagramı olarak $2^8 - 1$ sözde rasgele ikili dizinin kullanılması Şekil2.8(b)'de gösterilmektedir. Şekil2.8(c)'de kurtarılan NRZ-OOK sinyali gösterilmiştir [118]. Prensip olarak, mümkün olan maksimum veri hızı, LED'ler için elektronik sürüş ile sınırlıdır. Ancak karartma sinyalinin geçiş süresi, NRZ-OOK veri darbelerinininkiyile çakışmalıdır.

Yukarıda belirtilen karartma kontrol şemaları, kanal gürültüsünün zararlı etkilerini azaltmak için ileri hata düzeltme (FEC) kodlarıyla birlikte kullanılmalıdır. Ne yazık ki, boş alan optik iletişimleri için tasarlanan kodlanmış MPPM şemaları, elde edilebilirliği en üst düzeye çıkarmak için, kod kelime uzunluklarının gerekli olduğu Görünür Işık İletişim (VLC) sistemleri için uygun değildir [128,134]. Ortak karartma ve verim kontrolünün yanı sıra hata düzeltmeyi başarmak adına, optimize edilmiş sabit ağırlık kodları [135]'te tasarlanmıştır.

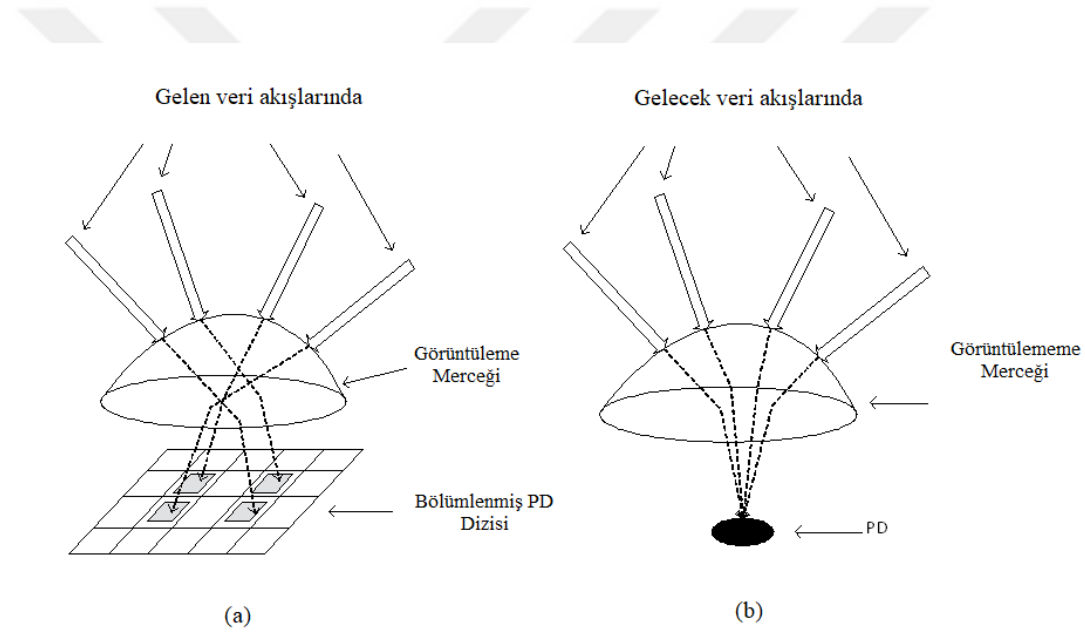
2.8. Çok Girişli, Çok Çıkışlı (MIMO) VLC

İç ortamlarda, orta derecede homojen bir aydınlatma elde etmek için birden fazla aydınlatma ünitesi kullanılır. VLC sistemlerinde, birden fazla verici (yani LED tabanlı ışıklar) kullanılabilir. Çoklu giriş tek çıkışlı sistemler MISO olarak, çoklu çıkış ve çoklu alıcılı sistemler ise MIMO şeklinde isimlendirilir[119,136]. Böylece, kullanıcının hareketliliğini artırmış, sinyal bloke etme olasılığını azaltmış ve gölgeleme sorunu çözülmüş olur. Bir optik kanal kaybolursa, alıcı yine de başka bir vericiden veri alabilir. MISO'da herhangi bir zamanda yalnızca tek bir veri akışı iletilir. Bunun aksine, MIMO, birkaç bağımsız veri akışını aynı anda iletebilme avantajına sahiptir. Aynı anda birden fazla veri akışı gönderilebilir, bu durum sisteme verileri toplama ve veri çıkışını artırma yeteneği verir. MIMO, saçılma ve girişimin birbirinden bağımsız ve ilişkisiz kanallar oluşturduğu, dolayısıyla MIMO kanallarının tek girişli tek çıkışlı (SISO) sistemlerden daha büyük bir kapasiteye sahip olmasına izin verdiği (radyo frekansı alanında) kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. RF için kullanılan teknikler OWC için de geçerlidir.



Şekil 2.8. Ölçülen sinyal dalga biçimleri: (a) Darbe genişlik modülasyonu (PWM) için %70 görev döngüsü ile alınan PWM-OOK, göz diyagramı ve (b) kurtarılan NRZ-OOK veri sinyali [267].

Optik sistemler için iki tür MIMO konfigürasyonu uygundur: (i) görüntüleme ve (ii) görüntülememe. Görüntüleme MIMO'su; bir tekli dışbükey veya asferik lens [140] veya bir lens kombinasyonuna [61,137–139] ve çoklu alıcı kullanan bir görüntüleme çeşitliliğine dayanır [61,137–144]. Fotodedektörler (Şekil 2.9(a)); vericilerden yayılan veri akışları, bölümlere ayrılmış PD dizisi üzerinde görüntüler. Görüntüler herhangi bir pikselin üzerine düşebilir veya piksel grubu, her piksel bir alıcı kanalını temsil eder. Bu sistem kameraya benzer bir şekilde çalışır. Görüntülerin kendi benzersiz piksellerinin üzerine düştüğü durum için, veriler kolayca elde edilebilir. Ancak, görüntüler birkaç piksel üzerinde bulunduğunda, her pikselden gelen sinyalleri birleştirmek için devre gerekir ve kurtarmak için MIMO kod çözme algoritması gerekir.



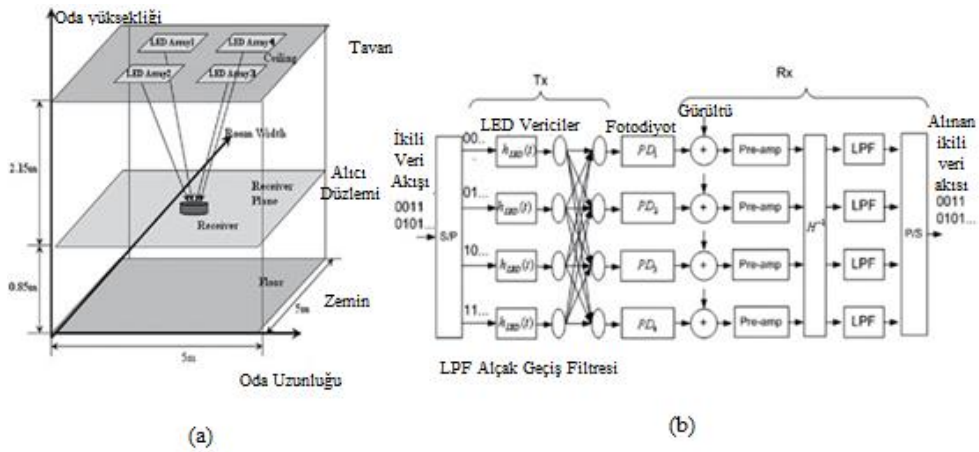
Şekil 2.9. MIMO: (a) görüntüleme ve (b) görüntülememe [267].

Öte yandan, görüntülemeyen MIMO, görüntülemeyen lensli tek bir piksel PD'ye sahip ayrı alıcılar kullanır (Şekil 2.9(b)). Hemisferik lensler, yakınsak lensler, bileşik parabolik yoğunlaştırıcılar (CPC'ler) veya bir flüoresan malzeme tarafından dalga boyu dönüşümüne dayalı görüntüleme yapmayan alıcı kullanılabilir [145]. Görüntülemeyen MIMO durumunda, her birinden yayılan veriler bireysel kaynak, ilgili verici-alıcı çifti arasındaki göreceli konumlarına dayalı ağırlıklarla alıcıda doğrusal olarak toplanır. Tek bir sinyal kullanan sinyallerin toplamı ile PD'de, orijinal ayrı ayrı veri akışlarını kurtarmak için sinyallerin çoğullanmasını çözmek için ek sinyal işleme gerekecektir.

Tipik bir VLC MIMO sistemi blok diyagramını Şekil 2.10(a)'da gösterilmiştir. Oda aydınlatması ve aynı anda dört bağımsız veri akışını iletmek için dört LED dizisi kullanılır. Fotodetektör; görüntülemeyen yoğunlaştırıcılara sahip dört elemanından oluşan bir alıcı dizisine sahiptir ve her bir LED dizisinden yayılan ışığı toplamak için kullanılır. Ancak geometrik konfigürasyon nedeniyle farklı güçlere sahiptir [146]. MxN görüntülemesiz MIMO modelinin şemasını Şekil 2.10(b)'da gösterilmektedir. Girdi veri akışı X , t-paralel iletim veri akışlarına $x_j (j = 1, \dots, t)$ çoğullanır; yoğunluk modüle ışık kaynakları, $Tx_j (j = 1, \dots, t)$ şeklindedir. Tüm veri akışları aynı anda iletildiğinden, alınan sinyal tüm x_j 'lerin doğrusal bir kombinasyonudur. Alıcıda, çoğullamayı çözmek için sinyaller gönderir ve iletilen verileri alır, MIMO sisteminin önce verici-alıcı arasındaki kanal katsayılarını tahmin etmesi gerekir. Bunu başarmak için, pilot sinyaller periyodik olarak sisteme eklenir. Veriler böylece bir pilot sinyal aktif olduğunda geri kalan vericiler sessiz kalır; bu nedenle, her pilot [61]'deki gibi benzersiz bir zaman diliminde iletilir. Tüm pilot sinyalleri alındığında, alınan optik güçleri detaylandıran bir H matrisi günlüğe kaydedilir. Ancak o zaman verici, verilerin tüm kanallarda eş zamanlı olarak iletilmesine devam edebilir.

Alınan sinyaller şu şekilde ifade edilebilir:

$$y = Hx + n \quad (2.17)$$



Şekil 2.10. (a) VLC MIMO sistemi ve (b) VLC MIMO modelinin şeması [267].

y sırasıyla alıcılardaki sinyalleri ve n alıcı gürültüsünü temsil eden r (r alıcı sayısıdır) boyutunda sütun vektörleridir. x , iletilen verileri temsil eden t boyutunda (t

verici sayısıdır) bir sütun vektörüdür. H , $[r \times t]$ boyutunda bir matristir. (2.18)'deki elemanlar şu şekilde genişletilebilir:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} & \cdots & h_{1r} \\ h_{12} & h_{22} & \cdots & h_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{t1} & h_{t2} & \cdots & h_{tr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_r \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Burada h_{ij} , i. verici ile j. alıcı arasındaki kanal durum bilgisidir (CSI) ve şu şekilde ifaden edilir:

$$h_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^K \frac{A_{pd-rj}}{d_{ij}^2} R_0(\Phi) \cos(\beta_{ijk}) & 0 \leq \beta_{ijk} \leq \beta_c \\ 0 & \beta_c > \beta_{ijk} \end{cases} \quad (2.19)$$

Burada A_{pd-rj} , j. alıcının toplama alanıdır, d_{ij}^2 i. vericiden j. alıcıya olan mesafedir. β_{ijk} alıcıya geliş açısı ve β_c alıcı görüş alanıdır. CSI, alınan pilot sinyallerin alınan optik gücü aracılığıyla toplanır ve kanal kazancı $H(0)$ cinsinden ifade edilebilir. H matrisini oluşturan DC kazançları şu şekilde verilir:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} & \cdots & h_{1M} \\ h_{12} & h_{22} & \cdots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \cdots & h_{NM} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

H matris derecesinin MIMO sistem performansını etkilediğine dikkat edilmelidir. H -matris tam dereceli değilse, H -matrisinin tam dereceli olmamasını telafi etmek için sistemin hızı düşmelidir. Bununla birlikte, görüntüleme sistemi, tam dereceli bir kanal H matrisini garanti ederken, görüntüleme yapmayan optik MIMO sistemi, kötü koşullandırılmış H matrisine sahip olabilir [26].

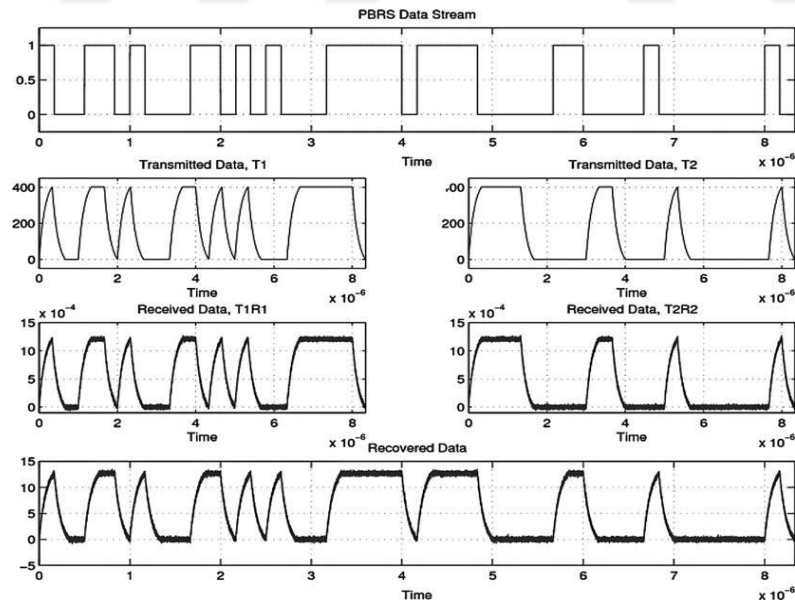
$$r_j = R \cdot P_t \sum_{i=1}^{i=N_r} h_{ij} \cdot t_i + \sqrt{\sigma_{n_j}^2} \quad (2.21)$$

Burada R fotodiyot duyarlılığıdır. P_t ortalama iletim optik gücüdür ve $\overline{\sigma_{n_j}^2}$ j'inci alıcı için ortalama kare gürültü akımıdır. Alınan sinyaller y vektörüne eklenir, burada $y=[r_1, \dots, r_j, \dots, r_{NR}]^T$. Alınan veriler, H-matris H'nin tersi kullanılarak şu şekilde tahmin edilir:

$$d_{est} = y \cdot H^T \quad (2.22)$$

Sıfır zorlama (ZF) ve maksimum olasılık kodu çözme (MLD), minimum ortalama kare hatası (MMSE) ve dikey Bell Labs katmanlı uzay-zaman algoritması (V-BLAST) algoritmaları gibi bir dizi MIMO kod çözme algoritması, MIMO-VLC için kabul edilir [93]. MIMO-VLC'de karmaşık algoritma kullanılarak yalnızca marjinal kazanç elde edilebildiği görülmektedir [146].

Tahmin edilen sinyaller daha sonra iletilen seri verileri kurtarmak için düşük geçişli filtrelerden ve bir seri/paralel dönüştürücülerden (P/S) geçirilir. Program 2.1'te verilen Matlab kodu, MIMO sistemini simüle edilebilir ve sinyali kurtarılabilir. Verici ve alıcıda gözlenen simüle edilmiş dalga biçimlerini Şekil 2.11 göstermektedir.



Şekil 2.11. MIMO için verici ve alıcıda simüle edilmiş dalga biçimleri [267].

Tablo 2.2. bir dizi VLC MIMO sistemi için simüle edilmiş verileri göstermektedir [119].

Simüle edilmiş VLC MIMO Sistemleri									
Parametreler	Beyaz Kanal			Beyaz Kanal+ dengeleme			Mavi Kanal		
Kanal Numarası	4	16	36	4	16	36	4	16	36
Data oranı (Mbps)	48	192	432	120	480	1080	160	640	1440
Mercek çapı (cm)	0.2	0.44	0.71	0.44	0.8	1.38	1.6	3.6	7.14
Dedektör boyutu (cm)	0.74	1.68	3.05	1.65	3.08	5.91	6.0	13.7	31.4
	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	0.74	1.68	0.05	1.65	3.08	5.91	6.0	13.7	31.4

2.9. Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM)

RF sistemlerinde yaygın olarak kullanılan Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM) şeması, çok yollu distorsiyonla mücadele etmek ve herhangi bir bant genişliği veya güç genişletmesi olmadan veri hızını artırmak için VLC sistemlerinde de benimsenmiştir [147]. OFDM, çeşitlilik kazancını artırmak ve/veya sistem kapasitesini geliştirmek ve frekans seçici sönmülemeyi azaltmak için Tx ve Rx'teki anten dizilerinin yanı sıra herhangi bir çoğullama şemasıyla birleştirilebilir [36,148–150]. VLC'lerde, RF tabanlı sistemlerde OFDM'nin en önemli dezavantajlarından biri olan yüksek PAPR, bir avantaj olarak kullanılmıştır [151]. Bu nedenle son yıllarda VLC'lerde kullanılan OFDM çok dikkat çekicidir [93,152].

IM/DD'de, geleneksel OFDM gibi karmaşık ve iki kutuplu sinyal formatlarına sahip VLC'ler; ışık yoğunluğu karmaşık veya negatif bir değer olamayacağından kullanılamaz [152,153]. Bu sorunun üstesinden gelmek için günümüze kadar bir dizi farklı OFDM formatı önerilmiştir [57,58,152,154–158]. Bunların arasında, DC-eğilimli optik-OFDM (DCO-OFDM) ve asimetrik olarak kırılmış optik-OFDM (ACO-OFDM), IM/DD'de benimsenen en popüler iki tekniktir [155]. Her iki şema da mevcut bant genişliğinin yarısı pahasına gerçek zamanlı alan sinyalleri sunmak için Hermitian simetrisine (HS) sahip olacak şekilde sınırlandırılmıştır [153,155]. DCO-OFDM'de, negatif olmayan bir OFDM sinyali sağlamak için negatif artık sinyallerin

kırılmasından önce bir DC sinyale eklenir. Bununla birlikte, (i) büyük bir DC sinyal seviyesi, çok daha yüksek bir ortalama optik güç seviyesi gerektirir ve (ii) negatif artık sinyallerin kırılması, gürültü sinyali ACO-OFDM'de ise antiasimetrik zaman alanı sinyallerini sağlamak için yalnızca tek alt taşıyıcılar demodüle edilir. Bu nedenle negatif sinyallerin sıfır seviyesinde kırılması bilgi kaybına yol açmaz. Sonuç olarak ACO-OFDM, örneğin OOK'a kıyasla optik güç gereksinimi açısından daha verimlidir ve düşük bir kırılma gürültü düzeyine sahiptir, oysa DCO-OFDM daha fazla bant genişliği sahiptir [159].

Alan destekli asimetrik olarak kırılmış optik OFDM'de (PA-ACO-OFDM), ACO-OFDM'nin anti-asimetrik zaman alanı özelliklerine sahip avantajları, veri hızını neredeyse %33 oranında artırmak için kullanılır [160]. Bu şemada, negatif zaman alanlı çipler ters çevrilir. Daha yüksek genlikli pilot çiplerin eklenmesinin ardından pozitif. Rx'te, negatif çipleri tespit etmek ve kurtarmak için pilot çipler kullanılır, böylece OFDM sembollerinin tamamen kurtarılmasına izin verilir.

3.BÖLÜM: GÖRÜNÜR IŞIK İLETİŞİMİ İÇİN KANAL MODELLEME VE KARAKTERİZASYON

3.1. Giriş

Bu bölümde görünür ışık iletişimi için kapsamlı bir kanal modelleme ve karakterizasyon çalışması sunuyoruz. Çalışmamız, aydınlatma kaynağından (örneğin LED'lerden) yayılan ışınların belirli bir kapalı alan içindeki etkileşiminin ve alıcılara (örneğin fotofiyot) kadar takip ettiği yolun doğru bir şekilde tanımlanmasına izin veren ışın izlemeye dayanmaktadır. Esas olarak ideal Lambert kaynakları ve tamamen dağınık yansımalarla sınırlı olan mevcut çalışmaların aksine, yaklaşımımız ideal olmayan herhangi bir kaynak için kanal dürtü yanıtlarını (CIR) ve ayrıca aynasal ve karışık aynasal-yaygın yansımaları elde etme yeteneğine sahiptir. Ayrıca bir kanal çalışmasında, nesnelerin (örneğin mobilya) varlığını ve yüzey malzemelerinin (örneğin tavanlar, zemin, duvarlar ve mobilya) dalga boyuna bağlı yansıma özelliklerini tam olarak yansıtabiliriz. Örnek olay ve senaryo incelemeleri olarak, parlak boya, alçı, alüminyum, metal, ahşap ve cam gibi farklı yüzey malzemelerine sahip ve çeşitli boyutlarda bir dizi iç mekân ortamını ele alıyoruz. Ayrıca farklı sayı ve teknik özelliklerdeki vericileri (yani, tekli ve çoklu vericiler ve dizi tipi) ve alıcı spesifikasyonları (yani, konum ve dönüş) ile çeşitli senaryoları ele alıyoruz. Her ortam ve senaryo için, CIR'ler elde ediyoruz. Kanal DC kazancı, kök ortalama kare gecikme yayılımı (RMS), tutarlılık bant genişliği ve ortalama fazla gecikme gibi kanal parametrelerinin elde edildiği bir kanal karakterizasyon çalışması sunuyoruz. Ayrıca

aynı ortamlar için kızılötesi ve görünür ışık CIR'leri arasında bire bir karşılaştırmalar yaparak, iki optik bant arasındaki farkları vurguluyoruz.

Günümüzde kablosuz iletişim uygulamaları ve hizmetleri için sürekli artan bir talep yoğunluğu bulunmaktadır. Geleneksel radyo frekansı (RF) çözümleri, spektrum kıtlığı nedeniyle, bu artan talebi karşılayamaz. Bu nedenle günümüzde kablosuz iletişim ihtiyacını karşılamak ve sorunsuz bir iletişim deneyimi sağlamak için son derece güvenilir ve düşük maliyetli alternatif ve/veya tamamlayıcı çözümler gereklidir. Görünür Işık İletişiminin (VLC) [174] böyle bir vaadi vardır. Mevcut aydınlatma altyapısında yani kablosuz iletişim amacı için ışık yayan diyotlar kullanılır. Ve bu diyotlar (LED) ikili olarak kullanılır. İnsanın görme yeterneği, ışık yeterince hızlı değiştiğinde (örneğin LED'ler hızlı bir şekilde aç kapa yaptığında) yalnızca ortalama yoğunluğu algılar. Bu nedenle, ışık yayan diyotlar (LED) yani aydınlatma çıkışı, insan gözü üzerinde bir etki olmaksızın ve insanın bulunduğu ortamda karanlık hissi oluşturmaksızın veri iletebilir.

Gelişmiş fiziksel katman tekniklerinden ağ oluşturmaya kadar uzanan Görünür Işık İletişimi (VLC) hakkında büyüyen bir literatür vardır [175–188]. Ancak Görünür Işık İletişim (VLC) sistemlerinde bu artan ilgiye rağmen, uygun görünür ışık (VL) kanal modellerinde giderilmesi gereken eksiklik halen mevcuttur. Kanal modellemeye verim ve güvenlik; Görünür Işık İletişim sistem tasarımı için önemli bir adım olduğundan bu ciddi bir endişe kaynağıdır. Geçmişte, çoğu özyinelemeli hesaplama yöntemlerine [189–191,241–247] veya Monte Carlo ışın izleme yaklaşımlarına [189–191] bağlı olan kızılötesi (IR) kanal modelleme [244–246] üzerine birçok çalışma raporu yayınlanmıştır. Bununla birlikte, Görünür Işık İletişimi (VLC) ve kızılötesi (IR) iletişimleri arasında önemli farklılıklar olduğu ve bu sonuçların Görünür Işık İletişimi (VLC) kanal modellemesine doğrudan bir şekilde uygulanamayacağı belirtilmelidir. Örneğin, bir kızılötesi (IR) kaynağı monokromatik bir yayıcı olarak bilinirken, beyaz ışıklı bir LED kaynağı doğal olarak geniş bantlıdır (380–780 nm). Bu nedenle Görünür Işık İletişimi (VLC) kanal modellemesine kaynağın dalga boyu bağımlılığının dahil edilmesini gerektirir. Ayrıca, kızılötesi (IR) iletişiminde, malzemelerin yansımaları tipik olarak hesaplanır ve bir sabit olarak modellenir. Öte yandan, Görünür Işık İletişimi (VLC) bağlantısının geniş bant yapısı nedeniyle, görünür ışık (VL) spektrumundaki malzemelerin yansımaları dikkate alınmalıdır.

Önceki yıllarda Görünür Işık İletişimi (VLC) kanal modellemesini ele almak için bazı çalışmalar yapılmıştır [246–252]. Özellikle [246]'da boş bir odanın kanal darbe yanıtını (CIR) görünür ışık (VL) dalga boylarında değerlendirmek için Monte Carlo ışın izleme kullanılır, ancak yüzey malzemeleri için sabit yansımaya değerleri dikkate alındığında dalga boyu bağımlılığı göz ardı edilir. [249] ve [250]'de, [189]'da önerilen özyinelemeli yöntem, görünür ışık (VL) bandında kanal dürtü yanıtı (CIR) elde etmek için kullanılır, ancak yine sabit yansımaya varsayılır. [251]'da kanal modellemede dalga boyu bağımlılığının etkisini yansıtmak amacıyla, yansımaya değerleri, görünür ışık (VL) bandı üzerindeki dalga boyuna bağlı katsayıların ortalaması olarak hesaplanmıştır.

Günümüze kadar, boş bir odanın kanal dürtü yanıtını (CIR) belirlemek için özyinelemeli bir yöntemin kullanıldığı ve dalga boyu bağımlılığını açıkça hesaba katan tek çalışma [252]'da rapor edilmiştir. Bununla birlikte, [248–251]'a benzer şekilde, [252]'daki çalışma da yalnızca tamamen dağınık yansımalar ve birçok pratik durum için doğru olmayabilecek ideal Lambert kaynağı varsayımlarıyla sınırlıdır.

Bu çalışmada, [248–252]'daki sınırlamaların üstesinden gelen gerçekçi bir Görünür Işık İletişimi (VLC) kanal modelleme yaklaşımı öneriyoruz ve önerilen yaklaşıma dayalı olarak çeşitli iç ortam senaryoları için birkaç kanal dürtü yanıtını (CIR) sunuyoruz. Çalışmalarımızda yer alan kanal modelleri bilgisayar ortamında kullanılan Zemax[®] programına dayanmaktadır ve Zemax[®] programı ticari bir optik ve aydınlatma tasarım yazılımıdır [253]. Bu tür bir yazılımın asıl amacı optik sistem tasarımı ve modellemesidir. Bu yazılımda, belirli bir simülasyon doğrultusunda oluşturulan, belirli bir kapalı alan içinde aydınlatma kaynağından yayılan ışınların etkileşiminin doğru bir şekilde tanımlanmasına izin veren ışın izleme özelliklerinden yararlanıyoruz. Simülasyon ortamı Zemax[®] programında oluşturulur ve ortamın geometrisini, içindeki nesneleri, cisimleri ve ayrıca ışık kaynaklarının (örneğin LED'ler) ve alıcıların (yani fotodiyotların) özelliklerini tanımlayabilmemizi sağlar. Program sayesinde belirli sayıda yansımaya ve ışın sayısı için, sıralı olmayan ışın izleme aracı, her ışın için algılanan gücü ve kaynaktan dedektöre giden yol uzunluklarını hesaplar. Bunlar yine bilgisayar ortamında Matlab[®] programına aktarılır ve kanal dürtü yanıtını (CIR) vermek üzere işlenir. Sonuçlarımız, yaklaşımımızın, tamamen dağınık yansımalar ve ideal Lambert kaynağı varsayımı altında [252]'daki ile aynı kanal dürtü yanıtını (CIR) verdiğini göstermektedir. Yaklaşımımız ayrıca diğer (ideal olmayan) kaynak

türlerinin yanı sıra speküler ve karışık speküler-yaygın yansımalar için kanal dürtü yanıtları (CIR) elde etme yeteneğine sahiptir.

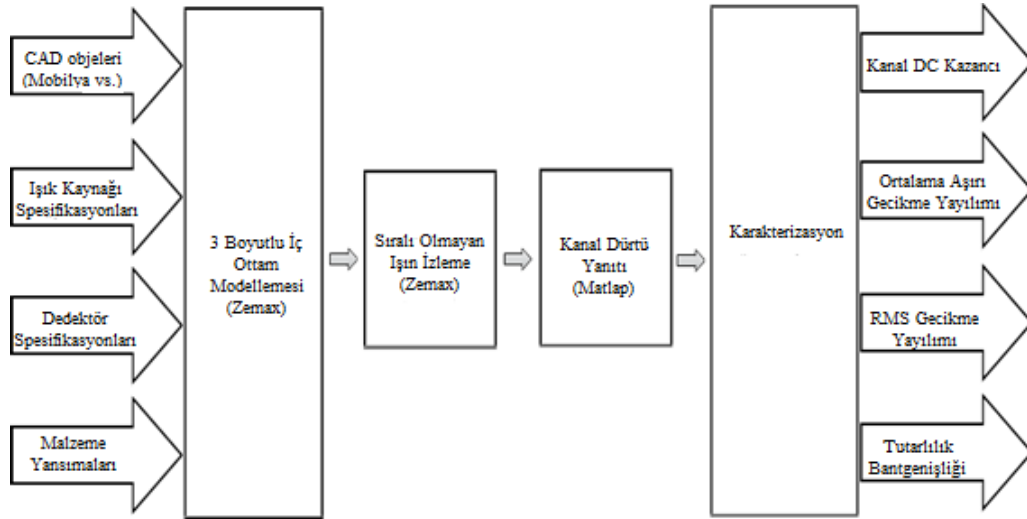
Örnek olay incelemeleri olarak, alçı, parlak boya, ahşap, alüminyum metal, cam gibi çeşitli boyutlara ve farklı yüzey malzemelerine sahip bir dizi iç mekân ortamını ele alıyoruz. Ayrıca farklı tekniklerde dizilim şekli ve sayıdaki verici (yani, tekli ve çoklu vericiler ve dizi tipi) ve alıcı spesifikasyonları (yani, konum ve dönüş) ile çeşitli senaryoları ele alarak inceliyoruz. Her ortam için, kanal dürtü yanıtları (CIR) elde ediyoruz. Kanal DC kazancı, kök ortalama kare gecikme yayılımı (RMS), tutarlılık bant genişliği ve ortalama fazla gecikme gibi kanal parametrelerinin elde edildiği bir kanal karakterizasyon çalışması sunuyoruz. Ayrıca iki optik bant arasındaki farkları vurgulamak için aynı ortamlar için kızılötesi (IR) ve görünür ışık (VL), kanal dürtü yanıtları (CIR) arasında bire bir karşılaştırmalar yapıyoruz.

Bölüm 3.2'de kanal modelleme için benimsenen yöntem ve metodolojiyi açıklıyoruz. Bölüm 3.3'te, [252]'da açıklandığı gibi boyutları belirtilen dikdörtgen boş bir odayı ele alıyor. Bu alanda sunulan sonuçlarla karşılaştırmalı olarak yaklaşımımızın doğruluğunu teyit ediyoruz. Bölüm 3.4'te, mobilyalı ve mobilyasız çeşitli iç ortamlar için kanal dürtü yanıtları (CIR) sunuyoruz ve sistem parametrelerinin kanal dürtü yanıtı (CIR) üzerindeki etkisini tartışıyoruz. Bölüm 3.5'te ise bulunan sonuçları elde ediyor ve yorumluyoruz.

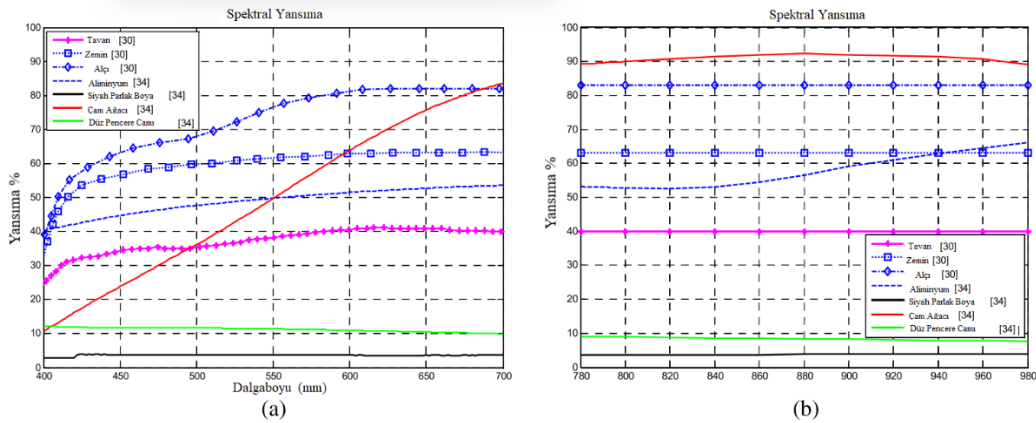
3.2. Kanal Modelleme Metodolojisi

Şekil 3.1, benimsenen kanal modelleme metodolojisinde izlenen ana adımların genel bir özetini sunar. İlk adımda belirtebileceğimiz 3 boyutlu simülasyon ortamı oluşturuyoruz.

İç ortamın geometrisi; içindeki nesneler, yüzey malzemelerinin yansıma özellikleri, ışık kaynakları ve dedektörlerin özellikleri programda belirtilir. İkinci adımda, her bir ışın için algılanan güç ve kaynaktan dedektöre giden yol uzunluklarını hesaplanır. Bunun için Zemax®'ın sıralı olmayan ışın izleme özelliğini kullanıyoruz. Üçüncü adımda, bu verileri Matlab®'a aktarıyoruz ve söz konusu ortam için Kanal Dürtü Yanıtları (CIR) elde ediyoruz. Her adım için daha fazla ayrıntı aşağıda detaylandırılmıştır.



Şekil 3.1. Kanal modelleme ve karakterizasyonundaki adımlar [268].

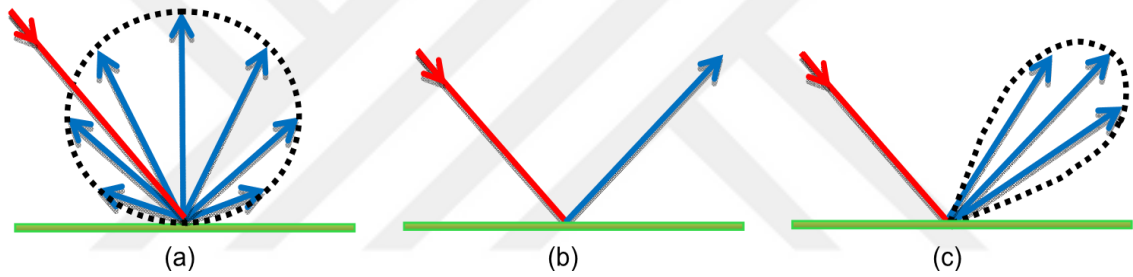


Şekil 3.2. (a) Görünür Işık (VL) bandında ve (b) Kızılötesi (IR) bandında çeşitli malzemelerin spektral yansımaları [252,256].

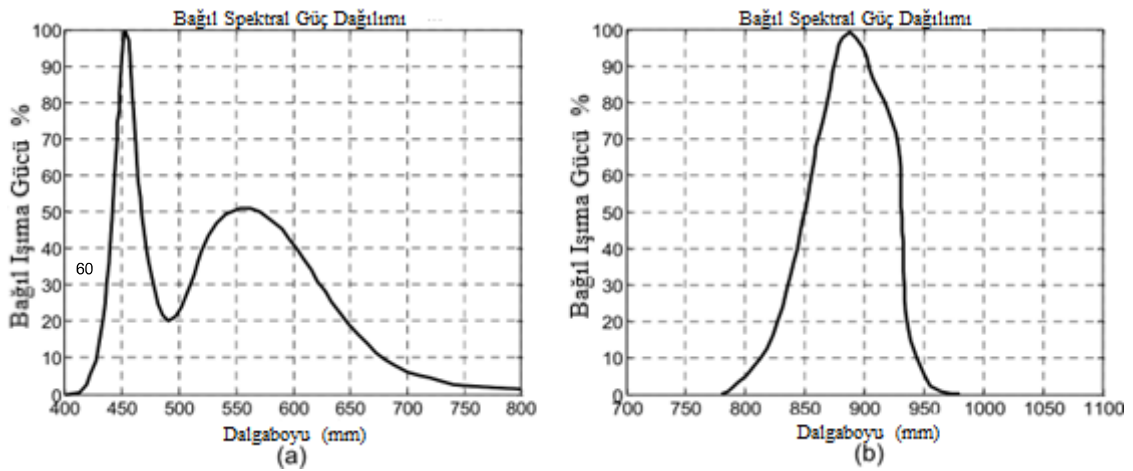
3.2.1. İç Ortamın Modellenmesi

Simülasyon ortamını modellemek için; kapı içi ortamın boyutlarını ve şeklini, içindeki mobilya ve nesneleri, yüzey malzemelerinin türünü (kaplama), ayrıca verici (LED) ve alıcının (fotodiyot) özelliklerini ve konumlarını belirtmemiz gerekir. İç mekân ortamı (yani oturma odası, ofis odası, kapalı ortam vb.), kullanıcı tanımlı 3 boyutlu geometrik mekanların oluşturulmasına ve değiştirilmesine izin veren bir arayüz olan

Zemax® programında “Part Designer” özelliği kullanılarak oluşturulur. Bilgisayar destekli CAD grafik tasarım programında; iç mekân ortamında kullanılması öngörülen mobilya ve diğer nesneler modellenebilir ve yazılıma aktarılabilir. Ayrıca yazılımdaki “Tablo Kaplama Yöntemi” oluşturulan senaryodaki her malzeme ve mobilya için yüzey kaplamasının dalga boyuna bağlı yansımaları tanımlamaya izin verir [254,255]. Daha önce belirtildiği gibi, dalga boyu bağımlılığı Görünür Işık (VL) bandında özellikle önemlidir. Kızılötesi (IR) ve Görünür Işık (VL) spektral bantları arasındaki fark karakteristiklerini vurgulamak için, bazı tipik malzemelerin yansımaları Şekil 3.2’de sunulmuştur. Gözlemlendiği gibi, çoğu malzemenin yansımalarının, çoğu pratik amaçlar için Kızılötesi (IR) bandında sabit olduğu varsayılabilir. Görünür Işık (VL) bandı için dalga boyu bağımlılığı dikkate alınmalıdır.



Şekil 3.3. (a) Tamamen dağınık yansımalar. (b) Speküler yansımalar. (c) Karışık yansımalar [268].



Şekil 3.4. (a) Cree Xlamp® MC-E Beyaz LED ve (b) OSRAM® SFH 4283 IR 880 nm'nin bağıl spektral güç dağılımı [268].

Yüzey malzemelerinin (duvar, tavan, mobilya vb.) modellenmesinde bir diğer önemli parametre de yansımaların türüdür. Örnek olarak, Şekil 3.3; tamamen dağınık, speküler ve karışık yansımaların gözlendiği üç farklı türü göstermektedir. Zemax®'ta “scatter fraction (SF)” parametresi (fonksiyonu) ile; malzemelerdeki dağınık yansımaların değerini belirleyebilir ve belirli bir yansıma türünü hesaba katabiliriz. Bu parametre “0” ile “1” arasında değişir, öyle ki “0” tamamen speküler yansımaları ve “1” tamamen dağınık durumu belirtir.

Zemax® programı, yüzey malzemelerinin gerçekçi modellemesine ek olarak gerçekçi ışık kaynaklarının kullanımına da olanak tanır. Programın Radyant Kaynak Modeli (RSM) veritabanında piyasada halihazırda kullanılan birkaç ışık kaynağı mevcuttur [253]. RSM dosyası, bir ışık kaynağı için; konum ve açı ile dalga boyunun bir fonksiyonu olarak kaynağın ölçülen ışımaya veya ışık yoğunluğunu içerir. Bu dosya, kapalı alanlarda ışık kaynağının hem yakın hem de uzak mesafedeki davranışını karakterize etmek için kullanılabilir. Örnek olarak, Şekil 3.4, Zemax® RSM veritabanından seçilen Görünür Işık (VL) ve Kızılötesi (IR) LED'lerinin çalışma dalga boyu aralığındaki göreceli güç dağılımını göstermektedir. Görünür Işık (VL) LED'i (Şekil 3.4(a)), bir Cree Xlamp® MC-E Beyaz LED'dir, Lambertian dağılımına ve 120° görüş açısına sahiptir [257]. Kızılötesi (IR) LED (Şekil 3.4(b)), bir OSRAM® SFH 4283 IR 880 nm LED'dir ve aynı görüş açısına ve Lambert dağılımına sahiptir [258]. Şekil 3.4(b)'den IR LED'in yarı maksimum (FWHM) spektral bant genişliğinin yaklaşık 75 nm olduğu gözlemlenmektedir. Öte yandan, Şekil 3.4(a), Kızılötesi (IR) LED'den farklı olarak Görünür Işık (VL) LED'in 400-800 nm arasında bir spektral bant genişliğine sahip olduğunu göstermektedir.

Zemax®'ta dedektörler; tutarsız ışınlam, tutarlı ışınlam, tutarlı faz, ışınlam yoğunluğu, parlaklık ve gerçek renk fotometrisi gibi farklı veri türlerini depolayan düzlemsel yüzeyler, eğri yüzeyler veya üç boyutlu hacimler olarak modellenebilir. Ayrıca proramda veriler; lüks, lümen, watt ve phot gibi radyometrik ve fotometrik birimlerde mevcuttur. Simülasyonlarımızda yine Zemax®'ta “Dedektör Dikdörtgen” işlev fonksiyonu ile, alıcı olarak kullanılacak elemanın belirtilen boyutlarda dikdörtgen bir yüzeyini oluşturuyoruz.

3.2.2. Sıralı Olmayan Işın İzleme

Zemax®'ta simülasyon ortamını oluşturduktan sonra, kanal dürtü yanıtını (CIR) belirlemek için sıralı olmayan ışın izleme özelliğini kullanıyoruz. Işın izleme yaklaşımında, ışınlar bir nesneyi fiziksel olarak kesene kadar gerçekleşebilir bir yol boyunca izlenir. Görüş hattı (LOS) yanıtının elde edilmesi kolaydır ve Görüş Hattı (LOS) mesafeye bağlıdır. Görüş Hattı (LOS) bileşeninin yanı sıra, ortamdaki diğer nesnelerin, tavan, duvar ve zemin arasında çok sayıda yansıma vardır. Sıralı olmayan ışınların izlenme şekli, sıralı olmayan kaynaklardan yayılan ışınlarının polarizasyon durumu, tutarlılık uzunluğu, başlangıç fazı, konumu ve yönü gibi kaynak özelliklerine bağlıdır. Zemax®'ta kullanılan rastgele ışın izleme yöntemleri temel olarak Monte Carlo analizine [259,260] ve ikincisi ışın izlemeyi hızlandırmak için kullanılan Sobol örneklemesine dayanır [261,262]. Işın izlemedeki ana parametreler ışın sayısı, (N_r) ve yansıma sayısı (k)'dır. Zemax® programında yansıma sayısı şu şekilde ayarlanır: "Göreceli Minimum Yoğunluk" fonksiyonunda; örneğin bu parametre 10^{-5} olarak ayarlanırsa, yazılım son segmentin yoğunluğunun ilk segmente göre oranı 10^{-5} olana kadar çalışır.

3.2.3. Kanal Dürtü Yanıtı'nın (CIR) Belirlenmesi

Sıralı olmayan ışın izleme aracı; yayılmakta olan her ışın için algılanan gücü ve kaynak ile detektör arasındaki yol uzunluklarını içeren bir çıktı dosyası oluşturur. Bu dosyayı Matlab®'a aktarıyoruz ve bu bilgiyi kullanarak kanal dürtü yanıtını (CIR) şu şekilde ifade edebiliriz:

$$h(t) = \sum_{i=1}^{N_r} P_i \delta(t - \tau_i) \quad (3.1)$$

Buradaki formülde P_i , i . ışının gücüdür. τ_i ise i ışının yayılma zamanıdır. $\delta(t)$, Dirac delta işlevidir ve N_r , dedektörde alınan ışınların sayısıdır.

3.2.4. Kanal Karakterizasyonu

Kanal Dürtü Yanıtları (CIR) elde ettiğimizde; ortalama fazla gecikme, RMS gecikme yayılımı, tutarlılık bant genişliği ve kanal DC kazancı gibi birkaç kanal

parametresini hesaplayabiliriz. Kanal DC kazancı (H_o), sabit bir verici gücü için ulaşılabilir sinyal-gürültü oranını belirler. Aşağıdaki şekilde hesaplandığı için Görünür Işık İletişimi (VLC) kanalının en önemli özelliklerinden biridir.

$$H_o = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) dt \quad (3.2)$$

Kanalın zaman dağılım parametreleri, RMS gecikme yayılımı ve ortalama aşırı gecikme sırasıyla verilmiştir [263].

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} (t-\tau_o)^2 h(t) dt}{\int_0^{\infty} h(t) dt}} \quad (3.3)$$

$$\tau_o = \frac{\int_0^{\infty} t \times h(t) dt}{\int_0^{\infty} h(t) dt} \quad (3.4)$$

Frekans korelasyon fonksiyonu Kanal Dürtü Yanıtı'ndan (CIR) şu şekilde elde edilebilir:

$$H(\Delta f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{-j2\pi\Delta f t} dt \quad (3.5)$$

Belirli bir korelasyon düzeyi c için (tipik olarak 0,9, 0,7 veya 0,5 olarak seçilir [264]), tutarlılık bant genişliği (B_c), normunun olduğu minimum frekans ayrımı olarak tanımlanır.

Bu seviye boyunca frekans korelasyon fonksiyonu. Şu şekilde hesaplanır;

$$B_c = \min(\Delta f) \text{ öyle ki } |H(\Delta f)| = c \quad (3.6)$$

Tablo 3.1. Kanal modelleme için farklı yaklaşımların karşılaştırılması [268]

	Metot	Yansima modeli	Yansima sayısı	Varsayımlar
	Önerilen yaklaşım	Dalgaboyu Bağı	Yüksek Dereceli (10 veya daha fazla yansima mümkündür)	-dağınık, speküler ve karışık yansımalar. -mobilyalı oda veya başka herhangi bir kapalı ortam -gerçekçi ölçülen kaynak
[44]	Monte Carlo Ray İzleme	Sabit Yansima	Üçüncü Sıra	- Tamamen Lambertini yansımaları -Boş oda -İdeal Lambertini kaynağı
[45]	Recursive	Sabit Yansima	Birinci Sıra	- Tamamen Lambertini yansımaları -Boş oda -İdeal Lambertini kaynağı
[46]	Recursive	Sabit Yansima	Birinci Sıra	- Tamamen Lambertini yansımaları -Boş oda -İdeal Lambertini kaynağı
[47]	Recursive	Ortalama Yansima	Dördüncü Sıra	- Tamamen Lambertini yansımaları -Boş oda -İdeal Lambertini kaynağı
[48]	Recursive	Dalgaboyu Bağı	Üçüncü Sıra	- Tamamen Lambertini yansımaları -Boş oda -İdeal Lambertini kaynağı

3.3. Mevcut Modellerle Karşılaştırma

Bölüm 3.1'de tartışıldığı gibi, literatürde Görünür Işık İletişim (VLC) kanal modellemesini ele almak için yalnızca bazı genel yaklaşımlar olmuştur [248–252]. Tablo 3.1'de mevcut durumdaki temel varsayımların karşılaştırılması ve yaklaşımımız verilmiştir.

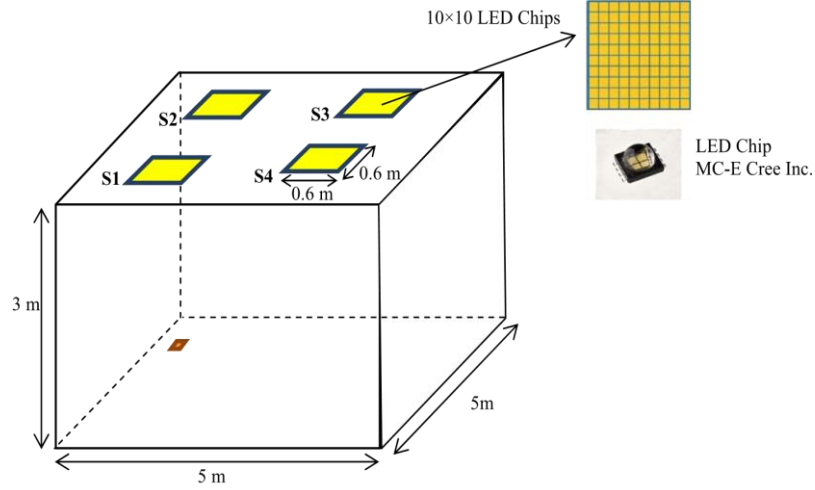
Dalga boyuna bağlı yansımayı dikkate alan mevcut tek çalışma [252]'dur. [252] dahil tüm çalışmalar sadece dağınık yansımaları ve ideal Lambert kaynağını

varsaymaktadır ve hesaplama süresi nedeniyle yansıma sayısı ile sınırlıdır. Yaklaşımımız daha esnek ve hesaplama açısından daha az talepkardır. Her türlü yansıma (yani dağınık, aynasal ve karışık) kolaylıkla hesaba katılabilir. Bununla birlikte sadece Lambertian kaynağı ile sınırlı değildir ve her türlü ışık kaynağını işleyebilir. Zemax® “Sobol örnekleme” kullandığından, simülasyonlar geleneksel ışın izleme yaklaşımlarına kıyasla nispeten daha az hesaplama süresi gerektirir [261,262]. Bu nedenle, daha iyi bir doğruluk için daha fazla sayıda yansımaya dayalı Kanal Dürtü Yanıtları (CIR) elde etmek mümkündür.

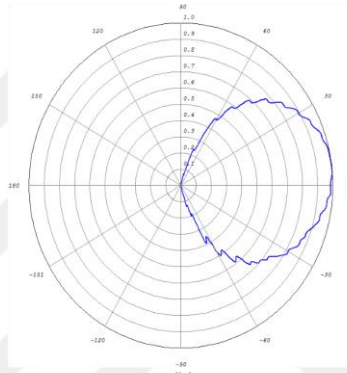
İki senaryo arasında karşılaştırma yapmak için, [252]'da kullanılan ortam ve değerleri dikkate alıyoruz (Şekil 3.5 ve Tablo3.2'deki ilgili parametreler). Spesifik olarak, boyutları 5m, 5m, 3m olan bir oda ele alıyoruz. LED armatürler tavana yerleştirilmiştir ve dedektör Şekil 4.5'teki gibi zeminin köşesine yerleştirilmiştir. Bir LED armatür 100 LED çipinden oluşur ve her çip 120^0 görüş açısı ile 0,45W yayar. Görüş Alanı (FOV) ve dedektörün alanı sırasıyla 85 cm^2 ve 1 cm^2 'dir. [252]'daki malzemelerin yansıması tamamen dağınık olarak kabul edilir ve ideal bir Lambert kaynağı kullanılır. Bizim durumumuzda, ideale yakın Lambert düzenine sahip Cree Xlamp® MC-E Beyaz LED (Şekil 3.5(b)) kullanıyoruz.

Şekil 3.6'da önerilen yaklaşımla elde edilen Kanal Dürtü Yanıtını (CIR) sunuyoruz. [48]'un kanal dürtü yanıtı (CIR) de bir kıyaslama olarak dahil edilmiştir. [48]'a benzer $k=3$ yansımalar olduğunu varsayıyoruz. Yaklaşımımızın doğruluğunu teyit eden iki kanal dürtü yanıtının (CIR) neredeyse aynı olduğu gözlemlenmiştir. İki kanal dürtü yanıtının (CIR) kuyukları arasında bazı küçük farklılıklar gözlenir. Bunun nedeni, ışık kaynağımızın ticari bir ışık kaynağı olması ve [252]'daki teorik olanın aksine ideal Lambertian (Şekil 3.5(b)) olmamasıdır. Ayrıca, kanal dürtü yanıtında (CIR) dört LED aydınlatma ile ilgili üç tepe noktasının mevcut olduğu not edilebilir.

En büyüğü en yakın LED'e (S2) karşılık gelir. İkincisi ise fotodedektörden (PD) aynı uzaklıkta bulunan iki LED (S1 ve S3) ile ilgilidir. Ve sonuncusu daha uzaktaki LED (S4) ile ilgilidir.



(a)

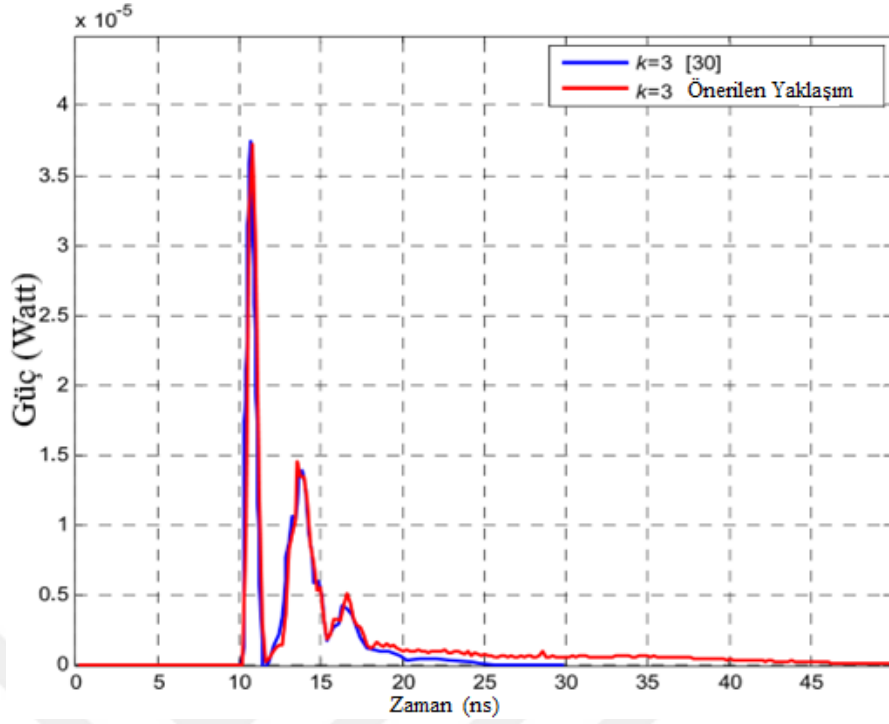


(b)

Şekil 3.5. (a) Üç boyutlu ortam. (b) Kaynağın emisyon modeli [268].

Tablo 3.2. [252]'da yer alan senaryo parametreleri;

Oda boyutları (m)	5x5x3
Zaman çözünürlüğü (Δt)	0.2(ns)
Işık sayısı	4
Her aydınlatma için çip sayısı	100
Her çipin gücü	0.45(W)
Işık pozisyonları (m)	(1.5,1.5,3) (11.5,3.5,3) (3.5,1.5,3)
PD pozisyonu (m)	(0.5,1,0)
Işığın görüş açısı	120^0
FOV of PD	85^0
PD alanı	1(cm ²)
Meteryaller	Tamamen dağınık yansımalar



Şekil 3.6. Önerilen yaklaşımın [252] ile karşılaştırılması [268].

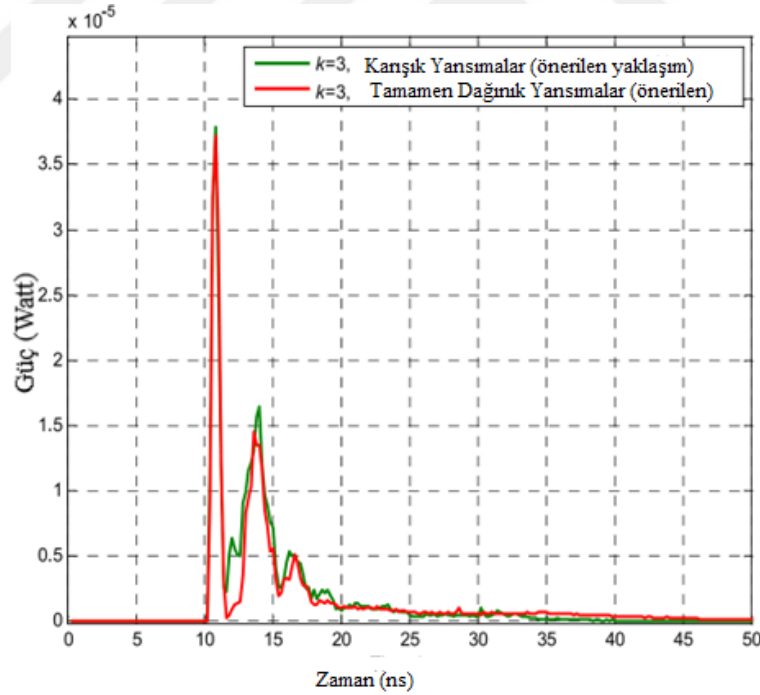
Tablo 3.3. Tamamen dağınık yansımalarda farklı k değerleri için ortalama aşırı gecikme, RMS gecikme yayılımı ve kanal DC kazancı [268]

k	$\tau_0(\text{ns})$	$\tau_{\text{RMS}}(\text{ns})$	H_0
0	12.58	2.10	4.825×10^{-5}
1	13.53	3.33	6.030×10^{-5}
2	15.59	6.60	7.068×10^{-5}
3	17.26	8.95	7.673×10^{-5}
4	17.42	9.25	7.714×10^{-5}
5	17.42	9.25	7.714×10^{-5}
6	17.42	9.26	7.714×10^{-5}
7	17.42	9.26	7.714×10^{-5}
8	17.42	9.26	7.714×10^{-5}

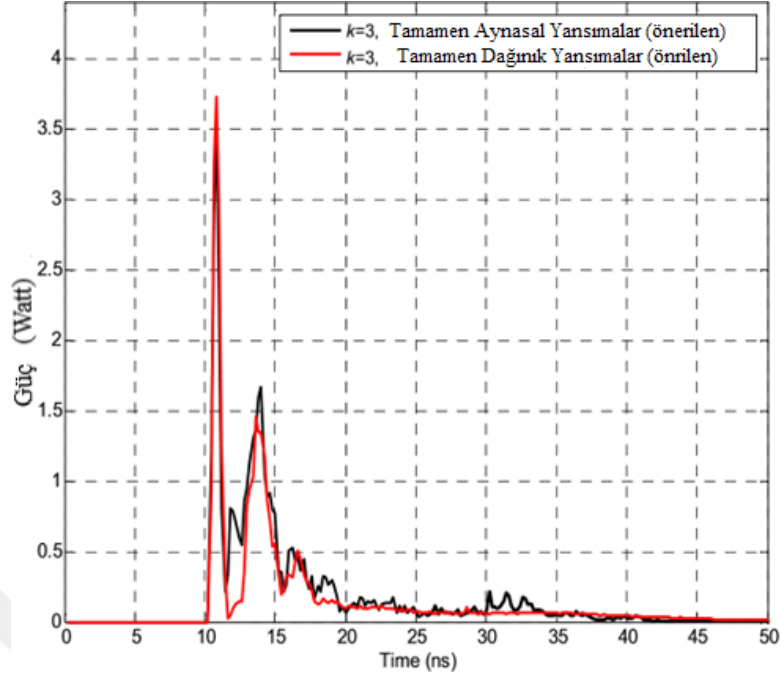
Şekil 3.6'da [252] ile bire bir karşılaştırma yapmak için $k = 3$ yansıma varsaydık; ancak, yaklaşımımızın daha fazla sayıda yansımayı kaldırabildiğini not ediyoruz.

Tablo3.3'te 8'e kadar olan k değerleri için ortalama aşırı gecikme, RMS gecikme yayılımı ve kanal DC kazancı gösterilmektedir.

[252]'daki özyinelemeli yaklaşımın tamamen dağınık yansımalar varsayımı üzerine kurulduğuna dikkat edilmelidir. Aşağıda, SF'nin sırasıyla 0,5 ve 0,2'ye ayarlandığı karışık yansımaları (Şekil 3.7) ve çoğunlukla aynasal yansımaları (Şekil 3.8) varsayıyoruz. Şekillerden bunlar açık biçimde görülmektedir. Şekil 3.7 ve 3.8, speküler bileşenlerin varlığının kanal dürtü yanıtında (CIR) dalgalanmalar yarattığını ve [252]'da ele alınan tamamen dağınık durumdan sapmalarla sonuçlandığını göstermektedir. Bu çoğunlukla speküler durumun düşünüldüğü Şekil 3.8'de belirgindir. Yayılma durumunda, bir ışın yüzeyden yansıdığı anda, ışının gücü yansıma katsayısı ile azalır ve bu güç, saçılan ışınlar arasında bölünür. Öte yandan, aynasal durumda, ışının gücü sadece yansıma katsayısı ile azalır ve saçılan ışınlar arasında güç dağılımı yoktur. Malzemeler için speküler bileşenler göz önüne alındığında, ışınların gücü yavaş yavaş bozulur ve bu da kanal dürtü yanıtında (CIR) dalgalanmalara neden olur.



Şekil 3.7. Karışık yansımalar ve tamamen dağınık yansımalar varsayımları altında kanal dürtü yanıtlarının (CIR) karşılaştırılması [268].



Şekil 3.8. Çoğunlukla speküler yansımalar ve tamamen dağınık yansımalar varsayımları altında kanal dürtü yanıtlarının (CIR) karşılaştırılması [268].

Tablo 3.4. Karışık yansımalar durumunda farklı k değerleri için ortalama fazla gecikme, RMS gecikme yayılımı ve kanal DC kazancı [268]

k	$\tau_o(\text{ns})$	$\tau_{\text{RMS}}(\text{ns})$	H_0
0	12.44	1.98	4.534×10^{-5}
1	13.88	3.52	7.387×10^{-5}
2	14.76	4.93	8.063×10^{-5}
3	15.05	5.49	8.193×10^{-5}
4	15.11	5.61	8.209×10^{-5}
5	15.11	5.61	8.210×10^{-5}
6	15.11	5.61	8.210×10^{-5}

Yansıma sayısının kanal dürtü yanıtı (CIR) üzerindeki etkisini değerlendirmek için Tablo 3.4 ve Tablo 3.5, karışık ve çoğunlukla speküler yansıma durumları için kanal parametrelerinin değerlerini sunar. Tamamen dağınık duruma benzer karma durum için dört yansımadan sonra RMS gecikmesi, ortalama aşırı gecikme ve kanal DC

kazancının doygun olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, çoğunlukla speküler durumda, bu yedi yansımadan sonra gerçekleşir.

Tablo 3.5. Çoğunlukla speküler yansımalar durumunda farklı k değerleri için ortalama fazla gecikme, RMS gecikme yayılımı ve kanal DC kazancı [268]

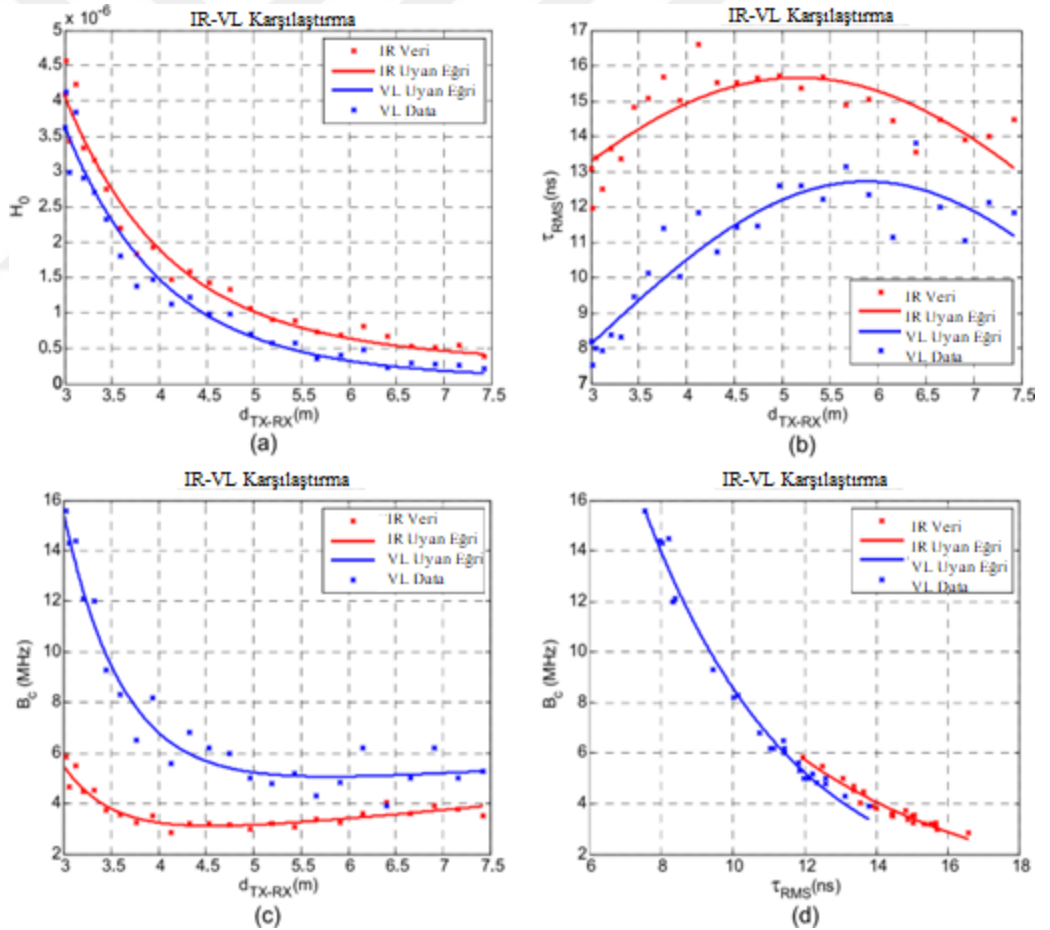
k	$\tau_o(\text{ns})$	$\tau_{\text{RMS}}(\text{ns})$	H_o
0	12.365	1.945	4.190×10^{-5}
1	13.854	3.454	7.406×10^{-5}
2	15.241	5.376	8.602×10^{-5}
3	16.469	7.124	9.198×10^{-5}
4	17.079	8.077	9.433×10^{-5}
5	17.444	8.783	9.538×10^{-5}
6	17.643	9.227	9.585×10^{-5}
7	17.744	9.491	9.605×10^{-5}
8	17.792	9.638	9.612×10^{-5}
9	17.816	9.721	9.616×10^{-5}
10	17.818	9.733	9.616×10^{-5}
11	17.821	9.744	9.616×10^{-5}
12	17.821	9.744	9.616×10^{-5}
13	17.821	9.745	9.616×10^{-5}
14	17.821	9.745	9.616×10^{-5}

3.4. Çeşitli İç Mekân Ortamları için VLC Kanal Özellikleri

Kanal modelleme yaklaşımımızı bir önceki bölümde tanıttık ve avantajlarımızı vurgulayan mevcut bazı çalışmalar ile karşılaştırdık. Bu bölümde, yaklaşımımıza dayanarak, bir dizi iç ortam için kanal dürtü yanıtlarını (CIR) sunuyoruz ve ilgili kanal özelliklerini tartışıyoruz.

3.4.1. Verici ve Alıcı Arasındaki Mesafenin Etkisi

Bu bölümde, verici ve alıcı arasındaki mesafe değişiminin kanal parametreleri üzerindeki etkisini araştırıyoruz. Boyutları 10m, 10m, 3m olan boş bir oda düşünüyoruz. Verici tavanın ortasına yerleştirilerek konumu sabitlenir. Alıcının konumu ise zeminin köşesi ve odanın ortasına uzanan diyagonal çizgi üzerinde ilerler. Verici ve alıcı (d_{TX-RX}) arasındaki mesafe 3 m ile 7,42 m arasında değişiklik gösterir. Bir önceki bölüme benzer ve 1 cm^2 olarak, dedektörün görüş alanı (FOV) ve açısının 85° olduğunu varsayıyoruz. Oda iç yüzeyinde kullanılan malzemeler sıra ile; duvarda alçı, tavanda alçı ve zeminde çam ağacıdır [255]. VL ve IR bandı arasındaki farkları vurgulamak için, aynı varsayımlar altında kızılötesi (IR) bandı için aynı çalışmayı tekrarlıyoruz. Görünür Işık (VL) ve kızılötesi (IR) bandı için sırasıyla Şekil3.4(a) ve (b)'de verilen ışık kaynaklarını kullanıyoruz.



Şekil 3.9. (a) Mesafeye karşı kanal DC kazancı. (b) RMS gecikmesine karşı mesafe. (c) Tutarlılık bant genişliğine karşı mesafe. (d) Tutarlılık bant genişliğine karşı RMS gecikme yayılımı [268].

Yukarıda bahsedilen varsayımlara dayalı olarak hazırlanan simülasyon ile Şekil3.9’da kanal RMS gecikme yayılımı, DC kazancı ve tutarlılık bant genişliğinin mesafeyle nasıl değiştiğini göstermektedir. Başlıca gözlemler aşağıda özetlenmiştir.

3.4.1.1. Kanal DC Kazancı [Şek. 9(a)]

d_{TX-RX} arttıkça alınan gücün negatif üstel bir şekilde azaldığı ve kanal DC kazancının azalmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Eğri uydurma yoluyla, DC kazancını d_{TX-RX} cinsinden şu şekilde ifade edebiliriz:

$$H = \begin{cases} 6.54 \times 10^{-5} e^{-0.99 d_{TX-RX}} + 7.52 \times 10^{-7} e^{-0.26 d_{TX-RX}} & VL \text{ BAND} \\ 5.71 \times 10^{-5} e^{-0.93 d_{TX-RX}} + 9.08 \times 10^{-7} e^{-0.12 d_{TX-RX}} & IR \text{ BAND} \end{cases} \quad (3.7)$$

VL ve IR için elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında; benzer konfigürasyonlar için Görünür Işık (VL) kanallarının DC kazançlarının, kızılötesi (IR) kanallarına göre daha küçük olduğunu ortaya koymaktadır. Bunun başlıca nedeni, kızılötesi (IR) bandındaki yansıtma değerlerinin Görünür Işık (VL) bandındakinden daha büyük olmasıdır.

3.4.1.2. RMS Gecikme Yayılımı [Şekil 3.9(b)]

RMS gecikme yayılımının artan mesafe ile önce arttığı, ardından azaldığı gözlemlenmiştir. Yapılandırmamızda, alıcının konumu diyagonal üzerinde değiştirilirken vericinin konumunun sabit olduğuna dikkat edilmelidir. Bu davranış değişikliği, dedektör konumunun bir sonucudur. Benzer davranış [265]'te de rapor edilmiştir. Eğri uydurma yoluyla, d_{TX-RX} cinsinden RMS gecikme yayılımını şu şekilde ifade ederiz:

$$\tau_{RMS} = \begin{cases} 12.72 e^{-\left(\frac{d_{TX-RX}-5.88}{4.29}\right)^2} & VL \text{ BAND} \\ 15.66 e^{-\left(\frac{d_{TX-RX}-5.17}{5.34}\right)^2} & IR \text{ BAND} \end{cases} \quad (3.8)$$

Kızılötesi (IR) ve Görünür Işık (VL) için elde edilen eğimlerin karşılaştırılmasında; uygulanmalar için Görünür Işık (VL) ile RMS yayılımının, kızılötedsi (IR) kanallarından daha küçük olduğunu ortaya koyuyor. DC kazançları

açısından benzer şekilde, bu gözlemlerdeki yansıma oranları Görünür Işık (VL) bandındakilerden daha büyük bir şekilde olacaktır.

Sonuçlarımız, Görünür Işık (VL) kanalının verilen ortam içinde 8-13 ns'lik bir RMS gecikme yayılımı sunduğunu göstermektedir. Saniyede birden fazla gigabit düzeyinde veri hızlarını hedeflemek, onlarca simgeyi kapsayan semboller arası girişim (ISI) ortaya çıkaracaktır. Bu, yüksek hızlı Görünür Işık İletişim (VLC) sistemleri için uygun semboller arası girişim (ISI) azaltma tekniklerinin kullanılmasını gerektirir. Optik dikey frekans bölmeli çoğullama [176,178,183] ve eşitleme teknikleri [177, 184,185] gibi potansiyel çözümler Görünür Işık İletişimi (VLC) literatüründe bulunabilir.

3.4.1.3. Tutarlılık Bant Genişliği [Şek. 9(c) ve (d)]

Şekil 3.9(c)'den, artan mesafeyle birlikte tutarlılık bant genişliğinin önce azaldığı, ardından hafifçe arttığı görülmektedir. Tutarlılık bant genişliği, RMS gecikme yayılımı ile ters orantılı olduğu için bu durum olağan karşılanmalıdır. Spesifik olarak, d_{TX-RX} açısından tutarlılık bant genişliğini şu şekilde elde ederiz:

$$B_c = \begin{cases} 1349e^{-1.60d_{TX-RX}} + 3.93e^{0.03d_{TX-RX}} & VL \text{ BAND} \\ 896.5e^{-1.91d_{TX-RX}} + 1.92e^{0.09d_{TX-RX}} & IR \text{ BAND} \end{cases} \quad (3.9)$$

Ayrıca Şekil 3.9(c)'den VL kanallarının potansiyel olarak IR kanallarından daha büyük iletim bant genişliği sağlayabileceği gözlemlenmiştir.

Şekil 3.9(d)'de, tutarlılık bant genişliği ve RMS gecikme yayılımı arasındaki ilişkiyi daha da net anlayabiliyoruz. Eğri uydurma yoluyla, bu ilişki aşağıdaki şekilde formülize edilebilir:

$$B_c = \begin{cases} 1934 \tau_{RMS}^{-2.37} & 7.5 < \tau_{RMS} < 14 & VL \text{ BAND} \\ 2303 \tau_{RSM}^{-2.40} & 12 < \tau_{RMS} < 16.6 & IR \text{ BAND} \end{cases} \quad (3.10)$$

3.4.2. Çoklu Vericilerin Etkisi, Verici/Alıcının Konumu/Dönüşü ve Nesnelerin Varlığı

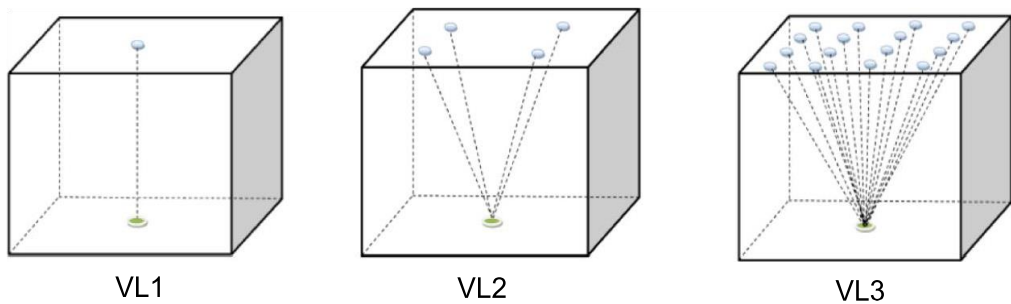
Bir önceki bölümde, tek vericili boş bir oda için Kanal Dürtü yanıtları (CIR) elde ettik ve ilgili kanal parametrelerini sunduk. Bu bölümde, farklı verici özellikleri (yani, çoklu vericiler ve dizi tipi), alıcı özellikleri (yani, konum ve dönüş) ve mobilyalara sahip çeşitli ortamları ele alıyoruz.

Çalışmamızda duvarları ve tavanı sıvalı, zemini çam olan 5mx5mx3m büyüklüğünde bir oda varsayılmıştır. LED'ler için toplam güç 1 W'dir. Bu varsayımla, kanal DC kazancını ortalama alınan güçle ilişkilendiririz [189]. Kolay tanımlama için, farklı konfigürasyonları Şekil 3.2'de gösterilen VLx (x= 1, 2, ..., 8) olarak etiketliyoruz (Şekil 3.10-Şekil3.12).

3.4.2.1. Çoklu Verici Dağıtımının Etkisi

Şekil 3.10'da farklı sayıda vericiye sahip üç konfigürasyonu ele alıyoruz. Bu konfigürasyonların temel özellikleri şu şekildedir:

- **VL1:** tavanın ortasında 1 verici ve zeminin ortasında tek alıcı bulunan boş dikdörtgen oda;
- **VL2:** tavanda aralarında orantılı mesafe bulunan 4 verici ve zeminin ortasında tek bir alıcı bulunan boş dikdörtgen oda;
- **VL3:** tavanda aralarında orantılı mesafe bulunan 16 verici ve zeminin ortasında tek alıcı bulunan boş dikdörtgen oda.



Şekil 3.10. Çoklu ışık kaynakları ile konfigürasyon [268].

Tablo 3.6, söz konusu üç konfigürasyon için alınan sonuç parametrelerini gösterilmektedir. Şekildeki gibi verici sayısını artırarak (VL1, VL2 ve VL3), verici ve alıcının mükemmel bir şekilde hizalandığı VL1'e göre kanal DC kazancının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu gözlemin sabit bir toplam iletim gücü varsayımı altında yapıldığına dikkat edilmelidir. Bu nedenle alınan güç, tavanda daha fazla dağılan LED'lerle azalır. Tablo 3.6'dan ayrıca, birden fazla kaynaktan daha fazla saçılma alındığından, tek kaynaklı VL1'e kıyasla VL2 ve VL3'te RMS gecikme yayılımının arttığı gözlemlenmiştir.

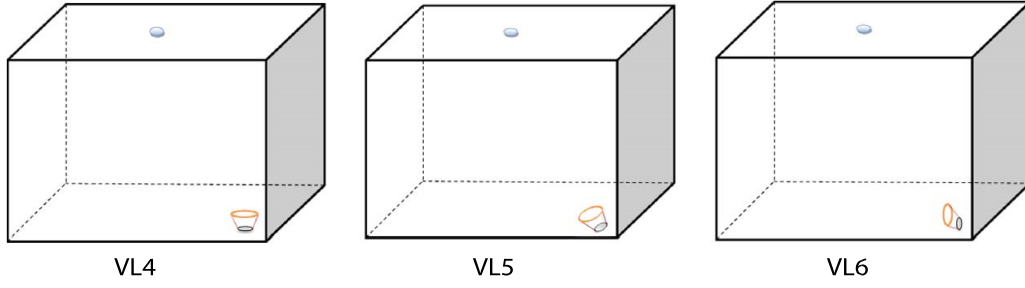
Tablo 3.6. Farklı sayıda verici için kanal parametreleri [268]

Channel Parameters Config.	$\tau_o(ns)$	$\tau_{RMS}(ns)$	H_o
VL1	15.22	10.55	5.90×10^{-6}
VL2	19.92	10.60	3.02×10^{-6}
VL3	20.26	10.95	2.58×10^{-6}

3.4.2.2. Alıcının Konumunun/Dönüşünün Etkisi

Şekil 3.11'de, farklı alıcı dönüşlerine sahip üç konfigürasyonu ele alıyoruz. Bu konfigürasyonların ana özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- **VL4:** tavanın ortasında tek verici ve zeminin köşesinde yukarıya bakan tek alıcı bulunan boş dikdörtgen oda;
- **VL5:** tavanın ortasında tek verici ve zeminin köşesinde 45 derece dönebilen tek alıcı bulunan boş dikdörtgen oda;
- **VL6:** tavanın ortasında tek verici ve zeminin köşesinde 90 derece dönebilen tek alıcı bulunan boş dikdörtgen oda.



Şekil 3.11. Alıcının çeşitli dönüşleri ile konfigürasyon [268].

Elde edilen kanal dürtü yanıtları (CIR) ve kanal parametrelerine dayanarak (Tablo 3.7), dedektörün kaynağa doğru döndürülmesiyle (VL5), kanal DC kazancının VL4 ve VL6'ya göre arttığını gözlemliyoruz. Alıcı sırasıyla tavan ve duvarlara doğru yönlendirilir. Ayrıca dedektörün köşe tarafına hareket ettirilmesiyle dedektörün zeminin ortasında bulunduğu VL1'e göre RMS gecikme yayılımının arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum köşe kenarlarından daha fazla saçılma gücü alınmasının bir sonucudur.

Tablo 3.7. Detektörün farklı dönüş açıları için kanal parametreleri [268]

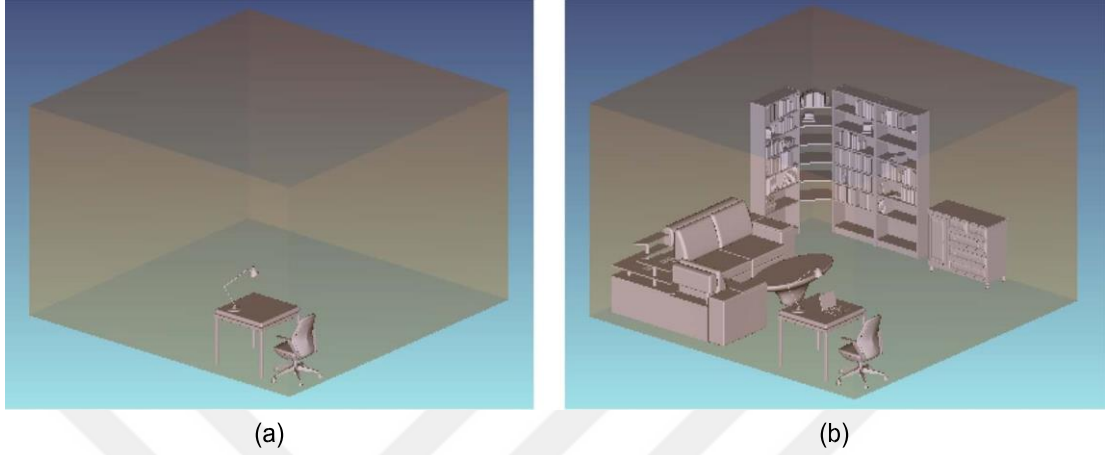
Channel Parameters Config.	$T_{tr}(ns)$	$\tau_o(ns)$	$\tau_{RMS}(ns)$	H_o
VL4	49	26.18	11.59	1.09×10^{-6}
VL5	52	26.62	12.04	1.35×10^{-6}
VL6	51	26.34	12.97	1.17×10^{-6}

3.4.2.3 Çevredeki Nesnelerin Etkisi

Şekil 3.12'de, bir odadaki nesnelerin (örn. mobilya) etkisini değerlendirmek için iki farklı konfigürasyonu ele alıyoruz. Verici tavanın ortasına ve alıcı zeminin ortasına yerleştirilmiştir. VL7 ve VL8'de, VL1 ile aynı ölçülerde odayı boyutlandırıyoruz. Bu konfigürasyonların ana özellikleri şu şekildedir:

- **VL7:** masa lambası, masa ve sandalye içeren dikdörtgen oda;

- **VL8:** çalışma masası, masa lambası, dizüstü bilgisayar, sandalye, kanepa, sehpa ve kütüphane dolabı içeren dikdörtgen oda.



Şekil 3.12. (a) az mobilya ve (b) çok mobilya ile konfigürasyon.

VL7 ve VL8'de sıra, masa lambası, sandalye, kafes, dizüstü bilgisayar, kütüphane, sehpa ve kanepenin kaplama malzemelerinin sırasıyla çam ağacı, siyah parlak boya, siyah parlak boya, çam ağacı, siyah parlak boya, çam ağacı olduğunu varsayıyoruz.

Tablo 3.8. Boş oda ve mobilyalı oda için kanal parametreleri [268]

Channel Parameters Config.	$T_{tr}(ns)$	$\tau_o(ns)$	$\tau_{RMS}(ns)$	H_o
VL7	41	15.10	10.41	5.91×10^{-6}
VL8	37	13.08	7.80	5.58×10^{-6}

Elde edilen kanal dürtü yanıtları (CIR) ve kanal parametrelerine dayanarak (Tablo 3.8), çok sayıda mobilyalı konfigürasyonda (VL8), odadaki mobilyaların varlığının, gecikme yayılımının ve kanal DC kazancının azalmasına neden olduğunu

gözlemliyoruz. Öte yandan, az mobilyalı (VL7) odadaki gecikme yayılımı ve kanal DC kazancı, boş bir odadakilere benzer. Ancak, kaynağın, dedektörün ve mobilyaların göreceli konumlarına bağlı olarak, daha önceki bir IR kanal modelleme çalışmasında belirtildiği gibi kanal dürtü yanıtı (CIR) üzerinde farklı gözlemler yapılabileceği belirtilmelidir [266].

3.5. Sonuç

Bu çalışmada, Zemax[®] adlı ticari bir optik ve aydınlatma tasarım yazılımı kullanak gerçekçi bir Görünür Işık İletişim (VLC) kanal modeli önerdik. Bu yazılımın gelişmiş ışın izleme özelliklerinden yararlanarak, yansıma katsayılarının dalga boyu bağımlılığı ve farklı yansıma türleri (yaygın, speküler, dağınık ve speküler durumlar) gibi pratik sorunları hesaba katan gerçekçi Kanal Dürtü Yanıtları (CIR) elde ettik. Ayrıca, mevcut çalışmalarda tipik olarak kullanılan ideal Lambert kaynakları yerine ticari ışık kaynaklarını entegre edebildik. Böylece daha yüksek sıralı yansıma sayısına sahip Kanal Dürtü Yanıtları (CIR) elde ettik. Çalışmamızın ilk bölümünde, yaklaşımımızın doğruluğunu teyit etmek için, ilk olarak, tamamen dağınık yansımalar ve ideal Lambert kaynağı varsayımı altında yaklaşımımızın [252]'daki ile aynı Kanal Dürtü Yanıtını (CIR) verdiğini gösterdik. Daha sonra speküler ve karışık yansımaların etkisini tartıştık. Sonuçlarımız, aynasal bileşenlerin varlığının Kanal Dürtü Yanıtında (CIR) dalgalanmalar yarattığını ve tamamen dağınık durumdan sapmalara yol açtığını gösterdi. Ayrıca, özellikle speküler durumlar için daha yüksek dereceli yansımaları dikkate almanın önemini gösterdik. Çalışmamızın ikinci bölümünde, verici ve alıcı arasındaki değişen mesafenin kanal parametreleri üzerindeki etkisini araştırdık ve mesafenin bir fonksiyonu olarak kanal DC kazancı ve RMS gecikme yayılımı için kapalı form ifadeleri elde ettik. Sonuçlarımız, alınan gücün negatif üstel bir şekilde azaldığını ve bunun da kanal DC kazancının azalmasına neden olduğunu gösterdi. Ayrıca, artan mesafe ile RMS gecikme yayılımının önce arttığı, ardından azaldığı gözlemlenmiştir. Kızılötesi (IR) ve Görünür Işık (VL) için elde edilen sonuçların karşılaştırılmasını yaptık. Görünür Işık (VL) kanallarının DC kazançlarının ve RMS gecikme yayılımının aynı konfigürasyonlar için Kızılötesi (IR) kanallarındakilerden daha küçük olduğunu ortaya koymaktadır. Sonunda verici özelliklerinin (yani tekli ve çoklu vericiler), alıcı özelliklerinin (yani konum, dönüş) ve ortam içindeki nesnelerin (yani mobilya) Kanal Dürtü Yanıtı (CIR) üzerindeki etkisini gösterdik.

4.BÖLÜM: SİMİLASYON SONUÇLARI VE PERFORMANS ANALİZİ

4.1. SNR Analizi

A. Parazit olmadan—Elektriksel SNR, fotodetektör duyarlılığı R, alınan optik güç ve gürültü varyansı cinsinden şu şekilde ifade edilebilir:

$$SNR = \frac{(RP_r)^2}{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2} \quad (4.1)$$

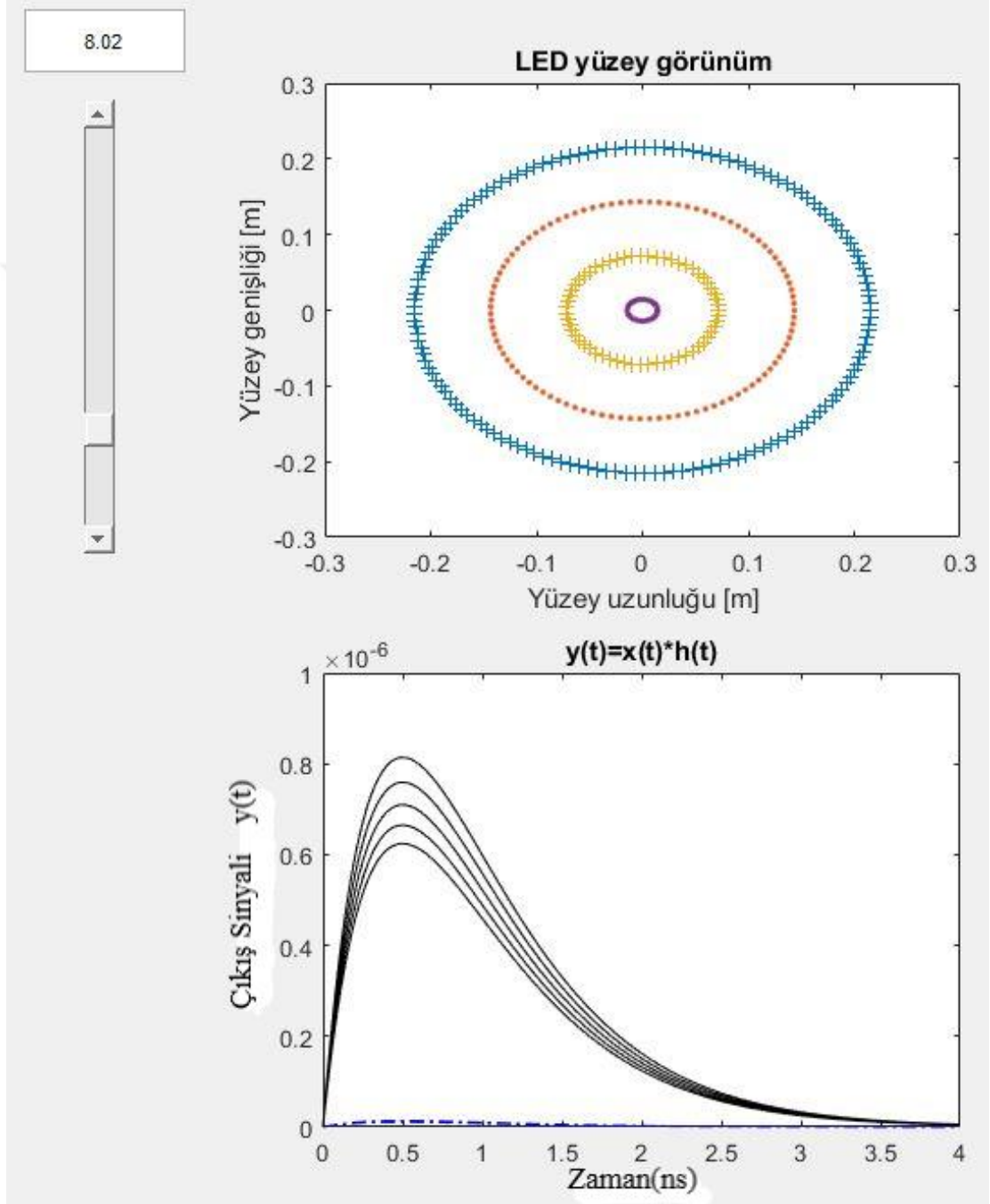
Atış ve termal gürültü varyansları [95] tarafından verilmiştir:

$$\sigma_{shot}^2 = 2qR(P_r + P_{r-isi})B + 2qI_B I_2 B \quad (4.2)$$

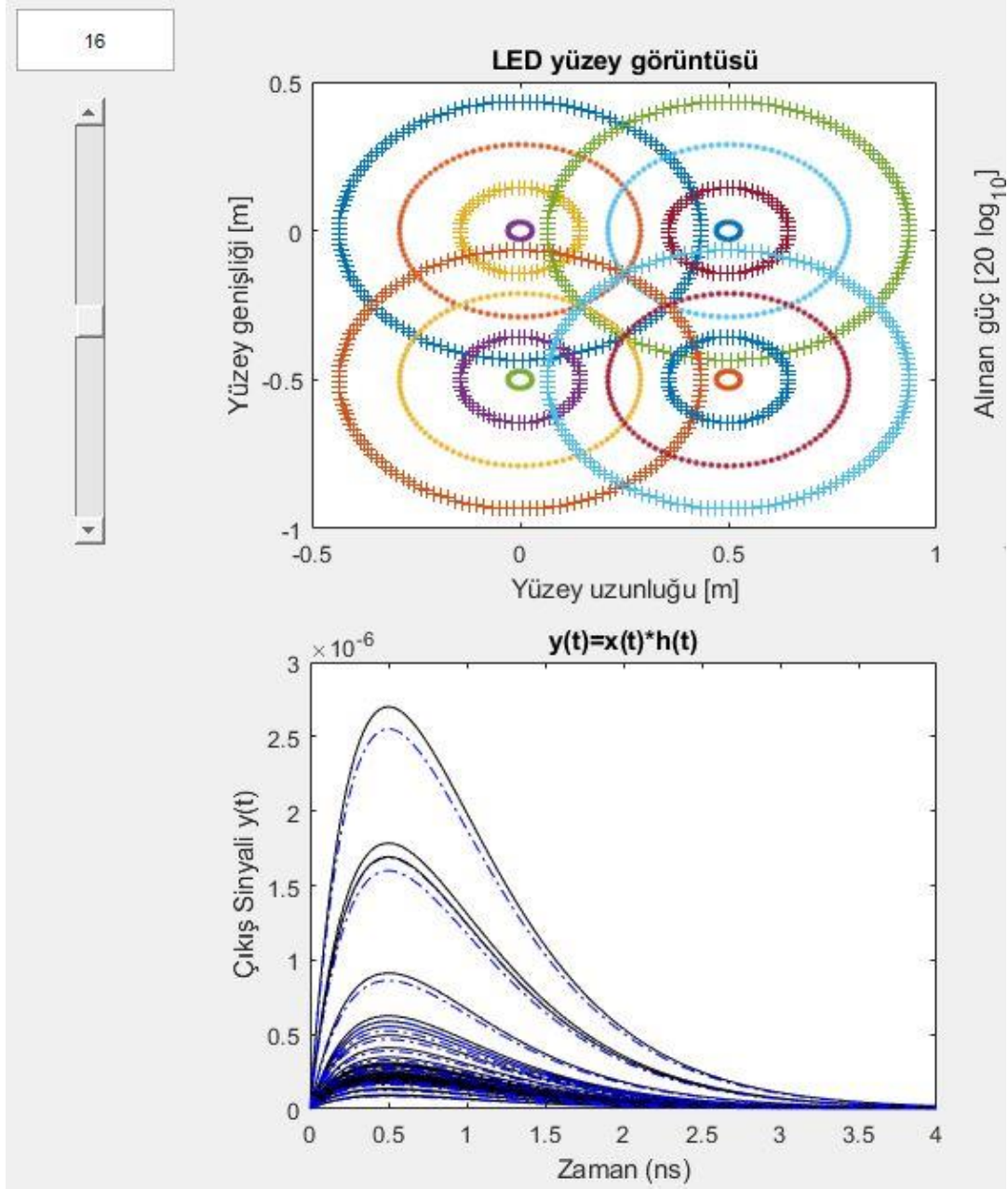
$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{8\pi k T_k}{G_{ol}} C_{pd} A I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 \kappa T_k \Gamma}{g_m} C_{pd}^2 A^2 I_3 B^3 \quad (4.3)$$

Fotodetektörü takip eden elektrik filtresinin bant genişliğinin B Hz ile temsil edildiği yerde, κ Boltzmann sabiti, I_B arka plan radyasyonundan kaynaklanan fotoakım, T_k mutlak sıcaklık, G_{ol} açık çevrim voltaj kazancı, C_{pd} sabittir birim alan başına fotodetektörün kapasitansı, Γ , FET kanalı gürültü faktörü, g_m , FET geçiş iletkenliği,

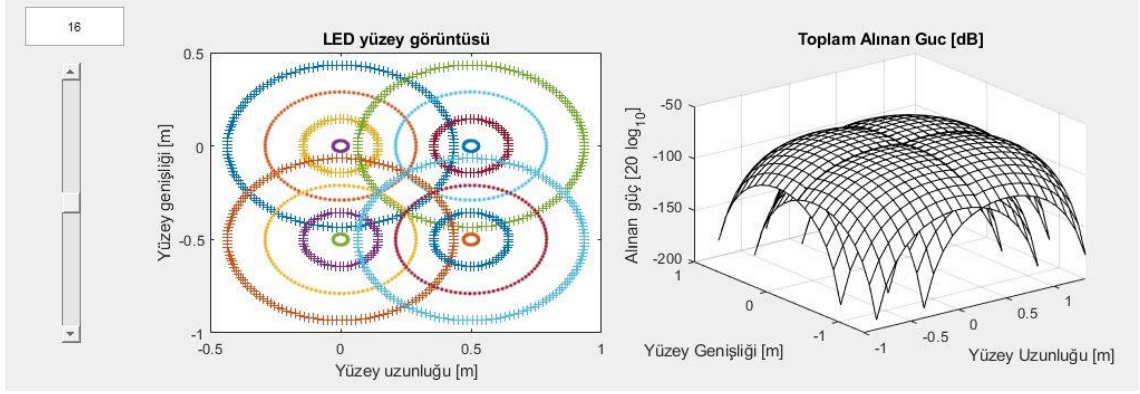
gürültü bant genişliği faktörleri $I_2 = 0,562$ ve $I_3 = 0,0868$ 'dir. Burada gösterilmeyen, elektrik yükselticiden kaynaklanan akım ve gerilim gürültü katkılarının da olduğuna dikkat edilmelidir. Pratikte sistemlerde, bir gürültü terimi baskın kaynak olacaktır ve bu nedenle SNR, baskın gürültü kaynağı cinsinden tanımlanabilir.



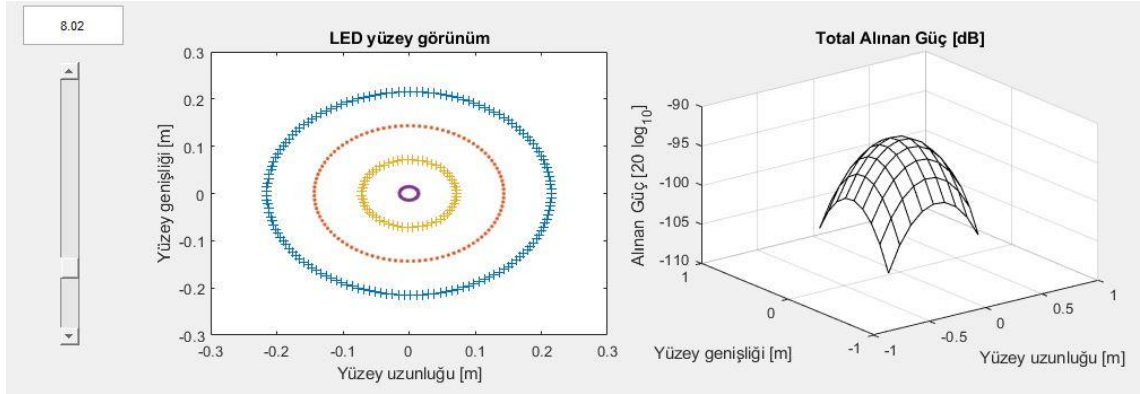
Şekil 4.1. SISO Kanalda yüzey uzunluğu ve yüzey genişliği parametrelerine karşın sistem çıkış gücü değişimi. (Program 4.1.)



Şekil 4.2. 2x2 MIMO kanal yüzey uzunluğu ve yüzey genişliği parametrelerine karşın güç yoğunluğu



Şekil 4.3. 2x2 MIMO Sistemde LED yüzey görüntüsü ve toplam alınan güç.



Şekil 4.4. SISO Sistemde LED yüzey görüntüsü ve toplam alınan güç.

B. Girişim ile—VLC'deki RF tabanlı hücresel sistemlerde olduğu gibi, iki girişim kaynağı vardır: kanallar arası ve ortak kanal girişimi. Ağ girişimi genellikle hiçbir sinyalin baskın olmadığı bir dizi bağımsız sinyalin birikimi olan bir Gauss rasgele süreci olarak modellenir. ISI (ortak kanal girişimi) ile çok yollu durumu göz önünde bulundurarak, sinyal için alınan güç ve ISI sırasıyla ile verilir.

$$P_{r-sig} = \int_0^T \left\{ \sum_{i=1}^{N_{LEDS}} h_i(t) \otimes x(t) \right\} dt$$

(4.4)

$$P_{r-isi} = \int_T^\infty \left\{ \sum_{i=1}^{N_{LEDS}} h_i(t) \otimes x(t) \right\} dt$$

Bu nedenle, mevcut bu durumda, merkezi limit teoremini kullanın ve sinyal-parazit oranını (SIR) tanımlamak için toplam girişim akımının σ_l^2 varyansını uygulayın.

$$SIR = \frac{(RP_r)^2}{\sigma_{shot-intr}^2} \quad (4.5a)$$

$$\sigma_{shot-intr}^2 = 2qRP_{r-isi}B \quad (4.5b)$$

$(RP_{r-isi})^2$ 'nin, ISI güç katkısı nedeniyle fotoakım olduğuna dikkat edilmelidir.

Normal olarak dağıtılan girişim ve gürültü ile, toplam bozulma varyanslarının toplamına eşit varyans ile normal olarak dağıtılır. Atış gürültüsü varyansı bu noktada şekilde edilir:

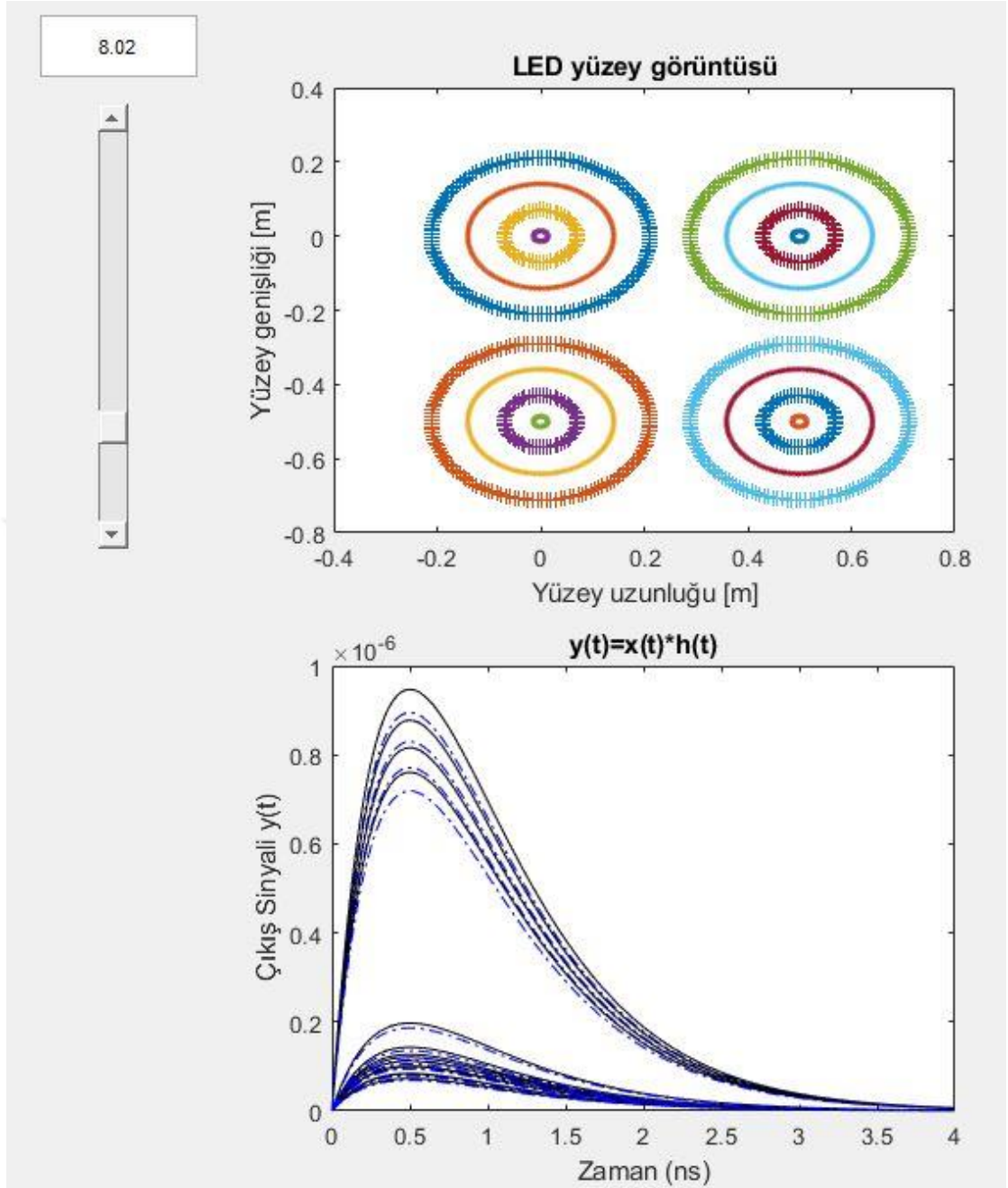
$$\sigma_{shot-m}^2 = 2qR(P_{r-s} + P_{r-isi})B + 2qI_B I_2 B \quad (4.6)$$

$$\sigma_{Total-m}^2 = \sigma_{shot-m}^2 + \sigma_{thermal}^2 \quad (4.7)$$

Sinyal-parazit artı gürültü oranı (SINR) şu şekilde tanımlanır:

$$SINR = \frac{(RP_r)^2}{\sigma_{Total-m}^2 + \sigma_{shot-intr}^2} \quad (4.8)$$

Gauss gürültüsü ve girişimi için, sırasıyla gürültü, girişim veya her ikisini dikkate alarak bir VLC bağlantısının performansı değerlendirilir; SNR, SIR ve SINR birbirinin yerine kullanılabilir. Genel yorumlar: (i) parazitin baskın kaynağı gürültü olduğunda, doğru bir performans aracı sağlayan SNR'yi kullanılır; (ii) parazit ağırlıklı sistemler için SIR kullanılır ve (iii) SINR, hem gürültü hem de girişim aynı büyüklük mertebesinde olduğunda kullanılmalıdır.



Şekil 4.5. 2x2 MIMO Sistemde girişimsiz güç analizi. (Program 4.1.)

Simülasyon sonuçlarına bakıldığında; MIMO kanalda girişimsiz iletim için çıkış gücü yüzey genişliği arttıkça artmaktadır. Yüzey genişliğinin yüzey uzunluğuna dikkate alındığında doğrudan görüş hattının bulunduğu Şekil 4.1.-Şekil4.3.'deki senaryolar için maximum alıcıya ulaşan güç yoğunluğu LOS hattı üzerinde (0,0) ekseninde elde edilmektedir. Ayrıca simülasyon sonuçlarından yüzey genişliğinin yüzey uzunluğuna

oranı değiştirilerek girişim kontrol edilmektedir. şekil 4.5.'de görüldüğü gibi dairesel ışıma örüntüleri arasında girişim bulunmamaktadır.



5.BÖLÜM: SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Sonuçlar ve Tartışma

Bu tez çalışmasında Görünür Işıklı Haberleşme (VLC) sistemlerinin farklı senaryoları için kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanım alanları araştırılarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Görünür ışıklı haberleşme sistemlerinde, optik kablosuz iletişim teknolojileri (OWC), radyo frekansı (RF) iletişimi için en önemli alternatif iletişim yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Özellikle son yıllarda yüksek hızlı kablosuz haberleşme sistemlerine olan talep ve ihtiyaç gün geçtikçe arttığı ve Radyo Frekansı (RF) haberleşmesinin kısıtlı olması nedeniyle bu talebi karşılayamadığı bilinmektedir. Radyo frekansı (RF) haberleşme sistemlerinin; kontrolsüz radyasyon yayılımı, sınırlı bant genişliği, düzenlenmiş frekans gibi sınırlamaların bulunması ve hareketli (mobil) kullanıcı sayısındaki artışa hitab edememesi nedeniyle radyo frekansı (RF) tabanlı iletişim, son yıllarda ciddi bir spektrum sorunu ile karşı karşıya kalınmasına neden olmaktadır. Bunun yanında Görünür ışık iletişimi (VLC), radyo frekansı (RF) ile karşılaştırıldığında, görünür ışık iletişimi (VLC); iletim ortamı için görünür ışık spektrumunda daha yüksek frekans bantları kullanmaktadır. Bant genişliği avantajı nedeniyle görünür ışık spektrumunu kullanan VLC, yüksek elektromanyetik parazitlere karşı güçlü direnç ve yüksek iletim hızı sunduğundan veri iletimi, güvenilirlik, hız ve kapasite açısından daha avantajlı ve günümüzde artan talebi karşılayacak bir teknolojidir. Bu açıdan optik kablosuz iletişim

sistemleri (OWC), yeni nesil kablosuz iletişim sistemleri için umut verici bir çözüm olarak görülmektedir.

Tez çalışması kapsamında VLC için literatürde yer alan modülasyon teknikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş, ayrıca SISO ve MIMO kanalları için benzetim çalışmaları yapılarak karşılaştırmalar sunulmuştur. Simülasyon sonuçlarına bakıldığında; yüksek güç- düşük boyut ve kompaktlık sağlanması açısından optik kablosuz iletişim sistemleri (OWC), yeni nesil kablosuz iletişim sistemleri için umut verici bir çözüm olarak görülmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] H. Chun, S. Rajbhandari, G. Faulkner, D. Tsonev, E. Xie, J. J. D. McKendry, E. Gu, M. D. Dawson, D. C. O'Brien, and H. Haas, **"LED Based Wavelength Division Multiplexed 10 Gb/s Visible Light Communications,"** J. Light. Technol., vol. 34, no. 13, sayfa 3047–3052, 2016.
- [2] G. Brezeanu, **"Silicon Carbide (SiC): A Short History. An Analytical Approach for SiC Power Device Design,"** Semicond. Conf. 2005. CAS 2005 Proceedings. 2005 Int., vol. 2, sayfa 345–348 vol. 2, 2005.
- [3] R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, and R. O. Carlson, **"Coherent Light Emission from GaAs Junctions,"** Phys. Rev. Lett., vol. 9, no. 9, sayfa 366–368, Nov. 1962.
- [4] G. Pang and T. Kwan, **"LED Traffic Light as a Communications Device,"** in IEEE/IEEE/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems, 1999, sayfa 788–793.
- [5] C. G. Lee, **"Visible Light Communication,"** in Short-Range Wireless Communications: Emerging Technologies and Applications, vol. 11, no. 01, R. Kraemer and M. Katz, eds. Wiley Publishing, 2015, sayfa 327–338.
- [6] "IEEE 802.15.7r." [Online]. Available: http://www.ieee802.org/15/pub/IEEE_802_15_WPAN_15_7_Revision1_Task_Group.htm. [Erişim Tarihi: 19.04.2016].
- [7] B. Hussain, F. Che, F. Zhang, T. S. Yim, L. Cheng, W. Ki, C. P. Yue, and L. Wu, **"A Fully Integrated IEEE 802. 15. 7 Visible Light Communication Transmitter with On-Chip 8-W 85% Efficiency Boost LED Driver C216 C217,"** Journal of Lightwave Technology, 2015, vol. 8724, no. c, sayfa 216–217.
- [8] S. Nakamura, T. Mukai, and M. Senoh, **"Candela-Class High-Brightness InGaN/AlGaIn DoubleHeterostructure Blue-Light-Emitting Diodes,"** Appl. Phys. Lett., vol. 64, no. 13, sayfa 1687–1689, Mar. 1994.
- [9] C. Michael Bourget, **An Introduction to Light-Emitting Diodes**, vol. 43, no. 7. The Society, 2008.
- [10] R. Mueller-Mach, G. O. Mueller, M. R. Krames, and T. Trottier, **"High-Power Phosphor-Converted Light-Emitting Diodes Based on III-Nitrides,"** IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 8, no. 2, sayfa 339–345, 2002.

- [11] D. A. Steigerwald, J. C. Bhat, D. Collins, R. M. Fletcher, M. O. Holcomb, M. J. Ludowise, P. S. Martin, and S. L. Rudaz, **“Illumination with Solid State Lighting Technology,”** IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 8, **no. 2**, sayfa 310–320, 2002.
- [12] I.-H. Tan, D. A. Vanderwater, J.-W. Huang, G. E. Hofler, F. A. Kish, E. I. Chen, and T. D. Ostentowski, **“Wafer Bonding of 75 mm Diameter GaP to AlGaInP-GaP Light-Emitting Diode Wafers,”** J. Electron. Mater., vol. 29, **no. 2**, sayfa 188–194, Feb. 2000.
- [13] Takahashi, A. Yoshikawa, and A. Sandhu, eds., **Wide Bandgap Semiconductors.** Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [14] K. Katayama, H. Matsubara, F. Nakanishi, T. Nakamura, H. Doi, A. Saegusa, T. Mitsui, T. Matsuoka, M. Irikura, T. Takebe, S. Nishine, and T. Shirakawa, **“ZnSe-Based White LEDs,”** J. Cryst. Growth, **vol. 214**, sayfa 1064–1070, Jun. 2000.
- [15] C. C. Wong, Y. C. Lin, B. R. Huang, Y. Z. Chiou, C. M. Chang, S. P. Chang, T. K. Lin, and S. J. Chang, **“ZnSe Based White Light Emitting Diode on Homoepitaxial ZnSe Substrate,”** IET Optoelectron., vol. 1, **no. 1**, sayfa 39–41, Feb. 2007.
- [16] P. Manousiadis, C. Hyunchae, S. Rajbhandari, R. Mulyawan, D. A. A. Vithanage, G. Faulkner, D. Tsonev, J. J. D. J. D. McKendry, M. Ijaz, X. Enyuan, E. Gu, M. D. D. Dawson, H. Haas, G. A. A. Turnbull, I. D. W.D. W. Samuel, D. O’Brien, H. Chun, S. Rajbhandari, R. Mulyawan, D. A. A. Vithanage, G. Faulkner, D. Tsonev, J. J. D. J. D. McKendry, M. Ijaz, E. Xie, E. Gu, M. D. D. Dawson, H. Haas, G. A. A. Turnbull, I. D. W. D. W. Samuel, and D. O’Brien, **“Demonstration of 2.3 Gb/s RGB White-Light VLC Using Polymer Based Colour-Converters and GaN Micro-LEDs,”** in **Summer Topicals Meeting Series (SUM)**, 2015, 2015, sayfa 222–223.
- [17] H. Chun, C. J. Chiang, A. Monkman, and D. Obrien, **“A study of Illumination and Communication Using Organic Light Emitting Diodes,”** J. Light. Technol., vol. 31, **no. 22**, sayfa 3511–3517, 2013.
- [18] P. A. P. A. Haigh, Z. Ghassemlooy, S. Rajbhandari, and I. Papakonstantinou, **“Visible Light Communications Using Organic Light Emitting Diodes,”** IEEE Commun. Mag., vol. 51, **no. 8**, sayfa 148–154, 2013.
- [19] S. Pimputkar, J. S. Speck, S. P. DenBaars, and S. Nakamura, **“Prospects for LED Lighting,”** Natature Photonics, **vol. 3**, sayfa 180–182, 2009.

- [20] M. S. Shur and A. Žukauskas, **“Solid-State Lighting: Toward Superior Illumination,”** Proc. IEEE, vol. 93, no. 10, sayfa 1691–1703, 2005.
- [21] U. S. D. of Energy, **“Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications,”** 2014.
- [22] T. Komine and M. Nakagawa, **“Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System Using LED Lights,”** Consum. Electron. IEEE, vol. 50, no. 1, sayfa 100–107, 2004.
- [23] P. R. Boyce, **Human Factors in Lighting.** CRC Press, 2014.
- [24] D. Sekulovski, L. Feri, T. Schenk, and J. M. G. Linnartz, **“Interactive Lighting Design Using Coded Light SSL,”** 2015, no. January 2009.
- [25] J. Muñoz, J. Muñoz, and R. Ivanov, **“Uniform Illumination of Distant Targets Using a Spherical LightEmitting Diode Array,”** Opt. Eng., vol. 46, no. 3, p. 033001, Mar. 2007.
- [26] H. Le Minh, D. O’Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, Y. J. Oh, M. Hoa Le, D. O’Brien, G. Faulkner, Z. Lubin, L. Kyungwoo, J. Daekwang, and O. YunJe, **“High-Speed Visible Light Communications Using Multiple-Resonant Equalization,”** IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 20, no. 14, sayfa 1243–1245, 2008.
- [27] H. Le Minh, D. O. Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, and Y. Oh, **“80 Mbit/s Visible Light Communications Using Pre-Equalized White LED,”** in 34th European Conference on Optical Communication, 2008. ECOC 2008., 2008, vol. 5, no. September, sayfa 1–2.
- [28] H. Le Minh, D. O’Brien, G. Faulkner, Z. Lubin, L. Kyungwoo, J. Daekwang, O. YunJe, W. Eun Tae, M. Hoa Le, D. O’Brien, G. Faulkner, Z. Lubin, L. Kyungwoo, J. Daekwang, O. YunJe, and W. Eun Tae, **“100-Mb/s NRZ Visible Light Communications Using a Postequalized White LED,”** IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 21, no. 15, sayfa 1063–1065, 2009.
- [29] Z. Ghassemloooy, **“Investigation of the Baseline Wander Effect on Indoor Optical Wireless System Employing Digital Pulse Interval Modulation,”** IET Commun., vol. 2, no. 1, sayfa 53–60, 2008.
- [30] A. M. Street, K. Samaras, D. C. Obrien, and D. J. Edwards, **“Closed Form Expressions for Baseline Wander Effects in Wireless IR Applications,”** Electron. Lett., vol. 33, no. 12, sayfa 1060–1062, 1997.

- [31] A. R. Hayes, Z. Ghassemlooy, N. L. Seed, and R. McLaughlin, **“Baseline-Wander Effects on Systems Employing Digital Pulse-Interval Modulation,”** IEE Proc. - Optoelectron., vol. 147, **no. 4**, sayfa 295–300, 2000.
- [32] **“Visible Light Communication Associations (VLCA).”** [Online]. Available: <http://vlca.net>.
- [33] **“St. Cloud First to Sign on for New Technology (press release).”** [Online]. Available: <https://www.tmcnet.com/usubmit/2010/11/19/5148608.htm>. [Erişim Tarihi: 08-07-2018].
- [34] 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**, sayfa B501–B506, 2012.
- [35] P. A. A. Haigh, Z. Ghassemlooy, S. Rajbhandari, I. Papakonstantinou, and W. Popoola, **“Visible Light Communications: 170 Mb/s Using an Artificial Neural Network Equalizer in a Low Bandwidth White Light Configuration,”** Light. Technol. J., vol. 32, **no. 9**, sayfa. 1807–1813, 2014.
- [36] D. Tsonev, H. Chun, S. Rajbhandari, J. J. D. McKendry, S. Videv, E. Gu, M. Haji, S. Watson, A. E. Kelly, G. Faulkner, M. D. Dawson, H. Haas, and D. O’Brien, **“A 3-Gb/s Single-LED OFDM-Based Wireless VLC Link Using a Gallium Nitride μ LED,”** IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 26, **no. 7**, sayfa 637–640, 2014.
- [37] Y. Wang, X. Huang, J. Zhang, Y. Wang, and N. Chi, **“Enhanced Performance of Visible Light Communication Employing 512-QAM N-SC-FDE and DD-LMS,”** Opt. Express, vol. 22, **no. 13**, sayfa 15328–15334, 2014.
- [38] G. Cossu, A. Wajahat, R. Corsini, and E. Ciaramella, **“5.6 Gbit/s Downlink and 1.5 Gbit/s Uplink Optical Wireless Transmission at Indoor Distances (≥ 1.5 m),”** in Optical Communication (ECOC), 2014 European Conference on, 2014, sayfa 1–3.
- [39] A. T. Hussein and J. M. H. Elmirghani, **“Mobile Multi-Gigabit Visible Light Communication System in Realistic Indoor Environment,”** J. Light. Technol., vol. 33, **no. 15**, sayfa 3293–3307, Aug. 2015.
- [40] Y. Wang, L. Tao, X. Huang, J. Shi, and N. Chi, **“8-Gb/s RGBY LED-Based WDM VLC System Employing High-Order CAP Modulation and Hybrid Post Equalizer,”** IEEE Photonics J., vol. 7, **no. 6**, sayfa 1–7, 2015.

- [41] P. Tian, X. Liu, S. Yi, Y. Huang, S. Zhang, X. Zhou, L. Hu, L. Zheng, and R. Liu, **“High-Speed Underwater Optical Wireless Communication Using a Blue GaN-Based Micro-LED,”** Opt. Express, vol. 25, no. 2, sayfa1193, Jan. 2017.
- [42] J. Luo, Y. Tang, H. Jia, and Q. Zhu, **“750 Mb / s Monochromatic LED-Based Real-Time Visible Light Communication System Employing a Low-Complexity Cascaded Post-Equalizer,”** Chinese Opt. Lett. Vol. 14, Issue 12, pp. 120604-, vol. 14, no. 12, sayfa 10–14, Dec. 2016.
- [43] **“Ultra-Parallel Visible Light Communication (UPVLC).”** [Online]. Available: <http://up-vlc.photonics.ac.uk>.
- [44] X. Liu, P. Tian, Z. Wei, S. Yi, Y. Huang, X. Zhou, Z.-J. Qiu, L. Hu, Z. Fang, C. Cong, L. Zheng, and R. Liu, **“Gbps Long-Distance Real-Time Visible Light Communications Using a High-Bandwidth GaN-Based Micro-LED,”** IEEE Photonics J., vol. 9, no. 6, sayfa 1–9, Dec. 2017.
- [45] R. X. G. Ferreira, E. Xie, J. J. D. McKendry, S. Rajbhandari, H. Chun, G. Faulkner, S. Watson, A. E. Kelly, E. Gu, R. V. Pentty, I. H. White, D. C. O’Brien, and M. D. Dawson, **“High Bandwidth GaN-Based Micro-LEDs for Multi-Gb/s Visible Light Communications,”** IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 28, no. 19, 2016.
- [46] D. V. Dinh, Z. Quan, B. Roycroft, P. J. Parbrook, and B. Corbett, **“GHz Bandwidth Semipolar (112̄2) InGaN/GaN Light-Emitting Diodes,”** Opt. Lett., vol. 41, no. 24, p. 5752, Dec. 2016.
- [47] S. Rajbhandari, H. Chun, G. Faulkner, D. O’Brien, A. V. N. V. N. Jalajakumari, K. Cameron, R. Henderson, E. Xie, J. J. D. J. D. McKendry, J. Herrnsdorf, E. Gu, M. D. Dawson, D. Tsonev, M. Ijaz, H. Haas, C. Hyunchae, G. Faulkner, D. O’Brien, A. V. N. V. N. Jalajakumari, K. Cameron, R. Henderson, X. Enyuan, J. J. D. J. D. McKendry, J. Herrnsdorf, E. Gu, M. D. Dawson, D. Tsonev, M. Ijaz, and H. Haas, **“Multi-Gigabit Integrated MIMO Visible Light Communication System: Progress and Updates,”** in Summer Topicals Meeting Series (SUM), 2015, 2015, sayfa 230–231.
- [48] H. Li, X. Chen, J. Guo, D. Tang, B. Huang, and H. Chen, **“200 Mb/s Visible Optical Wireless Transmission Based on NRZ-OOK Modulation of Phosphorescent White LED and a Pre-Emphasis Circuit,”** Chinese Opt. Lett., vol. 12, no. 10, p. 100604, 2014.
- [49] L. Honglei, C. Xiongbin, H. Beiju, T. Danying, C. Hongda, H. Li, X. Chen, B. Huang, D. Tang, and H. Chen, **“High Bandwidth Visible Light Communications**

Based on a Post-Equalization Circuit,” IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 26, **no. 2**, sayfa 119–122, 2014.

[50] Y. Y. Wang, J. Shi, C. Yang, Y. Y. Wang, and N. Chi, **“Integrated 10 Gb/s Multilevel Multiband Passive Optical Network and 500Mb/s Indoor Visible Light Communication System Based on Nyquist Single Carrier Frequency Domain Equalization Modulation,”** Opt. Lett., vol. 39, **no. 9**, sayfa 2576–9, May 2014.

[51] W. Yuanquan, C. Nan, Y. Wang, and N. Chi, **“Demonstration of High-Speed 2 x 2 Non-Imaging MIMO Nyquist Single Carrier Visible Light Communication with Frequency Domain Equalization,”** Light. Technol. J., vol. 32, **no. 11**, sayfa 2087–2093, 2014.

[52] S. Long, M. Khalighi, M. Wolf, Z. Ghassemlooy, and S. Bourennane, **“Performance of Carrier-Less Amplitude and Phase Modulation with Frequency Domain Equalization for Indoor Visible Light Communications,”** in 4th International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW), 2015, 2015, sayfa 16–20.

[53] Y. Wang, R. Li, Y. Wang, and Z. Zhang, **“3.25-Gbps Visible Light Communication System Based on Single Carrier Frequency Domain Equalization Utilizing an RGB LED,”** in Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest, 2014, **no. Th1F.1.**, sayfa 3–5.

[54] A. Nuwanpriya, S.-W. Ho, J. Zhang, A. Grant, and L. Luo, **“PAM-SCFDE for Optical Wireless Communications,”** J. Light. Technol., vol. 33, **no. 14**, sayfa 2938–2949, 2015.

[55] X. Li, N. Bamiedakis, X. Guo, J. McKendry, E. Xie, R. Ferreira, E. Gu, M. Dawson, R. Penty, and I. White, **“Wireless Visible Light Communications Employing Feed-Forward Pre-Equalization and PAM-4 Modulation,”** J. Light. Technol., vol. 34, **no. 8**, sayfa 2049–2055, 2016.

[56] 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,”** Opt. Express, vol. 21, **no. 25**, sayfa 31006–31011, 2013.

[57] S. Dimitrov, S. Sinanovic, and H. Haas, **“Signal Shaping and Modulation for Optical Wireless Communication,”** J. Light. Technol., vol. 30, **no. 9**, sayfa 1319–1328, 2012.

- [58] D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, **“Unlocking Spectral Efficiency in Intensity Modulation and Direct Detection Systems,”** IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 33, no. 9, sayfa 1758–1770, 2015.
- [59] A. H. Azhar and D. O’Brien, **“Experimental Comparisons of Optical OFDM Approaches in Visible Light Communications,”** 2013 IEEE Globecom Work. GC Wkshps 2013, sayfa 1076–1080, 2013.
- [60] C. Kottke, J. Hilt, K. Habel, J. Vučić and K. Langer, **“1.25 Gbit/s Visible Light WDM Link Based on DMT Modulation of a Single RGB LED Luminary,”** 2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications, Amsterdam, 2012, sayfa 1–3.
- [61] A. H. Azhar, T. A. Tran, D. O’Brien, and D. C. O’Brien, **“A Gigabit/S Indoor Wireless Transmission Using MIMO-OFDM Visible-Light Communications,”** IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 25, no. 2, sayfa 171–174, 2013.
- [62] K. Ying, Z. Yu, R. J. Baxley, H. Qian, G.-K. Chang, G. T. Zhou, **“Nonlinear Distortion Mitigation in Visible Light Communications,”** IEEE Wirel. Commun., vol. 22, no. 2, sayfa 36–45, 2015.
- [63] H. Qian, S. J. Yao, S. Z. Cai, and T. Zhou, **“Adaptive Postdistortion For Nonlinear LEDs in Visible Light Communications,”** IEEE Photonics J., vol. 6, no. 4, p. 7901508, 2014.
- [64] R. Mitra and V. Bhatia, **“Chebyshev Polynomial Based Adaptive Predistorter for Nonlinear LED Compensation in VLC,”** IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 1135, no. 2, sayfa 1–1, May 2016.
- [65] J. Vucic, C. Kottke, K. Habel, and K.-D. Langer, **“803 Mbit/s Visible Light WDM Link Based on DMT Modulation of a Single RGB LED Luminary,”** in 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2011, sayfa 1–3.
- [66] G. Cossu, A. M. Khalid, P. Choudhury, R. Corsini, and E. Ciaramella, **“2.1 Gbit/s Visible Optical Wireless Transmission,”** in Optical Communications (ECOC), 2012 38th European Conference and Exhibition on, 2012, sayfa 1–3.
- [67] Y. Wang, L. Tao, X. Huang, J. Shi, and N. Chi, **“Enhanced Performance of a High-Speed WDM CAP64 VLC System Employing Volterra Series-Based Nonlinear Equalizer,”** IEEE Photonics J., vol. 7, no. 3, sayfa 1–7, 2015.

- [68] G. Cossu, W. Ali, R. Corsini, and E. Ciaramella, **“Gigabit-Class Optical Wireless Communication System at Indoor Distances (1.5 ÷ 4 m),”** Opt. Express, vol. 23, no. 12, sayfa 15700–15705, 2015.
- [69] J. J. D. McKendry, R. P. Green, a. E. Kelly, G. Zheng, B. Guilhabert, D. Massoubre, E. Gu, M. D. Dawson, Z. Gong, B. Guilhabert, D. Massoubre, E. Gu, and M. D. Dawson, **“High-speed Visible Light Communications Using Individual Pixels in a Micro Light-Emitting Diode Array,”** IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 22, no. 18, sayfa 1346–1348, Sep. 2010.
- [70] R. Koester, D. Sager, W.-A. Quitsch, O. Pflingsten, A. Poloczek, S. Blumenthal, G. Keller, W. Prost, G. Bacher, and F.-J. Tegude, **“High-Speed GaN/GaInN Nanowire Array Light-Emitting Diode on Silicon (111),”** Nano Lett., vol. 15, no. 4, sayfa 2318–2323, 2015.
- [71] N. J. Findlay, J. Bruckbauer, A. R. Inigo, B. Breig, S. Arumugam, D. J. Wallis, R. W. Martin, and P. J. Skabara, **“An Organic Down-Converting Material for White-Light Emission from Hybrid LEDs.”** Adv. Mater., vol. 26, no. 43, sayfa 7290–4, 2014.
- [72] S. Jahangir, I. Pietzonka, M. Strassburg, and P. Bhattacharya, **“Monolithic Phosphor-Free InGaN/GaN Quantum Dot Wavelength Converter White Light Emitting Diodes,”** Appl. Phys. Lett., vol. 105, no. 11, p. 111117, Sep. 2014.
- [73] H. Chun, P. Manousiadis, S. Rajbhandari, D. A. A. Vithanage, G. Faulkner, D. Tsonev, J. J. D. J. D. McKendry, S. Videv, X. Enyuan, G. Erdan, M. D. D. Dawson, H. Haas, G. A. A. Turnbull, I. D. W. D. W. Samuel, D. C. C. O’Brien, E. Xie, E. Gu, M. D. D. Dawson, H. Haas, G. A. A. Turnbull, I. D. W. D. W. Samuel, and D. C. C. O’Brien, **“Visible Light Communication Using a Blue GaN μ LED and Fluorescent Polymer Color Converter,”** IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 26, no. 20, sayfa 2035–2038, 2014.
- [74] S. Collins, D. C. O’Brien, and A. Watt, **“High Gain, Wide Field of View Concentrator for Optical Communications,”** Opt. Lett., vol. 39, no. 7, sayfa 1756–1759, 2014.
- [75] R. Mulyawan, H. Chun, A. Gomez, S. Rajbhandari, P. P. Manousiadis, D. A. Vithanage, G. A. Turnbull, S. Member, I. D. W. Samuel, S. Collins, and D. O’Brien, **“MIMO Visible Light Communications Using a Wide Field-of-View Fluorescent Concentrator,”** IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 1135, no. 3, 2017.

- [76] A. David and M. J. Grundmann, **“Droop in InGaN Light-Emitting Diodes: A Differential Carrier Lifetime Analysis,”** Appl. Phys. Lett., vol. 96, no. 10, p. 103504, Mar. 2010.
- [77] J. Iveland, L. Martinelli, J. Peretti, J. S. Speck, and C. Weisbuch, **“Direct Measurement of Auger Electrons Emitted from a Semiconductor Light-Emitting Diode under Electrical Injection: Identification of the Dominant Mechanism for Efficiency Droop,”** Phys. Rev. Lett., vol. 110, no. 17, p. 177406, Apr. 2013.
- [78] C.-Y. Chen, P.-Y. Wu, H.-H. Lu, Y.-P. Lin, J.-Y. Wen, and F.-C. Hu, **“Bidirectional 16-QAM OFDM In-Building Network over SMF and Free-Space VLC Transport,”** Opt. Lett., vol. 38, no. 13, p. 2345, Jul. 2013.
- [79] S. Singh and R. Bharti, **“163m/10Gbps 4QAM-OFDM Visible Light Communication,”** Int. J. Eng. Tech. Res., vol. 2, no. 6, sayfa 225–228, 2014.
- [80] J. J. Wierer, J. Y. Tsao, and D. S. Sizov, **“Comparison between Blue Lasers and Light-Emitting Diodes for Future Solid-State Lighting,”** Laser Photonics Rev., vol. 7, no. 6, sayfa 963–993, 2013.
- [81] A. Neumann, J. J. Wierer, W. Davis, Y. Ohno, S. R. J. Brueck, and J. Y. Tsao, **“Four-Color Laser White Illuminant Demonstrating High Color-Rendering Quality,”** Opt. Express, vol. 19, no. S4, p. A982, Jul. 2011.
- [82] S. Watson, M. Tan, S. P. Najda, P. Perlin, M. Leszczynski, G. Targowski, S. Grzanka, and A. E. Kelly, **“Visible Light Communications Using a Directly Modulated 422 nm GaN Laser Diode,”** Opt. Lett., vol. 38, no. 19, sayfa 3792–3794, 2013.
- [83] Y.-C. Chi, D.-H. Hsieh, C.-T. Tsai, H.-Y. Chen, H.-C. Kuo, and G.-R. Lin, **“450-nm GaN Laser Diode Enables High-Speed Visible Light Communication with 9-Gbps QAM-OFDM,”** Opt. Express, vol. 23, no. 10, sayfa 13051–13059, 2015.
- [84] D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, **“Towards a 100 Gb/s Visible Light Wireless Access Network,”** Opt. Express, vol. 23, no. 2, sayfa 1627–1637, 2015.
- [85] H. Chun, S. Rajbhandari, D. Tsonev, G. Faulkner, H. Haas, and D. O’Brien, **“Visible Light Communication Using Laser Diode Based Remote Phosphor Technique,”** in Communication Workshop (ICCW), 2015 IEEE International Conference on, 2015, sayfa 1392–1397.
- [86] C. Aichele, R. Flickenger, C. Fonda, J. Forster, I. Howard, T. Krag, and M. Zennaro, **Wireless Networking in the Developing World.** 2013. Available at <http://wndw.net> (Erişim Tarihi 2018).

- [87] H. Chen, H. P. A. van den Boom, E. Tangdionga, and T. Koonen, **“30-Gb/s Bidirectional Transparent Optical Transmission with an MMF Access and an Indoor Optical Wireless Link,”** IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 24, **no. 7**, sayfa 572–574, Apr. 2012.
- [88] 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/ OSA J. Opt. Commun. Netw., vol. 3, **no. 1**, sayfa 56–65.
- [89] K. Lee and H. Park, **“Modulations for Visible Light Communications with Dimming Control,”** IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 23, **no. 16**, sayfa 1136–1138, Aug. 2011.
- [90] J. K. Kwon, **“Inverse Source Coding for Dimming in Visible Light Communications Using NRZ-OOK on Reliable Links,”** IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 22, **no. 19**, sayfa 1455–1457, Oct. 2010.
- [91] J. Choi, E. Cho, T. Kang, and C. G. Lee, **“Pulse Width Modulation Based Signal Format for Visible Light Communications,”** 15th Optoelectron. Commun. Conf. Tech. Dig., vol. 1, **no. July**, sayfa 276–277, 2010.
- [92] H. Chun, S. Rajbhandari, G. Faulkner, and D. O’Brien, **“Effectiveness of Blue-Filtering in WLED Based Indoor Visible Light Communication,”** 2014 3rd Int. Work. Opt. Wirel. Commun. IWOW 2014, sayfa. 60–64, 2014.
- [93] S. Rajbhandari, J. J. D. Mckendry, J. Herrnsdorf, H. Chun, G. Faulkner, H. Haas, I. M. Watson, D. O. Brien, and M. D. Dawson, **“A Review of Gallium Nitride LEDs for Multi-Gigabit-Per-Second Visible Light Data Communications,”** Semicond. Sci. Technol., vol. 32, **no. 2**, p. 023001, 2017.
- [94] T. Komine, **“Visible Light Wireless Communications and Its Fundamental Study,”** Keio University, 2005.
- [95] J. M. Kahn and J. R. Barry, **“Wireless Infrared Communications,”** Proc. IEEE, vol. 85, no. 2, sayfa. 265–298, 1997.
- [96] F. R. Gfeller and U. Bapst, **“Wireless In-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation,”** Proc. IEEE, vol. 67, **no. 11**, sayfa 1474–1486, 1979.
- [97] T. Komine, S. Haruyama, and M. Nakagawa, **“Adaptive Equalization System for Visible Light Wireless Communication Utilizing Multiple White LED Lighting Equipment,”** IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 8, **no. 6**, sayfa 2892–2900, Jun. 2009.

- [98] A. Satoh and E. Ogawa, **“Fundamental Characteristics of In-House Infrared Propagation and Environmental Noise,”** in 1986 Antennas and Propagation Society International Symposium, 1986, **vol. 24**, sayfa 205–208.
- [99] J. M. Kahn, W. J. Krause, and J. B. Carruthers, **“Experimental Characterization of Non-Directed Indoor Infrared Channels,”** IEEE Trans. Commun., vol. 43, **no. 234**, sayfa 1613–1623, 1995.
- [100] L. Kwonhyung, P. Hyuncheol, J. R. Barry, K. Lee, H. Park, and J. R. Barry, **“Indoor Channel Characteristics for Visible Light Communications,”** IEEE Commun. Lett., vol. 15, **no. 2**, sayfa 217–219, 2011.
- [101] F. Miramirkhani and M. Uysal, **“Channel Modeling and Characterization for Visible Light Communications,”** IEEE Photonics J., vol. 7, **no. 6**, 2015.
- [102] R. Bancroft, **“A Commercial Perspective on the Development and Integration of an 802.11a/b/g Hiperlan/ WLAN Antenna Into Laptop Computers,”** IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 48, **no. 4**, sayfa 12–18, Aug. 2006.
- [103] C. Na, J. Chen, and T. Rappaport, **“Measured Traffic Statistics and Throughput of IEEE 802.11b Public WLAN Hotspots with Three Different Applications,”** IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 5, **no. 10**, sayfa. 3296–3305, Nov. 2006.
- [104] D. Wu, Z. Ghassemlooy, H. L. H. L. Minh, S. Rajbhandari, and A. C. C. Boucouvalas, **“Improvement of the Transmission Bandwidth for Indoor Optical Wireless Communication Systems Using a Diffused Gaussian Beam,”** Commun. Lett. IEEE, vol. 16, **no. 8**, sayfa 1316–1319, 2012.
- [105] J. R. Barry, J. M. Kahn, W. J. Krause, E. A. Lee, and D. G. Messerschmitt, **“Simulation of Multipath Impulse Response for Indoor Wireless Optical Channels,”** IEEE J. Sel. areas Commun., vol. 11, **no. 3**, sayfa 367–379, 1993.
- [106] J. R. Barry, **Wireless Infrared Communications**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [107] T. S. Rappaport, **Wireless Communications: Principles and Practice**. Prentice Hall, 2002.
- [108] Ghassemlooy, Z., Popoola, W., & Rajbhandari, S. (tarih yok). **Optical Wireless Communications**. Taylor & Francis Group.
- [109] Cisco. (2012). Cisco Visual Networking Index: **Global Mobile Data Traffic Forecast** (Güncelleme 2016–2021). <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11520862.pdf%0A>.

- [110] Fiorarli, M. (2014). **Challenges for 5G Transport Networks.** IEEE International Conf. on Adv. Networks Telecommunication Systems, (s. 1-6).
- [111] Xu, X. (2015). **Advanced Modulation Formats for 400-Gbps Short-reach Optical Inter-Connection.** 23(1), 492.
- [112] Song, M., Princemin, E., Vgenopoulou, V., & Roudas, I. (2015). **Transmission Performances of 400 Gbps Coherent 16-QAM Multi-Band OFDM Adopting Nonlinear Mitigation Techniques.** Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications (TIWDC), (s. 46-48).
- [113] F. Zafar, D. Karunatilaka, and R. Parthiban, **“Dimming Schemes for Visible Light Communication: The State of Research,”** IEEE Wirel. Commun., vol. 22, no. 2, sayfa 29–35, Apr. 2015.
- [114] J. Garcia, M. A. Dalla-Costa, J. Cardesin, J. M. Alonso, and M. Rico-Secades, **“Dimming of HighBrightness LEDs by Means of Luminous Flux Thermal Estimation,”** Power Electron. IEEE Trans., vol. 24, no. 4, sayfa 1107–1114, 2009.
- [115] M. Doshi and R. Zane, **“Control of Solid-State Lamps Using a Multiphase Pulsewidth Modulation Technique,”** IEEE Trans. Power Electron., vol. 25, no. 7, sayfa 1894–1904, Jul. 2010.
- [116] M. Dyble, N. Narendran, A. Bierman, and T. Klein, **“Impact of Dimming White LEDs: Chromaticity Shifts Due to Different Dimming Methods,”** Proc. SPIE 5941, Fifth International Conference on Solid State Lighting, 2005, p. 59411H.
- [117] H. Sugiyama, S. Haruyama, and M. Nakagawa, **“Brightness Control Methods for Illumination and Visible-Light Communication Systems,”** in 2007 Third International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC’07), 2007, pp. 78–78.
- [118] E. Cho, J.-H. Choi, C. Park, M. Kang, S. Shin, Z. Ghassemlooy, and C. G. Lee, **“NRZ-OOK Signaling with LED Dimming for Visible Light Communication Link,”** 2011 16th Eur. Conf. Networks Opt. Commun., no. January, sayfa 32–35, 2011.
- [119] Z. Lubin, D. O’Brien, M. Hoa, G. Faulkner, L. Kyungwoo, J. Daekwang, O. YunJe, W. Eun Tae, L. Zeng, D. 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. Sel. Areas Commun., vol. 27, no. 9, sayfa 1654–1662, 2009.

- [120] IEEE Computer Society. LAN/MAN Standards Committee., Institute of Electrical and Electronics Engineers., and IEEE-SA Standards Board., IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Part 15.7, Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.
- [121] Young-Chai Ko, M.-S. Alouini, and M. K. Simon, **“Analysis and Optimization of Switched Diversity Systems,”** IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 49, no. 5, sayfa 1813–1831, 2000.
- [122] F. Yuan, W. Siu-Hong, and L. Hok-Sun Ling, **“A Power Converter with Pulse-Level-Modulation Control for Driving High Brightness LEDs,”** in Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE, 2009, sayfa 577–581.
- [123] Y. Zhang, Z. Zhang, Z. Huang, H. Cai, L. Xia, and J. Zhao, **“Apparent Brightness of LEDs under Different Dimming Methods,”** Proc. SPIE 6841, Solid State Lighting and Solar Energy Technologies, 2007, vol. 6841, p. 684109.
- [124] B. Bo, X. Zhengyuan, and F. Yangyu, **“Joint LED Dimming and High Capacity Visible Light Communication by Overlapping PPM,”** in 2010 19th Annual Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), 2010, sayfa 1–5.
- [125] Y. Zengm, R. J. Green, S. Sun, and M. S. Leeson, **“Tunable Pulse Amplitude and Position Modulation Technique for Reliable Optical Wireless Communication Channels,”** J. Commun., vol. 2, no. 2, sayfa 22–28, 2007.
- [126] A. B. Siddique and M. Tahir, **“Joint Brightness Control and Data Transmission for Visible Light Communication Systems Based on White LEDs,”** in 2011 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2011, sayfa 1026–1030.
- [127] Y. Kozawa and H. Habuchi, **“Enhancement of Optical Wireless Multi-Pulse PPM,”** in IEEE GLOBECOM 2008- 2008 IEEE Global Telecommunications Conference, 2008, sayfa 1–5.
- [128] X. Fang, M. A. Khalighi, and S. Bourennane, **“Coded PPM and Multipulse PPM and Iterative Detection for Free-Space Optical Links,”** IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw., vol. 1, no. 5, sayfa 404–415, 2009.
- [129] H. Sugiyama and K. Nosu, **“MPPM: A Method For Improving the Band-Utilization Efficiency in Optical PPM,”** Light. Technol. J., vol. 7, no. 3, sayfa 465–472, 1989.

- [130] J. Vucic, C. Kottke, S. Nerreter, K. Langer, and J. W. Walewski, **“513 Mbit/s Visible Light Communications Link Based on DMT-Modulation of a White LED,”** *Light. Technol. J.*, vol. 28, **no. 24**, sayfa 3512–3518, 2010.
- [131] T. P. Lee, **“The Nonlinearity of Double-Heterostructure LED’s for Optical Communications,”** *Proc. IEEE*, vol. 65, **no. 9**, sayfa 1408–1410, 1977.
- [132] J. M. Tang and K. A. Shore, **“Maximizing the Transmission Performance of Adaptively Modulated Optical OFDM Signals in Multimode-Fiber Links by Optimizing Analog-to-Digital Converters,”** *J. Light. Technol.*, vol. 25, **no. 3**, sayfa 787–798, Mar. 2007.
- [133] S. C. J. Lee, F. Breyer, S. Randel, D. Cardenas, H. P. a. Van Den Boom, and A. M. J. Koonen, **“Discrete Multitone Modulation for High-Speed Data Transmission over Multimode Fibers Using 850-nm VCSEL,”** 2009 Conf. Opt. Fiber Commun. - includes post deadline Pap., **no. 1**, sayfa 2–4, 2009.
- [134] H. Park and J. R. Barry, **“Trellis-Coded Multiple Pulse Position Modulation for Wireless Infrared Communications,”** *IEEE Trans. Commun.*, vol. 54, **no. 4**, sayfa 643–651, 2004.
- [135] Z. Babar, M. A. Mohd Izhar, H. V. Nguyen, P. Botsinis, D. Alanis, D. Chandra, S. X. Ng, R. G. Maunder, and L. Hanzo, **“Unary-Coded Dimming Control Improves ON-OFF Keying Visible Light Communication,”** *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, **no. 1**, sayfa 255–264, 2018.
- [136] D. O’Brien, **“Optical Multi-Input Multi-Output Systems for Short-Range Free-Space Data Transmission,”** *Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, 2010 7th International Symposium on. sayfa 517–521, 2010.
- [137] S.-M. Kim and J.-B. Jeon, **“Experimental Demonstration of 4×4 MIMO Wireless Visible Light Communication Using a Commercial CCD Image Sensor,”** *J. Inf. Commun. Converg. Eng.*, vol. 10, **no. 3**, sayfa 220–224, 2012.
- [138] S. Rajbhandari, H. Chun, G. Faulkner, K. Cameron, A. V. N. V. N. Jalajakumari, R. Henderson, D. Tsonev, M. Ijaz, Z. Chen, H. Haas, E. Xie, J. J. D. J. D. McKendry, J. Herrnsdorf, E. Gu, M. D. D. Dawson, D. O’Brien, and D. O’Brien, **“High-Speed Integrated Visible Light Communication System: Device Constraints and Design Considerations,”** *IEEE J. Sel. areas Commun.*, vol. 33, **no. 9**, sayfa 1750–1757, 2015.
- [139] J. M. Kahn, R. You, P. Djahani, A. G. Weisbin, B. K. Teik, A. P. Tang, K. T. Beh, A. P. Tang, R. You, P. Djahani, A. G. Weisbin, B. K. Teik, and A. P. Tang,

- “Imaging Diversity Receivers for High-Speed Infrared Wireless Communication,”** IEEE Commun. Mag., vol. 36, **no. 12**, sayfa 88–94, 1998.
- [140] K. D. Dambul, D. O’Brien, G. Faulkner, D. O’Brien, G. Faulkner, D. O’Brien, G. Faulkner, D. O’Brien, G. Faulkner, D. O’Brien, and G. Faulkner, **“Indoor Optical Wireless MIMO System with an Imaging Receiver,”** IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 23, **no. 2**, sayfa 97–99, 2011.
- [141] T. Q. Wang, Y. A. Sekercioglu, and J. Armstrong, **“Analysis of an Optical Wireless Receiver Using a Hemispherical Lens with Application in MIMO Visible Light Communications,”** J. Light. Technol., vol. 31, **no. 11**, sayfa 1744–1754, 2013.
- [142] B. Li, X. Lai, J. Wang, X. Liang, and C. Zhao, **“Performance Analysis of the Imaging Receivers Using a Hemispherical Lens for Visible Light Communications,”** in 2013 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, 2013, sayfa 1–5.
- [143] T. Chen, L. Liu, Z. Zheng, J. Song, K. Wu, and W. Hu, **“Fisheye-Lens-Based Space Division Multiplexing System for Visible Light Communications,”** EURASIP J. Wirel. Commun. Netw., vol. 2015, **no. 1**, sayfa 1–7, 2015.
- [144] T. Chen, L. Liu, B. Tu, Z. Zheng, and W. Hu, **“High-Spatial-Diversity Imaging Receiver Using Fisheye Lens for Indoor MIMO VLCs,”** IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 26, **no. 22**, sayfa 2260–2263, 2014.
- [145] D. Chitnis, L. Zhang, H. Chun, S. Rajbhandari, G. Faulkner, D. O’Brien, and S. Collins, **“A 200 Mb/s VLC Demonstration with a SPAD Based Receiver,”** in 2015 IEEE Summer Topicals Meeting Series (SUM), 2015, sayfa 226–227.
- [146] A. Burton, H. Minh, Z. Ghassemlooy, E. Bentley, and C. Botella, **“Experimental Demonstration of 50-Mbps Visible Light Communications Using 4 × 4 MIMO,”** IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 26, 2014.
- [147] L. Riche, K. Sujaee, and R. George, **“The Performance Of High Order Modulation QAM-OFDM in the Presence Mutipath Fading Channels,”** in 2012 Proceedings of IEEE Southeastcon, 2012, sayfa 1–3.
- [148] J. K. Lee, K. Lee, and X. Ma, **“Appropriate Modulation Scheme for Visible Light Communication Systems Considering Illumination,”** Electron. Lett., vol. 48, **no. 18**, sayfa 1137–1139, Aug. 2012.
- [149] H. Li, X. Chen, J. Guo, and H. Chen, **“A 550 Mbit/s Real-Time Visible Light Communication System Based on Phosphorescent White Light LED for Practical**

High-Speed Low-Complexity Application,” Opt. Express, vol. 22, no. 22, sayfa 27203–27213, 2014.

[150] P. A. Haigh, F. Bausi, Z. Ghassemlooy, I. Papakonstantinou, H. Le Minh, C. Fléchon, and F. Cacialli, **“Visible Light Communications: Real Time 10 Mb/s Link with a low Bandwidth Polymer Light-Emitting Diode,”** Opt. Express, vol. 22, no. 3, sayfa 2830–2838, 2014.

[151] Z. Yu, R. J. Baxley, and G. T. Zhou, **“Peak-to-Average Power Ratio and Illumination-to-communication Efficiency Considerations in Visible Light OFDM Systems,”** in 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2013, sayfa 5397–5401.

[152] J. Armstrong, **“OFDM for Optical Communications,”** Light. Technol. J., vol. 27, no. 3, sayfa 189–204, 2009.

[153] D. J. F. Barros, S. K. Wilson, and J. M. Kahn, **“Comparison of Orthogonal Frequency-Division Multiplexing and Pulse-Amplitude Modulation in Indoor Optical Wireless Links,”** IEEE Trans. Commun., vol. 60, no. 1, sayfa 153–163, 2012.

[154] D. Tsonev and H. Haas, **“Avoiding Spectral Efficiency Loss in Unipolar OFDM for Optical Wireless Communication,”** 2014 IEEE Int. Conf. Commun. ICC 2014, pp. 3336–3341, 2014.

[155] J. Armstrong and B. J. C. Schmidt, **“Comparison of Asymmetrically Clipped Optical OFDM and DC-Biased Optical OFDM in AWGN,”** Commun. Lett. IEEE, vol. 12, no. 5, sayfa 343–345, 2008.

[156] N. Fernando, Y. Hong, and E. Viterbo, **“Flip-OFDM for Unipolar Communication Systems,”** IEEE Trans. Commun., vol. 60, no. 12, sayfa 3726–3733, Dec. 2012.

[157] D. Tsonev, S. Sinanovic, and H. Haas, **“Complete Modeling Of Nonlinear Distortion in OFDM-Based Optical Wireless Communication,”** J. Light. Technol., vol. 31, no. 18, sayfa. 3064–3076, 2013.

[158] S. D. Dissanayake, K. Panta, and J. Armstrong, **“A Novel Technique to Simultaneously Transmit ACOOFDM and DCO-OFDM in IM/DD Systems,”** in 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2011, sayfa 782–786.

[159] J. Armstrong, B. Schmidt, D. Kalra, H. A. Suraweera, and A. J. Lowery, **“Performance of Asymmetrically Clipped Optical OFDM in AWGN for an Intensity Modulated Direct Detection System,”** in Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06. IEEE, 2006, sayfa 1–5.

- [160] O. Saied, Z. Ghassemlooy, X. Tang, X. Dai, H. Le Minh, and B. Lin, “**Position Encoded Asymmetrically Clipped Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing in Visible Light Communications,**” *J. Commun. Inf. Networks*, vol. 2, no. 4, sayfa 1–10, Dec. 2017.
- [161] Zhang, S. (2017). **Capacity-Approaching Transmission over 6375 km Using Hybrid Quasi-Single-Mode Fiber Spans.** *J. Light Technology*, 35(3), 481-487
- [162] Marcus, M., & Pattan, B. (2005). **Millimeter Wave Propagation: Spectrum Management Implications.** *IEEE Microw. Mag.*, 6(2), 54-62.
- [163] Liaison and Coordination Work for International Standardization in the Business Year 2013. https://www.ituaj.jp/wpcontent/%0Auploads/2013/10/nb25-4_web-3_poliaison.pdf%0A
- [164] He, X., Cao, G., & Zou, N. (2011). **Simulation of White Light Based on Mixed RGB LEDs.** *ICCTA, IET International Conference on Communication Technology and Application.*
- [165] Ramaswami, R. (2002). **Optical Fiber Communication: From Transmission to Networking.** *IEEE Commun. Mag.*, 40(May1s), 138-147.
- [166] Hecht, J. (2005). **Understanding Fiber Optics**, 5th Ed. Prentice Hall.
- [167] Davis, C. (2014). **Lasers and Electro-Optics: Fundamentals and Engineering**, 2nd ed. Cambridge University Press.
- [168] Keiser, G. (2011). **Optical Fiber Communications.** McGraw-Hill Companies.
- [169] Sze, S. M., & Ng, K. K. (2007). **Physics of Semiconductor Devices**, 3rd ed. John Wiley & Sons Inc.
- [170] Senior, J. M. (2009). **Optical Fiber Communications Principles and Practice**, 3rd ed. Pearson Education Limited.
- [171] Saulys, B., Matukas, J., Palenskis, V., Pralgauskait, S., Vysniauskas, J., & Saulys, B. (2010). **Analysis of Mode-Hopping Effect in Fabry-Perot Laser Diodes.** *Radar and Wireless*, 9(Iii), 3-6.
- [172] Mizuno, T. (2016). 32-Core Dense SDM Unidirectional Transmission of PDM-16QAM Signals Over 1600 km Using Crosstalk-Managed Single-Mode Heterogeneous Multicore Transmission Line. **Optical Fiber Communication conference.**
- [173] Bergh, A. A., & Copeland, J. A. (1980). **Optical Sources for Fiber Transmission Systems.** *Proc. IEEE*, 68(10), 1240-1247.

- [174] S. Arnon, J. R. Barry, G. K. Karagiannidis, R. Schober, and M. Uysal, Eds., **Advanced Optical Wireless Communication, 1st ed.** Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2012, sayfa 353–368.
- [175] T. Komine and M. Nakagawa, “**Fundamental analysis for visible light communications using LED lights,**” IEEE Trans. Consum. Electron., vol. 50, **no. 1**, pp. 100–107, Feb. 2004.
- [176] R. Mesleh, H. Elgala, and H. Haas, “**On the performance of different OFDM based optical wireless communication systems,**” IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw., vol. 3, **no. 8**, sayfa 620–628, Aug. 2011.
- [177] K. Acolatse, Y. Bar-Ness, and S. K. Wilson, “**Novel techniques of single-carrier frequency-domain equalization for optical wireless communications,**” EURASIP J. Adv. Signal Process., vol. 2011, **no. 1**, Sep. 2011, Art. ID 393768.
- [178] N. Fernando, Y. Hong, and E. Viterbo, “**Flip-OFDM for unipolar communication systems,**” IEEE Trans. Commun., vol. 60, **no. 12**, sayfa 3726–3733, Dec. 2012.
- [179] J. Gancarz, H. Elgala, and T. D. C. Little, “**Impact of lighting requirements on VLC systems,**” IEEE Commun. Mag., vol. 51, **no. 12**, sayfa 34–41, Dec. 2013.
- [180] A. Jovicic, J. Li, and T. Richardson, “**Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market,**” IEEE Commun. Mag., vol. 51, **no. 12**, sayfa. 26–32, Dec. 2013.
- [181] Y. Hong, J. Chen, Z. Wang, and C. Yu, “**Performance of a precoding MIMO system for decentralized multiuser indoor visible light communications,**” IEEE Photon. J., vol. 5, no. 4, Aug. 2013, Art. ID 7800211.
- [182] D. Bykhovsky and S. Arnon, “**Multiple access resource allocation in visible light communication systems,**” J. Lightw. Technol., vol. 32, **no. 8**, sayfa 1594–1600, Apr. 2014.
- [183] C. W. Hsu, C. W. Chow, and C. H. Yeh, “**Cost-effective direct-detection all-optical OOK-OFDM system with analysis of modulator bandwidth and driving power,**” IEEE Photon. J., vol. 7, **no. 4**, Aug. 2015, Art. ID 7902607.
- [184] H. Elgala and T. Little, “**Polar-based OFDM and SC-FDE links toward energy-efficient Gbps transmission under IM-DD optical system constraints,**” IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw., vol. 7, **no. 2**, sayfa A-277–A-284, Feb. 2015.

- [185] A. Nuwanpriya, S. Ho, J. Zhang, A. Grant, and L. Luo, **“PAM-SCFDE for optical wireless communications,”** J. Lightw. Technol., vol. 33, **no. 14**, sayfa 2938–2949, Jul. 2015.
- [186] X. Li, R. Zhang, and L. Hanzo, **“Cooperative load balancing in hybrid visible light communications and Wi-Fi,”** IEEE Trans. Commun., vol. 63, **no. 4**, sayfa 1319–1329, Apr. 2015.
- [187] G. Fekete, G. Mészáros, E. Udvary, G. Fehér, and T. Berceli, **“Visible light communication channel disturbances and examination of the modulation formats,”** J. Microw. Wireless Technol., sayfa 1–9, Nov. 2015, to be published.
- [188] A. T. Hussein and J. M. Elmirghani, **“Mobile multi-gigabit visible light communication system in realistic indoor environment,”** Int. J. Lightw. Technol., vol. 33, **no. 15**, sayfa 3293–3307, Aug. 2015.
- [189] J. R. Barry, J. M. Kahn, W. J. Krause, E. A. Lee, and D. G. Messerschmitt, **“Simulation of multipath impulse response for wireless optical channels,”** IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 11, **no. 3**, sayfa 367–379, Apr. 1993.
- [190] F. J. Lopez-Hernandez and M. J. Betancor, **“DUSTIN: Algorithm for calculation of impulse response on IR wireless indoor channels,”** Electron. Lett., vol. 33, **no. 21**, sayfa 1804–1806, Oct. 1997.
- [191] J. B. Carruthers and P. Kannan, **“Iterative site-based modeling for wireless infrared channels,”** IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 50, **no. 5**, sayfa 759–765, May 2002.
- [192] A. Stephan, J.-F. Helard, and B. Uguen, **“MIMO UWB Systems Based on Linear Precoded OFDM for Home Gigabit Applications,”** in IEEE GLOBECOM 2008—2008 IEEE Global Telecommunications Conference, 2008, sayfa 1–6.
- [193] A. Maiga, J.-Y. Baudais, and J.-F. Helard, **“Very High Bit Rate Power Line Communications for Home Networks,”** in 2009 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2009, sayfa 313–318.
- [194] H. Le Minh, D. O’Brien, and G. Faulkner, **“A Gigabit/S Indoor Optical Wireless System for Home Access Networks,”** in 2010 7th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP 2010), 2010.
- [195] T. Meyer, P. Langendorfer, M. Bahr, V. Suraci, S. Nowak, and R. Jennen, **“An Inter-MAC Architecture for heterogeneous Gigabit Home Networks,”** in 2009

IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009, sayfa 1–5.

[196] H. Minh, Z. Ghassemlooy, D. O’Brien, and G. Faulkner, **“Indoor Gigabit Optical Wireless Communications: Challenges and Possibilities,”** in Proceedings of ICTON, Munich: IEEE, 2010.

[197] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, **“Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems,”** IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C (Applications Rev., vol. 37, **no. 6**, sayfa 1067–1080, Nov. 2007.

[198] N. U. Hassan, A. Naeem, M. A. Pasha, T. Jadoon, and C. Yuen, **“Indoor Positioning Using Visible LED Lights,”** ACM Comput. Surv., vol. 48, **no. 2**, sayfa 1–32, Nov. 2015.

[199] S. Hann, J.-H. Kim, S.-Y. Jung, and C.-S. Park, **“White LED Ceiling Lights Positioning Systems for Optical Wireless Indoor Applications,”** in 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2010, sayfa 1–3.

[200] X. Liu, H. Makino, and Y. Maeda, **“Basic Study on Indoor Location Estimation Using Visible Light Communication Platform,”** in 2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2008, sayfa 2377–2380.

[201] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, **“Indoor Optical Wireless Communication: Potential and State-of-the-Art,”** IEEE Commun. Mag., vol. 49, **no. 9**, sayfa. 56–62, 2011.

[202] P. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra, **“Visible Light Communication, Networking and Sensing: A Survey, Potential and Challenges,”** IEEE Commun. Surv. Tutorials, vol. 17, **no. c**, sayfa 1–1, 2015.

[203] Y. U. Lee, S. Baang, J. Park, Z. Zhou, and M. Kavehrad, **“Hybrid Positioning with Lighting LEDs and Zigbee Multihop Wireless Network,”** SPIE 8282, Broadband Access Communication Technologies, 2012, vol. 8282, p. 82820L.

[204] K. Hyun-Seung, K. Deok-Rae, Y. Se-Hoon, S. Yong-Hwan, and H. Sang-Kook, **“An Indoor Visible Light Communication Positioning System Using a RF Carrier Allocation Technique,”** J. Light. Technol., vol. 31, **no. 1**, sayfa 134–144, 2013.

[205] K. Kaemarungsi and P. Krishnamurthy, **“Modeling of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting,”** in IEEE INFOCOM 2004, 2002, vol. 2, sayfa 1012–1022.

- [206] M. T. Van, N. Van Tuan, T. T. Son, H. Le-Minh, and A. Burton, **“Weighted K-Nearest Neighbour Model for Indoor VLC Positioning,”** IET Commun., vol. 11, no. 6, sayfa 864–871, Apr. 2017.
- [207] T. Q. Wang, Y. A. Sekercioglu, A. Neild, and J. Armstrong, **“Position Accuracy of Time-of-Arrival Based Ranging Using Visible Light with Application in Indoor Localization Systems,”** J. Light. Technol., vol. 31, no. 20, sayfa 3302–3308, Oct. 2013.
- [208] S.-Y. Jung, S. Hann, and C.-S. Park, **“TDOA-Based Optical Wireless Indoor Localization Using LED Ceiling Lamps,”** IEEE Trans. Consum. Electron., vol. 57, no. 4, sayfa 1592–1597, Nov. 2011.
- [209] J. H. Y. Nah, R. Parthiban, and M. H. Jaward, **“Visible Light Communications Localization Using TDOA-Based Coherent Heterodyne Detection,”** in 2013 IEEE 4th International Conference on Photonics (ICP), 2013, pp. 247–249.
- [210] H. Lv, L. Feng, A. Yang, P. Guo, H. Huang, and S. Chen, **“High Accuracy VLC Indoor Positioning System with Differential Detection,”** IEEE Photonics J., vol. 9, no. 3, sayfa 1–13, Jun. 2017.
- [211] A. Nuwanpriya, S.-W. Ho, and C. S. Chen, **“Indoor MIMO Visible Light Communications: Novel Angle Diversity Receivers for Mobile Users,”** IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 8716, no. c, sayfa 1–1, 2015.
- [212] S.-H. Yang, H.-S. Kim, Y.-H. Son, and S.-K. Han, **“Three-Dimensional Visible Light Indoor Localization Using AOA and RSS with Multiple Optical Receivers,”** J. Light. Technol., vol. 32, no. 14, sayfa 2480–2485, Jul. 2014.
- [213] Z. Guo, Z. Jia, W. Xia, Y. Zhang, and L. Shen, **“Indoor Localization System for Mobile Target Tracking Based on Visible Light Communication,”** in 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2017, sayfa 1–5.
- [214] Z. Vatansever and M. Brandt-Pearce, **“Visible Light Positioning with Diffusing Lamps Using an Extended Kalman Filter,”** in 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2017, sayfa 1–6.
- [215] J. Armstrong, Y. Sekercioglu Ahmet, and A. Neild, **“Visible Light Positioning: A Roadmap for International Standardization,”** IEEE Commun. Mag., vol. 51, no. 12, sayfa 68–73, 2013.
- [216] D. Li, C. Gong, and Z. Xu, **“A RSSI-Based Indoor Visible Light Positioning Approach,”** in 2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, CSNDSP 2016, 2016, sayfa 1–6.

- [217] S. Lee and S. Y. Jung, **“Location Awareness Using Angle-of-Arrival Based Circular-PD-Array for Visible Light Communication,”** in APCC 2012—18th Asia-Pacific Conference on Communications: **“Green and Smart Communications for IT Innovation,”** 2012, sayfa 480–485.
- [218] M. Rahaim, G. B. Prince, and T. D. C. Little, **“State Estimation and Motion Tracking for Spatially Diverse VLC Networks,”** 2012 IEEE Globecom Work. GC Wkshps 2012, **no. 1**, sayfa 1249–1253, 2012.
- [219] Y. Cai, W. Guan, Y. Wu, C. Xie, Y. Chen, and L. Fang, **“Indoor High Precision Three-Dimensional Positioning System Based on Visible Light Communication Using Particle Swarm Optimization,”** IEEE Photonics J., vol. 9, **no. 6**, sayfa 1–20, Dec. 2017.
- [220] W. Guan, Y. Wu, S. Wen, Y. Chen, and H. Chen, **“Indoor Positioning Technology of Visible Light Communication Based on CDMA Modulation,”** Acta Opt. Sin., vol. 36, 2016.
- [221] H. Steendam, **“A 3-D Positioning Algorithm for AOA-Based VLP with an Aperture-Based Receiver,”** IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 36, **no. 1**, sayfa 23–33, Jan. 2018.
- [222] H. Chen, W. Guan, S. Li, and Y. Wu, **“Indoor High Precision Three-Dimensional Positioning System Based on Visible Light Communication Using Modified Genetic Algorithm,”** Opt. Commun., vol. 413, sayfa 103–120, Apr. 2018.
- [223] Q. Peng, W. Guan, Y. Wu, Y. Cai, C. Xie, and P. Wang, **“Three-Dimensional High-Precision Indoor Positioning Strategy Using Tabu Search Based on Visible Light Communication,”** Opt. Eng., vol. 57, p. 1, 2018.
- [224] B. Zhu, J. Cheng, Y. Wang, J. Yan, and J. Wang, **“Three-Dimensional VLC Positioning Based on Angle Difference of Arrival with Arbitrary Tilting Angle of Receiver,”** IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 36, **no. 1**, sayfa 8–22, Jan. 2018.
- [225] M. Xu, W. Xia, Z. Jia, Y. Zhu, and L. Shen, **“A VLC-Based 3-D Indoor Positioning System Using Fingerprinting and K-Nearest Neighbor,”** in 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2017, sayfa 1–5.
- [226] S. Berchtold, C. Böhm, D. A. Keim, and H.-P. Kriegel, **“A Cost Model for Nearest Neighbor Search in High-Dimensional Data Space,”** in Proceedings of the Sixteenth ACM SIGACT-SIGMOD-SIGART Symposium on Principles of Database Systems—PODS ‘97, 1997, sayfa 78–86.

- [227] Y. Lee and M. Kavehrad, **“Two Hybrid Positioning System Design Techniques with Lighting LEDs and Ad-Hoc Wireless Network,”** IEEE Trans. Consum. Electron., vol. 58, **no. 4**, sayfa 1176–1184, Nov. 2012.
- [228] A. Papapostolou and H. Chaouchi, **“Scene Analysis Indoor Positioning Enhancements,”** Ann. Telecommun. - Ann. des télécommunications, vol. 66, **no. 9–10**, sayfa 519–533, Oct. 2011.
- [229] Y.-S. Kuo, P. Pannuto, K.-J. Hsiao, and P. Dutta, **“Luxapose: Indoor Positioning with Mobile Phones and Visible Light,”** in Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking- MobiCom '14, 2014, sayfa 447–458.
- [230] J. Fang, Z. Yang, S. Long, Z. Wu, X. Zhao, F. Liang, Z. L. Jiang, and Z. Chen, **“High-Speed Indoor Navigation System Based on Visible Light and Mobile Phone,”** IEEE Photonics J., vol. 9, **no. 2**, sayfa 1–11, Apr. 2017.
- [231] B. Lin, Z. Ghassemlooy, C. Lin, X. Tang, Y. Li, and S. Zhang, **“An Indoor Visible Light Positioning System Based on Optical Camera Communications,”** IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 29, **no. 7**, sayfa 579–582, Apr. 2017.
- [232] M. Moon and S. Choi, **“Indoor Position Estimation Using Image Sensor Based on VLC,”** in 2014 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2014), 2014, sayfa 11–14.
- [233] Masaki Yoshino, Shinichiro Haruyama, and Masao Nakagawa, **“High-Accuracy Positioning System Using Visible LED Lights and Image Sensor,”** in 2008 IEEE Radio and Wireless Symposium, 2008, sayfa 439–442.
- [234] P. Huynh and M. Yoo, **“VLC-Based Positioning System for an Indoor Environment Using an Image Sensor and an Accelerometer Sensor,”** Sensors, vol. 16, **no. 6**, p. 783, May 2016.
- [235] Y. Nakazawa, H. Makino, K. Nishimori, D. Wakatsuki, and H. Komagata, **“Indoor Positioning Using A High-Speed, Fish-Eye Lens-Equipped Camera in Visible Light Communication,”** in Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2013 International Conference on, 2013, no. October, sayfa 1–8.
- [236] R. Zhang, W.-D. Zhong, K. Qian, and D. Wu, **“Image Sensor Based Visible Light Positioning System with Improved Positioning Algorithm,”** IEEE Access, sayfa 1–1, 2017.
- [237] K. Levenberg, **“A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least,”** Q. Appl. Math., vol. 2, **no. 2**, sayfa 164–168, Jul. 1944.

- [238] S.-K. Han, S.-H. Yang, Y.-H. Son, and J.-Y. Kim, **“High-Resolution Indoor Positioning Using Light Emitting Diode Visible Light and Camera Image Sensor,”** IET Optoelectron., vol. 10, **no. 5**, sayfa 184–192, Oct. 2016.
- [239] J. Campbell, R. Sukthankar, I. Nourbakhsh, and A. Pahwa, **“A Robust Visual Odometry and Precipice Detection System Using Consumer-Grade Monocular Vision,”** in Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005, vol. 2005, sayfa 3421–3427.
- [240] F. Santos, V. Silva, and L. Almeida, **“A Robust Self-Localization System for a Small Mobile Autonomous Robot,”** in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2002.
- [241] J. B. Carruthers and J. M. Kahn, **“Modeling of nondirected wireless infrared channels,”** IEEE Trans. Commun., vol. 45, **no. 9**, sayfa 1260–1268, Oct. 1997.
- [242] R. Perez-Jimenez, J. Berges, and M. J. Betancor, **“Statistical model for the impulse response on infrared indoor diffuse channels,”** Electron. Lett., vol. 33, **no. 15**, sayfa 1298–1300, Jul. 1997.
- [243] R. Perez-Jimenez, V. M. Melian, and M. J. Betancor, **“Analysis of multipath impulse response of diffuse and quasidiffuse optical links for IR-WLAN,”** in Proc. 14th Annu. Joint Conf. IEEE Comput. Commun. Soc., Apr. 1995, **vol. 2**, sayfa 924–930.
- [244] F. J. Lopez-Hernandez, R. Perez-Jimenez, and A. Santamaria, **“Monte Carlo calculation of impulse response on diffuse IR wireless indoor channels,”** Electron. Lett., vol. 34, **no. 12**, sayfa 1260–1262, Jun. 1998.
- [245] F. J. Lopez-Hernandez, R. Perez-Jimenez, and A. Santamaria, **“Modified Monte Carlo scheme for high-efficiency simulation of the impulse response on diffuse IR wireless indoor channels,”** Electron. Lett., vol. 34, **no. 19**, sayfa 1819–1820, Sep. 1998.
- [246] F. J. Lopez-Hernandez, R. Perez-Jimenez, and A. Santamaria, **“Ray tracing algorithms for fast calculation of the channel impulse response on diffuse IR wireless indoor channels,”** Opt. Eng., vol. 39, no. 10, sayfa 2775–2780, Oct. 2000.
- [247] M. I. Sakib Chowdhury, W. Zhang, and M. Kavehrad, **“Combined deterministic and modified Monte Carlo method for calculating impulse responses**

of indoor optical wireless channels,” J. Lightw. Technol., vol. 32, **no. 18**, sayfa 3132–3148, Sep. 15, 2014.

[248] H. Chun, C. Chiang, and D. O'Brien, **“Visible light communication using OLEDs: Illumination and channel modeling,”** in Proc. Int. Workshop Opt. Wireless Commun., Oct. 2012, sayfa 1–3.

[249] H. Q. Nguyen et al., **“A MATLAB-Based simulation program for indoor visible light communication system,”** in Proc. CSNDSP, Jul. 2010, sayfa 537–540.

[250] T. Komine and M. Nakagawa, **“Performance evaluation on visible-light wireless communication system using white LED lightings,”** in Proc. 9th IEEE Symp. Comput. Commun., 2004, vol. 1, sayfa 258–263.

[251] S. Long, M. A. Khalighi, M. Wolf, S. Bourennane, and Z. Ghassemlooy, **“Channel characterization for indoor visible light communications,”** in Proc. IWOW, Sep. 2014, sayfa. 75–79.

[252] K. Lee, H. Park, and J. R. Barry, **“Indoor channel characteristics for visible light communications,”** IEEE Commun. Lett., vol. 15, no. 2, sayfa 217–219, Feb. 2011.

[253] Zemax 13 Release 2, Radiant Zemax LLC. [Online]. Available: www.radiantzemax.com/zemax

[254] E. Sarbazi, M. Uysal, M. Abdallah, and K. Qaraqe, **“Indoor channel modeling and characterization for visible light communications,”** Proc. 16th ICTON, Graz, Austria, Jul. 2014

[255] F. Miramirkhani, M. Uysal, and E. Panayirci, **“Novel channel models for visible light communications,”** in Proc. SPIE Photon. West, Broadband Access Communi. Technol. IX, Feb. 7–12, 2015, p. 93870Q.

[256] ASTER Spectral Library–Version 2.0. [Online]. Available: <http://speclib.jpl.nasa.gov>

[257] CREE LEDs. [Online]. Available: <http://www.cree.com>

[258] OSRAM LEDs. [Online]. Available: <http://www.osram-os.com>

- [259] A. Sivabalan and J. John, **“Modeling and simulation of indoor optical wireless channels: a review,”** in Proc. Conf. Convergent Technol. Asia-Pac. Region, Oct. 15–17, 2003, **vol. 3**, sayfa 1082–1085.
- [260] O. Gonzalez, C. Militello, S. Rodriguez, R. Prez-Jimenez, and A. Ayala, **“Error estimation of the impulse response on diffuse wireless infrared indoor channels using a Monte Carlo ray-tracing algorithm,”** Proc. Inst. Elect. Optoelectron., vol. 149, **no. 56**, sayfa 222–227, Oct. –Dec. 2002.
- [261] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, Numerical Recipes. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2007.
- [262] Zemax 13 Release 2, Radiant Zemax LLC. [Online]. Available: www.zemax.com/support/knowledgebase/understanding Sobolsampling
- [263] E. Sarbazi, M. Uysal, M. Abdallah, and K. Qaraqe, **“Ray tracing based channel modeling for visible light communications,”** in Proc. 22nd SIU Signal Process., Commun. Appl. Conf., Trabzon, Turkey, Apr. 2014, sayfa 702–705.
- [264] M. S. Varela and M. G. Sanchez, **“RMS delay and coherence bandwidth measurements in indoor radio channels in the UHF band,”** IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 50, **no. 2**, sayfa 515–525, Mar. 2001.
- [265] Z. Ghassemlooy, D. Wu, M. A. Khalighi, and X. Tang, **“Indoor non-directed optical wireless communications optimization of the Lambertian order,”** J. Elect. Comput. Eng. Innov., vol. 1, **no. 1**, sayfa 1–9, May 2013.
- [266] M. Abtahi and H. Hashemi, **“Simulation of indoor propagation channel at infrared frequencies in furnished office environments,”** in Proc. IEEE PIMRC, 1995, sayfa 306–310.
- [267] **Optical Wireless Communications- System and Channel Modelling With Matla-** Z. Ghassemlooy, W. Popoola, S. Rajbandari
- [268] Farshad Miramirrkhani, Murat Uysal **Channel Modeling and Characterization for Visible Light Communications** IEEE Photonics Journal, **Nol 7**, No 6 Dec. 2015