

T.C.
İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

LED İNDİS MODÜLASYONU TABANLI OPTİK MIMO
HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN KOD İNDİS
MODÜLASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CİHAT ARSLAN

ŞUBAT 2021

T.C.
İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

LED İNDİS MODÜLASYONU TABANLI OPTİK MIMO
HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN KOD İNDİS
MODÜLASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CİHAT ARSLAN

DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ ERDOĞAN AYDIN

ŞUBAT 2021

ONAY

İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nde Yüksek Lisans öğrencisi olan Cihat Arslan'ın hazırladığı ve jüri önünde savunduğu “LED İndis Modülasyonu Tabanlı Optik MIMO Haberleşme Sistemleri için Kod İndis Modülasyonu” başlıklı tez başarılı kabul edilmiştir.

JÜRİ ÜYELERİ

İMZA

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Erdoğan AYDIN

.....

Kurumu: İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Üyeler:

Doç. Dr. Eylem ERDOĞAN

.....

Kurumu: İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Burhan Demir ÖNER

.....

Kurumu: Maltepe Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 08.02.2021

BİLDİRİM

Hazırladığım tezin tamamen kendi çalışmam olduğunu, akademik ve etik kuralları gözeterek çalıştığımı ve her alıntıya kaynak gösterdiğimi taahhüt ederim.

Cihat ARSLAN

Danışmanlığını yaptığım işbu tezin tamamen öğrencinin çalışması olduğunu, akademik ve etik kuralları gözeterek çalıştığını taahhüt ederim.

Dr. Öğr. Üyesi Erdoğan AYDIN

TEŞEKKÜR

Bilge Hocam Sn. Dr. Öğr. Üyesi Erdoğan AYDIN'a yardımlarını eksiksiz esirgemeyen yenilikçi ufkundan dolayı medyun-u şükranım. Ayrıca, yüksek lisans eğitimim boyunca bana desteğini hiçbir zaman esirgemeyen her konuda yardımcı olan Sn. Fatih ÇÖGEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Şubat 2021,

Cihat ARSLAN



SEMBOL LİSTESİ

I	Toplam LED akımı
i_n	Elektronların oluşturduğu akım
i_p	Deliklerin oluşturduğu akım
V_ζ	Eşik gerilimi
E_{gap}	Enerji boşluk bandı
q	Elektron yük sabiti
λ	Dalga boyu
h	Planck sabiti
I_d	Toplayıcı akımı
T	Ortam sıcaklığı
K	Boltzman sabiti
P_{opt}	Işınsal güç
V	Harici gerilim
I_{ds}	Doyum akımı
ϕ_l	Parlama akısı
K_l	Radyometri-Fotometri arası ilişki sabiti
$V(\lambda)$	İzgesel hassasiyet
ϕ_{le}	Radyal akı
I	Işık yoğunluğu
Φ	Işık akısı
ω	Uzaysal açı
E	Parlaklık miktarı
A	Yüzeysel alan
$I(\theta)$	Yoğunluk dağılım fonksiyonu
$I(0)$	Merkezi ışık şiddeti yoğunluğu
m	Lambert indis derecesi

$\phi_{1/2}$	Yarım güç çarpanı
η	Işığın elektriğe dönüştürme kabiliyeti
η_q	Kuantum verimliliği
ξ	Elektron deliği çiftlerinin sayısı
R_{ref}	Optik yansıma katsayısı
ds	Optik gücün emildiği mesafe
a	Emilme (absorbsiyon) katsayısı
R	Fotodetektör duyarlılığı
I_p	Üretilen fotoakımı
P_p	Emilen ışığın gücü
f	Frekans
$R(\varphi)$	Lambert model fonksiyonu
P_{tx}	LED tarafından iletilen güç
φ	Parlaklık (irradiance) açısı
$g(\theta)$	Fotodetektörün toplayıcı kazanç model değişkeni
θ	Yansıma (incidence) açısı
n	Kırınım indisi
ψ_f	Görüş açısı
A_{pd}	Fotodetektörün yüzeysel verimli alanı
H_{ij}	VLC Kanal matrisi(i indisi verici indisi, j indisi alıcı indisi)
d_{ij}	Alıcı-verici arası uzaklık mesafesi(i indisi verici indisi, j indisi alıcı indisi)
$T_s(\theta)$	Optik filtre katsayısı
A_{rect}	Alıcı yüzeysel alanı
σ_{shot}^2	Anlık yanma gürültüsü
B	Eşdeğer gürültülü bant genişliği
I_1	Bant genişliği faktörü
R_r	Veri transfer oranı
P_{amb}	Işının gürültü gücü

B_{amp}	Kuvvetlendirici bant genişliği
P_{rc}	Ortamin elde edilen kaynak gücü
P_{ij}	Işık kaynağından iletilen güç
N	Verici sayısı
σ_{ther}^2	Mekanik ısı gürültüsü
i_{amp}^2	Kuvvetlendiricinin gürültü yoğunluğu
σ_{noise}^2	Mekanik ısı ve anlık yanma gürültü toplamı
SNR_{R_x}	Elektriksel gürültü
$x_{i,l}$	LIM tekniğinin bilgi mesaj verisi
$x_{i,lk}^{\mathcal{R},+}$	LIM tekniğinin bilgi mesaj verisinin gerçel pozitif elemanı
$x_{i,lk}^{\mathcal{R},-}$	LIM tekniğinin bilgi mesaj verisinin gerçel negatif elemanı
$x_{i,lk}^{\mathcal{I},+}$	LIM tekniğinin bilgi mesaj verisinin sanal pozitif elemanı
$x_{i,lk}^{\mathcal{I},-}$	LIM tekniğinin bilgi mesaj verisinin sanal negatif elemanı
$\mathbf{x}$	LIM tekniğinin bilgi mesaj veri vektörü
n_R	Alıcı sayısı
n_T	Verici sayısı
$\mathbf{W}_j$	Walsh Hadamard kod matrisi
$\beta_{1,i}$	İletilen (transmitted) bit
$\beta_{2,i}$	Haritalanan (mapped) bit
f_c	Taşıyıcı frekans
$\mathcal{N}$	İletilen blokların sayısını
$\mathcal{P}(t)$	Dikdörtgen darbeleri darbe şekillendirme filtresi
(I)	Eş evreli komponent
(Q)	Dik evreli komponent
$n_I(t)$	Toplamsal beyaz gauss gürültüsü
$[\cdot]^T$	Matris evrik sembolü

$\sum_{\ell}^{\kappa} \cdot$	Toplam sembolü
$\mathcal{E}_b$	İletilen bit enerjisi
$signum(\cdot)$	Signum fonksiyonu
$\mathcal{D}_i$	Karşılaştırma korelatör (ilintilendirici) sembolü
$\mathbf{r}_I(t)$	CIM tekniğinde alıcıdaki toplam işaret
$\mathcal{Z}_I(t)$	CIM tekniğinde vericiden iletilen işaret
$\mathbf{b}$	CIM ve LIM tekniğinde iletilen veri bitleri vektörü
$\mathbf{b}_{m \times 1}$	$m \times 1$ boyutlu veri bit vektörü
b_1	CIM-LIM tekniğinde birinci alt vektör
b_2	CIM-LIM tekniğinde ikinci alt vektör
T_s	Sembol süresi
s_k	İletilen toplam sembol
$\mathbf{c}_{\ell}$	CIM-LIM tekniğinde yayıcı kod vektörü
T_{φ}	Çiplere ait sembol süresi
s_i	Seçilen sembol
$\mathbf{x}_{i\ell}$	Zaman alanında yayılmış bilgi bitlerinin yayılan kod vektörü
$\mathbf{r}_k$	K'ncı çipe ait iletilen işaretin alıcıdaki elektriksel işaret vektörü
$\mathbf{n}_k$	Reel-değerli toplamsal beyaz Gauss gürültü vektörü
$N(\cdot)$	Gauss dağılım sembolü
(σ_w^2)	Varyans
$f_{x_{i,\ell}^{\Re(\Im),\pm}}(y)$	Gauss olasılık yoğunluk fonksiyonu
$u(y)$	Birim basamak fonksiyonu
$\delta(y)$	Birim dürtü fonksiyonu
$\Re / \Im$	Gerçel ve sanal işaret birleştirici sembolü
$\hat{\mathbf{x}}_{kl}$	Bilgi bitlerinin yayılan kod vektörünün kestirimli vektörü
$ \cdot ^2$	Mutlak değer karesi operatörü

$\hat{\ell}$	Kestirilen kod indis sembolü
$\hat{s}_i$	Kestirilen seçilen sembol
$\hat{\mathbf{b}}$	CIM-LIM tekniğinde iletilen bilgi bitlerin kestirimli vektörü
$\arg \min \Lambda^{MAP}()$	MAP Kestirimcisinin minimum argüman indis fonksiyonu
$\arg \max()$	En büyük değeri seçen argüman fonksiyonu
$\arg \min()$	En küçük değeri seçen argüman fonksiyonu
$\Lambda^{MAP}()$	MAP Kestirimcisinin metrik ifade fonksiyonu
$\ \cdot\ $	Norm vektörü
z	CIM-LIM Tekniğinde gerçel verici indisi
g	CIM-LIM Tekniğinde sanal verici indisi
$(\hat{z})$	CIM-LIM Tekniğinde gerçel kestirimli verici indisi
$(\hat{g})$	CIM-LIM Tekniğinde sanal kestirimli verici indisi
$\hat{\mathbf{x}}_{i\ell}$	Kestirilmiş vektör seti
$\hat{\mathbf{x}}_{i,\ell}^{\Re}$	Kestirilmiş vektör setinin gerçel kısmı
$\hat{\mathbf{x}}_{i,\ell}^{\Im}$	Kestirilmiş vektör setinin sanal kısmı
$\tilde{\mathbf{x}}_j$	Yayıcı kod çarpanlı vektör seti
L_k	LED kümesi

KISALTMALAR

3-DM	Üç boyutlu ortam (three dimension media)
3G	Üçüncü nesil (third generation)
4G	Dördüncü nesil (fourth generation)
5G	Beşinci nesil (fifth generation)
6G	Altıncı nesil (sixth generation)
AWGN	Toplamsal beyaz gauss gürültüsü (additive white gaussian noise)
BER	Bit hata oranı (bit error rate)
BPSK	İkili faz kaydırmalı anahtarlama (binary phase shift keying)
BSTS	Yükseltme gözetimi ve takip sistemi (boost surveillance and tracking system)
CDMA	Kod bölmeli çoklu erişim (code division multiple access)
CIM	Kod indis modülasyonu (code index modulation)
CSRZ	Taşıyıcı-sıkıştırılmış sıfıra dönüşümlü (carrier-suppressed return-to-zero)
DIFF	Dağınık görüşlü hat (diffuse)
dB	Desibel
D-PPM	Farksal darbe pozisyonlu modülasyon (differential pulse position modulation)
DSL	Sayısal abone hattı (digital subscriber line)
FET	Alan etkili transistör (field-effect transistör)

FOEWS	Erken izleme uyarı sistemi (follow on early warning system)
FOV	Görüş açısı (field of view)
FSO	Serbest Uzay Optik haberleşme (free space optical communication)
Gbps	Saniyede gigabit (gigabit per second)
ICI	Kanallar arası girişim (interchannel interference)
IEEE	Elektrik ve elektronik mühendisleri enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IM	İndis modülasyonu (index modulation)
IM/DD	Doğrudan algılamalı yoğunluk modülasyonu (intensity modulation-direct detection)
IoE	Her şeyin interneti (internet of everything)
IoT	Nesnelerin interneti (internet of things)
JEITA	Japonya elektronik ve bilgi teknolojisi endüstriyel şirketi (Japan electronics and information technology industries association)
JPL	Jet tahrik laboratuvarı (jet propulsion laboratory)
LCS	Lazer çapraz bağlantı alt sistemi (laser cross link subsystem)
LD	Lazer diyot (laser diode)
LED	Işık yayan diyot (light emitting diode)
LI-FI	Işık tabanlı bağlantı (light fidelity)
LIM	Led indis modülasyonu (led index modulation)
LOS	Doğrudan görüş hattı (line of sight)
MAC	Ortama erişim kontrolü (medium access control)
MAP	Maksimum a posteriyori (maximum a posteriori)
Mbps	Saniyede megabit (megabit per second)

MIMO	Çoklu giriş-çoklu çıkış (multiple input-multiple output)
MISO	Çoklu giriş tekli çıkış (multiple input-single output)
ML	En büyük olabilirlik kestirimi (maximum likelihood)
M-QAM	Çoklu seviyeli karesel genlik modülasyonu (m-ary quadrature modulation)
NASA	Ulusal havacılık ve uzay dairesi (national aeronautics and space administration)
NLOS	Dolaylı yoldan yansımali görüş hattı (non-line of sight)
OFDM	Dik bileşenli frekans bölmeli çoğullama (orthogonal frequency-division multiplexing)
OOK	Açma kapamalı anahtarlama (on-off keying)
OWC	Kablosuz optik haberleşmesi (optical wireless communication)
PAM	Darbe genlikli modülasyon (pulse amplitude modulation)
PD	Fotodetektör (photodetector)
PIM	Pasif ara geçişli modülasyon (passive intermodulation)
PPM	Darbe pozisyonlu modülasyon (pulse position modulation)
Q-DIFF	Yarı dağınık görüşlü hattı (quasi diffuse)
RF	Radio frekansı (radio frequency)
RFID	Radio frekansı tanımlama (radio frequency identification)
RGB	Kırmızı yeşil mavi renk tonu (red green blue)
SFTS	Uzay uçuşları test sistemi (space flight test system)
SIMO	Tekli giriş - çoklu çıkış (single input – multiple output)
SISO	Tekli giriş - tekli çıkış (single input – single output)
SNR	İşaretin gürültü oranı (signal to noise ratio)

SS	Yayılı izge (spread spectrum)
VLC	Görünür ışık haberleşmesi (visible light communication)
WBAN	Kablosuz vücut alan ağı (wireless body area network)
WDM	Dalga boyu bölmeli çoğullama (wavelength division multiplexing)
WLAN	Kablosuz yerel alan ağları (wireless local area network)
WMAN	Kablosuz metropolitan erişim ağları (wireless metropolitan access network)



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1	Kablosuz optik haberleşme sınıflandırması	7
Şekil 2.2	Semafor kulesi ve Heliograf foton aynası.....	8
Şekil 2.3	Kablosuz optik haberleşme uygulamaları	10
Şekil 2.4	FSO optik haberleşme bağlantı alanları	14
Şekil 2.5	FSO optik haberleşmesini etkileyen hava durumu faktörleri.....	16
Şekil 2.6	Elektromanyetik dalga izge bandı.....	17
Şekil 2.7	VLC haberleşmesi kullanım alan ve uygulamaları	18
Şekil 2.8	VLC haberleşmesi kanal mimarileri	21
Şekil 3.1	Haberleşme türlerinin gelişim süreçleri	23
Şekil 3.2	Haberleşme kanal modelleme topolojileri	24
Şekil 3.3	Fotodetektörlerin elektronik şeması.....	27
Şekil 3.4	Yarı iletken malzemelerin enerji iletim bandı.....	27
Şekil 3.5	Beyaz LED içerik görseli	29
Şekil 3.6	Dalgaboylarına göre RGB renk yoğunluk grafiği.....	29
Şekil 3.7	Led çiplerini içeren Beyaz LED.....	29
Şekil 3.8	Optoelektronik alt dalı kullanım enstrümanları	30
Şekil 3.9	IEEE 802.15.7 Standardına MAC topolojisi.....	33
Şekil 3.10	Yarım güç çarpanı gösterimi	35
Şekil 3.11	Lambert radyan yoğunluk gösterimi	36
Şekil 3.12	Lambert radyatör gösterimi.....	37
Şekil 3.13	Bir LED vericisinin ZEMAX programlı gösterimi	38
Şekil 3.14	Bir LED vericisinin ZEMAX programlı Lambert emisyon gösterimi.....	39
Şekil 3.15	VLC kanal modeline ait uzaklık mesafe görseli	42
Şekil 3.16	VLC kanal modeline ait değişkenlerin temel görsel şekli	44
Şekil 3.17	VLC yakın mesafe kapalı mekan gösterimi	46
Şekil 3.18	Farklı yarım güç açılara göre aydınlık şiddetleri	48
Şekil 3.19	VLC kanal modeline ait 45 derecelik yarım güç açısına ait SNR eğrisi.....	49
Şekil 3.20	Aydınlık şiddetinin 45 derecelik yarım güç açısına göre dBm ve mW cinsinden gösterimi	49
Şekil 4.1	Genelleştirilmiş IM/DD gösterimi	50
Şekil 4.2	Yakın mesafeli görülebilir ışık haberleşmesinin Led indis modülasyonlu şemasının blok şeması	51
Şekil 5.1	CIM-SS sisteminin sistem modeli.....	56
Şekil 6.1	CIM-LIM sistem modeli	59
Şekil 6.2	Sistem A (Alıcılar masanın merkezine konumlandırılmış).....	70
Şekil 6.3	Sistem B (Alıcılar masanın köşelerine konumlandırılmış)	71
Şekil 6.4	Sistem A için CIM-LIM ve LIM yöntemlerinin 4 bitlik performans karşılaştırması	72
Şekil 6.5	Sistem A için CIM-LIM ve LIM yöntemlerinin 6,7 ve 8 bitlik performans karşılaştırması	73
Şekil 6.6	Sistem B için CIM-LIM ve LIM yöntemlerinin 7 ve 8 bitlik performans karşılaştırması.....	74

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 VLC ve RF haberleşmesine ait özellikler tablosu	20
Tablo 3.1 VLC haberleşmesinin farklı ortamdaki gösterdiği özellikler tablosu.....	33
Tablo 3.2 VLC kanal modellemesinin sistemsel değişkenleri tablosu	47
Tablo 6.1 Benzetim ortamının fiziksel parametreleri	71



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	V
SEMBOL LİSTESİ	VI
KISALTMALAR.....	XI
ŞEKİLLER LİSTESİ	XV
TABLO LİSTESİ.....	XVI
İÇERİSİNDEKİLER	XVII
ÖZET	XIX
ABSTRACT	XXI
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Katkısı	6
1.3 Tezin Bölümleri.....	6
2. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN TARİHİSEL GELİŞİMİ	7
2.1 Kablosuz Optik Haberleşme.....	8
2.2 Semafor Kulesi ve Heliograf Foton.....	8
2.3 Kablosuz Optik Haberleşmenin Uygulama İmkanları	11
2.3.1 Ultra Yüksek Sistem Kapasitesi	11
2.3.2 Geniş Ağlar Yüksek Sayılı Cihaz.....	11
2.3.3 En Az Kayıplı Gecikme Süresi.....	12
2.3.4 En Yüksek Güvenlikli Veri Erişimi	12
2.3.5 En Düşük Enerji Tüketimi.....	12
2.4 Menziline Göre OWC Kullanım Alanları	13
2.4.1 En Düşük Kısa Menzilli Alanlar	13
2.4.2 Kısa Menzilli Alanlar	13
2.4.3 Orta Menzilli Alanlar	13
2.4.4 Uzun Menzilli Alanlar.....	13
2.4.5 Yüksek Uzun Menzilli Alanlar.....	14
2.5 Serbest Uzay Optik Haberleşmesi (FSO).....	14
2.6 Görünür Optik Haberleşmesi (VLC).....	16
2.6.1 VLC Hakkında Bazı Teknik Özellikler	18
2.6.2 VLC sistemlerinde modülasyon teknikleri.....	21

2.6.3	VLC Sistemlerinde Bazı Temel Band Modülasyonları.....	22
2.6.3.1	Darbe Genlikli Modülasyon	22
2.6.3.2	Darbe Pozisyonlu Modülasyon.....	22
2.6.3.3	Pasif İnter Modülasyon.....	22
3.	ARAŞTIRMA KANAL METODU VE VLC KANAL TÜRLERİ	23
3.1	Temel Kanal Model Topolojileri.....	24
3.2	VLC LOS Kanal Modeli Ve Değişkenleri	25
3.2.1	Işık Yayan Diyotlar (LED).....	26
3.2.1.1	Beyaz LED Vericisi.....	28
3.2.2	Işık Algılayıcı Yarı İletkenler (FOTODETEKTÖR)	30
3.2.2.1	Fotodetektörlerin Parametrik Özellikleri.....	31
3.3	Kanal Modelinde Belirlenen Standardizasyon	32
3.4	VLC Kanal Model Örnekleri.....	33
3.5	Kanal Modeline Ait Parametrik Denklemler.....	34
3.5.1	LOS Kanal Modeli Tasarımı	40
3.5.2	LOS Kanal Modeli Bilgisayar Benzetimleri	45
4.	LED İNDİS MODÜLASYONU.....	50
4.1	Led Yoğunluk modülasyonu	50
4.2	Led İndis Modülasyonu Modeli	51
5.	KOD İNDİS MODÜLASYONU.....	54
5.1	İndis Modülasyonu	54
5.2	Kod İndis Modülasyonu Sistem Modeli.....	55
6.	LED İNDİS MODÜLASYONU TABANLI OPTİK MIMO HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN KOD İNDİS MODÜLASYONU.....	59
6.1	CIM-LIM Sisteminin Verici Yapısı	60
6.2	CIM-LIM Sisteminin Alıcı Yapısı	64
6.2.1	CIM-LIM sisteminin Koşullu MAP Kestirimcisi.....	65
6.3	CIM-LIM Sisteminin Benzetim Sonuçları ve Tartışma	69
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER	75
	KAYNAKÇA.....	76
	ÖZGEÇMİŞ	84

ÖZET

LED İndis Modülasyonu Tabanlı Optik MIMO Haberleşme Sistemleri için Kod İndis Modülasyonu

Arslan, Cihat

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Erdoğan AYDIN

Şubat, 2021. 105 Sayfa.

Yeni nesil haberleşme teknikleri için umut verici bir alan olan görünür ışık haberleşmesi (visible light communication, VLC) sistemleri, radyo frekansı (radio frequency, RF) haberleşmesine kıyasla girişim ve yüksek gecikme gibi sorunlarla iyi bir şekilde başa çıkabilmektedir. Katı hal aydınlatması alanındaki devrim, floresan lambaların yerine VLC tekniklerinde ışık yayan diyotların (light emitting diodes, LED) kullanımını cazip kılmıştır. Buna ek olarak, indis modülasyonu (index modulation, IM) ailesinin bir ferdi olan, kod indis modülasyonu-yayılı izge (code index modulation-spread spectrum, CIM-SS) yüksek veri hızlı ve yüksek enerji verimli olması nedeniyle birçok çalışmada yer almıştır.

Bu tez çalışmasında, VLC haberleşmesinin bir üyesi olan “LED indis modülasyonu (led index modulation, LIM)” ve CIM-SS teknikleri birleştirilerek “kod indis modülasyonu tabanlı LED indis modülasyonu (CIM-LIM)” adı verilen yeni bir haberleşme tekniği literatüre sunulmuştur. Önerilen sistem yapısında, işaret bilgisi LED indislerine kodlanarak VLC kanalından iletilmektedir. Bunun yanı sıra, önerilen sistemde, bir yandan geleneksel modülasyonlu simgeleri diğer bir yandan da CIM-SS yönteminin yayıcı Walsh Hadamard kodu indisleri veri taşımaktadır. Neticede, önerilen sistem geleneksel VLC sistemlerine göre hem daha hızlı veri iletimi yapmakta hem de daha az enerji harcamaktadır. Önerilen yeni haberleşme sistemi için teorik çıkarımlar gerçekleştirilmiş, sistem modeli oluşturulmuş, gerekli bilgisayar benzetimleri sunulmuş ve hem aktif LED indislerine hem de yayıcı Walsh Hadamard kodu indislerine beraberce karar veren bir en büyük olabilirlikli (maximum likelihood, ML) alıcı yapısı sunulmuştur. Bilgisayar benzetimleri, önerilen CIM-LIM sisteminin geleneksel LIM tabanlı VLC sistemlerine kıyasla daha iyi hata başarımına sahip olduğunu göstermektedir. Önerilen

sistemin başarım analizleri optik kablosuz kanal (optical wireless channel, OWC) için gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Görünür ışık haberleşmesi, LED indis modülasyonu, kod indis modülasyonu, enerji verimliliği, MIMO sistemler.



ABSTRACT

Code Index Modulation for LED Index Modulation Based Optical MIMO Communication Systems

Arslan, Cihat

Master Thesis, Electrical and Electronics Engineering Department, Electrical and Electronics Engineering Program

Supervisor: Dr. Erdoğan Aydın

January, 2020. 105 Pages.

Visible light communication (VLC) systems, which are a promising area for new generation communication techniques, can cope well with problems such as interference and high latency compared to radio frequency (RF) communication. The revolution in solid state lighting has made it attractive to use light emitting diodes (LED) in VLC techniques to replace fluorescent lamps. Besides, code index modulation-spread spectrum (CIM-SS), a member of the index modulation (IM) family, has been included in many studies due to its high data-rate and high energy-efficiency.

In this thesis, a novel communication technique called “code index modulation based LED index modulation (CIM-LIM)” is presented to the literature by combining “LED index modulation (LIM)”, which is a member of VLC communication, and “CIM-SS” techniques. In the proposed system structure, the signal information is encoded in LED indices and transmitted over the VLC channel. Besides, in the proposed system, the spreading Walsh Hadamard code indices of the CIM-SS method carry data on the one hand, traditionally modulated symbols on the other hand. As a result, the proposed system both transmits data faster and consumes less energy compared to traditional VLC systems. Theoretical derivations for the proposed novel communication system have been carried out, the system model has been created, the necessary computer simulations are presented and a maximum likelihood (ML) receiver structure that decides together on both active LED indices and spreading Walsh Hadamard code indices is presented. Computer simulations show that the proposed CIM-LIM system has better error performance compared to traditional VLC systems. Performance analysis of the proposed system has been performed for the optical wireless channel (OWC).

Keywords: Visible light communication, LED index modulation, code index modulation, energy-efficiency, MIMO system

1. GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Kablosuz haberleşme sistemleri günümüz dünyasında her geçen gün daha da önem kazanmakta ve yüksek hızlı internet, her yerde her zaman internet vb. kavramlar gün geçtikçe hayatımızın içine daha çok girmektedir. 2015 yılı itibarıyla dünyada yaşayan 7.3 milyar insanın üzerinde uygulanan çalışmalar yaklaşık 3.7 milyar insanın internete bağlı olduğunu göstermiştir [1], [2]. Geçmişten günümüze kadar kablosuz haberleşme gönderilen işaretin iletilmesinde ve kanal yapısının belirlenmesinde önemli rolü olan radyo frekansı (radio frequency, RF) tabanlı haberleşme birçok araştırmacı tarafından çalışılmaktadır. Fakat RF tabanlı haberleşme, uzak ve yakın mesafede sınırlı bant genişliği ve elektromanyetik dalgalarla yaşanan girişimli parazitik durum sonucu gittikçe dünya genelinde ihtiyaç duyulan yüksek hızda veri gönderim oranının karşısında ve aynı zamanda karışık network bağlantılarında istenen taleplere yanıt vermekte zorlanmaktadır [3]. Kablosuz haberleşmenin gelecekteki kullanım trafiğinde 2020 yılından sonra geleceğe yönelik akademik çalışmaların yapıldığı 10 yıllık tahminlerin olduğu raporlamalar ve üzerinde durulan başat unsur uygulamalar olarak önümüze çıkan gelecek dönemlerde ihtiyacı artacak olan; çeşitli gelişmekte olan güncel uygulamalar, yapay zeka teknolojisi, yüksek mertebelerde veri transferi sağlayan internet ağları, kablolu ve kablosuz optik kanallar, mobil ağlar, nesneler içi ve arası internet ağları gibi yüksek veri transferi, hızlı veri akışı sağlayan, düşük maliyetli, karmaşık olmayan devre tipleri, minimum düzeyde hata başarımları ve daha az enerji tüketimli haberleşmenin cevap verebileceği şekilde tasarlanan ve sürekli olarak kendini üst seviyeye güncellenir hale gelmekte karşı karşıya kalan haberleşme teknolojisinin üçüncü nesil (third generation, 3G), dördüncü nesil (fourth generation, 4G) ve nihai olarak beşinci nesilde (fifth generation, 5G) topolojik konular daha da istenen duruma gelecek şekilde cevap verecek haberleşme mimarisi haline gelmiştir [4].

Günümüzde 5G'nin çok uluslu evrensel yapıya geçmeyip kökleşmemesine rağmen ileriye kapsayacak şekilde düşünülen altıncı nesil (sixth generation, 6G) teknolojisi ise ilk çalışmaları son zamanlarda ön çalışmalı düşünsel mimarisi tasarlanmaya başlaması da geleceğin olanca şekilde üç boyutlu ortamların (üç boyutlu ortam, 3-DM), sanal gerçeklik vb. uygulamalara olan ihtiyaç vermesi adına cevap vermektedir [5]. RF haberleşmesi ile sağlanan telsiz, mobil ve internet ağlarındaki sıkıntıları telafi ederek ve aynı zamanda ihtiyaç duyulan kontrolsüz radyasyona sebebiyet veren sıkıntıları gidererek daha hızlı veri oranlı, yüksek bant genişlikli, yüksek güvenli ve hata oranının az sistemler için farklı bir boyutta yeni bir

haberleşme tipine ihtiyaç duyulmaktadır [6], [7]. Bu bağlamda ihtiyaç duyulan haberleşme tipinde RF haberleşmesinin sorunlarından olan izge bant güvenliği ve bant genişliğinin verimli olarak kullanımında ücretsiz olarak kullanılmasıyla ekonomik katkı sağlaması da pozitif bir fayda sağladığı başka bir olumlu gerçektir. İş bu konuda günümüz teknolojisinde kullanılmaya başlanan optik kablosuz haberleşme tekniği, teorik bir aşamada kalmayıp uygulanabilir bir tekniğe sahip olma potansiyeline sahiptir. Buna ek olarak RF haberleşmesindeki önceden belirtilen hususlarda genel sıkıntıları gideren bir teknik olması özelliğiyle sınırsız bant genişliği, yüksek hızlı veri oranı, izge güvenliği, fazla girift kalabalık ağlarından ziyade daha basit yapıları, ücretsiz bant lisansı, sağlığa tehlike arz eden radyasyon problemini gidermesi gibi problemlere tamamlayıcı bir çözüm olarak bilim dünyasında yerini almıştır [8]. Enerjinin kullanımı veya enerjinin istenen verimde kullanılması geçmiş yıllarda olduğu gibi günümüzde ve gelecek yıllarda dikkatleri çeken mühim bir konu olması hasebiyle bilim dünyasında gereken önemi üzerinde çalışılıyor olması çok önemlidir, bu duruma ek olarak hızlı, daha verimli, kolaylığı fazla ve az maliyetli iletişimin geliştirilmesi ve buna duyulan ihtiyaç herkesçe bilinen bir konudur. Görünür ışık haberleşmesi (visible light communication, VLC), belirtilen özellikleri içerisinde barındırdığından, şimdiki ve gelecekteki akıllı teknoloji için oldukça güçlü bir çalışma söz konusu olarak kabul edilir. VLC haberleşmesi, görünür ışık izge bant aralığında (375-780 nanometre (nm)) beyaz olarak ışık yayan diyotlar (light emitting diode, LED) kullanan yakın mesafeli bir ışınsal kablosuz iletişimdir. Böylelikle beyaz LED ışıkları gerek aydınlatma ve ısı, gerekse de iletişim sağlayabilir. Başka bir anlatımla ifade edersek; VLC haberleşmesinin bir sinyal vericisi olarak LED'i, bir iletim ortamı olarak havayı ve bir sinyal alıcı bileşeni olarak uygun fotodetektörü (photodetector, PD) kullandığı, haberleşme ortamının ise kısa mesafeli odalar ve odacıklardan oluştuğu iletim band genişliğine ait lisans ücretine gerek kalmadan istenen ışık bandını kullanarak radyo frekans gürültü girişimlerinin olmadığı yüksek veri hızı ve düşük veri hata oranının olduğu bilgisayar ağlarından tutun günlük hayatın merkezinde olan işyerleri, devlet kurumları vb. yerlerde az maliyetle kolayca kurulup kullanılan bir çığır açma yolunda hızlıca rağbet görmeye başlamıştır. Yakın mesafeli VLC haberleşmesi ayrıca güvenli ve insan sağlığı için oldukça faydalı bir tekniktir. Yakın mesafeli VLC haberleşmesi lisanssız olan sınırsız band genişliğini kullanarak aynı andaki veri gönderim hızını daha da arttırması için çoklu-giriş çoklu-çıkış (multiple-input multiple-output, MIMO) teknikler ile beraber kullanılmaya başladı. İş bu yapılan çalışma tezinde ise gönderim kanal tipi MIMO tekniği üzerinden tasarlanarak daha fazla alıcı-verici kullanımı ile sınırsız bant genişliğini daha verimli kullanılması hale getirildi. MIMO tekniğine ait kanallar aktif iken RF işaretleri ile bir girişim söz konusu değildir. RF haberleşmesinde kullanılan MIMO tekniğinde

verici kısmında birim zamanda daha fazla antenin aynı anda aktif olması ile beraber, modülasyon tipinin örneğin dik bileşenli frekans bölmeli çoğullama (orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM) tekniği ile daha fazla veri gönderimi sağlanırken, tez çalışmamız olan LED indis modülasyon tabanlı optik haberleşmesi için kod indis modülasyon tekniğini kullanan VLC – 4x4 MIMO tekniğinde ise veri iletiminde sadece bir verici aktif iken gönderilen veriye ait anten indisi ise başka bir verici aktif olur diğer iki verici ise çalışmaz halde kalır. Yapılan çalışmada LED indis modülasyonlu (led index modulation, LIM) tabanlı optik MIMO sistemleri için kod indis modülasyon (code index modulation, CIM) yöntemi VLC kanallarına uygulanarak elde edilen haberleşme sisteminde genel olarak amaç; sistem performansını arttırarak iletişimin hızının daha yüksek performans elde etmesiyle beraber bit hata oranını (bit error rate, BER) azaltmada kullanılır [9]. Ayrıca MIMO sistemleri iletim gücünü arttırmadan, yüksek hızlı iletimle beraber bant genişliğini verimli kullanır. Önceden ifade edildiği gibi diğer MIMO tekniklerinden farklı olarak, yalnızca bir verici belirli bir zamanda aktiftir. Aktif verici belirli bir yoğunluk seviyesi yayar ve diğer tüm vericiler belirli bir süre için aynı anda kapalı durumdadır. Bu nedenle, alıcı tarafında kanallar arası girişimi (inter channel interference, ICI) tamamen önlenir ve gelen veriye ait alıcı kısmında verinin kestirimde tespit sürecini basitleştirir. Gelen veriler ise aktif verici ünitesini kontrol eder. Her verici indisi belirli bir veri biti dizisine karşılık gelir. Örneğin; dört iletim birimi vardır, iki bit her bir verici indisine karşılık gelir. Bu temel çalışmanın mekanizmasındaki bir amaç ise MIMO tekniğiyle uyumlu genel izgesel (spektral) verimliliklerdir. İletim birimlerinin sayısının ise temel iki logaritması ve iletim birimi sayısı iki güç yoğunluğu olmalıdır. Alıcıda orijinal bilgi bitlerini almak ve birimi iletmek içinse, aktif karar vermek için yoğun kestirimli bir kararda en uygun kod çözümü kullanılır [10], [11].

Veri taşıyıcısı olarak kullanılan taşıyıcı işaretlerin iletilirken fazı, genliği ve frekansı değiştirilerek haberleşme için uygun kanaldan iletimi sağlanır. Kablosuz optik haberleşmesi (optical wireless communication, OWC) uygulamalarından olan görünür ışık haberleşmesinde veri iletimi ise geleneksel haberleşme sistemlerin aksine doğrudan algılamalı yoğunluk modülasyon (intensity modulation/direct detection, IM/DD) tekniği kullanılarak sağlanır. Çalışan LED antenlerinin sahip olduğu indis kavramı ile birlikte hareket ederek çalışmalar çalışma esnasında yapının karmaşıklığına göre durumu değişerek tavır gösteren uzaysal alanda çoklu veya tek anten olan LED vericisinin yanıp ve sönmesiyle birlikte aktif olan LED’lerde ise darbe genlikli modülasyonunu iletirler [12]. İndislerin durumuna göre aktiflik veya pasif oluşu LED’lerin konumuna göre verici olarak kullanılmasından dolayı yoğunluklu çalıştığından

daha fazla yüksek spektral verimlilik sağlamakla beraber daha az enerji tüketimi yapılır. Bu özelliklere ek olarak frekans alanında da problem olan bant genişliği ihtiyacına cevap verdiğinden dolayı kullanılabilir [13].

Kod indis modülasyonu bilimsel akademik dünyada yerini son zamanlarda almıştır. Bu teknik yeni ve farklı bir modülasyon tekniği olarak karşımıza çıkmaktadır. Geçen süre zarfında sürekli kendini yenilemeye çalışan bu modülasyon tekniğinin en belirgin özellikleri ise şunlardır: enerjinin verimli kullanılması, istenen veri miktarına göre uygun bant genişliği gönderimi, birim zamanda geleneksel doğru dizilimli yayılımcı izge teorisine göre daha fazla veri taşır [14]. Bu modülasyon tekniği tıpkı doğru dizilimli-kod bölmeli çoklu erişim (direct-sequence code division multiple access , CDMA) tekniğinde olduğu gibi aynı andaki zaman ve frekans alanındaki çoklu kullanıcılara erişimi sağlamak için birbirine dik olan kanal kodları üretilir. Yeni teknik olan yayılı izge (spread spectrum, SS) tekniğini kullanan CIM-SS tekniği ise geleneksel CDMA tekniğine göre daha sağlıklı performans sağlarken daha iyi BER grafikleri sonucunu elde ederler [15]. CIM tekniği ise kendisi gibi yayılımcı kod indis yerine anten indisi seçilimli olarak klasik haberleşmenin aksine farklı boyutta veri bitlerini haritalayarak çalışan uzaysal modülasyona göre ise daha fazla enerji verimliliği, daha yüksek izgesel band verimliliği, daha sade sistem karmaşıklığı olarak daha az denklemlere etki eden analizi hızlandıran çarpımları vardır ve daha fazla veri gönderimi sağladığı anda ise BER hata başarımları daha fazladır [16]–[19]. CIM modülasyon tekniği ise özet olarak şu şekilde çalışır; veri bit bölücüleri ile gelen veri bitini karşılar. Bitleri uygun sıralı bölmelerle bir kısmını devre döngüsünün verimli çalışmasına uygun olacak şekilde tasarlanan modülatörlere örneğin çoklu seviyeli karesel genlik modülasyon (m-ary quadrature modulation, M-QAM) modülatörüne uğrarlar. Bölünen diğer veri bit kısmını ise yayıcı kodlardan olan izge durumuna göre standart genişliği değişen Walsh Hadamard kod çipleriyle gelen bitlere göre farklı olacak şekilde yayıcı kod matrisi tanımlanır. İkili atama tanınmış işbirlikli güdümlenme sonrası modülatörden ve yayıcı kodlardan gelen veriler çarpılarak uygun haberleşme kanalından veriler gönderilirken sağlam bir şekilde işaretin herhangi bir kanal veya ortamın sebep verdiği parazitik gürültüye karşı veri sağlığı korunmuş olur. Bu teknikte sadece modüle edilen veri taşınmaz aynı anda farklı alanlara(domain) gitmeden kod taşıyıcısı olan indislerde aynı kanalda taşınmaktadır [20]–[24].

LED indis modülasyonu; literatür dünyasında son dönemlerde yerini alarak kendini göstermeyi başarmıştır. RF haberleşmesinin izge durumunun lisanslı yapısından dolayı getirilen sınırlamalarla daha da verimsizleşmeye başlayan haberleşme alanında ışık tabanlı

bağlantı haberleşmesinin (light fidelity, LIFI) teknolojide ivmesi üstel olarak artacak şekilde talep görmesinin ardından literatür dünyasında yerini alan VLC kanal haberleşmesinin özellikle 5G'ye ait olan gerekli altyapısını karşılaması, yüksek performans ve yüksek veri iletim hızı vb. özelliklerinden dolayı kendi mevcut yapısını daha fazla iyileştirmek adına girişim engelini azaltacak, daha fazla yüksek mertebelerde veri transferini sağlayacak aynı zamanda Giga hertz (Ghz) mertebelerinde VLC teknik modelinin yeterli kalmayacağı ihtimali söz konusu olmaması adına ve teorik olarak gerek kompleks gerekse negatif işaretlerin iletimi için LIM tekniği geliştirilmiştir. LIM tekniğinde; Verici anten olarak çalışan LED bulunmasından dolayı veriler iletilirken modülasyon türü RF haberleşmesinden farklı olup IM/DD tekniği kullanılarak sağlanır. Kablosuz optik haberleşmesinde IM/DD tekniğine göre ışığın davranışına bağlı kalarak tek tip yönlü kalması yani pozitif durumlu olması gerekir. Bunlara ek olarak açma-kapama anahtarlama modülasyon (on-off keying, OOK), darbe pozisyon modülasyon (pulse position modulation, PPM), gibi modülasyon teknikleri kablosuz optik haberleşmesinde uygulanabilir tekniklerdir. LIM sistemine gelen bilgi mesaj bilgi bitleri M-QAM modülatörüne uğradıktan sonra işaretlerin işaret durumuna göre ayırıcı sistemine uğradıktan sonra işarete uygun olarak atanan LED aktif olurken iletilen verilerin ayırıcı sistemine girdikten sonra işarete uygun olmayan konuma göre atanan LED ise pasif durumda kalarak yanmaz. Verici LED verileri iletirken bunun yanında kapsül veya zarf gibi kapsayacak şekilde iletilen veriye ait LED indisi de beraber VLC kanal içerisine iletilir. İletilen bitler maksimum a posteriori kestirim (maximum a posteriori, MAP) sistemine uğrayarak iletilen veri ve veriyi ileten antenin indisi kestirilir. Uygun veriler doğru elde edildikten sonra ayırıcı işleminden geçen veriler tekrar birleştirici sistemine girerek veri M-QAM demodülatörüne uğrayarak gerçek veri bitleri gürültüden arındırılarak elde edilir. LIM tekniğinin çalıştığı alanlarda örneğin uzaysal alanda indis ve veri farklı alanda çalışmadan aynı boyutta ilerlemesiyle birlikte sağlıklı kanal taşınması gerçekleşmekle birlikte; spektral verimlilik, yüksek veri transferi, yüksek veri hızı, yüksek güvenli, daha az enerji tüketimi, sistematik donanımın karmaşıklığının azaltılması gibi özelliklere sahip olması önümüze çıkan mühim bir faal etken serisi olarak literatürdeki yeri her geçen gün daha da kalıcı hale gelmektedir. Son olarak CIM-LIM işbirlikli hibrit çalışması yapılarak; MIMO ve VLC gibi ışık haberleşmesinin katkısı yüksek olacak değişkenlere sahip tekniklerin harmonisi eşliğinde CIM ve LIM sistemlerinin bahsi geçen üstün özelliklerine atfen daha da fazla sinerjik yüksek performanslı bir modülasyon tekniği olarak çalışma tezi sunulmuştur [25]–[29].

1.2 Tezin Katkısı

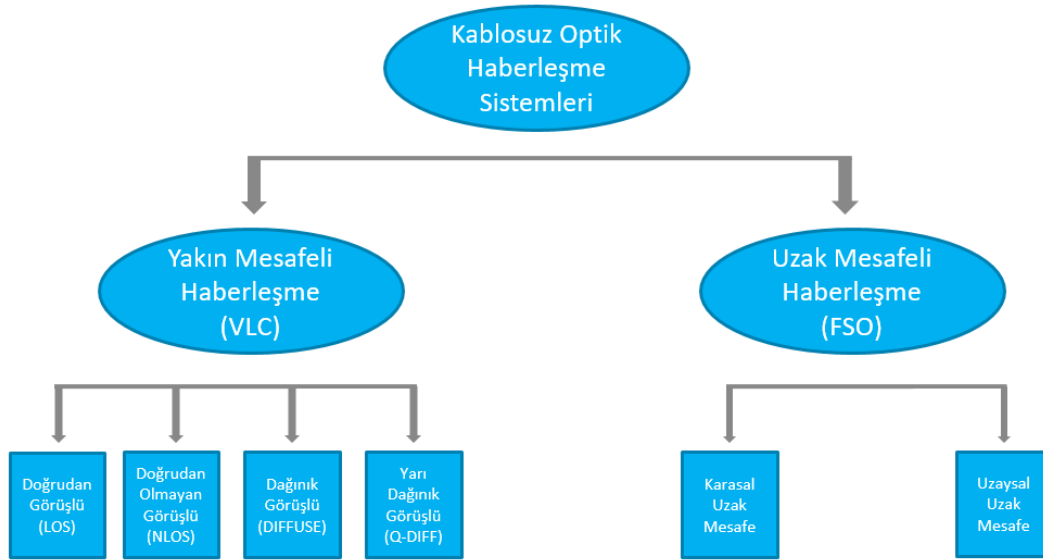
Tez çalışması kapsamında, yüksek veri hızlı ve enerji verimli CIM yöntemi ile LIM tabanlı optik MIMO sistemi birleştirilmiştir ve kısaca CIM-LIM olarak ifade edilen yeni bir teknik önerilmiştir. Böylece, bu tez kapsamında günümüzdeki optik MIMO sistemlerinin performans ve veri iletim hızında ciddi bir artma meydana gelirken indiste taşınan ekstra bit iletiminden dolayı verici iletim enerjisinde ciddi bir azalma meydana gelmektedir. CIM-LIM sistemi, yakın mesafeli görülebilir optik haberleşmenin sağlandığı kapalı iç mekanlar için önerilmiştir. Önerilen sistem parametreleri belirlenmiş optik haberleşmenin sağlandığı kapalı iki iç mekan senaryosu için (Sistem A ve Sistem B) test edilmiştir. Önerilen CIM-LIM tekniği, her iki senaryo için de geleneksel LIM yöntemine göre çok iyi başarıma sahip olduğu ve yüksek SNR kazancı sağladığı benzetim sonuçlarıyla gösterilmiştir.

1.3 Tezin Bölümleri

Bu Tez çalışması 6 Bölümden meydana gelmektedir. Bölüm 2’de kablosuz optik haberleşmenin tarihçesi, gelişimi ve tarihi derinlemesine irdelenmiştir. Bölüm 3’ te optik kanal modellemenin analizi yapılırken, Bölüm 4’te ise kod indis modülasyonu ele alınmıştır. Bölüm 5’te LED indis modülasyonunun temel yapısı incelenmiştir. Son olarak, Bölüm 6’da CIM ve LIM teknikleri birleştirilerek, yeni hibrit yapılı bir sistem modeli olan CIM-LIM tekniği önerilmiştir. Önerilen bu yöntemin verici ve alıcı yapısı detaylı açıklanmış olup benzetim sonuçları sunulmuştur.

2. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN TARİHİSEL GELİŞİMİ

Kablosuz optik haberleşmesi, yüksek hızlı geniş bant için bir sonraki alan sınırı olarak kabul edilir. Benzersiz özellikleri nedeniyle bağlantısı ise; son derece yüksek bant genişliği, dağıtım kolaylığı, tarife içermeyen bant genişliği tahsisi, düşük güç ($1/2$ radyo frekansı (RF) sistemleri), daha az kütle (RF sistemleri $1/2$), küçük boyut ($1/10$ çapı RF anteni) ve geliştirilmiş kanal güvenliği gibi özelliklere sahiptir. Saniyede 10 Gigabit (gigabit per second, Gbps)'e kadar veri aktarımı ile sesli ve görüntülü iletişim atmosfer (uzay) uzak mesafelilerde oldukça başarılıdır. Kablosuz optik haberleşmesinin iki geniş kategorisi vardır: Yakın mesafe (indoor) ve Uzak mesafe (outdoor) kablosuz optik haberleşmesidir. Yakın mesafe (indoor) kablosuz optik haberleşmesi dört kategoride sınıflandırılır: doğrudan görüş hattı (LOS), doğrudan olmayan görüş hattı (NLOS), yarı dağınık görüşlü hattı (quasi diffuse, Q-DIFF) ve dağınık görüşlü hattı (diffuse, DIFF) olmak üzere karşımıza çıkıyor. Uzak mesafe kablosuz optik haberleşme sistemleri ise karasal ve uzay sistemlerinde de sınıflandırılır. Şekil 2.1 ise bu sınıflandırmayı göstermektedir [30].



Şekil 2.1 Kablosuz optik haberleşme sınıflandırması

Kablosuz optik iletişim haberleşmesi son birkaç yıldır, Kablosuz optik iletişim sistemleri teknolojisindeki büyük ilerleme gösterdi. Optoelektronik bileşenler ve muazzam gelişmeler nedeniyle gözlenen kablosuz optik cihazlar sunan pazardaki büyüme sağlamıştır.

2.1 Kablosuz Optik Haberleşme

Haberleşmenin sağlandığı ortamlara göre adapte olma süreçlerinden ana amaçlardan en önemlisi de veri transferini sağlamaktır. Bir mesajı iletmek için işaret yangınları ve duman işaretleri şeklinde OWC örnekleri hemen hemen tüm coğrafyalarda varlığına rastlanabilir. Alfabetik bir koda göre kolları veya iki bayrağı veya direkleri belirli pozisyonlarda tutarak mesaj gönderme sistemi olan Semafor çizgileri; OWC uygulaması olarak, teknolojik sürecin en eski şeklidir. Fransız mühendis Claude Chappe ilk semafor çizgilerini inşa etti. 1792'de optik telgraf ağını; Semafor kulelerini bir çapraz çubukla birbirine bağlanan iki kolun pozisyonunda 196 bilgi sembolü olarak kodlandı. Önceki dönemlere ait OWC'nin bir başka örneği olarak, heliograf kablosuz bir güneş telgrafıdır. İşaretler, bir aynayı döndürerek veya ışını bir deklanşör ile keserek güneş ışığına göre yanıp sönmektedir [31].

2.2 Semafor Kulesi ve Heliograf Foton

1836'da Mors kodunun icadından sonra, donanma gemileri bir navigasyon için Kıyı kesimlerindeki fenerler ile işaret lambası üretildi. 1880'de Alexander Graham Bell bir serbest alan serbest uzay optik haberleşme (free space optical communication, FSO) bağlantısının ilk uygulamasını fotofon denilen cihazlarla uygulamalı olarak şu şekilde göstermiştir [32]: Vericide titreşimli bir ayna ve kristal bir ayna kullanarak bir parabolik alıcının odak noktasında selenyum hücreleri, Bell bir ses işaretini ışık işaretine dönüştürerek kısmi olarak modüle edebildi. Ancak, deneyin işaret taşıyıcısının karmaşık ve uygun olmayan durumu nedeniyle başarılı olamamıştır. Daha sonra, 1960'larda Theodore H. Maiman Hughes Araştırma Laboratuvarlarında ilk çalışan lazeri keşfetmiştir.

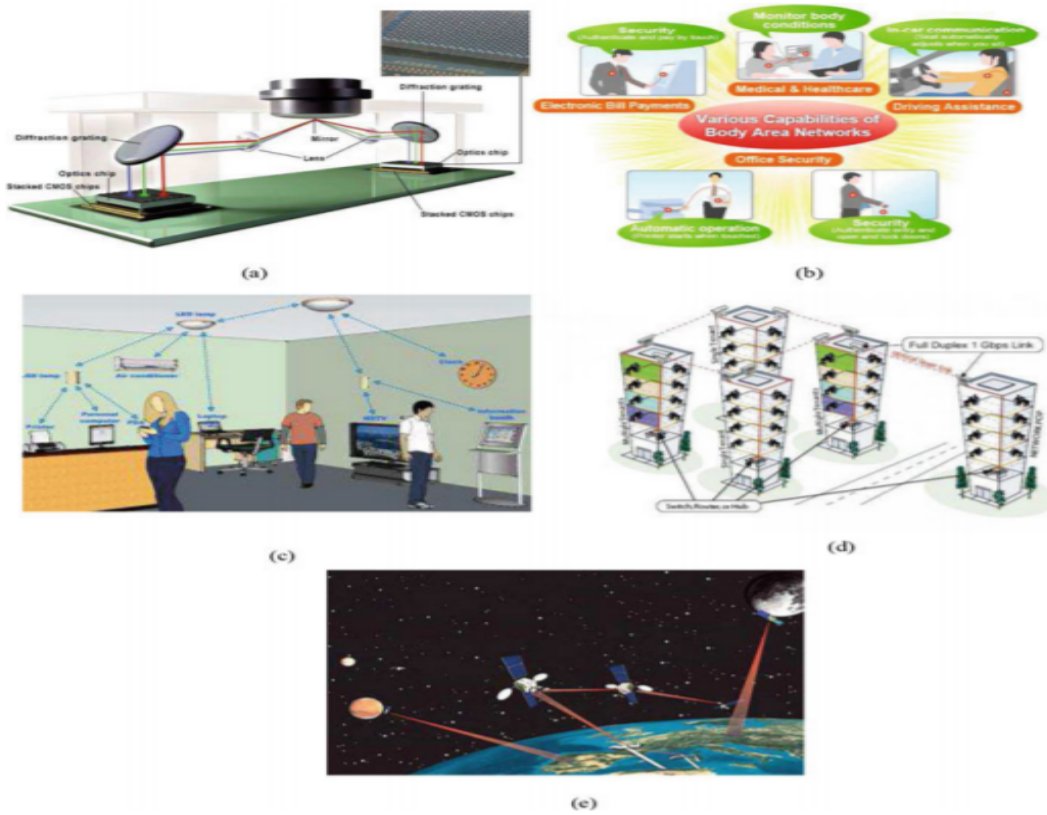


Şekil 2.2 Semafor kulesi ve Heliograf foton aynası

Bu noktadan itibaren Serbest uzay optik haberleşme şansı değişti. FSO haberleşme bağlantısı olarak Askeri ve Uzay laboratuvarlarında çeşitli deneyler yapıldı. 'de değiştiği üzere; 1970'lerde Hava Kuvvetleri Uzay Uçuşu olarak bilinen bir programa destekleyici oldu. Hava Kuvvetleri; Yeni Meksika yer istasyonunda uydudan toprağa bağlantı kurmak için Test Sistemi (space flight test system, SFTS) kurdu, Program daha sonra Airborne Uçuş Test Sistemi olarak yeniden adlandırıldı. Bu programın ilk başarısı 1980'lerde 1 Gbps veri hızının elde ettiği uçaktan yer istasyonuna gösterildi. Bundan sonra, bir gösteri hareketliliği 1980'lerde ve 1990'larda kaydedildi. Bunlar arasında Lazer Çapraz Bağlantı Alt Sistemi (laser cross link subsystem, LCS), Yükseltme Gözetimi ve Takip Sistemi (boost surveillance and tracking system, BSTS), Erken İzleme Uyarı Sistemi (follow on early warning system, FOEWS) ve daha fazlası oldu. Yerden tam iki katlı zemin (yörünge) Lazer İletişim Gösteri olarak bilinen lazer bağlantısı ilk kez 1995–1996 yılında Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (national aeronautics and space administration, NASA) tarafından Jet Tahrik Laboratuvarı (jet propulsion laboratory, JPL) ile birlikte kuruldu. Buna ek olarak, derin uzay ve uydu içi görevler için çeşitli gösteriler yapılmıştır [33], [34].

NASA Amerika dışında diğer uzaycılık hava ajanslarından Japonya, Hindistan ve Avrupa ülkeleri ile uydular arasında farklı uzay boyutlarında çalışmalara devam etmektedir. Devam edegelen çalışmalardan edinilen bilgilere göre çeşitli yerleşik cihazlar arasında yüksek veri hızlarına sahip tam bir çift yönlü olacak şekilde FSO haberleşmesi bağlantısı kuruldu. Uzay istasyonları ve yer istasyonları, uydular arası haberleşme tam olarak sağlanmasıyla birlikte FSO haberleşmesinin ileri yönlü (uplink) ve geri yönlü (downlink) veri transferinin sağlanması yanı sıra kapsamlı araştırmalar da yapılmaktadır. FSO haberleşme karasal bağlantıları, yani yerel alan oluşturmak için iki lokasyon arasındaki bağlantı kullanıcılara en son mesafeli bağlantı sağlayacak ağ segmenti sağlandı. FSO haberleşmesi yoğun nüfuslu kentsel alanlar için çok uygundur. Ana yollarda kazı çalışması yapılması oldukça zahmetlidir. Karasal Uzak mesafeli optik haberleşme bağlantıları kısaca kullanılabilir menzil (birkaç metre) veya uzun menzil (onlarca kilometre)'i gerçekler. Kısa menzilli bağlantılar (VLC), yerel alan ağı segmentlerini birbirine bağlayarak son kullanıcılara yüksek hızlı bağlantı sağlar. Kampüs içinde ayrılmış binalarda veya kampüsün farklı binalarında ki şirket bölümlerinde kullanılır. Uzun menzilli Uzak mesafeli optik haberleşme bağlantıları alan fiber halkalar veya yeni ağlar bağlamak için mevcut anakentlere kadar uzanıyor. Bu bağlantılar sona ulaşmıyor ancak hizmetlerini çekirdek altyapıya genişletiyorlar. FSO haberleşmesi sistemi aynı zamanda bir bina içine yerleştirilebilir ve kapalı kablolu olarak adlandırılmıştır [35].

Kablosuz optik haberleşme (OWC) sistemi, Bu kısa menzilli yakın mesafe VLC sistemi geleceğe yönelik bir teknoloji ve ilerleme kat ederek bugünlerde dikkat çekiyor. OWC teknolojisindeki son gelişmeler, 1979'da Gfeller ve Bapst'in çalışmaları ile birlikte öncü olarak başlattıkları bu alanda çığır açtıktan sonra önemli bir hız kazanmıştır [36]. OWC sisteminin olabilecek kullanım alanlarının genişliğinin yüzlerce Terahertz (Thz) elektromanyetik bant genişliği vaat eden yüksek kapasiteli şirket içi ağlar için optik alanda izgesel potansiyelini gösterdiler. OWC topolojisinde bir alt dalı olan Uzun mesafelerde FSO bağlantıları genellikle son derece yönlü olarak gerçekleştirilir, haberleşme araçları ise vericiler olarak lazer diyotları, Alıcı tarafında ise genellikle fotodiyotlar veya fotodetektörler kullanılır [37].



Şekil 2.3 Kablosuz optik haberleşme uygulamaları:

(a) Çipten çipe haberleşmesi (b) Kablosuz gövde alanı ağı (c) Yakın mesafe kızılötesi (infrared, IR) veya görünür ışık haberleşmesi (d) Bina içi haberleşmesi ve (e) Derin uzay uygulama örnekleri

2.3 Kablosuz Optik Haberleşmenin Uygulama İmkânları

Haberleşme teknolojisinin gelişmiş evrelerinden olan 4G'nin sunduğu imkânların sınırlarını daha da genişleten 5G'ye yönelik akademik ve pazarlama dünyasının hızla gelişen çalışmalarının artması sonucu yüksek verimde kalitede hizmetler sunacaktır. Haberleşme ağının sağlandığı aşağıda özellikleri sıralanacağı üzere örnek verecek olursak normalden daha fazla olarak 1000 kat daha fayda sağlamasıyla 10 Gbps hızında veri iletimi elde edilmesiyle birlikte gecikme ise saniyenin mili birimlerinde sıralanacaktır. RF sistemlerine kıyas olarak Kablosuz optik haberleşmelerde saniyenin nano mertebelerinde hesaplanacaktır [38]. Kablosuz optik haberleşme ise 5G'nin kullanılacağı RF sistemler yerine ne gibi özelliklerle bahsi üzerinde olacağını konu başlığı olarak bahsedeceğiz.

2.3.1 Ultra Yüksek Sistem Kapasitesi

5G sistemlerinin kullanıldığı sistemlerdeki ihtiyaçlardan biriside yüksek genişlikteki ağ bağlantılarını sağlamasıdır. Kablosuz optik haberleşmesinin dallarından olan yakın mesafeli olan VLC haberleşmesinde akademik çalışmalarda 100 Gbps'lik bir veri hızı ispat edilmiştir [39]. VLC'nin yanı sıra FSO olarak bilinen uzak mesafeli kablosuz optik haberleşmesinde ise aynı zamanda 20-40 Gbps'lik veri hızı ise atmosferlerde çeşitli modülasyon teknikleri; örneğin taşıyıcı-sıkıştırılmış sıfıra dönüşümlü (carrier-suppressed return-to-zero, CSRZ) modülasyon tekniği kullanılarak doğrulanmıştır [40].

2.3.2 Geniş Ağlar Yüksek Sayılı Cihaz

[38]' de belirtildiği üzere OWC, büyük bir bağlantı sağlamak için gündelik hayatta çok önemli bir rol oynayabilir. Farklı uygulamalar gerek büyük gerekse küçük ağ yapıları için LED'lerin kullanımının; düşük fiyatı, düşük enerji tüketimi ve daha uzun ömrü nedeniyle katlanarak arttığı gözlenmektedir. Bu nedenle, OWC teknolojisi; 5G ve IoT hedeflerine ulaşmak için düşük güçlü LED'ler aracılığıyla çok sayıda bağlantı sağlayabilir.

2.3.3 En Az Kayıplı Gecikme Süresi

OWC sistemlerinde genel itibariyle gecikme süresi RF sistemlerine göre çok daha düşük miktarda veri gidiş geliş süresi (ping) gecikmesi yaşanır. Daha önce VLC sistemlerinde bu durumu nanosaniye (ns) mertebelerinde dile getirmiştik. OWC uygulamalarından örnek verecek olursak su altı haberleşme sağlanmasının güç olduğu ortamlarda ise daha düşük riskli ping gecikme süresi ile birlikte ortalama BER değerlerinin nano mertebelerinde çalıştığı ispat edilerek göstermiştir [41].

2.3.4 En Yüksek Güvenlikli Veri Erişimi

OWC sistemlerinde veri iletimi sağlanırken ortam engeli ile karşılaşmaması gibi veri değişimi ağlar üzerinde sağlanmaz. Kaynak üzerinden doğrudan veri iletimi olduğu gibi iletilir.

2.3.5 En Düşük Enerji Tüketimi

LED'ler kaynaktan beslenmesiyle yüksek bir sıcaklıkta farklı ışık yoğunluğu seviyelerine geçebilir. Verilerin LED ile modüle edilmesini sağlayan hızlı iletimde insan gözünün hızı algılama yeteneğinin erişemediği algılayamadığı hızdır. Bu nedenle, bu enerji tasarruflu LED cihazları; aydınlatma, iletişim ve akıllı pozisyon değişimi için kullanılabilir [42]. Bu özellik RF sistemlerinde bulunan bir özellik değildir.

İçerikler üzerinden incelenmesi yapılması üzere OWC haberleşme sisteminin avantajlı 5 ana başlıkta bahsedildiğinden diğer yan avantajları ise şöyledir. [37]'de bahsi geçen başlıklara uygun sıralanmıştır:

- ❖ Yüksek deneysel kalitesi
- ❖ Güvenilir topolojik ağlar
- ❖ Akıllı hücresel ağlar
- ❖ Yoğun ve başarılı girift ağlar
- ❖ Heterojen ağların birlikteliği ve uyumluluğu
- ❖ Yüksek kapasiteli oranda veri iletim ağlar

2.4 Menziline Göre OWC Kullanım Alanları

OWC sistemlerinde tıpkı diğer haberleşme sistemlerinde olduğu gibi haberleşmenin sağlandığı alanların uzaklığına göre haberleşme alanlarına sahiptirler.

2.4.1 En Düşük Kısa Menzilli Alanlar

Süper bilgisayarlar için gerekli hesaplamalarda, Çip içinde ve çipler arası iletişimlerde, Işıksal (optical) ara bağlantılarda genel olarak kullanım alanlarından belli başlı alanlardır.

2.4.2 Kısa Menzilli Alanlar

Kablosuz uygulama alanlarından olan kablosuz vücut alan ağı (wireless body area network, WBAN) olan sensörlerinde, Akıllı telefon ve uygulamalarında, Telefonlar arası yakın mesafeli haberleşmelerde, Kızılötesi mesafesinde radyo frekansı tanımlama (radio frequency identification, RFID) özelliği sağlanan mobilite özelliği bulunan araçlarda kullanılır.

2.4.3 Orta Menzilli Alanlar

Orta menzilde (metre sırasına göre), tipik kablosuz uygulama kablosuz yerel alan ağlarıdır (wireless local area network, WLAN). Kablosuz ağların yakın mesafeli olarak optik haberleşmenin sağlandığı OWC dallarından olan VLC sisteminin özellikle kullanım alanlarının olduğu hastaneler, okul içi sınıflar, şirket içi haberleşmesinin sağlandığı alanlardır.

2.4.4 Uzun Menzilli Alanlar

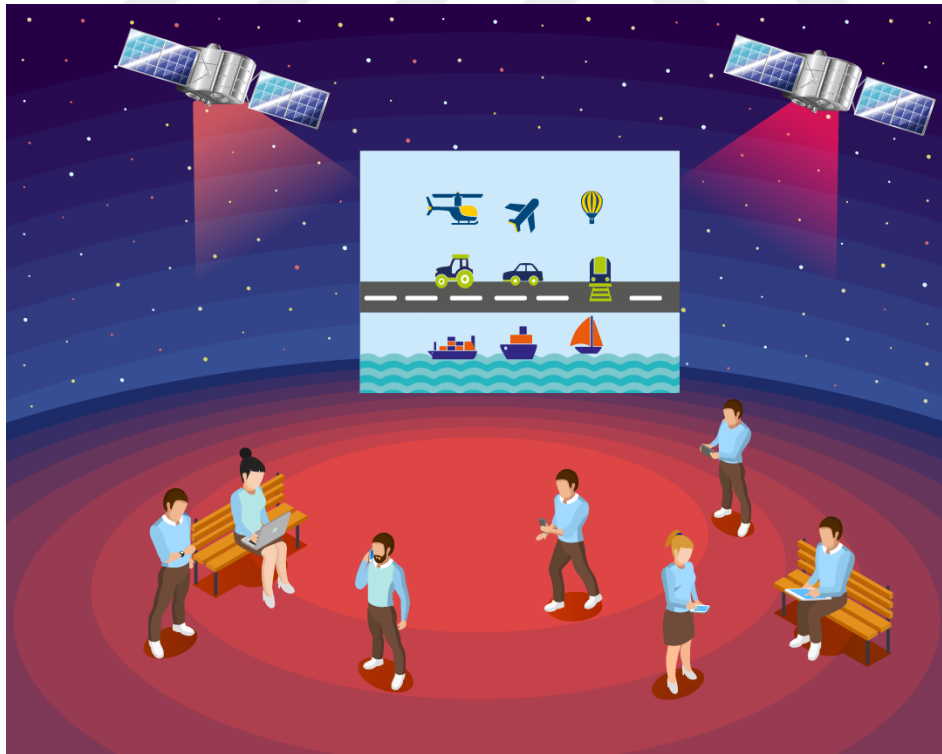
Uzun menzilde ise kullanım alanlarından özellikle FSO haberleşmesinin sağlandığı uzak mesafeli yakın yerler özellikle fabrikalar, üniversite ağları, endüstriyel yapılar, şirketler arası uzak haberleşmede kullanımının olduğu alanlardır. RF sistemlerine göre oldukça yüksek optik bandına sahip olan FSO haberleşmesinin olduğu alanlardan olan kablosuz metropolitan ağların barındığı (wireless metropolitan access network, WMAN) yerlerde veya WLAN- WLAN arası ağlarının bulunduğu uzun menzilli alanlardır.

2.4.5 Yüksek Uzun Menzilli Alanlar

FSO haberleşmesinin sağlandığı noktaların çoğullanmasıyla beraber; Uydular arası haberleşmelerde, uzay istasyonları haberleşmesinde, NASA'ya ait genel haberleşme tekniklerinin kullanıldığı alanlardır [43].

2.5 Serbest Uzay Optik Haberleşmesi (FSO)

FSO haberleşmesi, bilgilerin bir noktadan diğerine yayılması için verici ve alıcı arasında görüş hattı bağlantısı gerektirir. Buraya, kaynaktan gelen bilgi işareti optik taşıyıcı üzerinde modüle edilir ve bu modüle edilmiş işaretin daha sonra atmosferik kanal boyunca yayılmasına izin verilir veya alıcıya doğru yönlendirilmiş alıcıya gelince kablosuz ama bina içinden ise tekrar optik olarak fiber kablo kullanılır. Zemin uyduya (optik yer-uydu bağı) ve uydudan toprağa (optik yer-uydu bağı) yayılımı içerir optik ışın demeti atmosfer boyunca ve boş alanda yayılım gerçekleşir. Bu nedenle, bu bağlantılar karasal ve uzay bağlantılarının bir kombinasyonudur. Şekil 2.4 ise FSO haberleşmesi bağlantı alanları ile alakalı uygulamaları göstermektedir:



Şekil 2.4 FSO optik haberleşme bağlantı alanları

FSO teknolojisine dayanan optik kablosuz haberleşme sistemi, kablosuz esnekliğe sahip fiber hızını sağlayan bir dış mekânlarda veya arasında gerçekleşen bir kablosuz optik haberleşme

kategorisidir. 1.25 Gbps hızına kadar olan verimli veri hızlar bandında optik iletim sağlar ve gelecekte ise bantlarına göre kullanım sağlayan band ayırıcı WDM kullanarak 10 Gbps hıza ulaşılabilir. Bu, herhangi bir sabit kablosuz veya RF teknolojisi ile teorik veya pratik olarak mümkün değildir. Optik kablosuz ayrıca pahalı optik izge bandını satın alma ihtiyacını da ortadan kaldırır. Dünya çapında lisans onayları herhangi resmi bir kurum veya sivil yapılanma tarafından gerekmez, bu özellik ise onu sabit kablosuz teknolojilerden daha da üstün olarak kalıcı bir özellikle belirgin bir durum kılıyor. Anlatılan özelliklere ek olarak, FSO teknolojisinin dar bantta ışık iletimi, milimetre dalga radyosu gibi geleneksel, hatta daha yeni radyo tabanlı teknolojiler için klasik olarak 20 metreye karşı aksine 2 metredir. Optik kablosuz ürünlerin geleneksel kablolu optik çözümlerle benzerlikleri, erişim ağlarının optik çekirdek ağlarla sorunsuz birleştirilmesini (integration) sağlar ve tamamen optik bir ağın vizyonunu gerçekleştirmeye yardımcı olur [44], [45]. Fiber optik kablo ve FSO teknolojisi gibi optik haberleşmenin sağlandığı ortamlarda ise aynı özelliklerin çoğunu paylaşırlar, bilgi iletim şekillerinden dolayı farklı güçlkle karşılaşabilirler. Fiber kablo örnek olarak İstanbul'da altyapı çalışmalarının sağlandığı olumsuz durumlardan olan altyapı kazı çalışmaları, fare ısırması gibi zarar verdiği, fiber bağlantılarının esnek olarak kordonlu konnektörlerinin kullanıldığı fiber kablolarının hasar gören ek bağlantı noktaları, deniz altında kuvvetli balıkların zarar vermesi gibi FSO haberleşmesinde de benzer olarak aynı güçlüklerin havai durumda ki benzer güçlükleri ise şunlardır [46]:

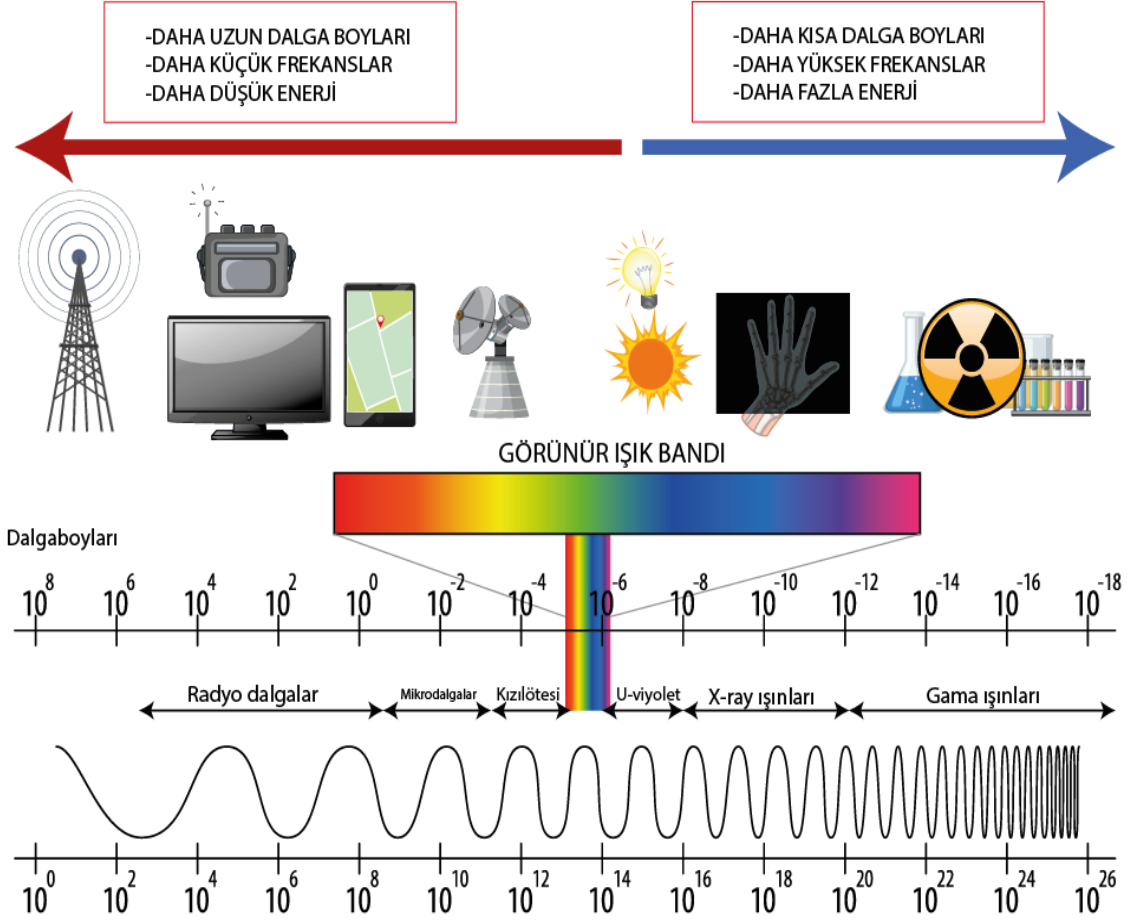
- ❖ Sis
- ❖ Işığın Emilmesi
- ❖ Işığın Saçılması
- ❖ Fiziksel engeller
- ❖ Bina sallanması / sismik aktivite
- ❖ Güvenlik
- ❖ Işıldama
- ❖ Işın Dolaşımı



Şekil 2.5 FSO optik haberleşmesini etkileyen hava durumu faktörleri

2.6 Görünür Optik Haberleşmesi (VLC)

Yakın mesafe kablolu optik iletişim bağlantıları fiziksel bir kablolu bağlantı kurmanın zor ankastra olduğu bir binada esnek bir ara bağlantı sağlar. Verici olarak lazerler veya ışık yayan diyotlar ve ışık emen olarak fotodetektör veya fotodiyot alıcılar vardır. Bu cihazlar, sürücü devreleriyle birlikte radyo frekansı ekipmanı veya mevcut bakır kablolarla karşılaştırıldığında çok daha ucuzdur. Ayrıca, yakın mesafede optik işaretler kısmi olarak kanallar arası girişimleri engelleyen modülasyon tekniklerinin türetilmesiyle beraber nüfuz etmediği için kablolu optik iletişim doğal olarak güvenli bir teknolojidir, ışıksal işaret kaynağı olan ışık demetlerine engelleyici bir unsur olarak görülen bir sebep teşkil eden duvarlar ise elektromanyetik dalgaların aksine parazitik gürültülere neden olabilir ve böylece gizli olumsuz güvenlik sorunlarına karşı yüksek derecede güvenlik sağlar. Bu optik dalgalar ya görünür ışık veya IR izgelerinde büyük tera mertebelerinde bant genişliğine sahiptirler. Bu cihazlar çok az güç tükettiği için mobil terminal sistemleri için de uygundur. Birçok avantajın yanı sıra, VLC optik haberleşmesinin performansını etkileyen çeşitli bozukluklardan etkilenir. Bu bozulmalara yol açan faktörlerden bazıları: optoelektronik cihazların hızını sınırlamak, büyük yol kaybı, gürültülü yakın mesafede akkor (floresan) aydınlatma veya güneş ışığına katkıda bulunan ortamın detektördeki gürültü, çok yollu dağılım ve yapay gürültü kaynakları gibi özellikler sıralanabilir. Sistem aralığı ortalama iletilen güç olarak sınırlandırılmıştır ve göz güvenliği düzenlemeleri nedeniyle sınırlıdır.



Şekil 2.6 Elektromanyetik dalga izge bandı

Yakın mesafe kablosuz optik iletişim için IR vericilerinde en yaygın kullanılan optik kaynaklar ışık yayan diyotlar ve lazer diyotlardır(laser diode, LD). LED'lerin çalışma aralığında ucuz oldukları ve daha geniş modülasyon bant genişliği ve doğrusal özelliklere sahip oldukları için LD'lere göre tercih edilir. LED'ler yönlü olmayan optik kaynaklar olduğundan, çıkışlarındaki güç çok yüksek değildir. Bu nedenle; daha düşük güç seviyelerini telafi etmek için, LED teknolojisi kullanılabilir. Ancak, LED'ler Saniyede 100 megabit (megabit per second, Mbps) hızı üzerindeki yüksek veri hızlarında çalışamaz. Lazer diyotlar, birkaç Gb/sn'lik veri hızlarında kullanılabilir. Göz güvenliği nedeniyle düzenlemelere karşı güvenli, lazer diyot; yakın mesafe kablosuz optik iletişim için doğrudan kullanılamaz yönlü ve optik hasara neden olabilir.



Şekil 2.7 VLC haberleşmesi kullanım alan ve uygulamaları

2.6.1 VLC Hakkında Bazı Teknik Özellikler

VLC haberleşmesine ait kullanım alanları şöyledir:

- ❖ Endüstriyel alanlar
- ❖ Ofis
- ❖ Aışveriş merkezleri
- ❖ Ulaşım araçları
- ❖ Hastaneler
- ❖ Toplantı merkezleri,
- ❖ Üniversiteler

VLC haberleşmesinde verici olarak kullanılan LED çipleri, çift amaçlı aydınlatma ve veri iletişimi için tercih edilen kaynaklardır ve aşağıda belirtilecek olan özelliklerinden dolayı revaçtadırlar [47]:

- ❖ G z güvenliği kuralları (lazerle karşılaştırıldığında)
- ❖ Kullanım süresi ve  mr 
- ❖ Düşük maliyet
- ❖ Cıva i ermeyiři
- ❖ Enerji – güç tasarrufu
- ❖ Yüksek hız
- ❖ Mobilite ve uyumlu
- ❖ En az düzeyde dip ısı dağılımı
- ❖ Nemlilięe yüksek oranda hassasiyeti
- ❖ çok daha yüksek bir enerji dönüşüm verimliliği (ışık etkinliğine sahip beyaz LED'ler 200 lm/W'den daha büyüktür)

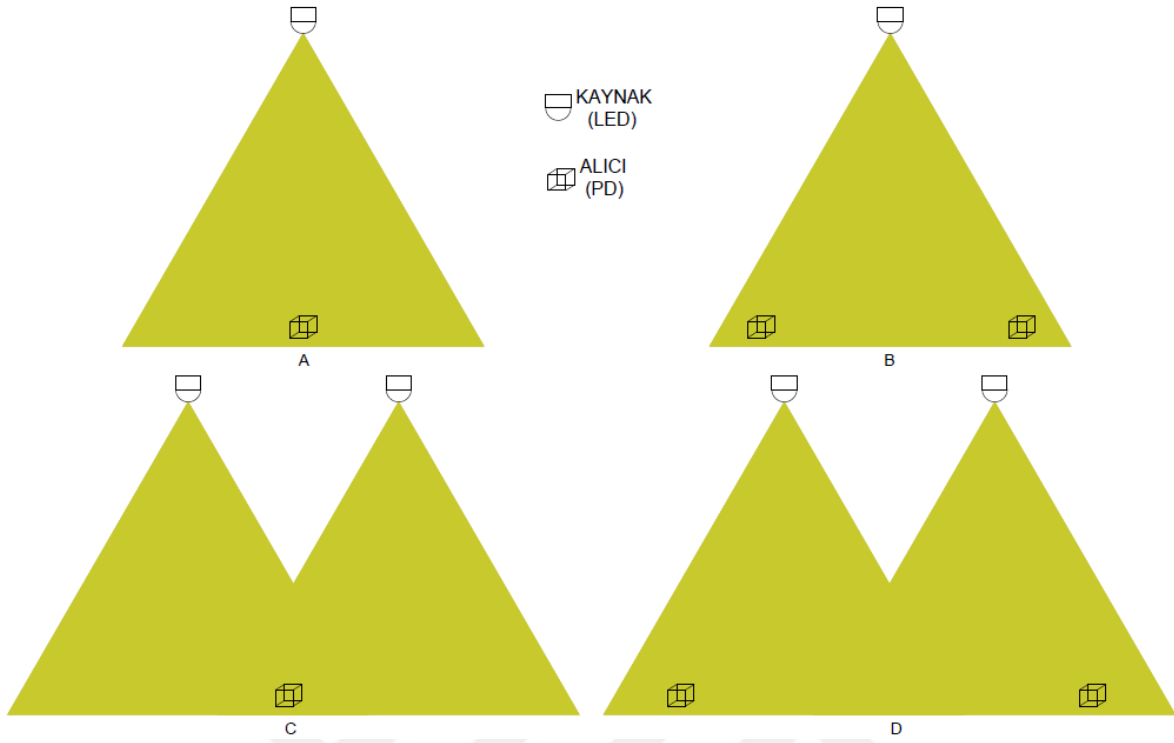
VLC haberleşmesinin yaşadığı güçlükler [48]:

- ❖ Hareket halinde aęa baęlanma
- ❖ çoklu kullanımı destekleme
- ❖ G z güvenliği nedeniyle iletim gücü kısıtlaması
- ❖ İşaretin sönümlenmesi
- ❖ Arka plan gürültü
- ❖ Fotodetektör kapasitansı

Tablo 2.1 VLC ve RF haberleşmesine ait özellikler tablosu

ÖZELLİK	VLC HABERLEŞMESİ	RF HABERLEŞMESİ
Elektromanyetik dalgalarla girişim etkilenmesi	Etkilenmez	Etkilenir
Güç tüketimi	Daha az	Yüksek
Bant genişliği	Yüksek	Düşük
Sağlık riski	Taşımaz	Yüksek enerjilerde taşır
Kurulumu	Daha kolay	Mesafeye göre değişir
Elektrik kuvvetlendirici	Yoktur	Vardır
Kapsadığı alan	Kısa	Orta
İşaret Görülebilirlik	Vardır	Yoktur
Katkı	Haberleşme ve Aydınlatma	Haberleşme
Güvenlik	Daha yüksek	Düşük
Veri oranı	Daha yüksek	Yüksek
Hareketlilik	Sınırlı	Daha iyi
Veri iletim hızı	Daha yüksek	Orta

RF kablosuz sistemlerde kullanılan yaygın kablosuz sistem mimarileri de VLC sistemlerinde araştırılarak irdelenen bir durum almıştır ve dört adet sistem mimarisini Şekil 2.8 göstermektedir: tekli giriş tekli çıkış (single input – single output, SISO), tek giriş çoklu çıkış (single input – multiple output SIMO), çoklu giriş tek çıkış (multiple input – single output, MISO) ve çoklu giriş çoklu çıkış(multiple input – multiple output, MIMO) olmak üzere adlandırılırlar. RF haberleşme sistemlerinde giriş ve çıkış sayısı, gönderici ve alıcıdaki anten sayısı ile belirlenirken, VLC sistemlerinde kaynak sayısı ise LED ve PD sayısına dayanmaktadır [49].



Şekil 2.8 VLC haberleşmesi kanal mimarileri: (a) SISO (b) SIMO (c) MISO (d) MIMO

2.6.2 VLC sistemlerinde modülasyon teknikleri

Kablosuz optik haberleşmesinde optik işaret öncesi dönüşümlerde RF işaretlerin de bantların yapısına göre türetilen modülasyon teknikleri bahsine değinmekte faydalı olmasının düşünülmesinde; İşaretin gürültü oranı (signal to noise ratio, SNR), SNR – BER eğrisi, veri iletimi vb. teknik kavramlarına yapacağı etkinin analizidir. Her ne kadar optik ve RF kanallarının parametreleri farklı olsa da; kablosuz optik haberleşmesinde uyumlu ve stabilize özelliği gösteren modülasyon tekniklerinin seçimine kılavuzluk yapacak dört kriter vardır. Kriterler ise şöyledir:

- ❖ Modülasyon tekniğinin ortalama gücü. (Göz sağlığına etkisi)
- ❖ Mevcut kanal bant genişliği ve alıcının bant genişliğinin gereksinimleri.
- ❖ Modülasyon tekniğinin karmaşık yapısı.
- ❖ Modülasyon tekniğinin veri iletimi sağlayan kaynaklardaki fiziksel sınırlaması.

2.6.3 VLC Sistemlerinde Bazı Temel Band Modülasyonları

VLC Haberleşmesinde RF işaretleri sisteme giren işaretler olmasından dolayı bazı modülasyon teknikleri optik haberleşme öncesi devreye girerler.

2.6.3.1 Darbe Genlikli Modülasyon

Kablosuz optik haberleşmesinde kullanılan klasik modülasyon tekniklerinden birisidir. Anahtarlama aç-kapa (on-off keying, OOK) modülasyon sadece iki değerlikli darbe genlikli modülasyon (pulse amplitude modulation, PAM) tekniğidir. Verici olarak kullanılan LED veya LD gibi enstrümanların çalışıp kapandığı sabit güç yansıma yapan modülasyon tekniğidir [50].

2.6.3.2 Darbe Pozisyonlu Modülasyon

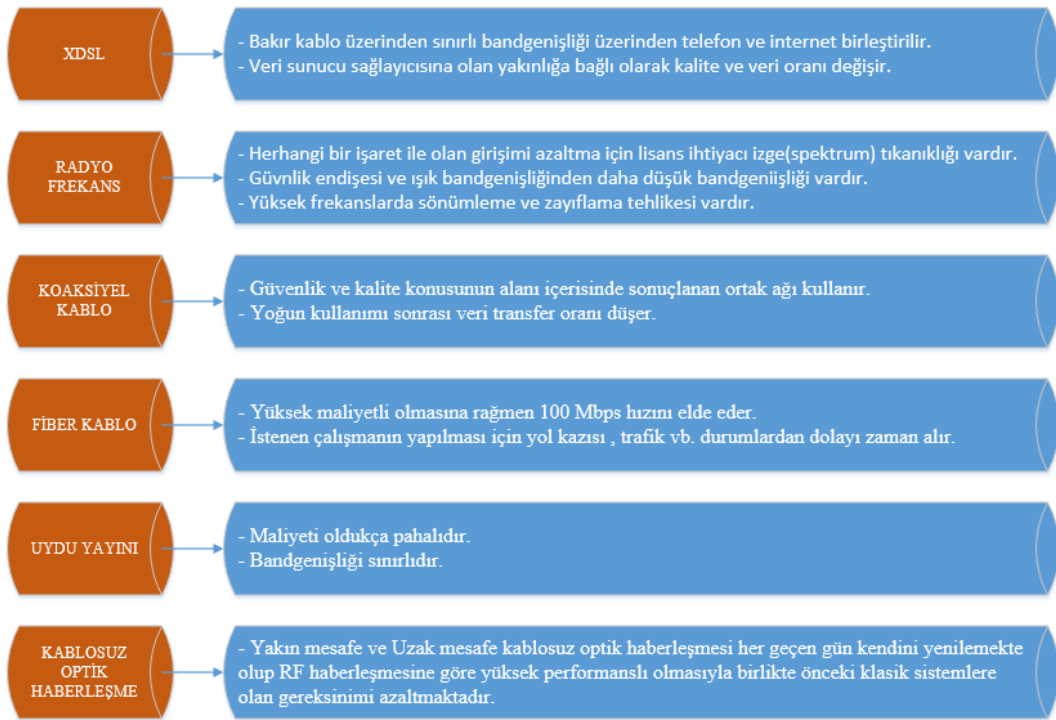
Darbe pozisyonlu modülasyon(pulse position modulation, PPM), OWC sistemlerinde yaygın olarak kabul edilen başka bir modülasyon türüdür. Farksal darbe pozisyonlu modülasyon(differential pulse position modulation, D-PPM) ulaşılabilir veri hızlarını artırmak için OWC sisteminde değerlendirildikten sonra PPM ile karşılaştırıldığında ortalama olarak daha az güç tüketir. Bununla birlikte, PPM işaretindeki bozulma D-PPM işaretinden daha büyüktür [51].

2.6.3.3 Pasif İnter Modülasyon

Pasif ara geçişli modülasyon (passive intermodulation, PIM), çoklu olacak şekilde iki yada daha fazla olan güç girişli işaretlere sahip olan antenler, kablolar, konnektörler gibi aktif olmayan enstrümanlarda ortaya çıkan doğrusal olmayan etkilerin sebebiyet verdiği harici etki sonucu ortaya çıkan işaretlerin üretilmesidir. Üretilen işaretler birbirine karıştığı zaman toplamsal ve farksal işaretleri aynı bant içerisinde parazitleri üretir ve bozulmaya sebebiyet verir [52].

3. ARAŞTIRMA KANAL METODU VE VLC KANAL TÜRLERİ

Günümüzde internet vericisi olarak çalışılan ağlardan olan; Çevirmeli Ağ (Dial-Up), Sayısal abone hattı (digital subscriber line, DSL), Kablo İnternet, Fiber Optik, Mobil İnternet, Uydu İnternet, Radyolink, Metro Ethernet vs. gibi haberleşme türlerinde her geçen gün yüksek kapasiteli bant genişliği, hızlı, verimli, yüksek güvenilirlikli, düşük maliyetli ve hata oranının çok düşük olduğu özelliklere sahip teknik detaylara ihtiyaç artmaktadır. Bahsi geçen teknik detaylar ise RF tabanlı erişim ağlarında dar bantlı izge, düşük veri hızı, pahalı bant lisansı, yüksek maliyet, işaret kalitesinin düşüklüğü, elektromanyetik dalgalarla girişim sonucu parazitik etkiler, SNR, güç kaybının fazlalığı vb. nedenleriyle ve aynı zamanda optik haberleşmede ki zayıf özelliklerin aksine lisansı ücretsiz, yüksek güvenilirlikli ve düşük maliyetli vb. olumlu durumlardan dolayı bilim dünyasının bakış yönünü ışık haberleşmesine çevirmesine sebep olmuştur.



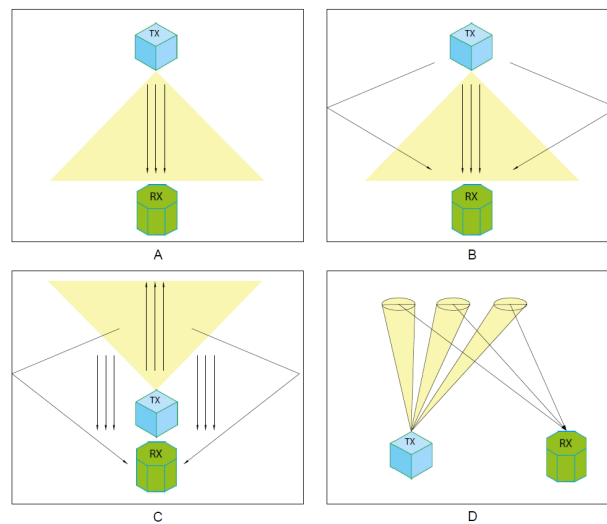
Şekil 3.1 Haberleşme türlerinin gelişim süreçleri

Yapılan çalışmanın araştırma konusu olan; Optik haberleşmesinin kablosuz türlerinden olan yakın mesafeli (indoor) VLC haberleşmesi teknik olarak MIMO kanal tespitinin başarımını sağlamak adına, optik haberleşmenin daha sağlıklı ve verimli sonuçlar elde edilmesi için alıcı, verici ve haberleşme kanalının içerikleri hususunda bu üç kavramın daha iyi anlaşılır hale getirmekle beraber uygun verilerle temel karakterizasyon olması şart bir durumdur. Herhangi

bir haberleşme kanalı için; Gerek RF gerekse Optik haberleşme kanalında uygun sistemin bir tasarımı; sistemin dürtü yanıtı ile gerçekleştirilir. Kanala ait özgü nitelikleri (spesifikasyon) daha doğru incelemek ve kanal kestirimi için, sistematik çalışma evresinin öncesinde haberleşmenin sağlandığı iç ve dış mekânlarda ki kanala ait parametrelerin deneysel ölçümü ve bilgisayar modellemesi göz önünde bulundurarak verimli veri iletimi evresine kuramsal olarak geçilmesi yeterli ön şart durumu söz konusudur [37], [53], [54]. VLC kanal modelleri tıpkı diğer optik kablosuz haberleşmesinde olduğu gibi tasarım tespitinde yardımcı unsurlar olan; haberleşme ortamı ve geometrik durumu, vericinin yansıtma açısı ve yönlü/yönsüz oluşu, vericinin bulunduğu yerin boyutu, haberleşme kanal ortamı, alıcının görüş açısı ve yönlü – yönsüz oluşu, alıcının bulunduğu yerin boyutu gibi özelliklerine dayanarak kanal modelleme yapılır [55].

3.1 Temel Kanal Model Topolojileri

Yakın mesafeli VLC haberleşmesi genel olarak frekans-seçimli kanal sönümleme özelliğine sahiptirler. VLC vericilerinin etkisi işaretin dengelenmesi için karşı refleks yoluyla düzeltilir. LED vericilerinin alçak geçiren özelliği ve ortamın geometrik boyutları dikkate alındığında alıcıya ulaşan işaretler Doğrudan ve dolaylı yoldan yansımalarla geç ulaşacaktır, Dolayısıyla VLC kanal tipi hem doğrudan ve dolaylı yoldan ulaşacak ışık işaretlerinin oluşturacağı kanal modelleri doğrudan görüş hatlı (line of sight, LOS), dolaylı yoldan yansımali görüş hatlı (non-line of sight, NLOS), yarı dağınık yayılım (quasi diffuse, Q-DIFF) ve dağınık yayılım (diffuse, DIFF) bileşenleri içerir [56], [57].



Şekil 3.2 Haberleşme kanal modelleme topolojileri: (a) LOS (b) NLOS (c) DIFF (d) Q-DIFF

VLC kanal dürtü yanıtı modelleme yapılırken genelde iki yöntem olarak; frekans-düz kanal modelleme ve frekans seçici kanal modelleme tipi kullanılır. Frekans-düz kanal modellemesi kanal modelinde LOS bileşenini dikkate alarak tasarlanırken frekans seçici kanal modellemesi kanal modelinde NLOS bileşenini kapsamı altında tasarlanır [58]. Kablosuz optik kanal modelleme tasarımı yapılırken kanala ait hususi (spesifik) özellikler; göz önüne alındığında dikkatleri çeker tarzda değişebilir. örnek olarak verecek olursak bağlantı kurulumu yapılacak şekilsel geometrik topoljide adlandırılır ve [55]' de anlatıldığı üzere kanal modelleme parametresi belirlenirken üç kriter başlıkta toplanarak işlevsellik kazanırlar. Şekilde gösterildiği üzere birinci aşama kriteri; verici ve alıcının birbirini görme veya karşılıklı yönlendirilmiş derecelerine göre diğer bir adıyla alıcı – verici pozisyonlama metodu ile modelleme sınıflandırması yapılır. İkinci aşama kriteri: Verici – alıcı arasında doğrudan bağlantı olacak şekilde ışının izlediği ve ulaştığı yol mesafesinin varlığı (LOS) ile sınıflandırma yapılır. Referans olarak NLOS olan kanal modellemeleri yapılırken LOS bağlantısının varlığı temel şarttır. Üçüncü ve son aşama kriteri olarak: Vericinin kendi bulunduğu sabit veya ayarlanabilir pozisyona göre değişebilir ölçeklerde yansıtma açısı sapma açısı olarak da bilinen açı ile beraber alıcının sabit veya vericinin pozisyonuna göre ayarlanabilir vericiden algılanan ışığa göre algıladığı görüş açısının (field of view, FOV) varlığına göre modelleme sınıflandırması yapılır. LOS olmayan diğer topolojilerin avantajlarından biri olarak önümüze çıkan çok yollu yöntemlerle daha girift topolojik durumlarda veri iletiminin sağlanmasıdır. Kullanıcı sabit bir yerde konumlanmayıp farklı yerlere hareket edince istenen veri akışının sağlıklı olarak sağlanmasıdır. Optik olarak ışın yayınlayan ışık vericilerinin sınırlı modülasyonların sınırlı modülasyonda ki bant genişliği, gürültü-girişimi, veri hızı, veri güvenliği vs. gibi özelliklere cevap veren ve onu geliştirerek yeni tekniklerle buluşturma alanı olan LOS olmayan kanal modellemeleri üzerindeki bilimsel bulguları biz tez çalışmamızda özet olarak yer vermekle beraber temel referans konumda olan LOS kanal modelleme üzerinde detaylı bilgi verilecektir [59] .

3.2 VLC LOS Kanal Modeli Ve Değişkenleri

Görünür ışık haberleşmesi; elektromanyetik dalga izgesinde yaklaşık 380 -700 nanometre (nm) aralığı bant dalga izgesinde gerçekleşen bir kablosuz ışık haberleşmesi branşıdır.

Elektromanyetik dalga izgesinde tüm yayılsal dalgalara ait enerji dağılımı ışınsal ve ışıktır, dolayısıyla tüm ışınsal yayılımları; gözlerimizin görüş bandının sınırlı oluşundan belli

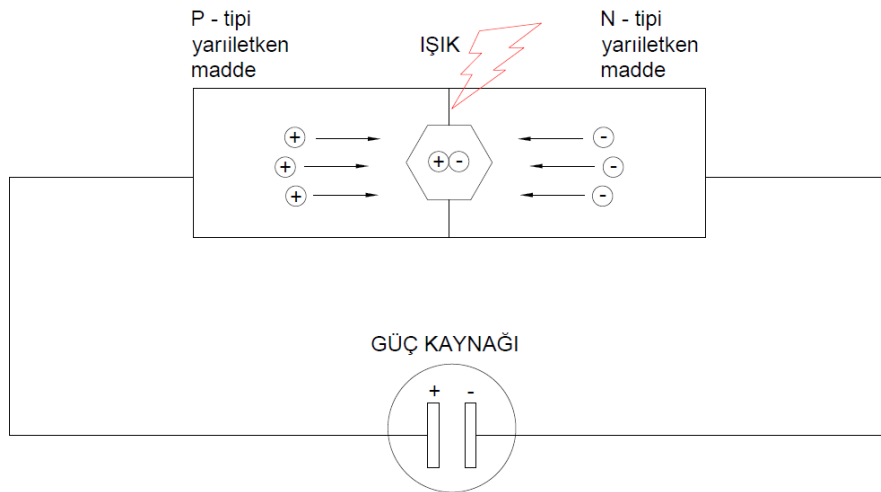
kısım bant aralıklarını görebiliriz. Gözlerimiz içerisindeki ışık algılayıcı konik reseptör hücreler ise ışığın görülmesi, kırılması ve algılanması sonucu orta ölçekli dalga boyu olan görülebilir ışık bandında ki dalga boylarına göre ayrılarak alıcılara göre hareket eder. Örnek verecek olursak; Görünür ışığın genel izgesi gözdeki konik hücrelerden geçerken, dalga boyları gökkuşağının renklerine ayrılır, çünkü her renk farklı bir dalga boyudur. Menekşe renk en kısa dalga boyuna sahip (380-400 nm) iken ve Kırmızı renk ise en uzun dalga boyuna sahiptir (680-700 nm). VLC kanal modeli oluşturulurken en önemli faktörlerden biride veri iletişimi sağlayacak bir kaynak olması pozisyonunun dışında ayrıca aydınlatma kaynağı, ve kaynağın insan sağlığı üzerinde gerek görme hasarı ve deri üzerinde ki ısının etkisi de göz önünde bulundurulması temel bir gereksinim durumudur.

Genel bir kavramsal olarak kanal modelleme formülizasyon kuramı için ideal olarak tez-antitez-sentez bilimsel adımlar gerçekleşmeden önce model parametrelerini incelememiz gerekir. Klasik haberleşme kanal modellemesi yapılırken var olması gereken minimum teknik enstrümanlar verici, alıcı ve kanal ortamı olmak üzere üç enstrüman varlığı söz konusudur. VLC haberleşmesinde ise verici olarak Beyaz ticari LED kullanırken, kanal ortamı yakın mesafeli olarak ev odaları, hastane, iş merkezleri vs. ile birlikte alıcısı fotodetektör denilen ışık algılayıcısı aparatlar kullanılmaktadır [60]–[62].

3.2.1 Işık Yayan Diyotlar (LED)

Enerji olarak ışımsal yayılım gösteren diyot; p-n bağlantısına sahip olan bir yarı iletken olan enstrümanlardan bir diyottur. LED yapısı; bir P-tipi yarı iletkeni ve bir N-tipi yarı ile birleştiren yarı iletken ışık kaynakları olarak kullanılır. Gerekli ve yeter şart düzeyde elektronları tahrik edecek bir gerilim uygulandığı zaman elektronların ve akış boşluğunun PN düğümünde birleşip ayrılmasıyla enerji akışı artan–azalan bir şekilde sağlanacaktır. Elektron hareketleri sonucu oluşan elektrik enerjisinin dağılımı ve yayılımı ile birlikte ısıya ve sonrası olarak da ısının ışığa dönüştürülmesiyle LED öncesi yarı iletkenlerin özelliğinden farklı olarak LED keşfi sonrası elektron hareketleri sonrası oluşan enerjiyi dolaylı olarak değil doğrudan ışığa dönüştüren enstrüman olarak önümüze çıkmaktadır [63]. PN bağlantısını kullanarak işlevsel olarak diyot gibi davranan yarı iletken bir enstrüman olan Beyaz LED ise VLC haberleşmesinde verici olarak kullanılır. Şekil 3.3’ te görüldüğü üzere elektron akışı ve akış boşluğunda ışık enerjisinin ortaya çıktığı gösterilmektedir. Işık aynı zamanda elektromanyetik bir dalga olması hasebiyle istenen enerji bandına göre uyarılmasıyla birlikte ileri yönde ve geri tıkama yönünde eşik

gerilim uygulanması sonrası elektron fotonlarının uyarılmasıyla ışık enerjisi görülebilir bir hal alması üzerine görünen ve kızıl ötesi bant arasında istenen değerler uygulanması sonrası ışık elde edilir [64], [65]. Yayılan ışımanın dalga boyu kullanılan ve eklenen katkı maddeleri ile alakalıdır. LED'ler iletim yönünde kutuplandığında serbest elektronlar P-N geçidine geçerek P bölgesine girerler. Bunların bir kısmı buradaki deliklerle birleşir. Bu birleşmeden dolayı açığa çıkan enerji, ışık enerjisi şeklindedir. P-N birleşik bağlantısından akan akımın değeri elektronların ve deliklerin sayısına bağlıdır. Kuantum teorisine göre elektronların deliklerle birleşmesi sonucu ışık enerjisi ortaya çıkmaktadır. Burada ortaya çıkan enerjinin miktarı P-N geçidinin enine bağlıdır. LED'den akan akım iki akım bileşeninden oluşmaktadır. Bunlar elektronların ve deliklerin oluşturduğu akımlardır. Elektronların sayısına bağlı akım i_n , deliklerin sayısına bağlı i_p , ile gösterilirse toplam LED akımı $I = i_n + i_p$ olacak şekilde, ışığın oluşmasında yalnızca elektronların oluşturduğu akım etkilidir [66].



Şekil 3.3 Fotodetektörlerin elektronik şeması



Şekil 3.4 Yarı iletken malzemelerin enerji iletim bandı

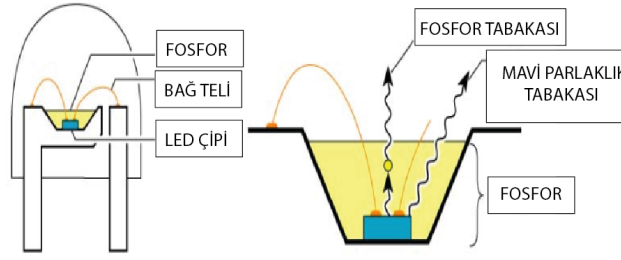
3.2.1.1 Beyaz LED Vericisi

Aydınlanma kaynağı olarak kullanılan akkor lamba ve sonrası olarak geliştirilen tasarruflu floresan lambalar 1960'lara kadar yaygın kullanımda idi. 1960'lar dönemleri içerisinde icat edilen LED lambalarla beraber günümüze kadar; iç mekan aydınlatması ile beraber tabela reklam, trafik ışıkları, yol aydınlatmaları vs. gibi uygulamalarda daha fazla kendini göstermiştir. LED'lerin akkor lamba ve floresan lambalara göre; daha uzun ömür, daha düşük ısı üretimi ve daha iyi performans gibi zararlı kimyasallar kullanmadan renk oluşturma, farklı cihazlara geçebilme özelliklerine sahip olması dikkatleri üzerine çekmeyi bilim dünyasında kabulünde önemli rol almasına sebep olmuştur. Belirtilen özelliklerinden başka bir tarafı ışık yoğunluğunun çok hızlı bir veri iletiminde ayarlanabilir olması VLC ışık haberleşmesi alanında yeni bir iletişim teknolojisinin üzerinde farklı modüler tekniklerin incelenmesi araştırılması ve geliştirilmesi gereken bir yol açmıştır [67].

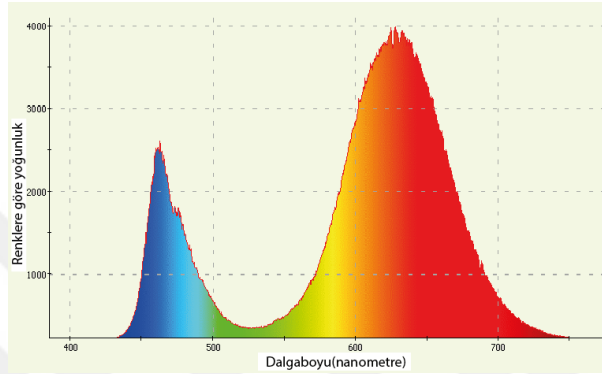
VLC optik bandının RF bandına üstün özelliği olarak düşük maliyetli olması güvenliğin yüksek olması gürültü girişiminin daha az parametre ile daha düşük değerde olması vb. karakteristik durumlarının fazla olmasının yanında verici olarak LED'lerin kullanılmasıyla beraber istenen sonuçların ideal değerlere yaklaşıma ihtimalinin daha yüksek değerde olması beklenir. LED'lerin kullanım alanlarına göre iç mekanlarda verici olarak kullanımının yanında aydınlatma olması hasebiyle ve insana ait gözlerin sağlığına zarar vermemesi adına aydınlatma güç lüks standardı ayarlanabilen özelliğinden dolayı TİCARİ BEYAZ LED tercih edilmiştir. Beyaz LED ise teknolojik olarak fosfor tabanlı beyaz led ve trikromatik beyaz led olmak üzere iki tip başlığında incelenir.

Fosfor Tabanlı Beyaz LED Tekniği

- ❖ Sarı ışık yayan bir fosfor tabakası ile kaplanmış mavi LED'in kullanılmasını içerir.
- ❖ Fosfor tabakası, mavi LED tarafından yayılan kısa dalga boyundaki ışığın bir kısmını emer ve daha sonra emiciden yayılan ışık, dalga boyunun sarı ışığın daha uzun dalga boyuna kaymasını sağlar.
- ❖ Maliyeti ucuz olmakla beraber trikromatlara göre daha az karmaşıktır [65], [68].



Şekil 3.5 Beyaz LED içerik görseli



Şekil 3.6 Dalga boylarına göre RGB renk yoğunluk grafiği

Trikromatik Beyaz LED Tekniği

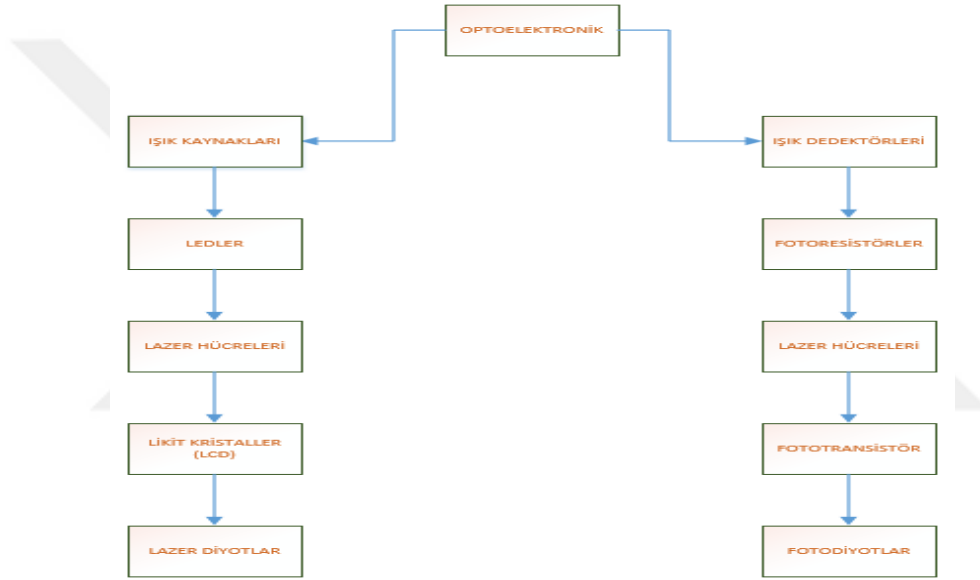
- ❖ Kırmızı (625 nm), yeşil (525 nm) ve mavi (470 nm) kırmızı yeşil mavi renk tonundan(red green blue, RGB) doğru oranda birleştirilerek beyaz ışık üretir.
- ❖ Yüksek hızlıdır.
- ❖ Renk kontrolünü etkinleştirir.
- ❖ Tipik olarak, bu üçlü cihazlar üç yayıcı ve kombine optiklere sahip tek bir paketten oluşur.
- ❖ Dalga boyu bölmeli çoğullama (wavelength division multiplexing, WDM) imkânı sundukları için VLC için caziptir [69].



Şekil 3.7 Led çiplerini içeren Beyaz LED

3.2.2 Işık Algılayıcı Yarı İletkenler (FOTODETEKTÖR)

Fotodetektörler, ışığı emen ve optik enerjiyi ölçülebilir elektrik akımına dönüştüren yarı iletken optik olarak davranan transdüzerdirler. Fotodetektörler modellenirken belli bir empedansa sahip oluşuyla beraber bir akım kaynağı olarak davranması hesaba katılarak üretilen elektrik işaretini kuvvetlendirmek için RF işaret kuvvetlendirici kullanılması gereklidir [70]. Günümüze kadar gelindiğinde Fotodetektörlerin gelişiminde özellikle eklenen ve uyumu sağlanan malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesi sonucu olumlu performans sağlanması tasarımı iyileştirilen Fotodetektörlerin uygulama alanlarının da artması ile doğrudan alaka söz konusudur [71].



Şekil 3.8 Optoelektronik alt dalı kullanım enstrümanları

Şekil 3.8’ de gösterildiği üzere; Optoelektronik bilim dalının içerikleri içerisinde yer alan optik verici ve alıcılarının kullanımlarından olan Fotodetektörlerin bazı özelliklerinin VLC kanal modellemesinin parametrik olarak formülasyon da bulunmasından dolayı daha iyi anlaşılması için bahsedilmesinde faydası vardır. Örnek olarak verecek olursak;

- ❖ Gönderilen ışık işaretinin dalga boyu bandına yüksek hassasiyet algılama özelliğine sahiptirler.
- ❖ İşaretlere karşı asgari düzeyde dip gürültüsü üretirler.
- ❖ İstenen veri oranının iletiminde hızlı yanıt vererek seri akış durumundadırlar.
- ❖ Sıcaklık değişimlerine ani tepki verebilirler.

- ❖ Optik kablolardan bağlantı sağlandığında veri trafiği için uyumludurlar.
- ❖ Uzun ömürlü ve düşük maliyet gibi özelliklere sahiptirler.

Genel özelliklerine göre Termal ve Fotonik detektörler olmak üzere iki başlıkta incelenirler [72]:

- ❖ Termal detektörler: Sıcaklığı yükselterek ışığı algılayarak ışık emilir. Işık bandı incelenince verimli olduğu alan sıcaklığına göre kızılötesi(infrared, IR) bandı aralığının uzak mesafelerinde iletim yapar.
- ❖ Foton detektörler: Gelen elektromanyetik ışık dalgasının radyasyonun emiliminde elektron deliği çiftleri oluşturarak çalışır. Elektronların taşıyıcı özelliğinin konsantrasyonu ve gelen radyasyonun yoğunluğu ile orantılı olarak çalışır.

3.2.2.1 Fotodetektörlerin Parametrik Özellikleri

1. **Kuantum Verimliliği:** Diyot malzemesi üzerinde yer alan tahrik edilen foton sayesinde ortaya çıkan elektron çiftlerinin tahrik eden fotonlara oranıdır.
2. **Detektör Yanıtı:** Yansıma yapan ışıma enerjisinin detektör elektrik enerjisi olarak ortaya çıkan çıkış akımına oranıdır. Bundan dolayı diyotun verimliliği de ortaya çıkar.
3. **Bant Genişliğinin Yanıt Alanı:** Fotodetektörün çalıştığı tepkimenin minimum eşik enerjisi girişinden sonra yansıma yapan ışımanın dalga boyunun band aralığıdır.
4. **Dip Gürültü Özelliği:** Işıma giriş işaretinin en düşük gücü ile çalışma sonrası enstrümanın ürettiği gürültüdür.
5. **Yanıt Verme Hassasiyeti:** Detektörün gelen ışık işaretinin şiddetine karşı ne kadar sürede çabuk bir şekilde yanıt vermesinin ölçütüdür [73], [74].

3.3 Kanal Modelinde Belirlenen Standardizasyon

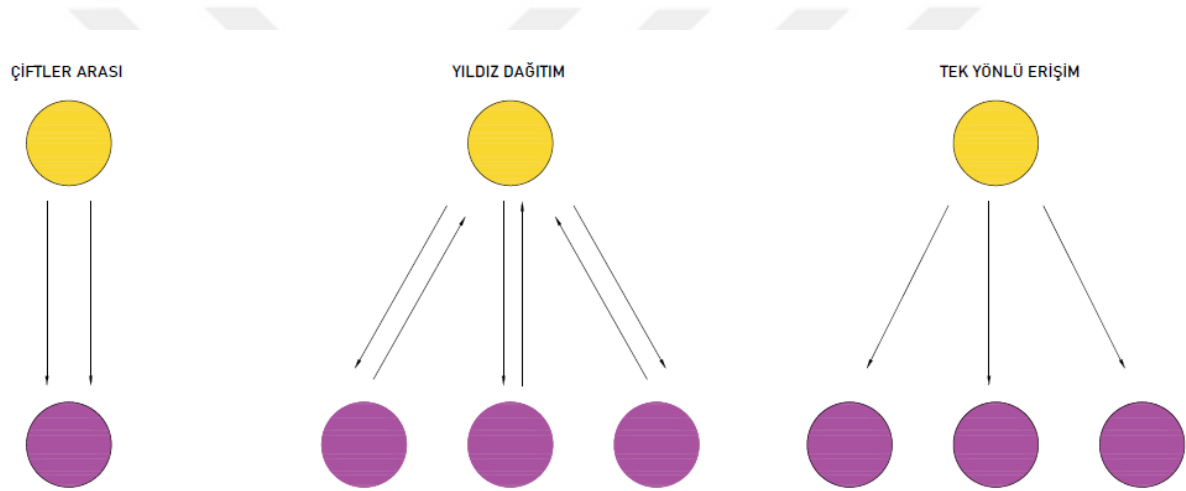
VLC haberleşmesinde yaklaşık olarak dalga boyu cinsi olarak 390-750 nm arası bandında çalışma sağlar, uzaysal boyuttaki frekans alanında ise bu dalga boyları 400-790 Thz frekans bandına karşılık denk gelir. Verici olarak kullanılan LED'lerin insan sağlığı üzerindeki (göz, deri vb.) optik yoğunluğun sağlamış olduğu durumlar, RF sistemlerine göre verimlilik, fiziksel bağlantıların daha az karmaşıklığı, yüksek hızda veri iletimi ile beraber VLC güncel hayatta yerini almasıyla beraber akademik bilim dünyasında dikkatleri çekmesiyle belli standartlar içerisinde olması gerektiği tespit edildi. Her geçen gün, VLC tekniğine ilgi artmasıyla yoğun literatür çalışmaları ağırlık kazanıyor. Kanal modellemesinden fiziksel katmanlar ve teorik hesaplamalara kadar bilimsellikten sapma olmaması adına endüstriyel dikkatler standardizasyon tespitlerinin yapılmasında engel teşkil edecek birkaç sebepten biri olmuştur ve aynı zamanda gelişmekte olan araştırma alanlarının tescilli satıcı çözümlerinin de parçalanmasına sebep olmuştur [75]. Uluslararası kuruluşlardan olan elektrik ve elektronik mühendisleri enstitüsünün (institute of electrical and electronics engineers, IEEE) IEEE 802.15.7 standardının yüksek veri hızı özelliği ise; görünür optik haberleşmesini destekler nitelikte ve optik haberleşmesini sağlayan vericilerin daha yüksek oranda modülasyon teknikleriyle saniyede 96 megabit hızına kadar haberleşme kuralları karara bağlanmıştır [76].

Japonya'da, Görünür ışık haberleşme konsorsiyumu standardizasyon hareketlerini ve incelemelerini yoğunlaştırdı ve bilim dünyasına iki standart belirleyerek sundu. VLC kimlik sistemi standardı ve haberleşme sistemi standardı olarak isimlendirildi. Standardizasyon faaliyetleri ve tasarısı Japonya bilgi teknolojisi tarafından kabul edildi. Japonya elektronik ve bilgi teknolojisi endüstriyel şirketi (Japan Electronics and Information Technology Industries Association, JEITA) 2007 yılında sunduğu standardizasyon olan tasarılarını JEITA CP-1221 ve JEITA CP-1222 olarak adlandırdılar ve Haziran 2013'te, JEITA CP-1222'nin geliştirilmiş bir versiyonunu da önerdiler. JEITA CP-1223 görünür ışık işaret sistemi standardı olarak adlandırılmıştır. Bu minvalde geliştirilen süreçler; gerek bilimsel alanlarda gerek pazar ihtiyacının kontrolünün sağlanmasında mevcut potansiyel durumu geliştirmek adına IEEE kuruluşu; Haziran 2011'de onaylanan IEEE 802.15.7 standardı üretildi. Bu standardın soft ve hard kısmı olarak mekanik ve yayılımsal haberleşme alanlarından olan fiziksel tabaka (physical layer) ve kablosuz iletişimin olduğu verici-alıcı arasındaki ışığın yayılımsal olarak topolojik

ulaşımı sağlanacak ortama erişim kontrolü (media access control, MAC) katmanlarını tanımlayarak uygun özellikleri belirleyen bir standarttır [77]–[79].

Tablo 3.1 VLC haberleşmesinin farklı ortamdaki gösterdiği özellikler tablosu

<i>Özellik</i>	<i>Altyapı</i>	<i>Mobil</i>	<i>Araç</i>
Sabit Koordinat	Var	Yok	Yok
Güç Kaynağı	Büyük	Sınırlı	Orta
Şekil Etkisi	Kısıtsız	Kısıtlı	Kısıtsız
Işık Kaynağı	Yoğun	Zayıf	Yoğun
Fiziksel Hareketlilik	Yok	Var	Var
Mesafe	Kısa ve Uzun	Kısa	Uzun
Veri Oranı	Yüksek ve Düşük	Yüksek	Düşük



Şekil 3.9 IEEE 802.15.7 Standardına MAC topolojisi

3.4 VLC Kanal Model Örnekleri

VLC haberleşmesinin sağlanacağı geometrik boyutları ile mevcut yapısı oda şeklinde olan kapalı veya açık yakın mesafeli alanlarda gerçekleşir. Kaynak olarak verici durumunda olan LED vericilerinden çıkan optik ışınlar duvarlara üst tavana alt tabana çarparak işaret zayıflaması ile beraber alıcıya ulaşacaktır. MIMO olarak çalışan işaret dağıtımında veya veri iletiminde ise; LED-LED arası ışınal girişimler, giderek artan düzeyde ki işaret zayıflaması, ortam değişimi sonrası işaret kırınımı, geri yönde işaret yansımaları, gecikmesi süresi ile birlikte kanal modellemesinin veri analizi ve parametre etkisinin analizi için sistem modeli tasarımı adına önemli bir şart söz konusudur. Kanal modellemesi doğrudan (LOS) ve birincil, ikincil olarak sürgit pozisyonundaki yansımalar sonucu oluşan dolaylı yoldan (NLOS) kanal

modellemelerinin toplamı olarak tasarlanır. Belli başlı olarak kullanılan kanal modelleri (DIFF/Q-DIFF) gerek geometrik gerek parametrelerin değışiklik gösterdiği durumlu sistematik kanal modelleri ise Kaynak modeli, Detektör modeli ve Reflektör modeli olarak karşımıza çıkıyor. Sistematik modelleme içerisinde yüzeysel ve genel olmamakla beraber detaylı olan özel kanal modellemeleri ise şunlardır [80]–[86]:

- ❖ Gfeller kanal modeli
- ❖ Tekrarlamalı kanal modeli
- ❖ Tavan hücre kanal modeli
- ❖ Dustin kanal model algoritması
- ❖ İstatistik kanal modeli
- ❖ Monte Carlo kanal algoritması
- ❖ Küresel kanal modeli
- ❖ Tekrarlamalı taraf temelli kanal modeli
- ❖ Foton izlemeli kanal modeli
- ❖ Eş güdümlü sıra takipli kanal modeli
- ❖ Işın toplayıcı kanal modeli

3.5 Kanal Modeline Ait Parametrik Denklemler

Bu kısımda; VLC haberleşmesine ait kanal modelinin içerdiği verici olarak kullanılan Beyaz LED vericilerinin, alıcı olarak kullanılan Fotodetektörlerin çalışma prensibinin belirlendiği formülasyon içeriklerini irdeleyerek açıklamaya çalışacağız.

Uygulanması planlanan bu çalışmada incelenen beyaz LED vericilerinin anlatıldığı başlıklar içerisinde belirtildiği üzere; ışığın yayımlandığı hüzmelerin parçacıkları adıyla bilinen fotonların sahip olduğu dalga boyu λ , doğrudan Beyaz LED tasarımında kullanılan ve belli bir eşik gerilimi (V_ζ) üzerinde aktif hale gelerek çalışan yarı-iletken malzemenin standart yapısı ile alakalı olması ile ilintili olarak enerji boşluk bandı E_{gap} ile bağlantılıdır. Dalga boyunun eşik gerilimi ve enerji bant boşluğu ile alakalı denklem şöyle ifade edilir [87]:

$$V_\zeta = \frac{E_{gap}}{q} \quad (3.1)$$

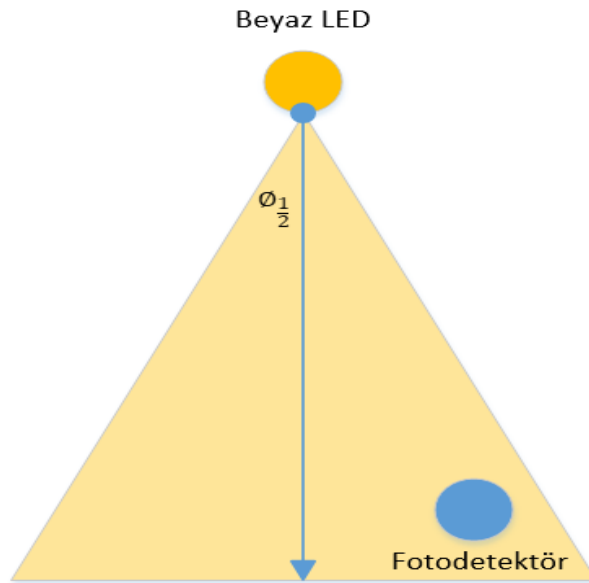
$$E_{gap} = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.2)$$

Burada bulunan h ; Planck sabiti olarak tanımlanırken, c ise ışığın ölçülür (scaler) hızıdır ve q ise elektron yük sabitidir. Yarı iletken malzeme olan Beyaz LED üzerinden geçen minimum düzeyde karakteristik çeken akım olarak tanımlanan toplayıcı I_d akımı ise şöyle ifade edilir;

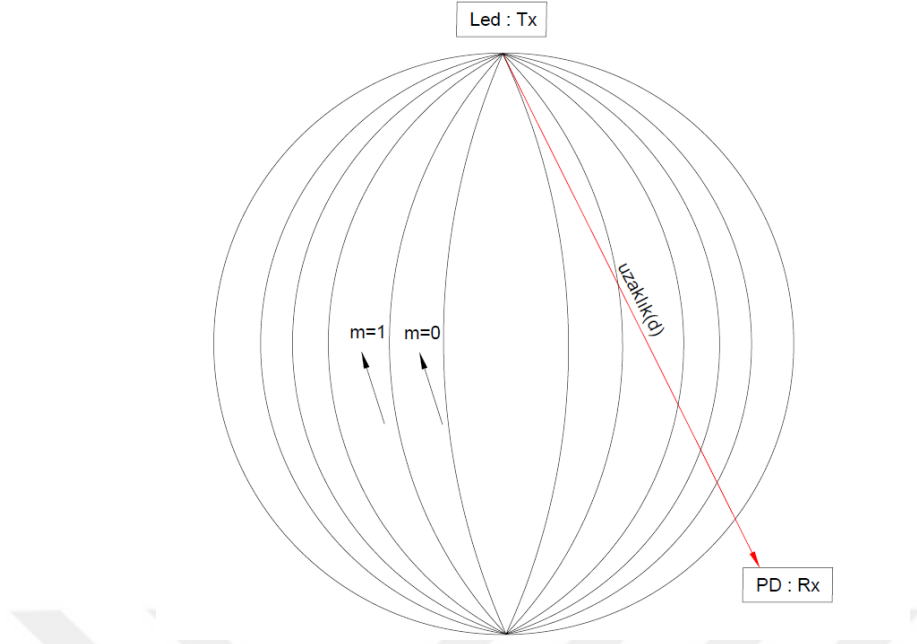
$$I_d = I_{ds} \left(e^{q(V-V_\zeta)/KT} - 1 \right) \quad (3.3)$$

$$I_{ds} \propto P_{opt} \quad (3.4)$$

(3.1)' deki denklemde belirtilen I_{ds} akımı tersinir yönden doyum akımı, T enstrümanın üretildiği fabrikasyon ayarının yüklendiği cihazın ortam sıcaklığı, K boltzman sabiti iken P_{opt} ise ışınsal yayımlanan karakteristik güç birimidir. Üstel olarak ifade edilen değişkenlerin içerisinde bulunan V parametresi ise V_ζ eşik gerilimine yakınsar veya üstünde olan ve harici olarak dışardan uygulanan gerilimdir [88]. Beyaz LED vericilerinin ürettiği ışıkların yayılma derecesi olarak ölçüm birimi modellemesi cinsinden Lambertian radyan yoğunluğu modeli ile açıklanır [89].



Şekil 3.10 Yarım güç çarpanı gösterimi



Şekil 3.11 Lambert radyan yoğunluk gösterimi

Beyaz LED vericilerinin ikili görev denen haberleşmeyi ve aydınlatmayı sağladığından sadece radyometrik unsurun dışında aynı zamanda fotometrik değişkenlerle de ilintili olmasından dolayı; Verici unsuru adına görev yapan LED’lerden yayılan ışığın parlama akısı hesaplanabilir. Bu özelliğe ek olarak; doğrudan görüşlü gelen ışık işaretinin alınan gücü, yol kaybı ve iletilen gücü de hesaplanabilir. [59]’de gösterildiği üzere Görünür ışığın yani yaklaşık 400-700 nm dalga boyu arasındaki Lümen (lm) cinsinden ifade edilen ışığın parlama akısı, görünür ışık kaynağının parlaklığının niceliksel bir ifadesi olarak tanımlanır ve şu şekilde yazılır:

$$\varphi_l = K_l \int_{400}^{700} V(\lambda) \varphi_{le}(\lambda) d(\lambda) \quad (3.5)$$

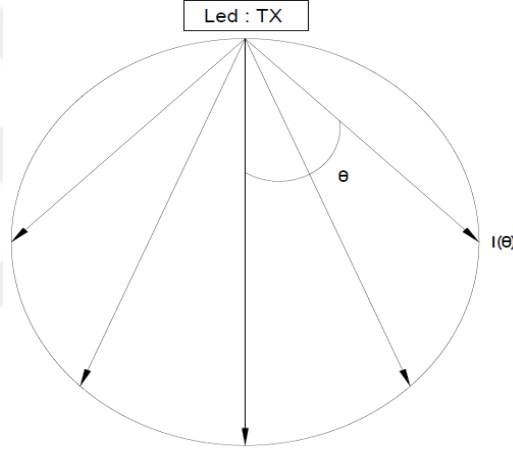
Burada bulunan K_l sabiti; radyometrik birim güç ile fotometrik birim lümen arasındaki ilişki sabiti, φ_l ışığın parlama akısı, $V(\lambda)$ insan gözünün görüşünün İzgesel (spektral) hassasiyeti, φ_{le} ise birim güç olarak tanımlanan radyal güç veya akısıdır. Aydınlanma şiddeti ve yoğunluğu olarak bilinen ve birimi candela (cd) olarak sabit kavram olan ışık yoğunluğu ise şu şekilde tanımlanır:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (3.6)$$

Burada bulunan Φ ışık akısı iken, ω ise uzay boşluğunda ışığın gönderildiği birim yansıtılan yüzey arasındaki uzaysal açıdır. Işığın yansıtıldığı tüm alan üzerinde ki birim alan üzerine düşen ışık miktarı olan parlaklık ise şöyle ifade edilir:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (3.7)$$

Burada bulunan Φ ışık akısı iken A ise ışığın beslediği bütün yüzeyin alanıdır.



Şekil 3.12 Lambert radyatör gösterimi

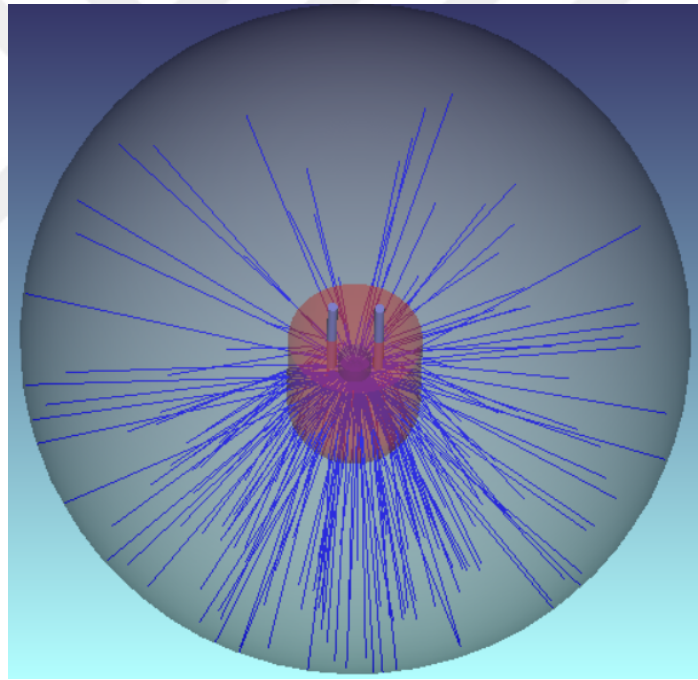
Şekil c' de bir LED'e ait gösterilen Lambert radyatöründe ki ışık şiddetinin yoğunluk dağılım fonksiyonu ise şöyledir:

$$I(\theta) = I(0) \cos^m(\theta) \quad (3.8)$$

Burada bulunan $I(0)$; ticari olarak üretilen LED'e ait fabrikasyon üretimindeki merkezi ışık şiddeti yoğunluğu iken, m ise ışık kaynağı olan LED'lerin yayınladığı Lambert yoğunluğunun indis derecesidir ve şöyle formülize edilir:

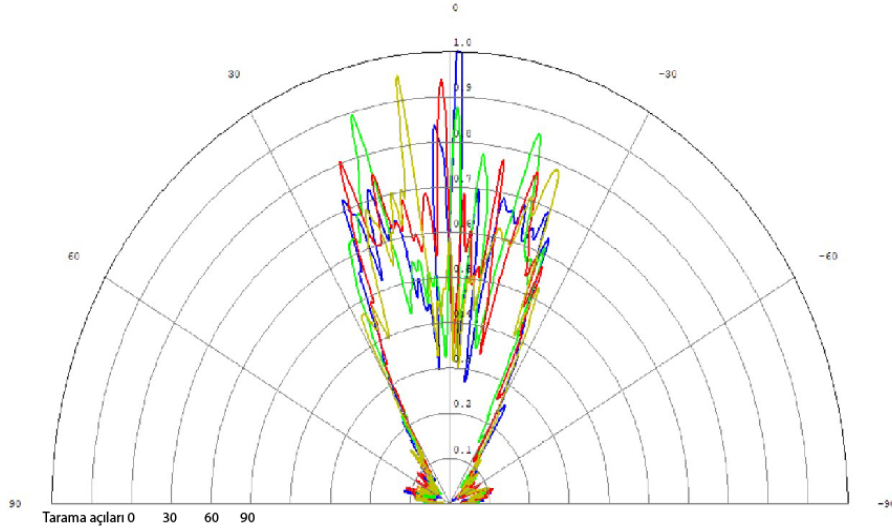
$$m = \frac{\ln(2)}{\ln(\cos(\phi_{1/2}))} \quad (3.9)$$

Formüllerde bulunan $\phi_{1/2}$ ise şekil a’da gösterildiği üzere LED’in yayınladığı tüm ışının yarım güç çarpanıdır. Lambert radyatör ışık yoğunluk dağılımının daha iyi anlaşılması adına; optik bir yazılım olan Zemax programı üzerinden kanal modellemesine yardımcı olması için görsel bir şekil üstünde Lambert davranışını somutlaştıracağız. Kanal modellemesi yapılırken kanala etki eden herhangi bir parametrenin karakterizasyonunun spesifikleştirilmesi ve tüm ayrıtları ile irdelenmesi gerekir. Zemax programında; ışınların takip edilmesi imkânı, ışınların boyut değiştirdiği yüzeylerin incelenmesi, takip edilen yoldan sapma yönleri, gecikme süresi, optik güç hesabı vb. özellikleri barındıran bir programdır. Programdan elde edilen bilgiler Matlab yazılımı ile senkronize bir şekilde çalışabilir [90].



Şekil 3.13 Bir LED vericisinin ZEMAX programlı gösterimi

Şekil 3.13’ te gösterildiği üzere; Zemax programında dağınık yayımlı özelliği gösteren bir malzeme olan LED modellemesinin bulunduğu ortamın şeklinden başlayarak, ortam sıcaklığı, LED’e pozisyonlananan koordinatına kadar, doğrudan dizilimli olmayan (non-sequential component) adlı sekme editöründe çeşitli parametrelerin değiştirilerek analiz edilerek, LED’in yaydığı ışının derecelere göre Lambert radyatörünün benzetimi Şekil 3.14’ te gösterilmiştir [91], [92].



Şekil 3.14 Bir LED vericisinin ZEMAX programlı Lambert emisyon gösterimi

[65]' de bahsedildiği üzere yakın mesafeli görülebilir ışık haberleşmesinde alıcı pozisyonunda bulunan fotodetektörlerin kısaca özetinden sonra formülasyon kısmından bahse girişeceğiz. Bir fotodetektör, kuantumların harekete geçme ve duyarlı oluşu anlamına gelen verimliliğini ortaya çıkaran sabit bir değer üzerinde eşik enerjisi olarak tetiklenen elektronların üretilmesi için vericiden gelen ışığa göre pozisyonlanan ve ışık fotonlarını ortaya çıkarma kurallarına göre çalışmasından dolayı; yarı iletken özelliği taşıyan fotodiyotlar örnek verilebilir. Hassas duyarlılık ise yüzeyinde meydana gelen optik ışın güç miktarına karşılık akım üretmesine bağlıdır. Geleneksel kapalı mekan alıcısı olan fotodiyot veya fotodetektörler; ön girişi ışık algılayıcısı, kuvvetlendirici entegreler ve elektriksel filtrelerin olduğu donanımsal bir mekanizmaya sahiptirler. Uzaktan gelen ışık ışınlarını verimli bir şekilde toplayan ve uygun yere yönlendiren optik toplayıcının (concentrator) seçimi ise yapılan çalışmada doğrudan görüşlü kanal tipini seçildiği için; SNR durumunu parazit olarak harici gelen ışıkları engellemek adına alıcı alanı yüzeysel olarak küçük hacimsel olarak da dar olmalıdır [93]. Yakın mesafeli ışık LOS kanal tipinde özellikle fotodetektörlerin kullanılmasının bir sebebi de aynı anda hem düşük maliyet ve yüksek bant alımlarını elde ederek verimli çalışmasıdır [94]. Fotodetektörler ışıkla birlikte çalıştıkları için kabiliyetlerinin alınan ışığın elektriğe dönüştürme kabiliyeti şöyle ifade edilir:

$$\eta = \frac{\text{üretilen elektronların sayısı}}{\text{absorbe edilen foton sayısı}} \quad (3.10)$$

Bir fotodetektör tarafından üretilen elektron deliği çiftlerinin sayısının belirli bir zamanda gelen fotonlara oranı, kuantum verimliliği olarak şöyle ifade edilir:

$$\eta_q = \xi(1 - R_{ref})(1 - e^{-ads}) \quad (3.11)$$

Burada bulunan ξ , foto-akıma öncülük eden elektron deliği çiftlerinin oranıdır, R_{ref} optik yansıma katsayısıdır, ds optik gücün emildiği mesafedir ve a ise optik absorpsiyon katsayısıdır.

Bir fotodetektörün duyarlılığı ya da yanıt verme hassasiyeti, birimsel olarak optik gücü başına üretilen foto-akım olarak tanımlanır, yani ışıktan akıma dönüşüm verimliliğine denir veya belirli bir dalga boyundaki gelen ışık gücüne foto-akımın oranıdır.

$$R = \frac{I_p}{P_p} = \eta_q \frac{q}{hf} \quad (3.12)$$

Burada bulunan R ; yanıt verme hassasiyeti, I_p üretilen foto akımı, P_p ise absorbe edilen ışığın gücü, η_q kuantum verimliliği, q elektron yükü, h Planck sabiti ve f ise ışığın dalga boyu olarak frekans karşılığıdır.

3.5.1 LOS Kanal Modeli Tasarımı

Yapılan Çalışmanın bu kısmında; yakın mesafeli görülebilir ışık haberleşmesine ait kanal modelini ve modele ait değişkenleri inceleyerek kanal modelinin davranışını belirten bilgisayar benzetimlerini göstereceğiz. Yakın mesafeli görülebilir ışık haberleşmesinde; verici kısmında yüksek verimli ve düşük maliyetli özelliğinden dolayı LED kullanıldığı için IM/DD iletim tekniği kullanılır. Çalışmada LOS kanal tipi kullanılmıştır. Doğru görüşlü kanal modellemesi yapılırken; verici bulunduğu kapalı mekân olarak seçilen odaların tavanında zemine dik olacak şekilde sabitlemesi yapılırken öte tarafta alıcı pozisyonunda olan fotodetektör ise verici dik veya yönlü olacak şekilde yerleştirilerek konumlanır. LED olarak kullanılan verici kısmında LED çiplerini içeren LED dizisi kullanılır. Bu LED vericileri fabrikasyon olarak üretilirken LED çipleri arası standart mesafelerle konumlanarak bir LED gibi davranır. LED'in yayımladığı ışınlarına göre genelleştirilmiş Lambertian modeli ise şöyle ifade edilir [95]:

$$R(\varphi) = \begin{cases} \frac{(m+1)}{2\pi} P_{tx} \cos^m(\varphi), & \varphi \in \left\{ -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right\} \\ 0, & \varphi \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (3.13)$$

Burada kullanılan φ açısı; vericinin alıcıya göre yayımladığı parlaklık (irradiance) açısı, m ise Lambert derece indisi ve P_{tx} ise LED tarafından yayınlanan ışığın gücüdür. Alıcının(PD) ışığı yakalama kabiliyetinin bir ölçüsü olan ışık toplayıcı kanal değişkeni ise şöyle ifade edilir:

$$g(\theta) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(\psi_f)}, & 0 \leq \theta \leq \psi_f \\ 0, & \theta \geq \psi_f \end{cases} \quad (3.14)$$

Burada kullanılan θ açısı; alıcının vericiye göre konumlanmasıyla ortaya çıkarak etki eden yansıma açısı, ψ_f açısı alıcının aldığı tüm ışığın yarı açısı olan görüş açısı (field of view, FOV), n ise alıcıda bulunan ışık toplayıcının farklı fotodetektörlere göre değişim gösteren kırınım indisi. Tüm bu formülasyonlardan elde edilen kanal değişkenlere ait doğrudan görüşlü kanal modeli ise şöyle ifade edilir:

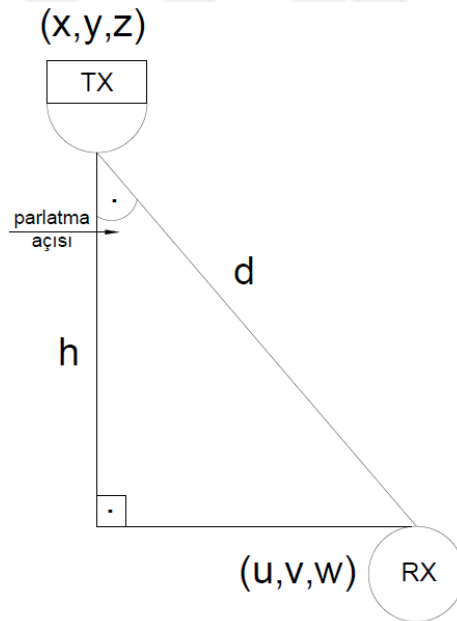
$$H_{ij}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1) A_{pd}}{2\pi d_{ij}^2} \cos^m(\varphi) T_s(\theta) g(\theta) \cos(\theta), & 0 \leq \theta \leq \psi_f \\ 0, & \theta \geq \psi_f \end{cases} \quad (3.15)$$

Burada kullanılan kanal formülü indisli matris olarak çalışır; i indisi hangi LED vericisine ait olduğunu gösterirken j indisi ise hangi PD alıcısına ait olduğunu gösterir, Formülde kullanılan

d_{ij} ; verici-alıcı arası hipotenüs uzaklığı, $T_s(\theta)$ optik filtre katsayısı, A_{pd} ise alıcıya ait yüzeysel alanın verimli olan alanı olarak bilinen alan ise şöyle ifade edilir [96]:

$$A_{pd}(\theta) = \begin{cases} A_{rect} \cos(\theta), & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ 0, & \theta \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (3.16)$$

Burada kullanılan A_{rect} ; alıcıya ait yüzeysel alandır. Verici-alıcı arası hipotenüs uzaklığı verici koordinatları (x,y,z) ve alıcı koordinatları (u,v,w) arasındaki matematiksel bağıntı Şekil 3.15’ te görselleştirilerek şöyle hesaplanır:



Şekil 3.15 VLC kanal modeline ait uzaklık mesafe görseli

$$d = \sqrt{(u-x)^2 + (v-y)^2 + (w-z)^2} \quad (3.17)$$

SNR tıpkı diğer geleneksel haberleşme sistemlerinde olduğu gibi optik kablosuz haberleşmesinde de önemli bir tanımlama noktasıdır. VLC haberleşmesinde LOS kanal modellemesinin LED yerine göre değişiklik gösterdiği durumlarda genelde gürültü ihmal edilir. Fotodetektör akımı genelde iki durumdan etkilenir; biri LED'in ilk yandığı andır, diğer etkilendiği durum ise ortam parazitleri ve ışık ortamlarıdır [97].

Elektrik akımında ki etkisi sonrası ortaya çıkan dalgalanma sebebi olan anlık yanma gürültüsü ise şöyle ifade edilir:

$$\sigma_{shot}^2 = 2(P_{rc} + P_{amb})qRB \quad (3.18)$$

$$B = I_1^2 R_r \quad (3.19)$$

$$\sigma_{ther}^2 = i_{amp}^2 B_{amp} \quad (3.20)$$

Burada kullanılan σ_{shot}^2 ; anlık yanma gürültüsü, q elektrik yükü, R alıcıya ait yanıt katsayısı oranı, B eşdeğer gürültülü bant genişliği, I_1 arka planda parazitik harmoniklerin ortaya çıkardığı gürültünün bant genişliği faktörü, R_r veri transfer oranı, P_{amb} ortama ait ısı kaynaklarının toplu olarak oluşturdukları ışının gürültü gücü, B_{amp} kuvvetlendirici bant genişliği ve P_{rc} ise ortamdan ve kaynaktan alınan güçtür ve şöyle ifade edilir:

$$P_{rc} = \sum_{i=1}^N H_{ij}(0) P_{ij} \quad (3.21)$$

Burada kullanılan H_{ij} ; i. LED'den j. Alıcıya kanal kazancı , P_{ij} i. LED vericisinden j. PD Alıcısına gönderilen güç, N indisi ise led çiplerini barındıran verici veya led sayısıdır. Fotodetektör içerisinde elektriksel sürücü devreleri çalıştığı zaman mekanizma olarak ortaya çıkan bir diğer gürültü ise donanımsal dip gürültü olarak harmoniklerin ürettiği gürültüdür ve şöyle ifade edilir:

$$\sigma_{ther}^2 = i_{amp}^2 B_{amp} \quad (3.22)$$

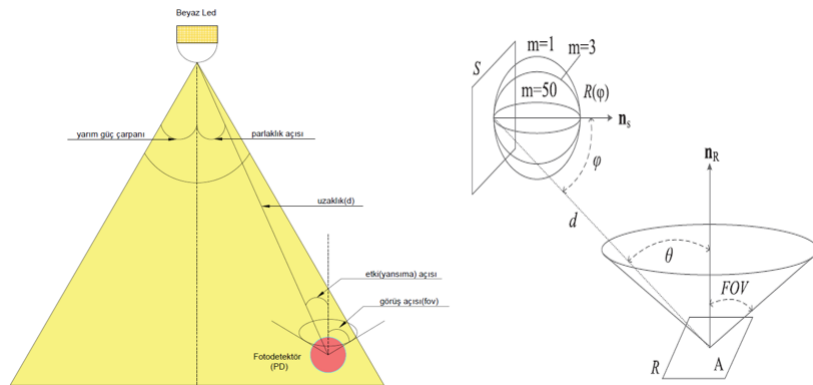
[30]'da da aynı konu üzerinde durarak bu formülde kullanılan toplamsal ifadenin ilk bölümü geri yön beslemeli direncin gürültüsü iken, alan etkili transistörün (field-effect transistör, FET) kanalında oluşan gürültüdür. σ_{ther}^2 ; anlık ışıma sonunda elektronik donanımda ortaya çıkan mekanik gürültüsü, i_{amp}^2 fotodetektör içerisindeki kuvvetlendiricinin gürültü yoğunluğudur. Gerek mekanik ısı gerek anlık yanma gürültüsü gelen ışığın elektriğe dönüşmesi sonrası ortaya çıkan gürültü toplam gürültüdür ve şöyle ifade edilir:

$$\sigma_{noise}^2 = \sigma_{ther}^2 + \sigma_{shot}^2 \quad (3.23)$$

Belirtilen denklemlerden hareketle gürültü sonrası ortaya çıkan SNR ise şöyle ifade edilir [98]:

$$\begin{aligned} SNR_{R_x} &= \frac{P_{R_x}^{elektriksel}}{\sigma_n^2} \\ &= \frac{1}{\sigma_n^2} \kappa \left(P_{R_x}^{ışıksal} \right)^2, \end{aligned} \quad (3.24)$$

Burada elektrikselden-ışığa dönüşüm faktörü olup değeri bir (unity) olarak alınmıştır. $P_{R_x}^{elektriksel}$ ifadesi, ortalama alınan elektriksel güç olarak tanımlanmaktadır. $P_{R_x}^{ışıksal}$ ifadesi, ortalama alınan ışıksal güç olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3.16 VLC kanal modeline ait değişkenlerin temel görsel şekli

3.5.2 LOS Kanal Modeli Bilgisayar Benzetimleri

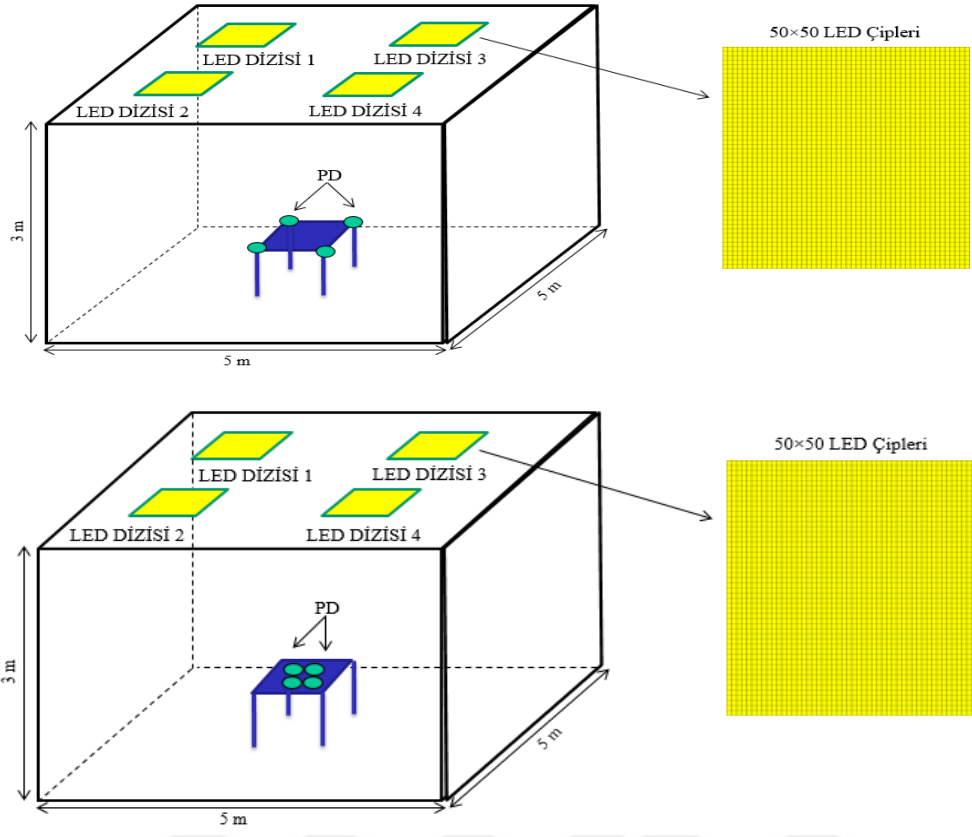
Yapılan çalışmanın bu kısmında 4x4 çoklu giriş – çoklu çıkış tekniği (multiple input – multiple output, MIMO) kullanılarak, yakın mesafeli görülebilir kanal modelinin uygulandığı ortam olarak 5m x 5m x 3m ebatlarında kapalı ortam iç mekân Şekil 3.17’ de gösterilmiştir. Kanal modellemesi yapılırken LED vericilerinin ve PD alıcılarının birbirine simetrik olmalarından dolayı kanal katsayı kazançları indissel olarak eşittir ve şöyle ifade edilirler:

$$\mathbf{H}_{i,j} = \begin{pmatrix} h_{1,2} & \cdots & h_{1,4} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{4,1} & \cdots & h_{4,4} \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

LED çip setlerine ait konumlanan pozisyonlar simetrik olduğu için 4x4 kanal modeline ait tüm kanal katsayısını hesaplamaya gerek olmadığı gibi 4x1 şeklinde konumlanan değişkenlerin düz simetrik ve çapraz simetrik olduğu için eşit olan indisleri şöyle açıklayabiliriz:

$$(h_{1,2} = h_{2,1}), (h_{1,3} = h_{3,1}), (h_{1,4} = h_{4,1}) \quad (3.26)$$

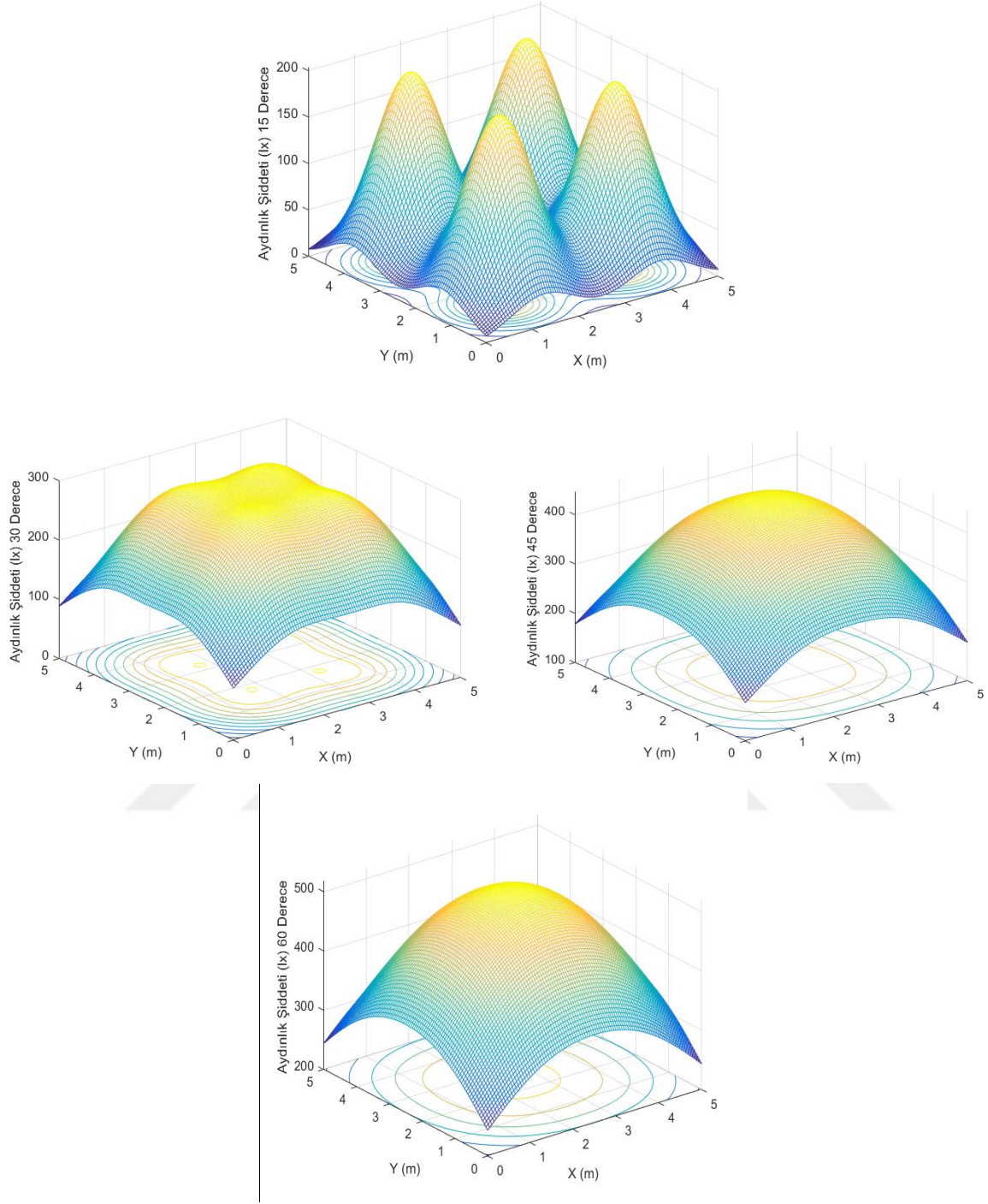
Herhangi bir özel durum belirtmeksizin örnek olma anlamında Tablo 3.2’ de belirtilen değişkenlerin değerlerine göre aydınlatma gücü, alınan optik gücü, elektriksel SNR ve optik güç dağılım benzetim sonuçlarını göstereceğiz.



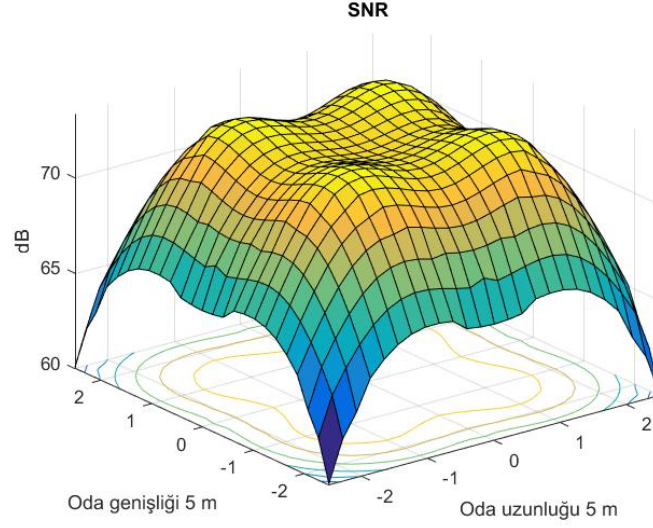
Şekil 3.17 VLC yakın mesafe kapalı mekân gösterimi

Tablo 3.2 VLC kanal modellemesinin sistemsel değişkenleri tablosu

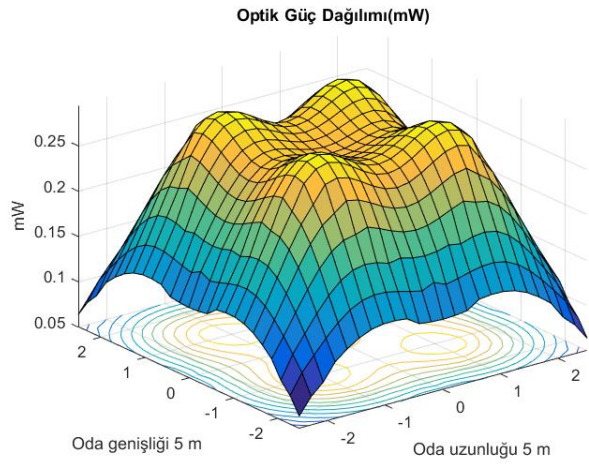
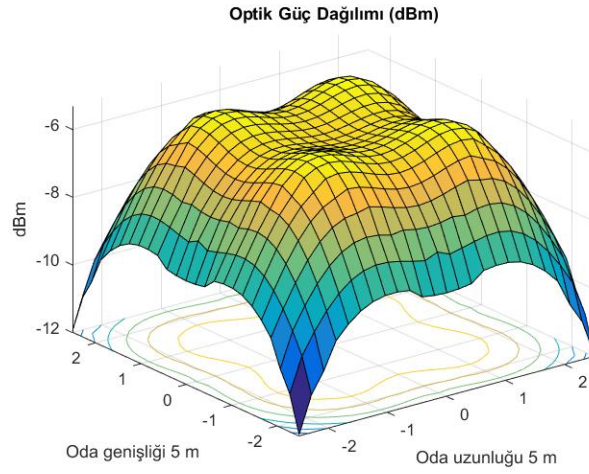
<i>Deęişkenler</i>	<i>Değer</i>
Oda Boyutları (x,y,z)	5x5x3 m^3
Verici Koordinatı (4 Led)	(1.25, 1.25, 3), (1.25, 3.75,3) (3.75, 1.25, 3), (3.75, 3.75,3)
Yansıtma Katsayısı (r)	0.6
Yarım güç açısı ($\phi_{1/2}$)	15°, 30°, 45°, 60°
Led başına iletilen güç (P_{ij})	15 mW
Led dizisi başına düşen çip sayısı	50 x 50 (2500)
Alıcı verimli aktif alanı (A_{pd})	1 cm^2
Görüş alanını açısı (ψ_f)	60
Alıcı yüksekliği	0.80 m
Elektron yükü (q)	1.6e-19 C
Işık hızı (c)	3e8 m/s
Optik filtre katsayısı $T_s(\theta)$.	1
Yanıt verme hassasiyeti (R)	0.5 A/W
Optik toplayıcı katsayısı ($g(\theta)$)	5
Merkezi aydınlık şiddeti ($I(\theta)$)	0-910 lx
Eşdeğer gürültülü bandgeniřlięi (B)	40 MHz
Kuvvetlendirici gürültü yoğunluğu (i_{amp})	6 pA/ $\sqrt{Hz}$
Gürültü bandgeniřlik faktörü (I_1)	0.489e6
Ortam ışınlarının gürültü gücü (P_{amb})	18.752 μW



Şekil 3.18 Farklı yarım güç açlarına göre aydınlık şiddetleri



Şekil 3.19 VLC kanal modeline ait 45 derecelik yarım güç açısına ait SNR eğrisi

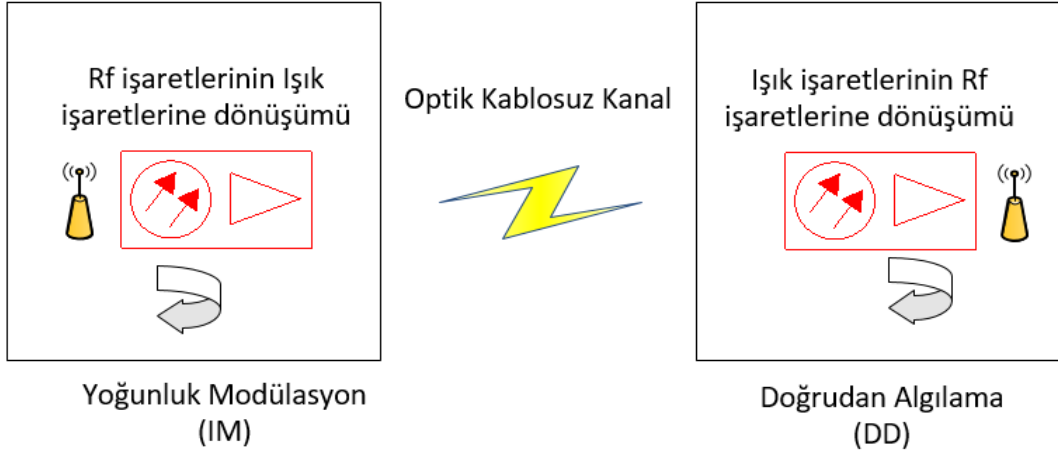


Şekil 3.20 Aydınlık şiddetinin 45 derecelik yarım güç açısına göre dBm ve mW cinsinden gösterimi

4. LED İNDİS MODÜLASYONU

4.1 Led Yoğunluk modülasyonu

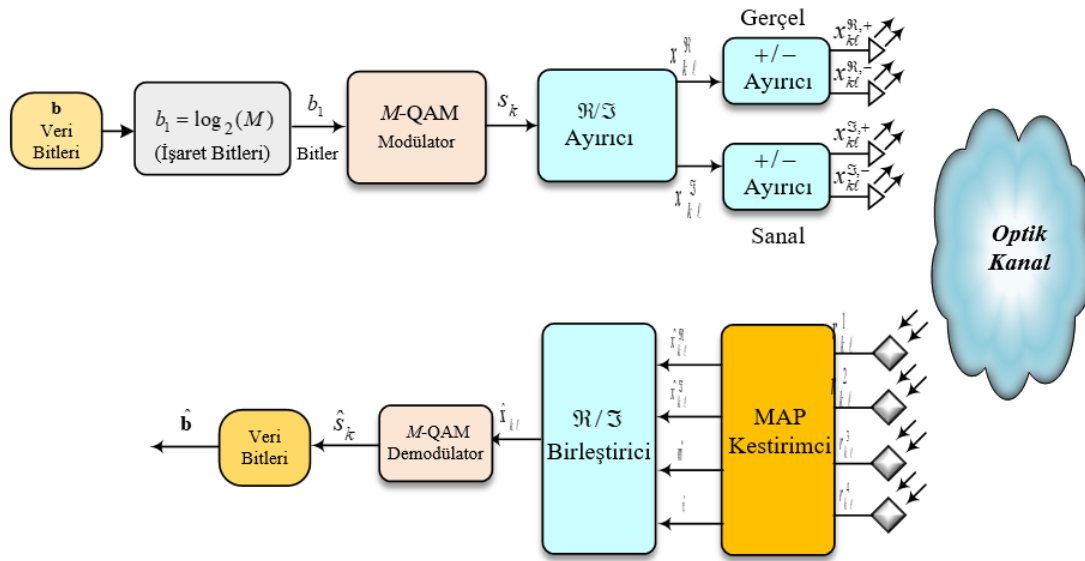
Günümüze kadar gelen kademeli olarak gelişen geleneksel haberleşme sistemlerinde gönderilecek veriler bilgiye dönüştürülürken gönderilmesinde modüle edilerek iletilir. Veri taşıyıcısı olarak kullanılan işaretlerin ise gönderilirken değişken olarak fazı, genliği ve frekansı esas alınır. [25]' deki literatür çalışmasına göre; Kablosuz optik haberleşmesi uygulamalarından olan görülebilir ışık haberleşmesinde veri iletimi ise geleneksel haberleşme sistemlerin aksine IM/DD tekniği kullanılarak sağlanır. IM/DD tekniği iki kısım olarak uyumlu bir şekilde çalışmaktadır. Tekniğin verici kısmında; verici olarak kullanılan LED vericilerinin yanması veya sönmesiyle birlikte tekniğin yoğunluk modülasyon kısmını (intensity modulation, IM) oluştururken, ışık haberleşmesinin sağlandığı alıcı kısmında ise bulunan ışık algılayıcı olarak fotodetektörlerin vericilerden gelen ışın demetinin ışığı algılaması üzerine fotodetektörlerin sensörleri tarafından ışığın yoğunluğuna göre akım üretmesi de aynı zamanda tekniğin doğrudan algılama (direct detection, DD) kısmını gerçekleştirir. Şekil 4.1 'de IM/DD tekniği görsel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 4.1 Genelleştirilmiş IM/DD gösterimi

4.2 Led İndis Modülasyonu Modeli

Yakın mesafeli görünür ışık haberleşmesi sistemlerinde ve 5G kablosuz mobil ağlarında; Doğrudan algılamalı yoğunluk modülasyon (intensity modulation / direct detection , IM/DD) iletim tekniği kullanılarak geliştirilen yeni nesil kanal haberleşmesi sağlayan Led indis modülasyon haberleşmesi akademik çalışmalarda yerini almıştır. [26]'da yeni bir teknik olarak kavramsal olarak literatüre kazanım sağlayan bu modülasyon tekniğini değerlendirmesi üzerine de kendine özgü farklı bir kanal metodu ile beraber; veriyi mevcut RF ve VLC optik sistemlerden daha hızlı bir şekilde iyileştirmeli hızlandırma amacı güdülmesiyle beraber RF işaretlerinin kapsadığı kablosuz haberleşme teknolojisi 3G, 4G vb. standartlarına göre sadece ışık işareti kullanılarak bant genişliğinin çeşitliliği, yüksek güvenli, fazla enerji verimliliği, hata başarımlarının yüksekliğine sahip olması ile beraber dikkatleri üzerine çekmeyi başarmıştır.



Şekil 4.2 Yakın mesafeli görülebilir ışık haberleşmesinin Led indis modülasyonlu şemasının blok şeması [27].

Şekil 4.2’de gösterildiği üzere led indis modülasyonun çalışma prensibi, [27]’de ise LIM tekniğinin çıkış referans yeri olan literatür çalışmasında önerilen blok şemasında şöyledir: RF işaretleri olarak gelen bilgi bitleri frekans değişiminin olmadığı sistemin çıkışına olduğu gibi ileten sadece modülasyon değişiminin gerçekleştiği M-QAM modülatörüne girer. Gelen verilerin geleneksel haberleşmede olduğu gibi gerçek ve sanal kısımlarının olduğu anlamına gelerek bir mesaj biti taşıdığı anlamına gelir. Bu durum ise yakın mesafeli görünür VLC kanalından sanal ve negatif işaretler iletilmezler. Literatürde bu olumsuz durumu ortadan

kaldırmak adına led indis modülasyonu (led index modulation, LIM) kavramı geliştirilmiştir. Zaman aralığında ki bilgi mesaj bitleri $x_{i,l}$ gerçek ve sanal ayırıcı ünitesine girerek gerçek ve sanal olarak bit verileri ayrılır. Ayrılan mesaj bitleri gerçek ve sanal oluşlarına göre işaretlerin yönünü tayin için pozitif ve negatif olarak ayrılırlar. Sonuç olarak alınan bilgi mesaj bitleri gerçek işaretlere ait pozitif ve negatif durumlar; sanal işaretlere ait pozitif ve negatif durumlar olarak ortaya çıkan dört durum (4.1) denklemin de ifade edilmiştir:

$$x_{i,lk}^{\mathcal{R},+} = \begin{cases} x_{i,lk}^{\mathcal{R}} & \text{eğer } x_{i,lk}^{\mathcal{R}} > 0 \\ 0 & \text{eğer } x_{i,lk}^{\mathcal{R}} < 0 \end{cases} \quad x_{i,lk}^{\mathcal{R},-} = \begin{cases} 0 & \text{eğer } x_{i,lk}^{\mathcal{R}} > 0 \\ -x_{i,lk}^{\mathcal{R}} & \text{eğer } x_{i,lk}^{\mathcal{R}} < 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$x_{i,lk}^{\mathcal{I},+} = \begin{cases} x_{i,lk}^{\mathcal{I}} & \text{eğer } x_{i,lk}^{\mathcal{I}} > 0 \\ 0 & \text{eğer } x_{i,lk}^{\mathcal{I}} < 0 \end{cases} \quad x_{i,lk}^{\mathcal{I},-} = \begin{cases} 0 & \text{eğer } x_{i,lk}^{\mathcal{I}} > 0 \\ -x_{i,lk}^{\mathcal{I}} & \text{eğer } x_{i,lk}^{\mathcal{I}} < 0 \end{cases}$$

Sistemin iletim kısmında; Gönderilecek bilgi mesaj bitleri blok şemasında belirtildiği üzere uygun LED antenlerinden gönderilerek, sadece pozitif değerler seçilir ve VLC optik kanalına iletilir. Öncelikle, alınan mesaj işaretleri gerçek değerlidir, iletilen mesaj vektörü minimum düzeyde dip gürültü olarak bir Gauss dağılımına sahiptir. Benzer şekilde, alınan işaret verileri, işareti iletmek için gereken tahmini elde etmek için önce karmaşık değerli işaretlerin birlikte toplanması gerektiğinden, [26]'da belirtildiği üzere, OFDM gibi teknikleri doğrudan iletilemez. Bu ve benzeri diğer tekniklerde sorun olan durumu çözmek için basit bir topolojik şemada sıfır zorlamalı MAP için dengeleyici eklenir. Ancak, bu sıfır zorlama nedeniyle, bu sisteme büyük bir gürültü gücü eklenir. Böylece, bu faktörü sistemden çıkarmak için, mesaj bilgi bitlerine ait olan bilgi vektörü hakkında bilgi içeren sistemin gelen bilgiyi tahmin etmek için kestirimci çalıştırıldıktan sonra kestirilen bilgi bitleri seri-paralel dönüşümlerle birlikte tekrar zaman tanım aralığından frekans tanıma aralığına çevrimi sağlanarak M-QAM demodülatörüne girerek sağlıklı bir şekilde veri transferi sağlanır.

(4.1) Denkleminde ifade edilen ve aktif edilen led sayısına göre MIMO sayısı değişebileceği üzere bu çalışmada tercih edilen verici – alıcı sayısına göre $n_T \times n_R$ MIMO VLC kanalı tercih edilmiştir. Burada n_T verici sayısını belirtirken n_R ise alıcı sayısını belirtir. Yapılan çalışmada 4×4 olacak şekilde alıcı – verici sayısı tasarlanarak iletilen mesaj bilgi bitleri $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ ise şöyle ifade edilirler:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_{i,lk}^{\mathcal{R},+} & x_{i,lk}^{\mathcal{R},-} & x_{i,lk}^{\mathcal{I},+} & x_{i,lk}^{\mathcal{I},-} \end{bmatrix}^T \quad (4.2)$$

Burada belirtilen mesaj bilgi bitlerine ait uygun LED vericisinin yanıp yanmamasına göre karar noktası olan iletim vektörüne gelen bilgi biti ayırıcıya girmeden gelen bilgi bitine ait olan iletim vektöründe 2 eleman sıfır olacak şekilde diğer 2 eleman ise bulunduğu gücü tanımlar. Örneğin $x = 2 - j0.45$ olsun; bu durumda bilgi bitine ait iletim vektörü şöyle olacaktır:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0.45 \end{bmatrix}^T \quad (4.3)$$

Gelen bilgi biti ayırıcı kısmına girdikten sonra gerçel (reel) kısımda 1.LED aktif 2. LED ise pasif yani yanmamaktadır; sanal kısmı ise 3.LED pasifken 4. LED aktif olarak çalışır. (4.3)'deki denkleme göre dayanarak literatürün bahsettiği ana kısım ise dikkat edilirse mesaj bilgi biti gerek negatif gerekse sanal kısımda olsa bile her durumda pozitif ve gerçel olarak veri bitleri kanal kısmına iletilerek istenen başarıımı elde etmektir.

5. KOD İNDİS MODÜLASYONU

5.1 İndis Modülasyonu

Yeni nesil haberleşme teknikleri için son on yıldır üzerinde sıklıkla üzerinde çalışılan en önemli konulardan biri de indis modülasyonu (index modulation, IM) tekniğidir. Yakın gelecekte, nesnelerin interneti (internet of things, IoT) ve herşeyin interneti (internet of everything, IoE) kavramları daha da yaygınlaşacak ve hemen her cihaz internete bağlı hâle gelecektir. Bu noktadan hareketle, yeni nesil haberleşme teknikleri için (IM gibi) enerjiyi ve spektrumunu verimli kullanan ve aynı zamanda yüksek veri hızlı tekniklerin geliştirilmesine büyük bir ihtiyacın olduğu söylenebilir. Bu bağlamda, esnek dalga formu tasarımları, milimetre dalga boyu (millimeter Wave, mmWave), devasa MIMO (massive MIMO) sistemleri gibi birçok yeni nesil haberleşme tekniği son zamanlarda geliştirilmektedir; ancak, yeni nesil haberleşme sistemlerinin araştırma topluluğu hâlâ yeni nesil haberleşme tekniklerine ihtiyaç duyulduğunu söylemektedir [23], [99].

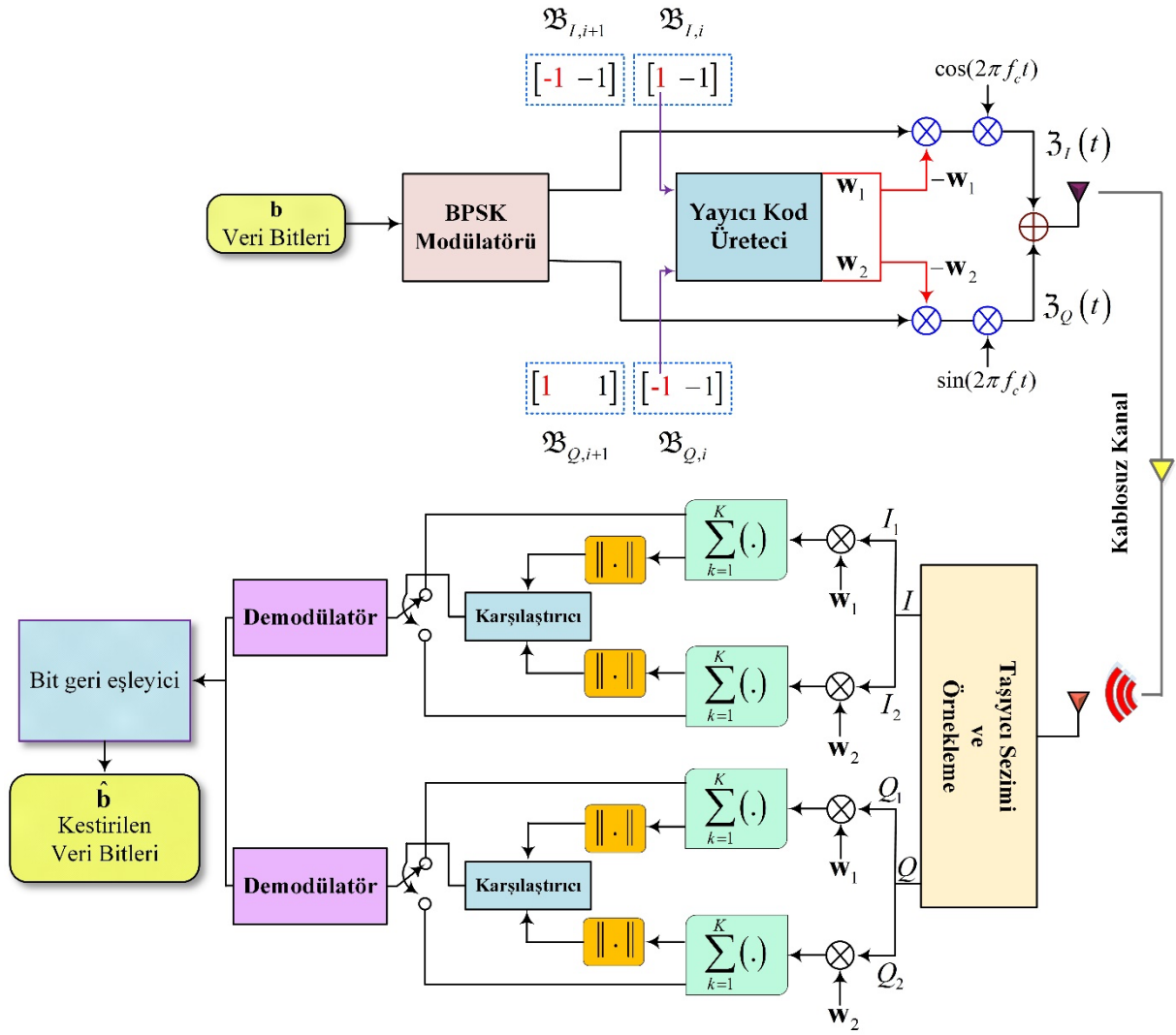
İlave bilgi bitlerini, geleneksel iletişim sistemlerine kıyasla daha akılcı bir şekilde iletmenin yenilikçi yollarını arayan IM tekniği; enerji verimliliği, spektral verimlilik ve kurulum-donanım basitliği hususlarında sunduğu çekici özellikler nedeniyle “yeni nesil haberleşme sistemleri” bağlamında karşımıza sıklıkla çıkmaktadır. IM teknikleri, teorik ve pratik olarak basit bir şekilde geleneksel haberleşme teknikleriyle beraber kullanılabilir; bu yüzden, son yıllarda IM’ye olan ilgi büyük ölçüde artmıştır. Geleneksel modülasyon şemaları sinüzoidal bir taşıyıcı işaretin genliğine, fazına veya frekansına bağlı olarak veri aktarmaktadır; aksine IM ise bunlara alternatif olarak tekniklerle meydana çıkmıştır [99], [100].

Esasen, IM şemaları; röleler, modülasyon türleri, zaman dilimleri, ön kodlayıcı matrisleri, dağılım matrisleri, yayıcı kodlar, işaret güçleri, verici antenler, alt taşıyıcılar gibi farklı boyutları ilave bilgi bitleri iletmek için kullanılmaktadır ve bununla birlikte çok büyük ekstra masraflar gerektirmemektedir. IM yapısında, gönderilecek bitlerin bir kısmı IM yapısının doğası gereği işarete gömülü bir vaziyette iletilir, bu yüzden iletilen bitlerin iletim enerjisinden tasarruf edilmiş olur ve aynı toplam iletim enerjisini kullanan geleneksel modülasyon şemalarına kıyasla ciddi bir şekilde hata performansında iyileşmeler gözlenir. IM, ikili bilginin iletilmesi için yeni boyutlar önerdiğinden, herhangi bir haberleşme sisteminin spektral verimliliğini ve donanım karmaşıklığını artırmadan etkin bir şekilde haberleşme gerçekleştirmektedir [99], [100].

5.2 Kod İndis Modülasyonu Sistem Modeli

Sisteme fazladan hesaplama karmaşıklığı eklemeyen veri hızını artırmak için, yayıcı Walsh Hadamard kodu alanının da bir indisleme parametresi olarak kullanıldığı [14]'de indis modülasyon alanını kullanan yeni bir teknik geliştirilmiştir. Kod indis modülasyonu-yayılı izge (code index modulation-spread spectrum, CIM-SS) olarak adlandırılan bu şema, daha yüksek veril elde etmek için MIMO veya SM sistemlerine de ayrıca entegre edilmiştir [21]. CIM-SS yöntemi, konstellasyon sembolleri ile birlikte giden ek verileri eşlemek için yayıcı Walsh Hadamard kodlarını kullanmaktadır. Şekil 5.1'te CIM-SS yönteminin sistem modeli gösterilmiştir [14], [99].

CIM-SS sisteminin yapısında, giden veriler bloklar hâlinde ele alınmaktadır; burada her bit bloğu için bir bit, önceden atanmış bir kod kümesinden bir yayıcı kodu seçmekte ve diğer bit ise bu seçilen kod tarafından yayılmaktadır. Alıcıda ise ilk olarak yayıcı kod kestirilir, bu da eşlenmiş olan bitin yeniden elde edilmesine olanak tanır, ardından iletilen bit, yeniden yayma (despreading) yoluyla demodüle edilir. Bu akılcı yapı sayesinde, bitlerin sadece yarısı fiziksel olarak bir kanal vasıtasıyla iletilirken diğer bir yarısı ise yayıcı kodlarla eşlenir. Sonuç olarak, CIM-SS yöntemi bir yandan enerji tüketimini azaltırken, diğer bir yandan da verimi artırmaktadır; ayrıca, sistem kolayca gerçekleştirilebilir hâle gelmektedir [14], [16], [99], [101].



Şekil 5.1 CIM-SS sisteminin sistem modeli [102].

CIM-SS sisteminin sistem modeli Şekil 5.1’te gösterilmiştir. Bu yapının verici kısmında, gönderilecek olan veri bitlerine $\mathbf{b}$; ikili faz kaydırmalı anahtarlama (binary phase shift keying, BPSK) aracılığıyla $\{-1, +1\}$ değerleri atanmaktadır, ardından bu veriler eş-evreli (I) ve dik-evreli (Q) komponentler arasında bölünmektedir. Burada, sistemin dik-evreli komponentinin açıklaması yapılmayacaktır; çünkü eş-evreli ve dik-evreli komponentleri birbirlerine çok benzemektedirler. Ayrıca Şekil 4.1’deki sistem modelinde iki tane yayıcı kod kullanılmıştır; bunlar $\mathbf{w}_1$ ve $\mathbf{w}_2$ olarak sistem modelinde görülmektedir. Sistemde mevcut bulunan yayıcı Walsh Hadamard kodlarının yapısı $\mathbf{w}_j = [w_{j,1}, w_{j,2}, \dots, w_{j,K}]^T$, $j \in \{1, 2\}$ şeklindedir ve bu kodlar mükemmel derecede bir ortogonalliğe sahiplerdir [14], [16], [99], [101].

Sistem yapısı dikkate alınır, eş-evreli i . blok olan $\mathcal{E}_{1,i} = (\beta_{1,i}, \beta_{2,i})$; $\beta_{2,i}$ tarafından seçilen Walsh Hadamard kodu $\beta_{1,i}$ ile çarpılmaktadır. $\beta_{2,i}$ Genel olarak $\{-1, +1\}$ olmak üzere iki değer alabilmektedir. Nitekim, mevcut yapıda iki ayrı ortogonal kod seçilebilmektedir. Örnek olarak, $\beta_{2,i} = -1$ ise $\mathbf{w}_2$ Walsh Hadamard kodu seçilmekte iken; $\beta_{2,i} = +1$ iken $\mathbf{w}_1$ Walsh Hadamard kodu seçilmektedir. Bu noktadan hareketle iletilen eş-evreli CIM-SS işareti aşağıdaki gibi ifade edilebilir [14], [101]:

$$\mathcal{Z}_I(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{\ell=1}^K \beta_{1,i} \mathbf{w}_{\beta_{2,i}, \ell} \mathcal{P}(t - (iL + \ell)T_c) \cos(2\pi f_c t) \quad (5.1)$$

Burada; $\mathcal{P}(t)$ $[0, T_c]$ aralığında birim genlikli dikdörtgen darbeleri darbe şekillendirme filtresi olarak adlandırılmaktadır, f_c taşıyıcı frekansıdır ve N ise iletilen blokların sayısını ifade etmektedir. Burada, $\beta_{1,i}$ iletilen (transmitted) bit olarak; $\beta_{2,i}$ ise haritalanan (mapped) bit olarak adlandırılmaktadır [14], [16], [99], [101].

Alıcı yapısında, alınan eş-evreli işaret aşağıdaki gibi ifade edilebilir [14], [101]:

$$r_I(t) = \mathcal{Z}_I(t) + n_I(t) \quad (5.2)$$

Burada, $n_I(t)$ sıfır ortalamaya sahiptir, boyut başına $N_0/2$ kadar olan bir varyansa sahiptir ve toplamsal beyaz gauss gürültüsü (additive white gaussian noise, AWGN) olarak adlandırılmaktadır. Temel bant işaretinin tekrardan elde edilmesi ve örnekleme işleminin son bulmasıyla beraber yayıcı Walsh Hadamard kodunu elde etmek için alıcı kısmında bir korelatör kullanılmaktadır. Alınan örneklenmiş işaret her dalda ilgili Walsh Hadamard yayıcı kodu ile çarpılmakta ve KT_c üzerinden toplanmaktadır [14], [101].

Bu nedenle, eş-evreli dalın $I_{1,i}$ birinci dalındaki çıkış aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir [14], [101]:

$$I_{1,i} = \begin{cases} \beta_{1,i} \mathcal{E}_b + n_1, & \text{eğer } \mathbf{w}_1 \text{ gönderilirse} \\ n_1, & \text{eğer } \mathbf{w}_2 \text{ gönderilirse} \end{cases} \quad (5.3)$$

Burada, $\mathcal{E}_b = \sum_{\ell}^K \mathbf{w}_{1,\ell}^2$ iletilen bit enerjisini ifade etmektedir; $n_1 = \sum_{\ell}^K n_{\ell} \mathbf{w}_{1,\ell}$ ifadesi ise birinci yayıcı Walsh Hadamard kodu ile AWGN gürültüsünün çarpılmış hâlini ifade etmektedir. Benzer işlemler yapılarak, $I_{2,i}$ ifadesi de rahatlıkla bulunabilir [14], [101]:

$$I_{2,i} = \begin{cases} n_2, & \text{eğer } \mathbf{c}_1 \text{ gönderilirse} \\ \beta_{1,i} \mathcal{E}_b + n_2, & \text{eğer } \mathbf{c}_2 \text{ gönderilirse} \end{cases} \quad (5.4)$$

Burada da benzer şekilde $n_2 = \sum_{\ell}^K n_{\ell} \mathbf{w}_{1,\ell}$ ifadesi ise ikinci yayıcı Walsh Hadamard kodu ile AWGN gürültüsünün çarpılmış hâlini ifade etmektedir.

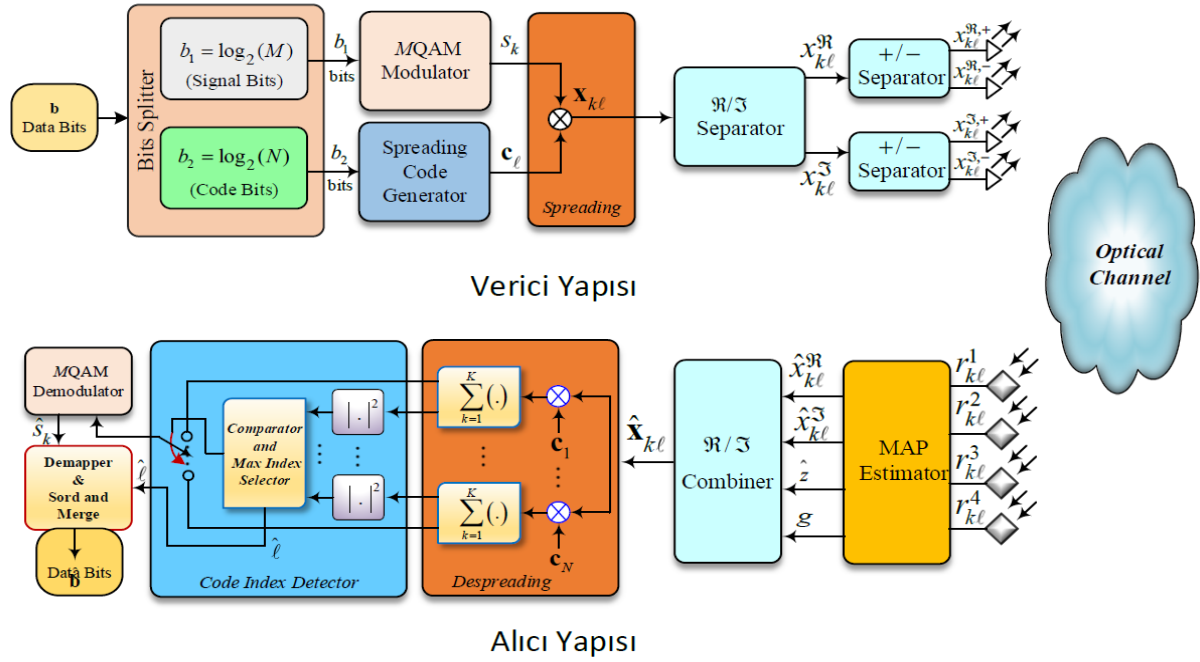
Korelatör çıkışlarının mutlak değerleri alınır, birbirlerinden çıkartılır ($\mathcal{D}_i = |I_{1,i}| - |I_{2,i}|$), iletilen Walsh Hadamard kodu tespit etmek için karşılaştırılır ve neticesinde haritalanan bit olarak adlandırılan $\beta_{2,i}$ elde edilmiş olur; sonrasında bu $\beta_{1,i}$ ifadesini elde etmek için kullanılır. Bu iki ifade aşağıda gösterildiği gibi elde edilebilir [14], [101]:

$$\begin{aligned} \mathcal{D}_i > 0, \quad \beta_{2,i} &= 1 \text{ ve } \beta_{1,i} = \text{signum}(I_{1,i}), \\ \mathcal{D}_i \leq 0, \quad \beta_{2,i} &= -1 \text{ ve } \beta_{1,i} = \text{signum}(I_{2,i}), \end{aligned} \quad (5.5)$$

Burada, $\text{signum}(\cdot)$ ifadesi signum fonksiyonunu ifade etmektedir ve bu fonksiyon matematikte bir reel sayının işaretini bulmak için kullanılmaktadır.

6. LED İNDİS MODÜLASYONU TABANLI OPTİK MIMO HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN KOD İNDİS MODÜLASYONU

Bu bölümde, LED indis modülasyonu tabanlı optik MIMO haberleşme sistemleri için önerilen kod indis modülasyonu kısaca CIM-LIM olarak adlandırılan sisteminin detayları anlatılacaktır.



Şekil 6.1 CIM-LIM sistem modeli

Önerilen CIM-LIM sistem modelinin verici ve alıcı yapısına ait blok diyagram Şekil 6.1’de ((a) verici yapısı (b) alıcı yapısı) sunulmuştur. Ele alınan sistem modeli, düz sönmülemeli optik MIMO kanallar dikkate alınarak performans gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Şekil 6.1 (a)’da önerilen CIM-LIM sistem modelinin verici yapısı dikkate alındığında, $\mathbf{b}$ iletilen bilgi bitlerini ifade edip $m \times 1$ boyutlu bir vektördür ($\mathbf{b}_{m \times 1}$). Verici yapısı dikkate alındığında ilk olarak, $\mathbf{b}$ bilgi vektörü bit bölücü bloğuna uygulanmaktadır. Bit bölücü $m \times 1$ boyutlu vektörü b_1 ve b_2 uzunluklu iki alt vektöre ayırmaktadır. b_1 Ve b_2 aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$b_1 = \log_2 M \text{ Bit ve } b_2 = \log_2 N \text{ bit.} \quad (6.1)$$

b_1 Bit vericide M -QAM modülerine uygulanarak ilişkili bit dizisine ait T_s simge süreli s_k M -QAM simgesini seçmektedir. Diğer yandan, b_2 adet bit ise yayıcı kod üreticine uygulanarak,

Walsh Hadamard kod olarak adlandırılan birbirine dik N adet yayıcı koddan ilişkili bit dizisine ait $\mathbf{c}_\ell$ yayıcı kodunu seçmektedir. Yayıcı kod aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\mathbf{c}_\ell = [c_{\ell 1}, c_{\ell 2}, \dots, c_{\ell K}], \ell = 1, 2, \dots, N, \quad (6.2)$$

burada, yayıcı kod çip olarak adlandırılırken ve $T_\ell = T_s / K$ süreye sahip K adet ± 1 çip verisinden meydana gelmektedir, yani $c_{ij} \in \{\pm 1\}$. Yayıcı kodlar doğası gereği birbirine dik olduğundan $i, j \in \{1, 2, \dots, N\}, i \neq j$ olmak üzere rastgele seçilen iki kod arasındaki ilişki aşağıdaki gibi sıfırdır:

$$\mathbf{c}_i \mathbf{c}_j^T = \begin{cases} [c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{iK}] \begin{bmatrix} c_{j1} \\ \vdots \\ c_{jK} \end{bmatrix} = 0, & \text{eğer } i \neq j \\ 1, & \text{eğer } i = j \end{cases} \quad (6.3)$$

6.1 CIM-LIM Sisteminin Verici Yapısı

CIM-LIM sistem modelinin verici yapısı dikkate alındığında, seçilen s_i M -QAM simgesi ve $\mathbf{c}_\ell$ yayıcı kodu yayma bloğunda (Spreading) zaman alanında çarpılarak yayma işlemi aşağıdaki gibi gerçekleştirilir:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{i\ell} &= s_i \mathbf{c}_\ell \\ &= \begin{bmatrix} \underbrace{s_i c_{\ell 1}}_{x_{i1}} & \underbrace{s_i c_{\ell 2}}_{x_{i2}} & \dots & \underbrace{s_i c_{\ell K}}_{x_{iK}} \end{bmatrix} \\ &= [x_{i,\ell 1}, x_{i,\ell 2}, \dots, x_{i,\ell K}]. \end{aligned} \quad (6.4)$$

Burada, $x_{i,\ell k} = s_i c_{\ell k}$ olup $k = 1, 2, \dots, K$ ’ dir. (6.4) numaralı eşitlik dikkate alındığında, zaman alanında yayılmış $\mathbf{x}_{i\ell}$ vektörüne ait veriler, hem karmaşık hem de pozitif ve negatif değerli reel ve sanal kısımlara sahip olduğundan VLC kanalından direkt olarak iletilemezler. Çünkü VLC kanalından iletilen verilen hem pozitif değere sahip olmalı hem de karmaşık ifade

içermemelidir. Literatürde bu olumsuz durumu ortadan kaldırmak için LED indis modülasyonu (LIM) olarak adlandırılan yöntem MIMO kanallar için önerilmiştir [27]. Bu tezde, önerilen LIM yöntemini $\mathbf{X}_{il}$ vektörüne ait bilgi verilerini iletmek için, Şekil 1’de sunulan CIM-LIM sistem modelinde olduğu gibi verici yapısının son bloğu ile birleştirilmiştir. Burada, $\mathbf{X}_{il}$ vektörüne ait her bir karmaşık veri olan $x_{i,\ell k}$, $k=1,2,\dots,K$, öncelikle $\Re/\Im$ ayırıcı ile reel ve sanal bileşenlerine ayrılır ve $x_{i,\ell k} = x_{i,\ell k}^{\Re} + j x_{i,\ell k}^{\Im}$ olarak elde edilmiş olur. Böylece pozitif veya negatif (+, -) değerlere sahip olabilen $x_{ik}^{\Re}$ ve $x_{ik}^{\Im}$ değerleri elde edilir. Son olarak $x_{i,\ell k}^{\Re}$ ve $x_{i,\ell k}^{\Im}$ ’yi sadece pozitif-değerli yapabilmek için aşağıdaki pozitif-negatif (+, -) ayırma işlem uygulanır [27]:

$$\begin{aligned} x_{i,\ell k}^{\Re,+} &= \begin{cases} x_{i,\ell k}^{\Re} & \text{eğer } x_{i,\ell k}^{\Re} > 0 \\ 0 & \text{eğer } x_{i,\ell k}^{\Re} < 0 \end{cases} & x_{i,\ell k}^{\Re,-} &= \begin{cases} 0 & \text{eğer } x_{i,\ell k}^{\Re} > 0 \\ -x_{i,\ell k}^{\Re} & \text{eğer } x_{i,\ell k}^{\Re} < 0 \end{cases} \\ x_{i,\ell k}^{\Im,+} &= \begin{cases} x_{i,\ell k}^{\Im} & \text{eğer } x_{i,\ell k}^{\Im} > 0 \\ 0 & \text{eğer } x_{i,\ell k}^{\Im} < 0 \end{cases} & x_{i,\ell k}^{\Im,-} &= \begin{cases} 0 & \text{eğer } x_{i,\ell k}^{\Im} > 0 \\ -x_{i,\ell k}^{\Im} & \text{eğer } x_{i,\ell k}^{\Im} < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (6.5)$$

(6.5) eşitliği ile verilen pozitif değerli işaretler, $n_T \times n_R$ MIMO VLC kanalından iletilir, burada n_T verici n_R alıcı birim sayısını ifade etmektedir. Önerilen sistem modeli dikkate alındığında $n_T \times n_R = 4$ olarak seçilmiştir.

Pozitif ve reel-değerli yayılmış M -QAM zaman işaretleri olan $x_{i,\ell k}^{\Re,+}$, $x_{i,\ell k}^{\Re,-}$, $x_{i,\ell k}^{\Im,+}$ ve $x_{i,\ell k}^{\Im,-}$ işaretleri $\mathbf{H}$ olarak ifade edilen 4×4 MIMO VLC kanaldan geçerek ve gürültü eklenerek aşağıdaki gibi alıcı birime ulaşır:

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}_k \quad (6.6)$$

$\mathbf{r}_k = [r_{k,1}, r_{k,2}, \dots, r_{k,n_R}]^T \in \sim^{n_R \times 1}$ Vektörü k ’nci çipe ait iletilen işaretin alıcı birimlerdeki PD’ den alınan elektriksel işaretlerini ifade etmektedir. $\mathbf{H}$ kanal matrisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & h_{1,3} & h_{1,4} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & h_{2,3} & h_{2,4} \\ h_{3,1} & h_{3,2} & h_{3,3} & h_{3,4} \\ h_{4,1} & h_{4,2} & h_{4,3} & h_{4,4} \end{bmatrix}. \quad (6.7)$$

Burada, $h_{m,n}$ Tx verici birimi (LED) ve Rx alıcı birimi (PD) arasındaki optik kablosuz bağlantının kanal kazancını ifade etmektedir. $\mathbf{n}_k$ Vektörü, reel-değerli toplamsal beyaz Gauss gürültü örneklerini ifade etmektedir. Burada ifade edilen gürültü, saçılma (shot) ve ısı (thermal) gürültüyü modellemektedir. Vektörünün tüm elemanları $N(0, \sigma_w^2)$ dağılımına sahip olup, alınan elektriksel işarete elektriksel alanda eklenmektedir. (6.6) denkleminde ifade edilen $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{4 \times 1}$ iletilen işareti CIM-LIM sistemi için aşağıdaki yapıya sahiptir:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_{i,\ell k}^{\Re,+} & x_{i,\ell k}^{\Re,-} & x_{i,\ell k}^{\Im,+} & x_{i,\ell k}^{\Im,-} \end{bmatrix}^T \quad (6.8)$$

Burada, LED'ler tarafından yayılan işaretler $\mathbf{x}$ vektörünün elemanlarını ifade etmektedir. (6.5) numaralı denklem göz önüne alındığında, $\mathbf{x}$ vektörünün 4 elemanından sadece 2 elemanı sıfırdan farklıdır. Yani 2 LED aktif olup ışık yayarken diğer iki tanesi kapalı durumda olup ışık yaymamaktadır. Bu durumu $s_i = -1.2247 + 0.4082j$ ve $c_{\ell k} = 1/\sqrt{16}$ (burada $M = 8$ olup simgeler normalize edilmiştir ve çip uzunluğu $K = 16$ seçilmiştir) için bir çip işareti ile örnek gösterilecek olunursa, $x_{i,\ell k}$ aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned} x_{i,\ell k} &= s_i c_{\ell k} \\ &= (-1.2247 + 0.4082j) \left(\frac{1}{\sqrt{16}} \right) \\ &= -0.3062 + j0.1021 \end{aligned} \quad (6.9)$$

Böylece $\mathbf{x}$ vektörü aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\mathbf{x} = [0 \quad 0.3062 \quad 0.1021 \quad 0]^T \quad (6.10)$$

Sonuç olarak, vericinin ikinci ve üçüncü LED'i aktif olup, ikinci LED $x_{i,\ell k}$ simgesinin reel kısmının mutlak değerini iletirken, üçüncü LED ise $x_{i,\ell k}$ simgesinin sanal kısmının mutlak değerini iletmektedir. Burada dikkat edilecek olursa, $\mathbf{x}$ vektörünün sıfırdan farklı tüm elemanları pozitif değere sahiptir. Bu akılcı yolla, LED indis modülasyonu M -QAM modülasyonunu temel alan tüm haberleşme yöntemlerini ışık haberleşmesine uygulama fırsatı sunmuştur.

(6.6) numaralı denklemde gürültü modellenirken, alıcı tarafında ortalama elektriksel işaret gürültü oranı aşağıdaki gibi dikkate alınmıştır [103]–[105]:

$$\begin{aligned} SNR_{R_x} &= \frac{P_{R_x}^{elektriksel}}{\sigma_n^2} \\ &= \frac{1}{\sigma_n^2} \kappa \left(P_{R_x}^{ışıksal} \right)^2, \end{aligned} \quad (6.11)$$

Burada elektrikselden-ışığa dönüşüm faktörü olup değeri bir (unity) olarak alınmıştır. $P_{R_x}^{elektriksel}$ ifadesi, ortalama alınan elektriksel güç olarak tanımlanmaktadır. $P_{R_x}^{ışıksal}$ ifadesi, ortalama alınan ışıksal güç aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$P_{R_x}^{ışıksal} = \frac{1}{4} \sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^4 h_{m,n} I, \quad (6.12)$$

Burada I yayılan ortalama ışıksal yoğunluğu ifade etmektedir. Simetriden dolayı $x_{i,\ell k}^{\Re}$ ve $x_{i,\ell k}^{\Im} \sim N(0, 1/2)$ olduğu dikkate alınır, $\mathbf{x}$ vektörünün 4 elmanı da kırılmış Gauss olasılık yoğunluk fonksiyonuna sahip olur, yani pdf aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$f_{x_{i,\ell k}^{\Re(\Im), \pm}}(y) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-y^2} u(y) + \frac{1}{2} \delta(y) \quad (6.13)$$

Burada $u(y)$ ve $\delta(y)$ ifadeleri sırasıyla birim basamak ve birim dürtü fonksiyonunu ifade etmektedir. Bir LED'den yayılan ortalama elektriksel güç aşağıdaki gibi elde edilir [27]:

$$\begin{aligned}
I &= E \left\{ x_{i,\ell k}^{\Re(\mathfrak{I}),\pm} \right\} \\
&= \int_0^{\infty} y f_{x_{i,\ell k}^{\Re(\mathfrak{I}),\pm}}(y) dy \\
&= \frac{1}{2\sqrt{\pi}}.
\end{aligned} \tag{6.14}$$

6.2 CIM-LIM Sisteminin Alıcı Yapısı

Verici yapısını kısaca özetleyecek olursak, vericinin ilettiği indis modülasyonlu simgeler öncelikle optik kanaldan geçerek alıcıya ulaşır. Alıcıya gelen gürültülü $\mathbf{r}$ vektörü Şekil 6.1’ de görüldüğü gibi öncelikle MAP kestirimciye uygulanmaktadır. MAP kestirimci çıkışındaki veriler vericinin tersine $\Re/\Im$ birleştiriciye uygulanarak $\hat{\mathbf{x}}_{kl}$ vektörü elde edilmektedir. Sonrasında elde edilen $\hat{\mathbf{x}}_{kl}$ vektörü bir sonraki blok olan geri yayma işlemine iletilerek $\hat{\mathbf{x}}_{kl}$ vektörüne tüm yayıcı kodlar üzerinden geri yayma işlemi uygulanır. Geri yayma işleminden elde edilen değerler bir sonraki blok olan kod indis detektörüne uygulanır. Bu blokta, geri yayma işleminden gelen tüm değerler üzerinden mutlak değer karesi operatörü ($|\cdot|^2$) ile mutlak değer karesi alındıktan sonra yine aynı blokta yer alan karşılaştırıcıya uygulanır. Karşılaştırıcı maksimum değerli verinin indisini seçerek iletilen kod indisini olan $\hat{\ell}$ ’ yi belirlemiş olur. Bu aşamadan sonra alıcı iletilen kod indisini bilgisine sahip olmaktadır. Bu blokta aynı zamanda anahtarlama devresi yer almaktadır. Bu anahtarlama devresi sayesinde bir sonraki blok olan M -QAM demodülatörünün karmaşıklığı mükemmel derecede azaltılmış olmaktadır. Bu anahtarlama devresi sayesinde M -QAM demodülatörünün girişine sadece $\hat{\ell}$ ile ilişkilendirilmiş geri yayılan veri uygulanacaktır. Yani sonuç olarak, N adet geri yayılmış veriden sadece bir tanesi yani $\hat{\ell}$ ’inci veri M -QAM demodülatörüne uygulanmaktadır. M -QAM demodülatörü $\hat{\ell}$ ’inci veriye ilişkin karar verdiği $\hat{s}_i$ simgesini elde eder. $(\hat{\ell}, \hat{s}_i)$ Elde edilmiş veriler geri tablola ve bit sıralama bloğuna uygulanır. Son olarak bu bloğun çıkışında iletilen bit dizisine ait kestirilmiş bitler olan $\hat{\mathbf{b}}$ ’ye karar verilmiş olur.

6.2.1 CIM-LIM sisteminin Koşullu MAP Kestirimcisi

Eşitlik (6.7)'de verilen kanal matrisini kolon vektörü cinsinden aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \mathbf{h}_3 \ \mathbf{h}_4]. \quad (6.15)$$

Kanal matrisinin (6.15)' de yazıldığı gibi dikkate alınırsa, (6.6) eşitliği ile ifade edilen alınan gürültülü işaret aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$\mathbf{r} = \mathbf{h}_z \bar{x}_{i,\ell k}^{\Re} + \mathbf{h}_g \bar{x}_{i,\ell k}^{\Im} + \mathbf{n} \quad (6.16)$$

Burada, $\bar{x}_{i,\ell k}^{\Re} = |x_{i,\ell k}^{\Re}|$, $\bar{x}_{i,\ell k}^{\Im} = |x_{i,\ell k}^{\Im}|$, $z \in \{1, 2\}$, $g \in \{3, 4\}$ olarak ifade edilmektedir. $\bar{x}_{i,\ell k}^{\Re}$ ve $\bar{x}_{i,\ell k}^{\Im}$ ifadeleri aşağıdaki gibi PDF ifadesine sahip olup katlanmış Gauss (half-normal) dağılımına (Folded Gaussian Distribution) sahiptir:

$$f_{\bar{x}_{i,\ell k}^{\Re(\Im)}}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-y^2} u(y). \quad (6.17)$$

Sonuç olarak, (z, g) için verilen çifti için $\bar{x}_{i,\ell k}^{\Re}$ ve $\bar{x}_{i,\ell k}^{\Im}$ 'in koşullu MAP kestirimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\left(\tilde{x}_{i,\ell k}^{\Re(z,g)}, \tilde{x}_{i,\ell k}^{\Im(z,g)} \right) = \arg \max_{\bar{x}_{i,\ell k}^{\Re}, \bar{x}_{i,\ell k}^{\Im}} f\left(\bar{x}_{i,\ell k}^{\Re}, \bar{x}_{i,\ell k}^{\Im} \mid \mathbf{r} \right) \quad (6.18)$$

Burada $f\left(\bar{x}_{i,\ell k}^{\Re}, \bar{x}_{i,\ell k}^{\Im} \mid \mathbf{r} \right)$, $\bar{x}_{i,\ell k}^{\Re}$ ve $\bar{x}_{i,\ell k}^{\Im}$ 'nin $\mathbf{r}$ üzerine koşullu PDF'ni ifade etmektedir. Bazı matematiksel dönüşüm ve hesaplamalardan sonra, (6.18) eşitliği aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\left(\tilde{x}_{i,\ell k}^{\Re(z,g)}, \tilde{x}_{i,\ell k}^{\Im(z,g)} \right) = \arg \min_{\bar{x}_{i,\ell k}^{\Re}, \bar{x}_{i,\ell k}^{\Im}} \Lambda^{MAP}\left(z, g, \bar{x}_{i,\ell k}^{\Re}, \bar{x}_{i,\ell k}^{\Im} \right) \quad (6.19)$$

Burada $\Lambda^{MAP}(z, g, \bar{x}_{i,\ell k}^{\Re}, \bar{x}_{i,\ell k}^{\Im})$ ifadesi MAP kestirim metriklerini ifade etmektedir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\Lambda^{MAP}(z, g, \bar{x}_{i,\ell k}^{\Re}, \bar{x}_{i,\ell k}^{\Im}) = \|\mathbf{r} - \mathbf{h}_z \bar{x}_{i,\ell k}^{\Re} - \mathbf{h}_g \bar{x}_{i,\ell k}^{\Im}\|^2 + 2\sigma_w^2 \left((\bar{x}_{i,\ell k}^{\Re})^2 + (\bar{x}_{i,\ell k}^{\Im})^2 \right). \quad (6.20)$$

$\|\mathbf{u}\| = \mathbf{u}^T \mathbf{u}$ Özelliği kullanılarak ve bazı matematiksel işlemlerden sonra (6.20) denklemini aşağıdaki gibi basitleştirilebilir [27]:

$$\Lambda^{MAP}(z, g, \bar{x}_{i,\ell k}^{\Re}, \bar{x}_{i,\ell k}^{\Im}) = \lambda (\bar{x}_{i,\ell k}^{\Re})^2 + \chi (\bar{x}_{i,\ell k}^{\Im})^2 + \eta \bar{x}_{i,\ell k}^{\Re} + \varsigma \bar{x}_{i,\ell k}^{\Im} + \varpi \bar{x}_{i,\ell k}^{\Re} \bar{x}_{i,\ell k}^{\Im}, \quad (6.21)$$

Burada $\lambda, \chi, \eta, \varsigma$ ve ϖ katsayıları aşağıdaki tanımlanır [27]:

$$\begin{aligned} \lambda &= \mathbf{h}_z^T \mathbf{h}_z + 2\sigma_w^2, \\ \chi &= \mathbf{h}_g^T \mathbf{h}_g + 2\sigma_w^2, \\ \eta &= -2\mathbf{r}^T \mathbf{h}_z, \\ \varsigma &= -2\mathbf{r}^T \mathbf{h}_g, \\ \varpi &= 2\mathbf{h}_z^T \mathbf{h}_g \end{aligned} \quad (6.22)$$

(6.21) denkleminde yer alan $\Lambda^{MAP}(z, g, \bar{x}_{i,\ell k}^{\Re}, \bar{x}_{i,\ell k}^{\Im})$ ifadesini $\bar{x}_{i,\ell k}^{\Re}$ ve $\bar{x}_{i,\ell k}^{\Im}$ üzerinden türevi alınıp sıfıra eşitlenirse, MAP kestirimci, (z, g) üzerine koşullandırılmış $\bar{x}_{i,\ell k}^{\Re}$ ve $\bar{x}_{i,\ell k}^{\Im}$ ifadesine ait kestirim değerini aşağıdaki gibi elde eder:

$$\tilde{x}_{i,\ell k}^{\Re,(z,g)} = \left[\frac{2\chi\eta - \varsigma\varpi}{\varpi^2 - 4\lambda\chi} \right]^+, \quad \tilde{x}_{i,\ell k}^{\Im,(z,g)} = \left[\frac{2\lambda\varsigma - \eta\varpi}{\varpi^2 - 4\lambda\chi} \right]^+ \quad (6.23)$$

Burada, $\lfloor x \rfloor^+ \triangleq \max([0, x])$ olarak tanımlanmaktadır. Böylece iletilen M -QAM simgelerin reel ve sanal kısmının değerleri bulunmuş olmaktadır. Fakat eşitlik (6.8) ile verilen $\mathbf{x}$ vektörü dikkate alındığında, elde edilen bu $\tilde{x}_{i,\ell k}^{\Re,(z,g)}$ ve $\tilde{x}_{i,\ell k}^{\Im,(z,g)}$ değerleri $\mathbf{x}$ vektörünün 4 indisinden

hangisine ait olduğu yani (z, g) ikilisi halen bilinmemektedir. Yani elde edilen $\tilde{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{R}, (z, g)}$ ve $\tilde{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{I}, (z, g)}$ değerlerinin işaretleri $(+, -)$ bilinmemektedir. Sonuç olarak, $(+, -)$ değerlerinin bilinmesi için aktif LED'lerin indisleri olan (z, g) ikilisinin kestirim değerlerinin bilinmesi gerekmektedir.

$\tilde{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{R}, (z, g)}$ ve $\tilde{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{I}, (z, g)}$ ile ilişkilendirilmiş aktif verici LED'lerin indislerini belirlemek için (yani z ve g 'nin kestirimi), koşullu MAP kestirim detektörü tüm (z, g) çiftleri için $\tilde{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{R}, (z, g)}$ ve $\tilde{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{I}, (z, g)}$ değerlerini belirler ve daha sonra koşulsuz (actual) olan $\bar{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{R}}$ ve $\bar{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{I}}$ değerlerini aşağıdaki gibi elde eder:

$$(\hat{z}, \hat{g}) = \arg \min_{z, g} \Lambda^{MAP} \left(z, g, \tilde{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{R}, (z, g)}, \tilde{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{I}, (z, g)} \right). \quad (6.24)$$

Burada $\hat{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{R}, MAP} = \tilde{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{R}, (\hat{z}, \hat{g})}$ ve $\hat{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{I}, MAP} = \tilde{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{I}, (\hat{z}, \hat{g})}$, dir.

LIM yöntemini özetleyecek olursak, öncelikle, mümkün olan tüm aktif olabilecek LED senaryosunu ifade eden $(z, g) \in \{(1, 3), (1, 4), (2, 3), (2, 4)\}$ indis kümesi için $\bar{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{R}}$ ve $\bar{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{I}}$ 'a ait MAP kestirimleri hesaplanır. Daha sonra, CIM-LIM sisteminin koşullu MAP kestirimcisi en büyük olabilirlikli aktif LED çifti olan $(\hat{z}, \hat{g})$ ve bu LED çiftine ilişkin $\bar{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{R}}$ ve $\bar{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{I}}$ ($\hat{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{R}, MAP}, \hat{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{I}, MAP}$) değerlerini, (6.20) numaralı denklem ile sunulan MAP kestirim metriklerini mümkün olan tüm dört senaryo için hesaplayarak kestirir.

$(\hat{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{R}, MAP}, \hat{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{I}, MAP}, \hat{z}, \hat{g})$ Elde edilen değerleri alıcı yapısının ikinci bloğu olan $\mathfrak{R} / \mathfrak{I}$ birleştiriciye uygulanarak k 'nci iletilen çipe ait karmaşık işaret aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\hat{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{R}} = \begin{cases} \hat{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{R}, MAP} & \text{eğer } \hat{z} = 1 \\ -\hat{x}_{i, \ell k}^{\mathfrak{R}, MAP} & \text{eğer } \hat{z} = 2 \end{cases} \quad (6.24)$$

$$\hat{x}_{i,\ell k}^{\mathfrak{I}} = \begin{cases} \hat{x}_{i,\ell k}^{\mathfrak{I},MAP} & \text{eğer } \hat{g} = 3 \\ -\hat{x}_{i,\ell k}^{\mathfrak{I},MAP} & \text{eğer } \hat{g} = 4 \end{cases} \quad (6.25)$$

Sonuç olarak, $x_{i,\ell k} = s_i c_{\ell k}$ ifadesine ilişkin $\hat{x}_{i,\ell k} = \hat{x}_{i,\ell k}^{\mathfrak{R}} + j \hat{x}_{i,\ell k}^{\mathfrak{I}}$ verisine karar verilmiş olmaktadır. MAP kestirimci K tane çip işaretinden gelen verileri kestirdikten sonra birleştirici çıkışında $\hat{\mathbf{x}}_{i\ell}$ ile ifade edilen kestirilmiş vektör seti aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{i\ell} &= \left[\left(\hat{x}_{i,\ell 1}^{\mathfrak{R}} + j \hat{x}_{i,\ell 1}^{\mathfrak{I}} \right), \left(\hat{x}_{i,\ell 2}^{\mathfrak{R}} + j \hat{x}_{i,\ell 2}^{\mathfrak{I}} \right), \dots, \left(\hat{x}_{i,\ell K}^{\mathfrak{R}} + j \hat{x}_{i,\ell K}^{\mathfrak{I}} \right) \right] \\ &= \left[\hat{x}_{i,\ell 1}, \hat{x}_{i,\ell 2}, \dots, \hat{x}_{i,\ell K} \right]. \end{aligned} \quad (6.26)$$

Bu aşamadan sonra, LIM modülasyonlu singeler kestirilmiş olduğundan; hem indiste hem de simgede taşınan bilgiler geri elde edilebilir. Daha önce de belirtilmiş olduğu gibi, bunun için önce kod indiste taşınan bit bilgisini bulmak için geri yayma işlemi uygulanacak ve arkasından geri yayılmış vektör kod indis detektörüne uygulanacaktır. Kod indis bilgisi belirlendikten sonra ilgili kestirilen kod indisli geri yayılmış veri M-QAM modülatörüne uygulanıp simgede taşınan bilgi bitleri de geri elde edilecektir. Bunun için, (6.26) ile elde edilen $\hat{\mathbf{x}}_{i\ell}$ vektörü, CIM-LIM sisteminin alıcı yapısında da gösterildiği gibi öncelikle geri yayma bloğuna uygulanacaktır. Geri yayma bloğunda ilişki alıcı aracılığı ile $\hat{\mathbf{x}}_{i\ell}$ vektörü her dalda ilgili $\mathbf{c}_j$ yayıcı kod ile çarpılarak $T_s = K T_c$ simge süresi boyunca toplanacaktır:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_j &= \sum_{k=1}^K c_{j,k} x_{i,\ell k} \\ &= \sum_{k=1}^K c_{j,k} (s_i c_{\ell k}) \\ &= \begin{cases} s_i & j = \ell \\ 0 & j \neq \ell \end{cases} \end{aligned} \quad (6.27)$$

(6.27) eşitliğindeki geri yayma işlemi $j = 1, 2, \dots, N$ tüm Walsh Hadamard kod kümesi üzerinden yapıldığında, elde edilen vektör seti aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\tilde{\mathbf{X}} = \{ \tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_N \} \quad (6.28)$$

Ele alınan sistem modelinde kod indisinin kestirimi yapmak için, Şekil 6.1’ de alıcı yapısında gösterildiği gibi $\tilde{\mathbf{x}}$ vektörünün her elemanın mutlak değeri hesaplanır, daha sonra maksimum elemanına ait indis bilgisi belirlenir. Kullanılan Walsh yayıcı kodlar birbirine dik olduğu için mutlak değeri alınmış genlik ifadesinin en büyük değerli elemanı, aynı indis üzerindeki geri yayılmış elemana eşittir. Yani,

$$\sum_{k=1}^K c_{j,k} c_{\ell,k} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } j = \ell \\ 0, & \text{eğer } j \neq \ell \end{cases} \quad (6.29)$$

Sonuç olarak, Şekil 6.1’ de alıcı yapısında gösterildiği gibi mutlak değeri alınmış genlik ifadesi setinin maksimum elemanına ait indis bilgisi karşılaştırmacı ve maksimum indis seçiciye (comparator and maximum index selector) uygulanarak kestirilmiş indis bilgisi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} \hat{\ell} &= \arg \max_j \{|\tilde{\mathbf{x}}|\} \\ &= \arg \max_j \{|\tilde{x}_1|, |\tilde{x}_2|, \dots, |\tilde{x}_N|\} \end{aligned} \quad (6.30)$$

Kestirilmiş olan $\hat{\ell}$ indisli $\tilde{x}_{\hat{\ell}}$ verisi MQAM demodülatöre uygulanarak iletilen s simgesi aşağıdaki gibi elde edilir:

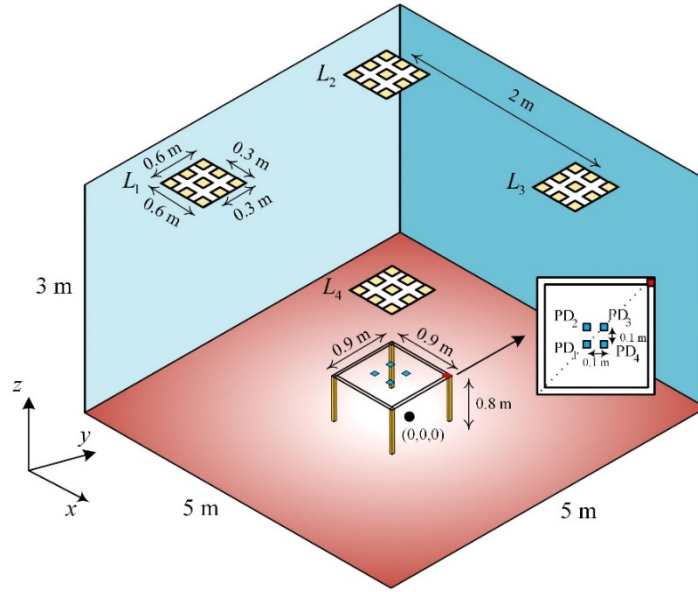
$$\hat{s} = \arg \min_{i \in \{1, 2, \dots, J, M\}} \left\{ |\tilde{x}_{\hat{\ell}} - s_i|^2 \right\} \quad (6.31)$$

Son olarak, elde edilen $(\hat{s}, \hat{\ell})$ kestirilmiş değerleri kullanılarak bit geri eşleme aracılığıyla iletilen bit dizisinin kestirimi olan $\hat{\mathbf{b}}$ ’ye karar verilir.

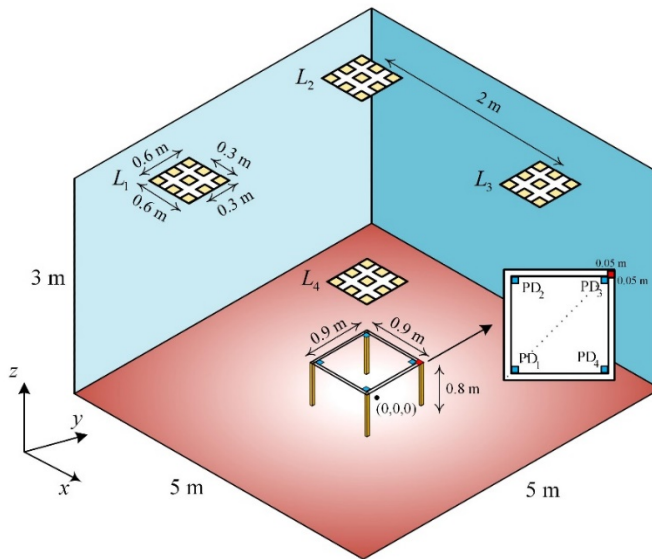
6.3 CIM-LIM Sisteminin Benzetim Sonuçları ve Tartışma

Bu bölümde önerilen CIM-LIM sisteminin benzetim sonuçları sunulacaktır. Bu bağlamda, önerilen yöntem aşağıda Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’de gösterilen iki farklı yakın mesafe sistem yapısına (Sistem A ve Sistem B) adapte edilerek performans sonuçları elde edilmiştir. Her iki sistemde de oda boyutları klasik uzunluklarda olup genişlik, uzunluk ve yüksekliği $5m \times 5m \times 3m$ olan bir oda boyuta sahiptir. Sistem A ve Sistem B, 4 verici ve 4 alıcılı yani 4×4

MIMO-VLC sistemi için tasarlanmış olup test edilmiştir. Her iki sistemde de tavana konumlandırılmış L_1, L_2, L_3 ve L_4 olmak üzere 4 adet LED kümesi yer almaktadır ve aralarında 2 m mesafe bulunmaktadır. Her bir LED kümesi için 9 adet LED çip kullanılmıştır. L_1 Ve L_2 iletilen modülasyonlu simgenin reel bileşene ait indis bilgisini taşıırken L_3 ve L_4 LED kümesi sanal bileşene ait modülasyonu simgenin bilgisini taşımaktadır.



Şekil 6.2 Sistem A (Alıcılar masanın merkezine konumlandırılmış)

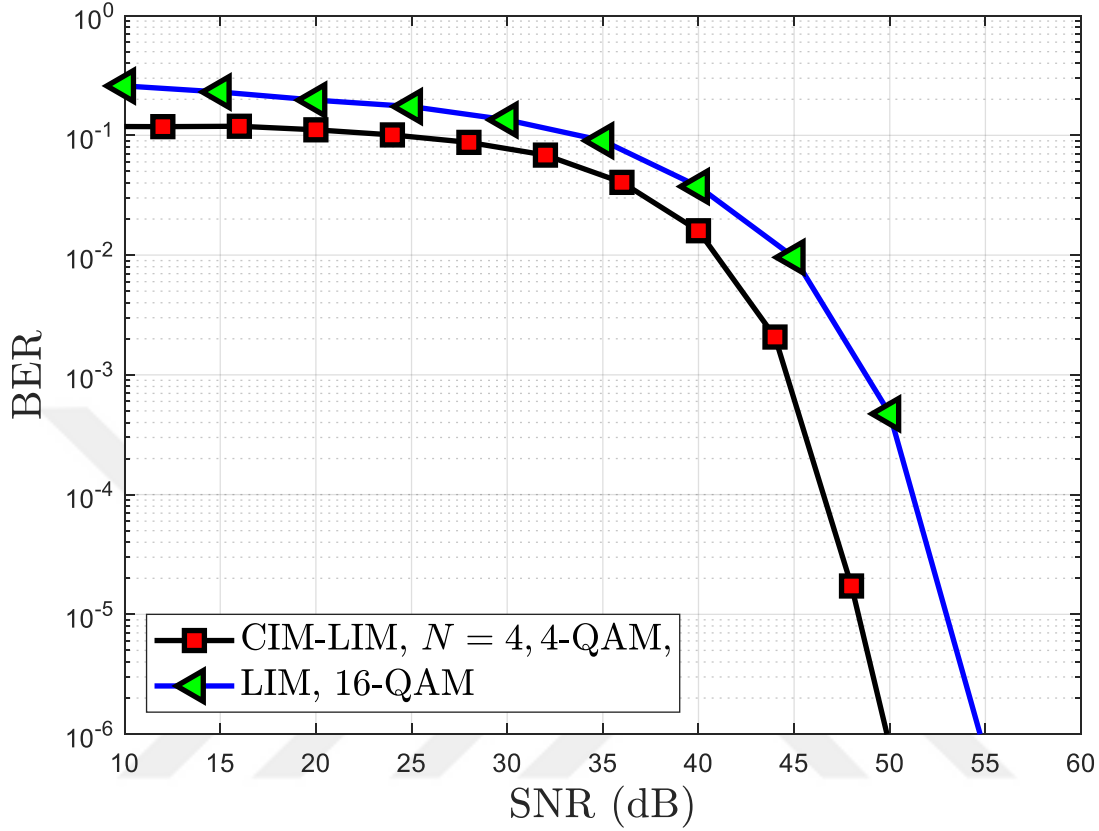


Şekil 6.3 Sistem B (Alıcılar masanın köşelerine konumlandırılmış)

Tablo 6.1 Benzetim ortamının fiziksel parametreleri [106]

Parametreler	Değerleri
Odanın Boyutları (Genişlik×Boy×Yükseklik)	$5m \times 5m \times 3m$
LED kümesi sayısı	4
Her LED kümesi için LED çip sayısı	9
LED çiplerinin Modeli	Cree Xlamp MC-E White
LED çiplerinin Gücü	5 W
LED kümelerinin pozisyonu (x, y, z) (m)	$L_1 \rightarrow (-1.3, -0.7, 3)$ $L_2 \rightarrow (-1.3, 1.3, 3)$ $L_3 \rightarrow (0.7, 1.3, 3)$ $L_4 \rightarrow (0.7, -0.7, 3)$
Alıcı fotodetektörü (PD) pozisyonları (x, y, z) (m)	Sistem A $PD1 \rightarrow (-0.05, -0.005, 0.8)$ $PD2 \rightarrow (-0.05, 0.005, 0.8)$ $PD3 \rightarrow (0.05, 0.005, 0.8)$ $PD4 \rightarrow (0.05, -0.005, 0.8)$
	Sistem B $PD1 \rightarrow (-0.4, -0.4, 0.8)$ $PD2 \rightarrow (-0.4, 0.4, 0.8)$ $PD3 \rightarrow (0.4, 0.4, 0.8)$ $PD4 \rightarrow (0.4, -0.4, 0.8)$
LED kümelerinin görüş açısı	120°
PD'nin FOV yarım açısı (derece)	85°
PN'nin alanı	1 cm^2
Meteryaller	Duvarlar ve Tavan: Alçı Yerler ve Masa: Çam ağacı

Sistem A ve Sistem B’de gösterildiği gibi L_1, L_2, L_3 ve L_4 , $0.6m \times 0.6m$ boyutuna sahip olup 9 LED çipinden meydana gelmektedir ve her bir çip 120° görüş açısıyla 5W’lık ışıma yapmaktadır.

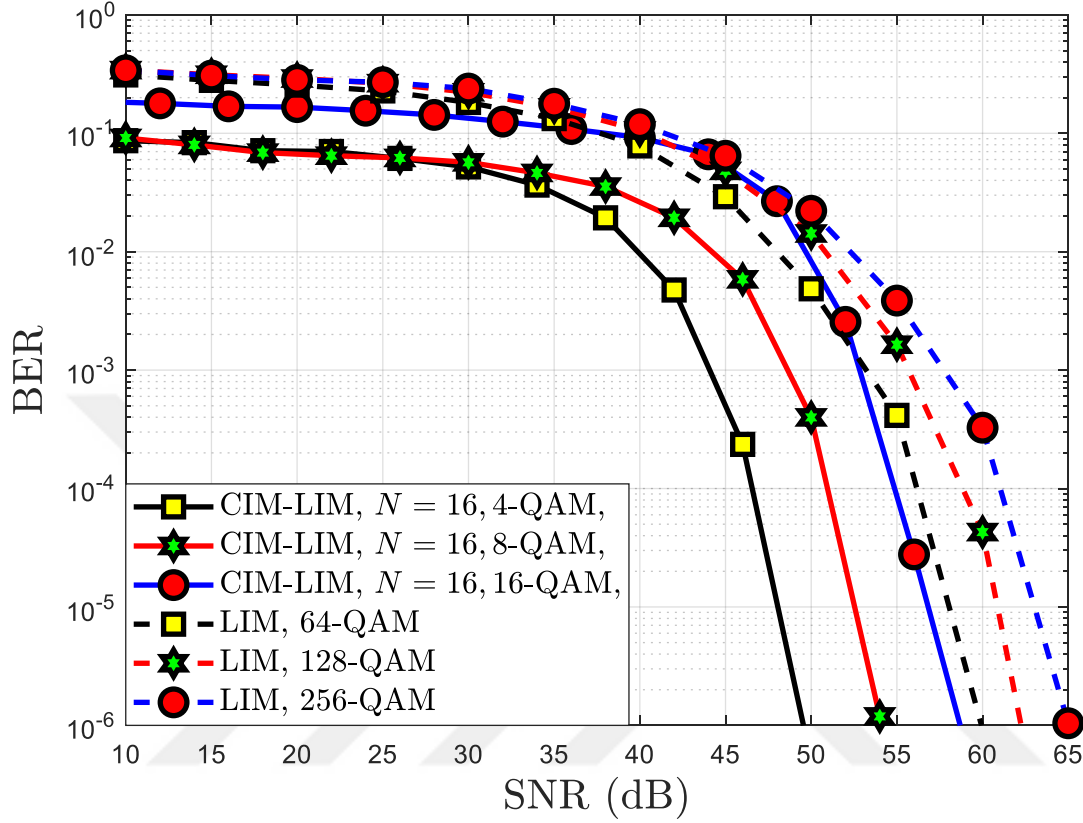


Şekil 6.4 Sistem A için CIM-LIM ve LIM yöntemlerinin 4 bitlik performans karşılaştırması

Bu değer ideal bir odanın aydınlatması için yeterli olmaktadır. Benzetim sonuçları Tablo 6.1’de verilen parametre değerleri için yapılmıştır [106]. CIM-LIM sistemi için tüm performanslar elde edilirken kod uzunluğu $K = 32$ olarak seçilmiştir. $SNR(dB) = 10 \log_{10}(SNR_{R_x})$ olarak tanımlanmış ve SNR_{R_x} ifadesi 6.11 eşitliğinde verilmiştir.

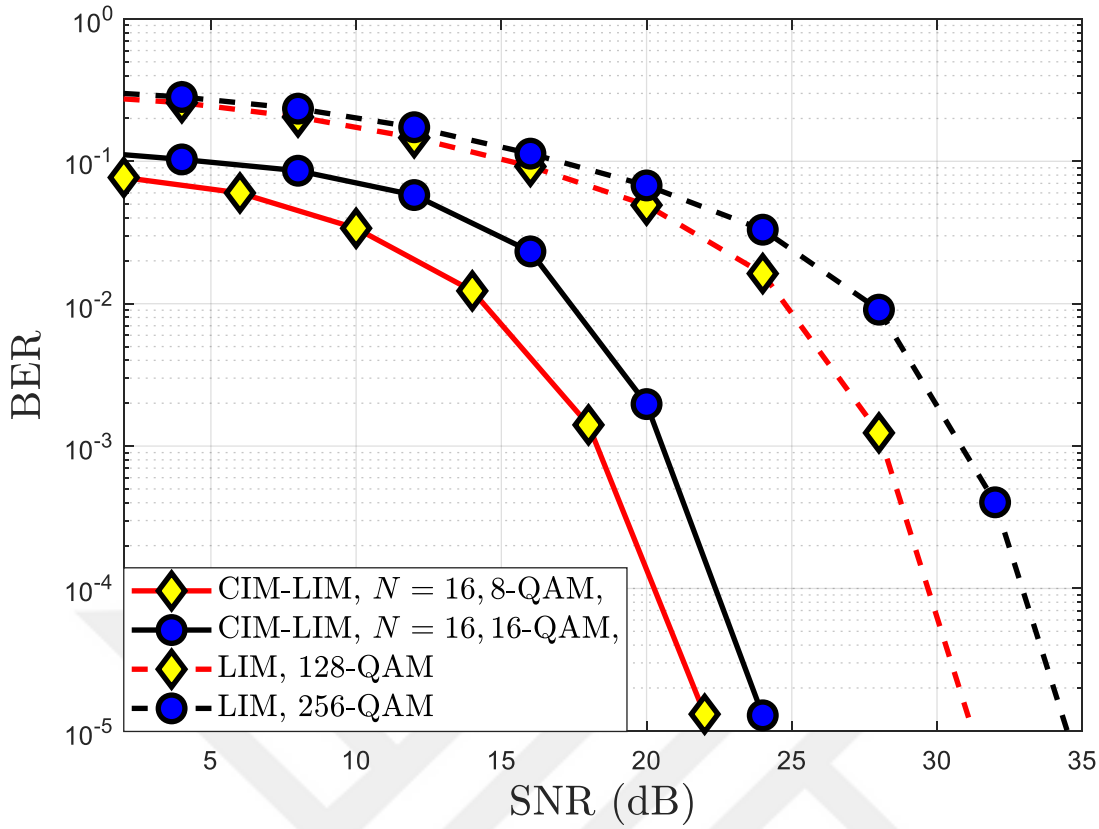
Şekil 6.4’de Sistem A için CIM-LIM ve LIM yöntemlerinin 4 bitlik BER performans karşılaştırma eğrileri sunulmuştur. CIM-LIM sistemi için yayıcı kod sayısı $N = 4$ ’dür. CIM-LIM sistemi 4 bitin 2 bitini yayıcı kod indisinde taşırken 2 bitini 4-QAM simgesinde iletmektedir. LIM yöntemi 4 bitin tamamını 16-QAM simgesi aracılığıyla iletmektedir. Şekil

6.4'den görüleceği üzere, 10^{-6} BER'de aynı bit hızında önerilen CIM-LIM sistemi klasik LIM yöntemine göre yaklaşık 5 dB kazanca sahiptir.



Şekil 6.5 Sistem A için CIM-LIM ve LIM yöntemlerinin 6,7 ve 8 bitlik performans karşılaştırması

Şekil 6.5'te, Sistem A için CIM-LIM ve geleneksel LIM yöntemlerinin 6,7 ve 8 bitlik BER performans karşılaştırma eğrileri sunulmuştur. CIM-LIM sistemi için 6,7 ve 8 bitlik iletim hızları için yayıcı kod sayısı $N = 16$ olarak seçilmiştir. CIM-LIM sistemi 6,7 ve 8 bitlik iletim için 4 bitini yayıcı kod indisinde taşıırken, 2,3 ve 4 bitini sırasıyla 4-QAM, 8-QAM ve 16-QAM simgesinde iletmektedir. LIM yöntemi 6,7 ve 8 bitlik iletimin tamamını sırasıyla 64-QAM, 128-QAM ve 256-QAM simgeleri aracılığıyla iletmektedir. Şekil 6.5'den görüleceği üzere, 10^{-6} BER'de 6,7 ve 8 bitlik hızlarda önerilen CIM-LIM sistemi klasik LIM yöntemine göre, sırasıyla yaklaşık 10 dB, 9 dB ve 8 dB'lik kazançlara sahiptir. Sonuç olarak Sistem A için CIM-LIM tekniği geleneksel LIM yöntemine göre çok daha iyi başarıma sahip olduğu gösterilmiştir.



Şekil 6.6 Sistem B için CIM-LIM ve LIM yöntemlerinin 7 ve 8 bitlik performans karşılaştırması

Şekil 6.6’da, Sistem B için CIM-LIM ve geleneksel LIM yöntemlerinin 7 ve 8 bitlik BER performans karşılaştırma eğrileri sunulmuştur. CIM-LIM sistemi için 7 ve 8 bitlik iletim hızları için yayıcı kod sayısı $N = 16$ olarak seçilmiştir. CIM-LIM sistemi 7 ve 8 bitlik iletim için 4 bitini yayıcı kod indisinde taşırken, 3 ve 4 bitini sırasıyla 8-QAM ve 16-QAM simgesinde iletmektedir. LIM yöntemi 7 ve 8 bitlik iletimin tamamını sırasıyla 128-QAM ve 256-QAM simgeleri aracılığıyla iletmektedir. Şekil 6.6’dan görüleceği üzere, 10^{-5} BER’de 7 ve 8 bitlik hızlarda önerilen CIM-LIM sistemi klasik LIM yöntemine göre, sırasıyla yaklaşık 10.5 dB ve 10 dB’lik kazançlara sahiptir. Sonuç olarak Sistem B için CIM-LIM tekniği geleneksel LIM yöntemine göre çok daha iyi başarıma sahip olduğu gösterilmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, optik MIMO sistemler için enerji verimli ve yüksek veri hızlı CIM yöntemi LIM yöntemi ile birleştirilerek ve kısaca CIM-LIM olarak adlandırılan yeni bir enerji verimli ve yüksek veri hızlı haberleşme tekniği önerilmiştir. Önerilen CIM-LIM tekniği, kaynağa ait bilgiyi iletmek için geleneksel modüleli simgeleri ve aktif yayıcı kod indislerini beraberce kullanmaktadır.

Önerilen CIM-LIM tekniğinin performansı geleneksel LIM sisteme göre daha iyi hata performansına sahiptir; elde edilen bilgisayar benzetimleri ile bu yargı doğrulanmıştır.

Bu tez çalışmasının bir devamı olarak, önerilen CIM-LIM sisteminin, uzaysal modülasyon ve dikgen uzaysal modülasyon tekniklerine uygulanması planlanmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi, and H. D. Schotten, “The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 334–366, Feb. 2021, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3057679.
- [2] GSMA Intelligence, “Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile,” *GSMA Intell. Underst. 5G*, no. December, pp. 3–15, 2014.
- [3] Y. Liu *et al.*, “Light Encryption Scheme Using Light-Emitting Diode and Camera Image Sensor,” *IEEE Photonics J.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–7, Feb. 2016, doi: 10.1109/JPHOT.2016.2519287.
- [4] B. Önal, F. Çögen, and E. Aydın, “Differential chaos shift keying-assisted media-based modulation,” *Electrica*, vol. 21, no. 1, 2021, doi: 10.5152/ELECTRICA.2020.20046.
- [5] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, “6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 1, pp. 957–975, Sep. 2019, doi: 10.1109/OJCOMS.2020.3010270.
- [6] M. Beshr, C. Michie, and I. Andonovic, “Evaluation of Visible Light Communication system performance in the presence of sunlight irradiance,” in *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2015, vol. 2015-Augus, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICTON.2015.7193685.
- [7] Y.-H. Kim, W. A. Cahyadi, and Y. H. Chung, “Experimental demonstration of LED-based vehicle to vehicle communication under atmospheric turbulence,” in *2015 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 2015, pp. 1143–1145, doi: 10.1109/ICTC.2015.7354759.
- [8] K. Lee, H. Park, and J. R. Barry, “Indoor Channel Characteristics for Visible Light Communications,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 2, pp. 217–219, Feb. 2011, doi: 10.1109/LCOMM.2011.010411.101945.
- [9] H. Farahneh, C. Mekhiel, A. Khalifeh, W. Farjow, and X. Fernando, “Shadowing effects on visible light communication channels,” in *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2016, vol. 2016-Octob, pp. 1–5, doi: 10.1109/CCECE.2016.7726717.
- [10] T. Komine and M. Nakagawa, “Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 50, no. 1, pp. 100–107, Feb. 2004, doi: 10.1109/TCE.2004.1277847.
- [11] M. Saadi, L. Wattisuttikulkij, Y. Zhao, and P. Sangwongngam, “Visible Light Communication : Opportunities , Challenges and Channel Models,” *Int. J. Electron. Informatics*, vol. 2, no. 1, pp. 1–11, 2013.
- [12] E. Curry, D. K. Borah, and J. M. Hinojo, “Optimal Symbol Set Design for Generalized Spatial Modulations in MIMO VLC Systems,” in *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2016, pp. 1–7, doi: 10.1109/GLOCOM.2016.7842097.
- [13] E. Ozturk, E. Basar, and H. A. Cirpan, “Generalized Frequency Division Multiplexing with Index Modulation,” in *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/GLOCOMW.2016.7848916.

- [14] G. Kaddoum, M. F. A. Ahmed, and Y. Nijsure, "Code Index Modulation: A High Data Rate and Energy Efficient Communication System," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 2, pp. 175–178, Feb. 2015, doi: 10.1109/LCOMM.2014.2385054.
- [15] T. Zhao, Z. Yang, and Y. Zhao, "Partial-code-aided scheme for narrowband interference suppression in direct-sequence spread spectrum systems," *IET Commun.*, vol. 4, no. 18, pp. 2240–2251, Dec. 2010, doi: 10.1049/iet-com.2010.0058.
- [16] G. Kaddoum and E. Soujeri, "On the comparison between code-index modulation and spatial modulation techniques," in *2015 International Conference on Information and Communication Technology Research (ICTRC)*, 2015, pp. 24–27, doi: 10.1109/ICTRC.2015.7156412.
- [17] F. Cogen and E. Aydin, "Hexagonal Quadrature Amplitude Modulation Aided Spatial Modulation," in *2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2019, pp. 730–733, doi: 10.23919/ELECO47770.2019.8990645.
- [18] F. Cogen and E. Aydin, "Performance Analysis of HQAM Based Spatial Modulation over Nakagami- m Fading Channels," in *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2020 - Proceedings*, 2020, doi: 10.1109/SIU49456.2020.9302497.
- [19] F. Cogen and E. Aydin, "Cooperative quadrature spatial modulation with Euclidean distance and capacity optimized antenna selection," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 34, no. 1, p. e4663, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/dac.4663>.
- [20] F. Çögen, E. Aydin, N. Kabaoğlu, E. Başar, and H. Ilhan, "A novel MIMO scheme based on code-index modulation and spatial modulation," in *26th IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2018*, 2018, pp. 1–4, doi: 10.1109/SIU.2018.8404646.
- [21] F. Cogen, E. Aydin, N. Kabaoğlu, E. Başar, and H. Ilhan, "Code Index Modulation and Spatial Modulation: A New High Rate and Energy Efficient Scheme for MIMO Systems," in *2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing, TSP 2018*, 2018, doi: 10.1109/TSP.2018.8441230.
- [22] E. Aydin and F. Cogen, "Two-way code index modulation," in *27th Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2019*, 2019, doi: 10.1109/SIU.2019.8806516.
- [23] E. Aydin, F. Cogen, and E. Basar, "Code-Index Modulation Aided Quadrature Spatial Modulation for High-Rate MIMO Systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 10, pp. 10257–10261, 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2928378.
- [24] F. Cogen, E. Aydin, N. Kabaoglu, E. Basar, and H. Ilhan, "Generalized Code Index Modulation and Spatial Modulation for High Rate and Energy-Efficient MIMO Systems on Rayleigh Block-Fading Channel," *IEEE Syst. J.*, pp. 1–8, 2020.
- [25] R. Mesleh, R. Mehmood, H. Elgala, and H. Haas, "Indoor MIMO Optical Wireless Communication Using Spatial Modulation," in *2010 IEEE International Conference on Communications*, 2010, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICC.2010.5502062.
- [26] N. Showme, A. Ramachandran, N. Sekhar, and R. Shankar, "High competence MIMO-OFDM with generalized led index modulation," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 228–230, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i2.31.13448.

- [27] E. Başar, E. Panayirci, M. Uysal, and H. Haas, “Generalized LED index modulation optical OFDM for MIMO visible light communications systems,” in *2016 IEEE International Conference on Communications, ICC 2016*, 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICC.2016.7510821.
- [28] D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, “Light fidelity (Li-Fi): towards all-optical networking,” in *Broadband Access Communication Technologies VIII*, 2013, vol. 9007, p. 900702, doi: 10.1117/12.2044649.
- [29] H. S. Hussein and M. Hagag, “Optical MIMO-OFDM With Fully Generalized Index-Spatial LED Modulation,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 9, pp. 1556–1559, Sep. 2019, doi: 10.1109/LCOMM.2019.2926457.
- [30] H. Kaushal, V. K. Jain, and S. Kar, “Overview of Wireless Optical Communication Systems,” Springer, New Delhi, 2017, pp. 1–39.
- [31] J. Rodríguez Méndez, “Electrical and Electronic, Computers and Systems Engineering Department PhD Programme in Electrical and Electronic Engineering SWITCHING-MODE POWER CONVERTERS FOR VISIBLE LIGHT COMMUNICATION TRANSMITTERS Doctoral thesis,” 2018.
- [32] F. M. MIMS, III, “Alexander Graham Bell and the Photophone: The Centennial of the Invention of Light-Wave Communications, 1880–1980,” *Opt. News*, vol. 6, no. 1, p. 8, Jan. 1980, doi: 10.1364/ON.6.1.000008.
- [33] M. A. Ryan *et al.*, “Monitoring Space Shuttle Air Quality Using the Jet Propulsion Laboratory Electronic Nose,” *IEEE Sens. J.*, vol. 4, no. 3, pp. 337–347, Jun. 2004, doi: 10.1109/JSEN.2004.827275.
- [34] L. Mandrake, B. Wilson, C. Wang, G. Hajj, A. Mannucci, and X. Pi, “A performance evaluation of the operational Jet Propulsion Laboratory/University of Southern California Global Assimilation Ionospheric Model (JPL/USC GAIM),” *J. Geophys. Res.*, vol. 110, no. A12, p. A12306, Dec. 2005, doi: 10.1029/2005JA011170.
- [35] B. Dickey, “Benefits Stemming from Space Exploration,” *ESA Publ.*, no. September, pp. 1–22, 2013.
- [36] F. R. Gfeller and U. Bapst, “Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation,” *Proc. IEEE*, vol. 67, no. 11, pp. 1474–1486, 1979, doi: 10.1109/PROC.1979.11508.
- [37] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical wireless communications: System and channel modelling with MATLAB®*. CRC Press, 2017.
- [38] M. Z. Chowdhury, M. K. Hasan, M. Shahjalal, E. B. Shin, and Y. M. Jang, “Opportunities of Optical Spectrum for Future Wireless Communications,” in *2019 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC)*, 2019, pp. 004–007, doi: 10.1109/ICAIIIC.2019.8668981.
- [39] D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, “Towards a 100 Gb/s visible light wireless access network,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 2, p. 1627, Jan. 2015, doi: 10.1364/OE.23.001627.
- [40] A. Alipour, A. Mir, and A. Sheikhi, “Ultra high capacity inter-satellite optical wireless communication system using different optimized modulation formats,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 127, no. 19, pp. 8135–8143, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.ijleo.2016.06.011.

- [41] R. Alghamdi, N. Saeed, H. Dahrouj, M.-S. Alouini, and T. Y. Al-Naffouri, "Towards Ultra-Reliable Low-Latency Underwater Optical Wireless Communications," in *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, 2019, vol. 2019-Septe, pp. 1–6, doi: 10.1109/VTCFall.2019.8891506.
- [42] M. Z. Chowdhury, M. T. Hossan, A. Islam, and Y. M. Jang, "A Comparative Survey of Optical Wireless Technologies: Architectures and Applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 9819–9840, Jan. 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2792419.
- [43] M. Uysal and H. Nouri, "Optical wireless communications - An emerging technology," in *International Conference on Transparent Optical Networks*, 2014, pp. 1–7, doi: 10.1109/ICTON.2014.6876267.
- [44] I. I. Kim and E. J. Korevaar, "Availability of free-space optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems," in *Optical Wireless Communications IV*, 2001, vol. 4530, p. 84, doi: 10.1117/12.449800.
- [45] A. B. Raj and A. K. Majumder, "Historical perspective of free space optical communications: From the early dates to today's developments," *IET Communications*, vol. 13, no. 16. Institution of Engineering and Technology, pp. 2405–2419, 08-Oct-2019, doi: 10.1049/iet-com.2019.0051.
- [46] A. Malik and P. Singh, "Free Space Optics: Current Applications and Future Challenges," *Int. J. Opt.*, vol. 2015, pp. 1–7, 2015, doi: 10.1155/2015/945483.
- [47] O. Alsulami, A. T. Hussein, M. T. Alresheedi, and J. M. H. Elmirghani, "Optical Wireless Communication Systems, A Survey," Dec. 2018.
- [48] A.-M. Cailean and M. Dimian, "Current Challenges for Visible Light Communications Usage in Vehicle Applications: A Survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2681–2703, 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2706940.
- [49] P. Gawłowicz, E. A. Jarchlo, and A. Zubow, "Practical MIMO for Visible Light Communication," *arXiv*, Feb. 2020.
- [50] A. J. C. Moreira, R. T. Valadas, and A. M. de Oliveira Duarte, "Performance of infrared transmission systems under ambient light interference," *IEE Proc. - Optoelectron.*, vol. 143, no. 6, pp. 339–346, Dec. 1996, doi: 10.1049/ip-opt:19960696.
- [51] Da-Shan Shiu and J. M. Kahn, "Differential pulse-position modulation for power-efficient optical communication," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 8, pp. 1201–1210, 1999, doi: 10.1109/26.780456.
- [52] L. Mingtai, W. Zunfeng, and L. Tao, "Test technique for passive inter-modulation distortion," in *2013 IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 2013, vol. 1, pp. 370–373, doi: 10.1109/ICEMI.2013.6743081.
- [53] O. González, "Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Optical Wireless Communications," in *Optical Communication*, N. Das, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2012.
- [54] 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, pp. 367–379, Apr. 1993, doi: 10.1109/49.219552.
- [55] A. Al-Kinani, C.-X. Wang, L. Zhou, and W. Zhang, "Optical Wireless Communication Channel Measurements and Models," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp.

1939–1962, 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2838096.

- [56] T. Q. Wang, R. J. Green, and J. Armstrong, “MIMO Optical Wireless Communications Using ACO-OFDM and a Prism-Array Receiver,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 9, pp. 1959–1971, Sep. 2015, doi: 10.1109/JSAC.2015.2432520.
- [57] S. Long, M. A. Khalighi, M. Wolf, S. Bourennane, and Z. Ghassemlooy, “Investigating channel frequency selectivity in indoor visible-light communication systems,” *IET Optoelectron.*, vol. 10, no. 3, pp. 80–88, Jun. 2016, doi: 10.1049/iet-opt.2015.0015.
- [58] H. Ma, L. Lampe, and S. Hranilovic, “Coordinated Broadcasting for Multiuser Indoor Visible Light Communication Systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 9, pp. 3313–3324, Sep. 2015, doi: 10.1109/TCOMM.2015.2452254.
- [59] O. Z. Alsulami *et al.*, “Networking and processing in optical wireless,” *arXiv*, Jul. 2019, doi: 10.13140/rg.2.2.29579.03362.
- [60] T. J. Imholt *et al.*, “Nanotubes in Microwave Fields: Light Emission, Intense Heat, Outgassing, and Reconstruction,” *Chem. Mater.*, vol. 15, no. 21, pp. 3969–3970, Oct. 2003, doi: 10.1021/cm034530g.
- [61] G. Butcher, *Tour of the Electromagnetic Spectrum: Ultraviolet Waves*. Washington, DC, USA, 2016.
- [62] M. Saadi and L. Wuttisittikulkij, “Visible Light Communication – The Journey So Far,” *J. Opt. Commun.*, vol. 40, no. 4, pp. 447–453, Oct. 2019, doi: 10.1515/joc-2017-0107.
- [63] A.-D. Lin, S. Z. Poon, H.-W. Tu, C.-Y. Chen, and C.-M. Hsu, “Study on Thermoelectric Conversion and Conjugate Heat Transfer for PCBA by Finite Element Analysis,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 1, p. 197, Dec. 2019, doi: 10.3390/app10010197.
- [64] C. M. Bourget, “An Introduction to Light-emitting Diodes,” *HortScience*, vol. 43, no. 7, pp. 1944–1946, Dec. 2008, doi: 10.21273/HORTSCI.43.7.1944.
- [65] Jinmin LiG. Q. Zhang, *Light-Emitting Diodes*, vol. 4. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [66] S. Pimputkar, J. S. Speck, S. P. DenBaars, and S. Nakamura, “Prospects for LED lighting,” *Nat. Photonics*, vol. 3, no. 4, pp. 180–182, Apr. 2009, doi: 10.1038/nphoton.2009.32.
- [67] P. H. 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. 4, pp. 2047–2077, 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2476474.
- [68] “PTL, Manufacturers of inorganic phosphor powders - Phosphor Technology Ltd.” [Online]. Available: <https://www.phosphor-technology.com/>. [Accessed: 04-Mar-2021].
- [69] S. Al-Waisawy, A. F. George, W. M. Jadwisieniczak, and F. Rahman, “Preparation of balanced trichromatic white phosphors for solid-state white lighting,” *Luminescence*, vol. 32, no. 5, pp. 791–799, Aug. 2017, doi: 10.1002/bio.3253.
- [70] A. Yesilkaya, H. F. Alsan, F. Miramirkhani, E. Panayirci, H. Senol, and M. Uysal, “Modeling of visible light channels and performance analysis of ACO-OFDM,” in *2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2015, pp. 2102–2105, doi: 10.1109/SIU.2015.7130285.

- [71] K. D. Choquette, M. D. Dawson, and F. Koyama, "Introduction to the issue on optoelectronic materials and processing," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 8, no. 4, pp. 737–738, Jul. 2002, doi: 10.1109/JSTQE.2002.804628.
- [72] A. Rogalski, "Comparison of photon and thermal detector performance," in *Handbook of Infra-red Detection Technologies*, Elsevier, 2002, pp. 5–81.
- [73] "Welcome to LE426 homepage." [Online]. Available: <http://pongsak.ee.engr.tu.ac.th/le426/>. [Accessed: 04-Mar-2021].
- [74] S. Donati, *Photodetectors: Devices, Circuits and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd, 2020.
- [75] R. Shaaban and S. Faruque, "Optimized optical wireless channel for indoor and intra-vehicle communications: power distribution and SNR analysis," in *Broadband Access Communication Technologies XII*, 2018, p. 15, doi: 10.1117/12.2292151.
- [76] S. Rajagopal, R. D. Roberts, and S. K. Lim, "IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 3, pp. 72–82, Mar. 2012, doi: 10.1109/MCOM.2012.6163585.
- [77] IEEE Standard Association, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications (802.15.7-2018)," 2011.
- [78] S. Haruyama, "Japan's Visible Light Communications Consortium and Its Standardization Activities," no. Vlcc, 2007.
- [79] L. E. M. Matheus, A. B. Vieira, L. F. M. Vieira, M. A. M. Vieira, and O. Gnawali, "Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3204–3237, 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2913348.
- [80] Z. Rihawi, "Optical wireless channel characterisation in guided structures (vehicle applications)," University of Warwick, 2016.
- [81] F. J. López-Hernández, R. Pérez-Jiménez, and A. Santamaría, "Monte Carlo calculation of impulse response on diffuse IR wireless indoor channels," *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 12, p. 1260, 1998, doi: 10.1049/el:19980825.
- [82] F. J. López-Hernández, R. Pérez-Jiménez, and A. Santamaría, "Modified Monte Carlo scheme for high-efficiency simulation of the impulse response on diffuse IR wireless indoor channels," *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 19, p. 1819, Sep. 1998, doi: 10.1049/el:19981173.
- [83] R. Perez-Jimenez, "Ray-tracing algorithms for fast calculation of the channel impulse response on diffuse IR wireless indoor channels," *Opt. Eng.*, vol. 39, no. 10, p. 2775, Oct. 2000, doi: 10.1117/1.1287397.
- [84] J. B. Carruthers and J. M. Kahn, "Modeling of nondirected wireless infrared channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 10, pp. 1260–1268, 1997, doi: 10.1109/26.634690.
- [85] R. Pérez-Jiménez, J. Berges, and M. J. Betancor, "Statistical model for the impulse response on infrared indoor diffuse channels," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 15, p. 1298, 1997, doi: 10.1049/el:19970866.
- [86] R. Perez-Jimenez, V. M. Melian, and M. J. Betancor, "Analysis of multipath impulse response of diffuse and quasi-diffuse optical links for IR-WLAN," in *Proceedings of*

INFOCOM'95, 1995, vol. 2, pp. 924–930, doi: 10.1109/INFCOM.1995.515965.

- [87] B. Wilson, *Introduction to Physical Electronics*. 2007.
- [88] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, vol. 9780521865. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [89] J. M. Kahn and J. R. Barry, “Wireless infrared communications,” *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265–298, 1997, doi: 10.1109/5.554222.
- [90] E. Sarbazi, M. Uysal, M. Abdallah, and K. Qaraqe, “Ray tracing based channel modeling for visible light communications,” in *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2014, pp. 702–705, doi: 10.1109/SIU.2014.6830326.
- [91] T. Aumeyr *et al.*, “Zemax Simulations of Transition and Diffraction Radiation,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 517, no. 1, p. 012026, May 2014, doi: 10.1088/1742-6596/517/1/012026.
- [92] F. G. Bisesto, M. Castellano, E. Chiadroni, and A. Cianchi, “Zemax simulations describing collective effects in transition and diffraction radiation,” *Opt. Express*, vol. 26, no. 4, p. 5075, Feb. 2018, doi: 10.1364/OE.26.005075.
- [93] H. Park, “Coded Modulation and Equalization for Wireless Infrared Communications,” 1997.
- [94] S. I. Ali, “Employing VLC Technology for Transmitting Data in Biological Tissue (Master’s Thesis),” University of Oulu, 2019.
- [95] T. Cevik and S. Yilmaz, “An Overview of Visible Light Communication Systems,” *Int. J. Comput. Networks Commun.*, vol. 7, no. 6, pp. 139–150, Nov. 2015, doi: 10.5121/ijenc.2015.7610.
- [96] Y. Qiu, H.-H. Chen, and W.-X. Meng, “Channel modeling for visible light communications-a survey,” *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 16, no. 14, pp. 2016–2034, Oct. 2016, doi: 10.1002/wcm.2665.
- [97] Y. Zhuang *et al.*, “A Survey of Positioning Systems Using Visible LED Lights,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 1963–1988, 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2806558.
- [98] H. Lu, Z. Su, and B. Yuan, “SNR and optical power distribution in an indoor visible light communication system,” in *2014 7th International Congress on Image and Signal Processing*, 2014, pp. 1063–1067, doi: 10.1109/CISP.2014.7003937.
- [99] F. Cogen, E. Aydin, N. Kabaoglu, E. Basar, and H. Ilhan, “Generalized Code Index Modulation and Spatial Modulation for High Rate and Energy-Efficient MIMO Systems on Rayleigh Block-Fading Channel,” *IEEE Syst. J.*, pp. 1–8, Jun. 2020, doi: 10.1109/JSYST.2020.2993704.
- [100] M. Wen, X. Cheng, and L. Yang, *Index Modulation for 5G Wireless Communications*. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [101] G. Kaddoum, Y. Nijsure, and H. Tran, “Generalized Code Index Modulation Technique for High-Data-Rate Communication Systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 9, pp. 7000–7009, Sep. 2016, doi: 10.1109/TVT.2015.2498040.
- [102] Fatih Çögen, “Kod indis modülasyonu tabanlı uzaysal modülasyon tekniğinin tasarım ve performans analizi (Yüksek Lisans Tezi),” T.C. İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 2020.

- [103] T. Fath and H. Haas, “Optical spatial modulation using colour LEDs,” in *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2013, pp. 3938–3942, doi: 10.1109/ICC.2013.6655173.
- [104] T. Fath, J. Klaue, and H. Haas, “Coded spatial modulation applied to optical wireless communications in indoor environments,” in *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2012, pp. 1000–1004, doi: 10.1109/WCNC.2012.6213919.
- [105] S. Dimitrov and H. Haas, *Principles of LED Light Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [106] A. Yesilkaya, E. Basar, F. Miramirkhani, E. Panayirci, M. Uysal, and H. Haas, “Optical MIMO-OFDM with Generalized LED Index Modulation,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 8, pp. 1–1, Aug. 2017, doi: 10.1109/TCOMM.2017.2699964.

