



**GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİNDE
MODÜLASYON TÜRLERİNİN İNCELENMESİ**

PINAR UZUN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
Dr. Öğr. Üyesi Levent GÖKREM
Temmuz - 2019
Her hakkı saklıdır**

T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİNDE MODÜLASYON
TÜRLERİNİN İNCELENMESİ

PINAR UZUN

TOKAT
Temmuz - 2019

Her hakkı saklıdır

Pınar UZUN tarafından hazırlanan “**Görünür Işık Haberleşmesinde Modülasyon Türlerinin İncelenmesi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 12 TEMMUZ 2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Dr. Öğretim Üyesi Levent GÖKREM
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi

Üye
Dr. Öğretim Üyesi Mahir KAYA
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi

Üye
Dr. Öğretim Üyesi Uğur ERKAN
Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi


.....

.....

.....



TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdđiđi yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

PINAR UZUN

12 TEMMUZ 2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİNDE MODÜLASYON TÜRLERİNİN İNCELENMESİ

PINAR UZUN

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:DR. ÖĞR. ÜYESİ LEVENT GÖKREM)

İnsanlık tarihinin en önemli sosyal etkinliği olan haberleşme, gelişen teknolojiler ile farklı bir boyuta ulaşmıştır. Öyle ki sadece insanlar değil elektronik cihazlar arasında dahi bir haberleşme söz konusu haline gelmiştir. Yakın zamanda, verimli ve güvenli haberleşme sağlaması, az enerji tüketimi ile Görünür Işık Haberleşmesi (VLC) dikkatleri üzerine çekmiştir. Işık yayan diyotların (LED) haberleşme ve aydınlatma gibi iki farklı amaçla aynı anda kullanılabilmesi özellikle kapalı alanlarda büyük avantaj olarak görülmektedir. Bu avantajlardan faydalanmak için dünya genelinde VLC üzerinde yapılan çalışmalar diğer kablosuz haberleşme türlerine kıyasla yoğunluk kazanmıştır ve birçok farklı başlık altında devam etmektedir. Bu başlıklardan biri olan modülasyon ise VLC sistemlerinde veri aktarımı için önemli bir konudur. Birçok farklı modülasyon türleri haberleşmede kullanılsa dahi ışığın doğası gereği Yoğunluk Modülasyonu/Doğrudan Sezim (IM/DD) tekniğinin kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle kullanılacak modülasyon yöntemi hem ışığın doğasına uygun hem de verimli haberleşme sağlayacak şekilde belirlenmelidir. Bu çalışmada VLC hakkında temel bilgilerden bahsedilmiş, kullanılacak modülasyon türleri incelenmiştir. Ayrıca Optisystem benzetim yazılımı ile iki farklı modülasyon türü için sistem özellikleri incelenmiştir.

2019, 65 SAYFA

ANAHTAR KELİMELER: Haberleşme, Görünür Işık Haberleşmesi, Modülasyon, Yoğunluk Modülasyonu, Doğrudan Sezim, Bit Hata Oranı, Sinyal Gürültü Oranı

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF MODULATION TYPES IN VISIBLE LIGHT COMMUNICATION

PINAR UZUN

**TOKAT GAZIOSMANPASA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

DEPARTMENT OF MECHATRONICS ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASST. PROF. DR. LEVENT GÖKREM)

Communication, which is the most important social activity in the history of humanity, has reached a different dimension with developing technologies. So much so that not only among people, but also even electronic devices communication has become common. Recently, Visible Light Communication (VLC) has attracted attention with its efficient and secure communication and low energy consumption. The fact that light emitting diodes (LEDs) can be used simultaneously for two different purposes such as communication and illumination provides a great advantage, especially in confined spaces. In order to take advantage of these advantages, studies on VLC have been intensified compared to other types of wireless communication and continues under many different headings. Modulation, which is one of these topics, is an important issue for data transfer in VLC systems. Even if many different modulation types are used in communication, it is necessary to use Intensity Modulation / Direct Detection (IM / DD) technique because of the nature of light. For this reason, the modulation method to be used should be determined both in accordance with the nature of the light and to ensure efficient communication. In this study, basic information about VLC is mentioned and the modulation types that can be used are examined. Also the system properties for two different modulation types were examined with Optisystem simulation software.

2019, 65 PAGE

KEYWORDS: Communication, Visible Light Communication, Modulation, Intensity Modulation, Direct Detection, Bit Error Rate, Signal Noise Ratio

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca beni sabırla destekleyen sayın hocam, Dr. Öğretim Üyesi Levent GÖKREM'e, hayatım boyunca bana her zaman destek olan aileme ve bu süreçte yanımda olan arkadaşlarıma teşekkür ve minnetimi sunarım.

Pınar UZUN

12 TEMMUZ 2019



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Literatür Araştırması	4
2.2. Haberleşme Sistemleri	7
2.3. Görünür Işık Haberleşmesi.....	12
2.4. Görünür Işık Haberleşmesi İçin Standartlar	17
2.5. Görünür Işık Haberleşmesi İçin Modülasyon.....	22
2.5.1. Optik modülatörler	23
2.5.2. Tek taşıyıcılı modülasyon	26
2.5.3. Çok taşıyıcılı modülasyon	32
2.5.4. Işığa bağlı özel modülasyon	35
2.5.5. Çoklu erişim metotları.....	37
3. MATERYAL ve YÖNTEM	39
3.1. Materyaller	39
3.1.1. Verici	39
3.1.2. Alıcı	42
3.1.3. Kanal.....	43
3.2. Yöntem.....	44
3.2.1 Kullanılan bileşenler	44
3.2.2 OOK-NRZ modülasyonu ile VLC sistemi	51
3.2.3. M-QAM-OFDM modülasyonu ile VLC sistemi.....	51
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	54
4.1. OOK-NRZ VLC Sistemi	54
4.2. M-QAM-OFDM VLC Sistemi	55

5. SONUÇ ve ÖNERİLER	58
6. KAYNAKLAR	60
7. ÖZGEÇMİŞ	66



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

B	Bit
m	Metre
cm	Santimetre
Lm	Lümen
nm	Nanometre
Rx	Alicı
Tx	Verici
W	Watt
μ	Mikro

Kısaltmalar

Açıklama

APD	Avalanche Photo Diode
BER	Bit-Error-Rate
CC	Convolutional Codes
CSK	Color Shift Keying
DMT	Discrete Multi Tone
EMI	Electromagnetic Interference Immunity
FEC	Forward Error Correction
FOV	Field of View
FSK	Frequency Shift Keying
FSO	Free Space Optics
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IM/DD	Intensity Modulation /Direct Detection
ISI	Inter Symbol Interference
ISM	Industrial Science Medical
kbps	Kilo bit per second
LD	Laser Diode
LED	Light Emitting Diode

LOS	Line of Sight
LI-FI	Light Fidelity
MAC	Media Access Control
MCM	Multi Carrier Modulation
Mbps	Mega bit per second
MIMO	Multi Input Multi Output
NLOS	Non Line of Sight
NRZ	Non Return Zero
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OOK	On-Off Keying
OWC	Optical Wireless Communication
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PHY	Physical
PIN	Positive Instrict Negative
PPM	Pulse Position Modulation
PWM	Pulse Width Modulation
RGB	Red Green Blue
RLL	Run Length Limited
RF	Radio Frequency
RS	Reed Solomon
RZ	Return Zero
SCM	Single Carrier Modulation
SNR	Signal-Noise-Ratio
Sym	Sembol
VLC	Visible Light Communication
QAM	Quadrature Amplitude Modulation

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Elektromanyetik Spektrometre ve Görünür ışık aralığı.....	2
Şekil 2.1. Algılanan ışığın ölçülen ışığa göre grafiği	18
Şekil 2.2. Farklı topoloji türleri	21
Şekil 2.3. Modülasyon işlemi	22
Şekil 2.4. Örnek OOK-NRZ ve OOK-RZ grafiği.....	27
Şekil 2.5. PWM, PPM, VPPM, OPPM ve MPPM modülasyon tekniklerinin farkı	30
Şekil 2.6. 4-QAM ve 16-QAM için takımuydu dağılım grafiği	32
Şekil 2.7. DCO-OFDM, ACO-OFDM, PAM-DMT ve U-OFDM modülasyon türleri arasındaki performans karşılaştırılması.....	34
Şekil 2.8. CIE 1931 Kromatiklik şeması	36
Şekil 3.1. VLC sistem yapısı	39
Şekil 3.2. Farklı LED türleri	41
Şekil 3.3. Farklı bağlantı şekilleri.....	44
Şekil 3.4. Kullanıcı Tanımlı Bit Dizi Üreteci (a) ve PRBSG (b).....	45
Şekil 3.5. NRZ Darbe Üreteci.....	45
Şekil 3.6. Osiloskop Görüntüleyici.....	45
Şekil 3.7. LED	46
Şekil 3.8. FSO Kanal	46
Şekil 3.9. Alçak Geçiren Bessel Filtresi	46
Şekil 3.10. 3R Rejeneratör	47
Şekil 3.11. BER Analizörü	47
Şekil 3.12. Göz Diyagramı Analizörü	47
Şekil 3.13. QAM Dizi Üreteci	48
Şekil 3.14. Elektriksel Takımuydu Görüntüleyici	48
Şekil 3.15. OFDM Modülasyon.....	48
Şekil 3.16. Alçak Geçiren Kosinüs Filtresi.....	49
Şekil 3.17. Dördül Modülatör	49
Şekil 3.18. PIN fotodiyot	49
Şekil 3.19. Dördül Demodülatör	50

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.20. OFDM Demodülatör.....	50
Şekil 3.21. QAM Dizi Dekoderi	50
Şekil 3.22. OOK-NRZ sistemi.....	51
Şekil 3.23. M-QAM-OFDM VLC sistemi için BER değeri	52
Şekil 3.24. M-QAM-OFDM Verici Sistemi ve Kanalı.....	53
Şekil 3.25. M-QAM-OFDM Alıcı Sistemi	53
Şekil 4.1. OOK-NRZ VLC sisteminin BER grafiği	54
Şekil 4.2. OOK-NRZ VLC sistemi için göz diyagramı.....	55



ÇİZELGE LİSTESİ

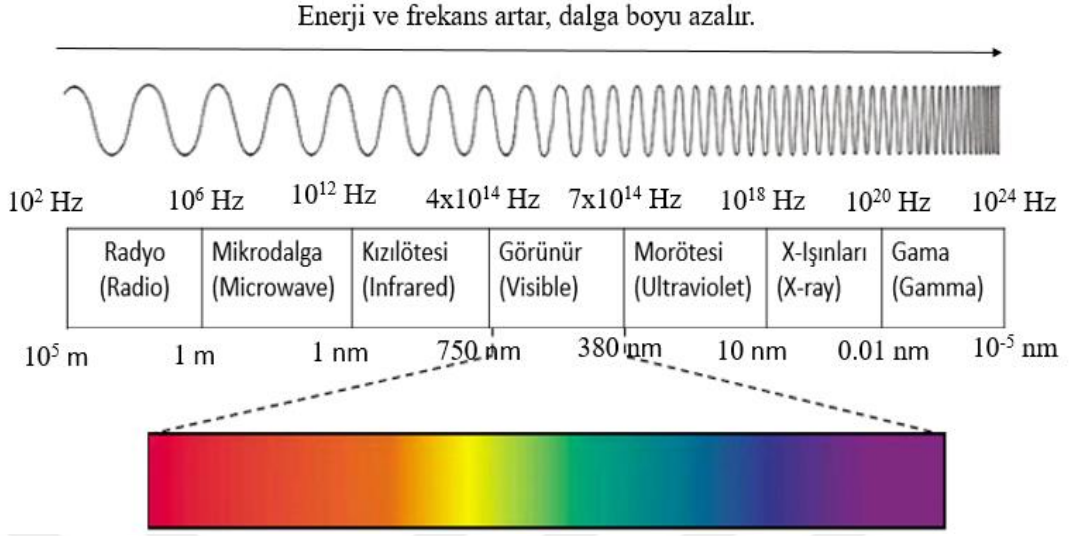
<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. RF Bant kullanım aralıkları	9
Çizelge 2.2. VLC ve RF haberleşme sistemlerinin karşılaştırılması	14
Çizelge 2.3. CSK'da kullanılan yedi banda ait renk kodu, merkez ve kromatik koordinatlar.....	37
Çizelge 2.4. Farklı modülasyon türlerinin BER, SNR ve veri oranı değerlerine göre karşılaştırılması (Wang ve ark., 2012), (Elgala ve ark., 2009).....	37
Çizelge 3.1. PIN ve APD fotodiyotların karşılaştırılması (Hranilovic, 1988).....	42
Çizelge 3.2. M değeri ile Görev döngüsü ilişkisi (Wang ve ark., 2012)	52

1. GİRİŞ

Haberleşme, canlılar için geçmişten günümüze önemli bir ihtiyaç iken günümüz şartlarında, gelişen teknoloji ile cihazlar için de önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu nedenlerle üzerinde sürekli olarak çalışmalar yapılan bir alandır. Ayrıca günümüzde veri oranlarının artması, yüksek veri iletim hızına ihtiyaç duyulması gibi koşullar da haberleşme sistemleri üzerinde çalışmayı gerektirmektedir. Temel haberleşmenin üzerine uzun mesafeler arasında daha hızlı haberleşmeyi sağlamak için kablolar yardımı ile bir haberleşme hattı kurulmuş olsa da; kabloların neden olduğu kalabalık, maliyet fazlalığı, bakım ihtiyaçları günümüz koşullarında dezavantaj olarak görülmeye başlanmıştır. Bu nedenle kablosuz haberleşme sistemleri önem kazanarak, üzerinde yoğun olarak çalışılan bir alan haline gelmiştir.

Günümüzde yaygın olarak ve birçok farklı alanda kullanılan kablosuz haberleşme sistemleri çoğunlukla Radyo Frekans (RF) tabanlıdır. RF, elektromanyetik spektrumda 3 kilohertz (kHz) 'den 300 Gigahertz (GHz) 'e kadar olan aralığı kapsar. Ancak RF bandındaki spektrum tahsisi hem ulusal hem de uluslararası düzeyde düzenlenmiştir ve RF bandının bir alt bandını kullanmak için lisans gerekmektedir (Uysal ve Nouri, 2014). Bu durum RF tabanlı kablosuz haberleşmeyi sınırlı bir aralıkta tutarak kullanımını kısıtlar. Ayrıca günümüzdeki yüksek veri oranı ile bu aralığın dolmak üzere olması da sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sorunu çözmek ve kısıtlamaların önüne geçebilmek için RF tabanlı haberleşmeye alternatif teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Elektromanyetik spektrometreye bakıldığında (Şekil 1.1) geniş ve lisanslandırılmamış bir bant aralığına sahip olan görünür ışık bandı dikkatleri üzerine çekmektedir. Burada frekans aralığı 430 THz - 750 THz olması nedeniyle veri iletimi belirli bir zaman aralığında sonsuz genişliğe sahiptir (Ertuna, 2016). Bu nedenler ile son yıllarda Görünür Işık Haberleşmesi (Visible Light Communication – VLC) üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır.



Şekil 1.1. Elektromanyetik Spektrometre ve Görünür ışık aralığı

VLC’de bilgi ışık sinyali aracılığıyla aktarılır. Yani VLC’de aydınlatma ve haberleşme gibi iki ihtiyaç aynı anda karşılanabilir. Bu da enerji tüketimini belirli bir oranda tutarak, ekonomik bir haberleşme olanağı sunar. Ayrıca ışık, duvar ve benzeri opak (ışığı geçirmeyen, saydam olmayan) engellerden geçemeyeceği için veri güvenliği de kolaylıkla sağlanabilir. Aydınlatma ve haberleşme için kullanılan ışık yayan diyotların (Light Emitting Diode – LED) insan sağlığına herhangi bir zararı da bulunmamaktadır. Bu nedenlerle VLC, özellikle kapalı alanlarda ekonomik, güvenli ve sağlıklı haberleşme imkânı sağlayan bir teknoloji olarak anılabilir. RF tabanlı haberleşme sistemleri ile karşılaştırıldığında özellikle kapalı alanlarda büyük avantajlara sahip olan VLC’nin birçok farklı kullanım alanı ile hayatımızda yerini almaya başladığı ve daha da geliştirilmesi için üzerinde çalışmaların devam ettiği görülmektedir.

VLC’de bilginin ışık sinyali ile iletilmesi bilginin modüle edilmesi ile gerçekleşir. Bilginin iletilmesi için optik haberleşme sistemlerinde optik sinyalin yoğunluğu birçok farklı şekilde modüle edilebilir. VLC’de verici olarak aydınlatma elemanları ve alıcı olarak fotodedektör kullanılması ile veri, yoğunluk modülasyonu/doğrudan sezim (IM/DD) yöntemine göre modüle edilmelidir (Yeşilkaya ve ark., 2015). Bu nedenle ışığın doğasına bağlı olarak optik bilgi sinyalinin, gerçel (reel) ve pozitif değerli olması gerekmektedir. Ayrıca VLC sistemlerinin gerçekleştirilmesinde karartma ve titreşim

gibi zorluklar da karşımıza çıkmaktadır. Bu zorluklar VLC sistemlerinde modülasyon işlemlerini kısıtlayan, çözülmesi gereken birer problem olarak karşımıza çıkar. Bu amaçla da farklı optik modülasyon yöntemleri bulunmaktadır. Günümüzde artan veri oranı ve veri iletimindeki yüksek hız ihtiyacı da modülasyon türlerini yetersiz kılan bir problemdir. Bu nedenle modülasyon türleri üzerinde çalışmalar da VLC sistemleri üzerindeki çalışmalara paralel olarak devam etmektedir.

Bu tezde içerik olarak kuramsal temeller başlığı altında, haberleşmenin tarihçesinden kısaca bahsedilerek kablosuz haberleşmenin gerekliliği ve kullanım alanlarından bahsedilmiştir, günümüzde yaygın olarak kullanılan RF tabanlı haberleşme sistemlerine değinilerek olumlu ve olumsuz yönleri gözden geçirilmiştir. Daha sonra VLC hakkında bilgiler verilerek, günlük hayatta kullanılabilecek alanlara örnekler verilmiştir. VLC sisteminin gerçekleştirilmesi için fiziksel katman standartları ve özellikleri açıklanarak, titreşimin azaltılması, karartma desteği gibi önemli konular vurgulanmıştır. VLC için önemli kavramlar olan Bit-Hata-Oranı (Bit-Error-Rate - BER), Sinyal Gürültü Oranı (Signal Noise Ratio - SNR) açıklamıştır. VLC sistemleri için optik modülasyonun gerekliliği ve kullanılabilecek modülasyon türlerinden bahsedilmiştir. Materyal ve yöntemler başlığı altında VLC için kullanılan optik alıcı ve vericilerin yapı ve özellikleri gösterilerek, optik kanal açıklanmıştır. Ayrıca deneysel sonuçları elde etmek için kullanılan Optisystem isimli program ve burada kullanılan bileşenler gösterilmiştir. Açma – Kapama anahtarlama (On-Off Keying – OOK) gibi temel bir modülasyonun yanında Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) gibi karmaşık ama verimli olarak göz önüne çıkan bir modülasyon için kurulan benzetim sistemi açıklanmıştır. Bulgular ve tartışma başlığı altında ise yapılan benzetimler sonucu elde edilen ilgili sonuçlar grafiksel olarak gösterilerek açıklanmıştır. Sonuç ve Öneriler başlığı altında ise VLC ve VLC modülasyon türleri için yapılan benzetim sonucuna bağlı olarak ulaşılan bilgiler açıklanarak daha sonraki çalışmalar için neler yapılabileceğine değinilecektir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Literatür Araştırması

Gelişen teknoloji ile son yıllarda yüksek hızlı, verimli kablosuz haberleşme en temel gereksinimlerimizden biri haline gelmiştir. Bu nedenle kablosuz haberleşme sistemleri üzerine yoğun olarak çalışmalar yürütülmektedir. Ancak kablosuz mobil haberleşme sistemlerindeki veri hızlarının üst sınırı Shannon tarafından belirlenmiştir ve bu sınır iletişimin bant genişliğine bağlıdır (Shannon, 1998). Son zamanlarda giderek artan veri oranı ile bu bant aralığı dolmaktadır.

Günümüzde kablosuz haberleşme sistemleri çoğunluk RF tabanlı ve kısıtlıdır. Gelişen teknolojiler ile bilgiye hızlı ve verimli ulaşma ihtiyacı nedeniyle RF frekans bandı dolmak üzeredir. Bu doluluk nedeniyle 5. Nesil (5G) sistemler için yeterli bir frekans aralığı belirlemek zor olacağı öngörülmektedir. Dolayısıyla alternatif teknolojilere ihtiyaç duyulmuş ve buna yönelik çalışmalar başlatılmıştır. Bu çalışma alanlarından biri de optik kablosuz haberleşme sistemlerinin alt başlığı olan VLC'yi kapsar. VLC'nin geçmişi eski medeniyetlere dayanmaktadır (Elgala, 2010). Eski medeniyetlerde ateş ve dumanın kullanılması VLC sistemine örnek olarak sayılabilir. Teknik olarak ise 1880 yılında Graham Bell tarafından güneş ışığı demetine telsiz telefon mesajı yükleyerek 213 metre uzağa gönderilmesi VLC'nin en önemli örneği olarak sayılabilir (Gfeller ve Bapst, 1979). VLC ortaya çıkışında pek ilgi görmemiştir ancak 2011 yılında Harald Haas'ın Li-Fi teknolojisini tanıtmaları ile ilgileri yeniden üzerine çekmiştir. Modülasyon ise veri aktarımında en önemli kavramlardan biridir. Çünkü VLC sisteminin verimini, performansını belirleyen etkenler modülasyon ile iyileştirilebilir. VLC ve modülasyon türleri üzerine çalışmalar birçok farklı şekilde devam etse bile yetersiz görülmektedir ve bu nedenle çalışmalar devam etmektedir.

VLC'de bilgi, ışık yayan diyot (LED) ya da lazer diyot (Laser Diode - LD) gibi ışık kaynaklarının insan gözünün algılayamayacağı şekilde hızlı bir yoğunluk modülasyonu ile aktarılır (Komine ve Nakagawa, 2004). Işığın doğasına bağlı olarak, VLC sistemlerinde bilginin IM/DD yöntemine göre iletilmesi sistemde kullanılacak

modülasyon türlerini kısıtlamakta olduğu görülmektedir. Modülasyon türleri ile ilgili yapılan çalışmalarda ilk olarak, tek taşıyıcılı sistem olarak sadece açma-kapama anahtarlama (On-Off Keying, OOK) ve darbe konum modülasyonu (Pulse Position Modulation, PPM) kullanıldığı görülmektedir (Yeşilkaya ve ark., 2015). Bu modülasyon türleri ile yapılan çalışmalarda yüksek bant verimliliğine ulaşılmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle daha yüksek bant verimliliği elde etmek amacıyla, tek taşıyıcılı ve çok seviyeli olan darbe genlik modülasyonu (Pulse Amplitude Modulation, PAM) ile çalışmalar yapılmıştır (Elgala ve ark., 2011). Artan veri oranı ve veri iletim hızlarının yetersizliği, güvenilir ve çok taşıyıcılı modülasyon türlerine ihtiyaç doğurmuştur. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda modülasyon türleri VLC için hassas bir konu olduğundan bu konu üzerinde çalışmalara yoğunluk verilmiştir. Graham Bell'in 1880'deki çalışması ilk sırada sayılmak üzere diğer çalışmalar incelendiğinde başlıca olanları aşağıda sıralanmıştır;

LED'lerin hızlı anahtarlanmasının yanı sıra görünür ışığın haberleşme için modüle edilmesi kavramı 1999 yılında ilk olarak ortaya çıkmıştır (Pang ve ark., 1999). 2001 yılında, RONJA (Reasonable Optical Near Joint Access) 1.4 kilometre mesafeden saniyede 10 Mb veri aktarımı için görünür ışık ışınlarını kullanmıştır (Kulhavy, 2001). Aydınlatma ve haberleşme için beyaz LED'lerin (White LED - WLED) kullanılması Japonya'da 2000'li yılların başında Keio Üniversitesi'nde yapılan çalışmalar ile şekillenmeye başlamıştır (Tanaka ve ark., 2000). Daha sonra 2003 yılında VLC teknolojisini tanıtmak ve standartlaştırmak için Görünür Işık İletişim Konsorsiyumu (Visible Light Communication Consortium - VLCC) kuruldu (Anonim, 2003). VLCC, VLC teknolojisini ofis ve evlerde kullanılan LED aydınlatma ürünlerine, ticari aydınlatma ürünlerine, trafik lamba ve sinyallerine, ev aletlerindeki küçük aydınlatma elemanları ile birleştirerek bir standart elde etmeye çalışmıştır. İç mekan konumlaması ve POS/müşteri veri alışverişi dahil ticari uygulamalar için Görünür Işık Kimlik Sistemi (Visible Light ID), Japonya Elektronik ve Bilgi Teknolojileri Endüstrileri Birliği (Japan Electronics and Information Technology Industries Association - JEITA) tarafından standartlaştırılmıştır. "Görünür Işık ile Haberleşme Sistem Standardı" ve "Görünür Işık ID Sistem Standardı" adı verilen ulusal standartlarla standardize edilen bu standartlar JEITA tarafından sırasıyla JEITA CP-1221 ve JEITA CP-1222 olarak adlandırılarak

kabul edilmiştir (Anonim, 2007). Avrupa'daki ev kullanıcıları için gigabit veri oranlarını sağlamayı hedefleyen hOME Gigabit Access projesi (OMEGA), mevcut kablosuz RF teknolojilerini desteklemek için uygun bir Optik Kablosuz (OW) teknoloji geliştirmiştir (Grubor ve ark., 2008). Kablosuz Kişisel Alan Ağları (WPAN) için IEEE 902.15 çalışma grubu tarafından 2011 yılında VLC için ilk IEEE standardı olan 802.15.7 yayınlandı (Anonim, 2011). Daha sonra 2014'te toplanan çalışma grubu tarafından IEEE 802.15.7r1 revizyonu yayınlandı (Anonim, 2014).

VLC için gerçekçi bir kanal modelinin oluşturulması için yapılan çalışmaların yanı sıra önemli bir konu olan modülasyon için de çalışmalar devam etmektedir. 2009 yılında basit, birinci dereceden bir analog eşitleyici kullanılarak açma-kapama anahtarlama sıfıra dönüşsüz (On-Off Keying Non-Return to Zero – OOK-NRZ) modülasyonu ile 100 Mbps veri hızı elde edilmiştir (Minh ve ark., 2009). Yine 2009 yılında alıcı olarak fotodiyot kullanılan bir VLC sisteminde OOK modülasyonu kullanılarak 5 metre (m) mesafede 125 Mbps ve OFDM ile 0.7 m'de 200 Mbps veri hızına ulaşıldığı rapor edilmiştir (Vucic ve ark., 2009a, b). 2x1 beyaz LED dizisi ve 3x3 fotodetektör dizisinden oluşan çoklu giriş çoklu çıkışlı bir OFDM (Multiple Input Multiple Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing – MIMO-OFDM) VLC sistemi kurularak, 1 m gibi bir mesafede 220 Mbps iletim hızına ulaşılmıştır ve eğer çığ fotodiyodu (Avalanche Photo Diode – APD) kullanılırsa bu oranın artabileceği önerilmiştir (Azhar ve ark., 2010). Yine 2010 yılında yapılan çalışmalar ile OOK modülasyonlu sistemin veri hızı 230 Mbps'ye ulaşırken, OFDM tabanlı sistemin veri hızı 513 Mbps'ye yaklaşmıştır (Vucic ve ark., 2010). 2012 yılında ise tek bir LED tabanlı VLC sisteminin en yüksek veri iletim hızı OFDM kullanılarak 1 Gbps'ye ulaştığı görülmüştür (Khalid ve ark., 2012). Buna ek olarak, VLC sistemlerine taşıyıcısız genlik ve faz (Carrierless Amplitude and Phase – CAP) modülasyonu uygulanarak 1.1 Gbps veri hızına ulaşılmıştır (Wu ve ark., 2012). Bir MIMO – OFDM yapısı kullanılarak, 4 ayrı LED'in verici olarak kullanıldığı ve 3x3 alıcı dizisi ile oluşturulan 4x9 VLC sisteminde veri iletim hızının 1.1 Gbps'ye ulaştığı tespit edilmiştir (Azhar ve ark., 2013). Mavi filtreleme ve eşitleme sonrası ile hazırlanan devre aracılığıyla VLC sistemi; 340 Mb/s'ye kadar OOK-NRZ modülasyonu ile veri iletimi sağlayan 151 MHz'lik bir bant genişliği elde edilmiştir. Bu sistem 1 Watt'lık Beyaz LED kullanılarak 43 santimetre

(cm) mesafeden çalıştırılmıştır (Li ve ark., 2014). Eşitleme öncesi ve sonrası teknikler kullanılarak, OFDM modülasyonu ile 0.05 m mesafeden 3 Gb/s veri hızına ulaşılmıştır (Tsonev ve ark., 2014). Farklı modülasyon türlerinin VLC sistemleri için kullanılabilirliği gözlemlenirken, bu modülasyon türlerinin karşılaştırılmaları, düşük BER oranı elde etmeleri de önem kazanmıştır. OFDM ve OFDMA sistemleri karşılaştırılarak OFDMA sistemlerinde veri aktarımının OFDM sistemlerine göre daha zor olduğu da yapılan çalışmalarla gözlemlenmiştir (Öztürk, 2016). OOK gibi basit ve temel bir modülasyona karşılık FSK modülasyonu ile gerçekleştirilen iki farklı sistem üzerinde yapılan araştırmalar sonucu OOK modülasyonunun daha düşük maliyetli ve verimli olduğu gözlemlenmiştir (Netsianda ve ark., 2017).

Güncel makaleler, çalışmalar incelendiğinde; haberleşme sistemlerinde VLC ve modülasyon türlerinin ilgi çektiği ve birçok farklı çalışmalara konu olduğu gözlemlenmiştir. Gözlemlenen bilgiler ışığında VLC'nin, RF teknolojisi yerine alternatif bir haberleşme sistemi olarak karşımıza çıktığı kaçınılmazdır. VLC ile başlıca; kapalı alanlarda internet erişimi (Zhu ve ark., 2015), veri aktarımı (Bouchet ve ark., 2010), konum belirleme (Karunatilaka ve ark., 2015) gibi işlemler gerçekleştirilebileceği gibi açık alanlarda trafik ışıkları ile trafik durumu bilgisinin araçlara aktarılmasının (Uysal ve ark., 2015) yanı sıra ileride yapılacak çalışmalar ile VLC'nin farklı alanlarda da uygulanabileceği ön görülmektedir (Sarbazı ve ark., 2014). Aynı zamanda farklı modülasyon türleri ile VLC sistemleri kurularak daha uzun mesafelere, kısa sürede daha fazla veri aktarılması gibi verimlilik arttırmaya yönelik çalışmalar ile bu kullanım alanlarının desteklenmesi gerekmektedir.

2.2. Haberleşme Sistemleri

Haberleşme insanın en önemli sosyal ihtiyaçlarından biridir. Bu nedenle ateş, duman, mağara duvarlarına çizimler yapma, ses işaretleri gibi ilkel yöntemlerle başlayan haberleşme, zaman içerisinde, gelişen teknoloji ile daha önemli bir hale gelmiştir. İnsan hayatını daha kolaylaştıran sistemler üzerinde haberleşmenin kullanılması, haberleşme aracılığıyla birçok ihtiyacın karşılanması ile bu sistemlerinin geliştirilmesi ve ilerlemesi için çalışmalara ağırlık verilmiştir. Kızılderililerin dumanla haberleşmeleri en ilkel ve

en eski haberleşme sistemlerinden biri olarak düşünülürse günümüzdeki haberleşme sistemleri aşırı gelişmiş durumda olduğu görülmektedir. Ancak yine de yeterli görülmeyp üzerinde yoğun olarak çalışmalar devam etmektedir.

Haberleşme sistemleri birçok farklı şekilde gerçekleştirilebilse de kablolu ve kablosuz haberleşme olarak 2 ana gruba ayrılarak incelenebilir. Bilgi sinyallerinin aktarılması için metal veya fiber kabloların kullanıldığı, uzun mesafeler için yüksek maliyetlere neden olan ve kısa mesafeler içinse kalabalık bir veri trafiğinin altından kalkmak için fazla görüntü kirliliği oluşturan kablolu haberleşme, verimli ve yeterli olarak görülmemiştir. Ayrıca giderek artan veri oranlarına karşılık veriye hızlı bir biçimde ulaşma ihtiyacı da kablolu sistemler yerine kablosuz haberleşme sistemlerini önemli bir çözüm olarak karşımıza çıkarmıştır. Bu nedenle kablosuz haberleşme sistemleri ilgileri üzerine çekerek birçok farklı çalışma alanlarına konu olmuştur. Kablosuz haberleşme sistemleri, ağırlıklı olarak Radyo Frekansı (Radio Frequency – RF) tabanlıdır. RF bandı üzerinde çalışmalar; 1820 yılında Hans Christian Orsted'in elektrik akımının manyetik alan oluşturduğunu keşfetmesi ile başlamış, Michael Faraday, André-Marie Ampère ve James Clerk Maxwell'in çalışmaları ile genişletilmiş ve matematiksel olarak temelleri atılmıştır (Mahon, 2003). RF tabanlı ilk uzun mesafeli kablosuz ve ticari haberleşme Marconi tarafından 1902 yılında, Atlas Okyanusu üzerinden gerçekleştirilmiştir (Falciassecca ve Valotti, 2009). Böylece kablosuz haberleşmenin kullanım yeterliliği görülmüş ve önemi anlaşılmış, üzerinde daha birçok farklı çalışma yapılmış ve kablosuz haberleşmeyi gerçekleştirmek amacıyla farklı sistemler geliştirilmiştir. Bu çalışmalar ile kablosuz haberleşme sistemleri günümüze kadar kapasitesi ve kullanım alanları artarak gelmiştir. Yine de büyük çoğunluğu RF tabanlı olan bu sistemler incelenir ve karşılaştırılırsa karşımıza birçok avantajın yanı sıra dezavantaj olarak sorun ve eksikliklerin çıkmakta olduğu görülmektedir.

Kablosuz haberleşmenin kullanıcı ve kullanılan sisteme hareketlilik özelliği kazandırması ile hayatımızın hemen hemen her anında kullanılması ihtiyacını doğurmuştur. Bu nedenle kısa mesafeler arasındaki haberleşme imkânlarının sınırları zorlanarak daha uzun mesafelerde haberleşme hedeflenmiş ve bu amaçla çalışmalar yürütülmüştür. Gelişen teknoloji ile kablosuz haberleşme sistemleri birçok farklı alanda

kullanılmaya başlanmıştır. Uzaktan kontrol edilebilen insansız araçlar, akıllı ev sistemleri, akıllı trafik lambaları gibi birçok örnek sayılabilir. Birden farklı kablosuz haberleşme türünden hangisinin kullanılacağı ise uygulamanın gerektirdiği kapsama alanı, verimli enerji kullanımı, maliyet gibi çeşitli özelliklere göre belirlenir.

Yaygın olarak kullanılan kablosuz haberleşme sistemleri, kullanım alanları, yeterlilikleri ve kısıtlarına göz gezdirerek bizim için olumlu ve olumsuz yanları incelenebilir. Bu amaçla ilk olarak çoğu kablosuz haberleşme sistemini içeren RF teknolojisinden bahsetmek gerekir. RF teknolojisi elektromanyetik spektrumda 3 kHz ile 300 GHz aralığında bulunan elektromanyetik dalgalar üzerinden haberleşmeyi sağlar. Geniş bir bant aralığına sahip gibi görünse de uluslararası ve ulusal düzeyde bu aralığın lisanslandırılmış olması RF teknolojisinin kullanım alanlarını oldukça kısıtlamaktadır. Özellikle amatör uygulamalar için yani kullanıcı için lisans gerektirmeyen bant aralığı oldukça kısıtlıdır.

Çizelge 2.1. RF Bant kullanım aralıkları

RF Bant				
İsmi	Sembolü	Aralığı	Dalga Boyu	Kullanım Alanları
Very Low Frequency	VLF	3 kHz – 30 kHz	10 km ile 100 km	Jeofizik sondaj çalışmaları, Denizaltılar arası iletişim
Low Frequency	LF	30 kHz – 300 kHz	1 km ile 10 km	Gemi / Uçak çakarları
Medium Frequency	MF	300 kHz – 3 MHz	100 m ile 1 km	AM radyo, Deniz radyosu, Amatör radyo
High Frequency	HF	3 MHz – 30MHz	10 m ile 100 m	Kısa dalga yayını, Deniz / Hava radyosu, Amatör radyo
Very High Frequency	VHF	30 MHz – 300 MHz	1 m ile 10 m	TV, FM, Polis telsizleri, Yangın vb. afet telsizleri
Ultra High Frequency	UHF	300 MHz – 3GHz	10 cm ile 100 cm	Düşük güçlü radyo, Cep telefonu, Taksi telsizleri, Amatör radyo, TV, Kablosuz LAN
Super High Frequency	SHF	3 GHz – 30GHz	1 cm ile 10 cm	Uydu yayını, Radar
Extremely High Frequency	EHF	30 GHz – 300 GHz	1 mm ile 10 mm	Uydu yayını, Radar, Radyo Astronomi

Çizelge 2.1.'den de görüldüğü üzere RF bant aralığı yoğun olarak kullanılmaktadır ve amatör kullanım için lisanslandırılmamış çok az aralık vardır. Bu aralık endüstriyel, bilimsel ve medikal (Industrial, Scientific, Medical – ISM) aralık olarak adlandırılır. Ülkemizde bu bantların kullanımı Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu tarafından Kısa Mesafe Telsiz Cihazları Yönetmeliğiyle düzenlenmektedir ve ISM bantları açısından Avrupa'da kullanılan bant ve standartlar uygulanmaktadır (Anonim, 2019). Bu bantlar; 433/868 MHz, 315/915 MHz, 2.4 GHz ISM bandı olarak kullanılmaktadır.

Kısa mesafelerde veri aktarımı için kullanılan, IEEE 802.15.1 standardı olarak da bilinen Bluetooth, 2.4 GHz ISM bandını kullanır. Yaygın olarak fare, klavye ve yazıcı gibi bilgisayar çevre birimlerini kablosuz olarak bağlamakta kullanılan düşük bant genişliğine sahip bir protokoldür. Bu uygulamalardaki kapsama alanlarını içeren ağlar Kablosuz Kişisel Alan Ağı (Wireless Personal Area Network – WPAN) olarak adlandırılmaktadır (Fernandez, 2012).

ZigBee, düşük veri hızlı, kısa menzilli kablosuz haberleşme için IEEE 802 standardını temel alır. Lisanssız ISM radyo frekans bandını kullanmaktadır. Düşük veri hızı, düşük maliyet ve uzun pil ömrü olan bir haberleşme olması açısından çoğu otomasyon uygulamalarında kullanılır. Bununla birlikte pek çok ZigBee uygulamasında, kablosuz cihazın her tür etkinliğe dâhil olduğu toplam süre çok sınırlıdır; cihaz, zamanının çoğunu uyku modu olarak da bilinen bir güç tasarrufu modunda geçirir.

Wi-Fi ismi kablosuz bağlantı anlamına gelen Wireless Fidelity'den türetilmiştir. LAN (Local Area Network) düzeyinde internet erişimi sağlayan kablosuz bağlantı tipidir. Wi-Fi dizüstü bilgisayarlar, PDA (Personal Digital Asistant)'lar ve diğer taşınabilir cihazların yakınlarındaki kablosuz erişim noktaları aracılığıyla yerel alan ağına bağlanabilmesini sağlar. Bağlantı, kablosuz erişim noktaları ve cihazın ortak desteklediği, 2.4 GHz veya 5 GHz radyo frekansında gerçekleştirilir yani ISM frekans bandını kullanmaktadır (Al-Qutayri ve Jeedella, 2010). Wi-Fi, WLAN (Wireless Local Area Network) olarak da isimlendirilir. Bluetooth'dan çok daha hızlı veri iletimi sağlar. Teorik olarak kapsama alanı 1.5 km olan Wi-Fi, kapalı alanlarda ve mevcut engellere bağlı olarak 300 metreye kadar düşmektedir.

HomeRF, küçük ofis ve ev ortamlarında kablosuz haberleşme amaçlı kullanılan bir standarttır. 2.4 GHz ISM bandında çalışmaktadır. HomeRF IEEE 802.11x standartlarına göre veri aktarımının yanı sıra ses desteğini de sağladığı için avantajlıdır (Anonim, 2011a).

Hücreli ağ olarak da bilinen GSM (Küresel Mobil Sistem- Global System Mobile) mobil iletişimde bir çığır açmıştır. Geçen on yılda sistemin gelişimiyle GPRS (Genel Paket Radyo Servisi - General Packet Radio Service), UMTS (Evrensel Mobil Haberleşme Sistemi - Universal Mobile Telecommunications System) gibi yeni nesil sürümler ile iletim hızlarının artması ve yeni servisleri desteklemeleri sağlanmıştır. GSM/GPRS, alanı belli büyüklükteki hücrelere bölerek veri iletimi sağlar. Hücre büyüklükleri o bölgenin taleplerine ve trafik yüküne bağlı olarak değişir. Frekansın yeniden kullanımına dayalı bu teknolojiye hem ses hem de veri iletişimine olanak sağlanmaktadır (Al-Qutayri ve Jeedella, 2010).

GPS (Global Positioning System - Küresel Konumlama Sistemi), Dünya üzerinde herhangi engelsiz bir görüş hattında, üç veya daha fazla - eğer yükseklik bilgisi alınacaksa en az dört uydu gerekmektedir - uydusu ile her türlü hava koşulunda yer ve zaman bilgileri sağlayan uzay tabanlı uydu navigasyon sistemidir. Düzenli olarak kodlanmış bilgi yollayan bir uydu ağıdır ve uydularla arasındaki mesafeyi ölçerek Dünya üzerindeki kesin yeri tespit etmeyi mümkün kılar (National Instruments, 2013). Son yıllarda koordinat bilgisinin kullanıldığı uygulamaların sayısı ve çeşidi artmaktadır.

Günümüz şartlarında kablosuz haberleşmenin önemli bir ihtiyaç olduğu aşikârdır. Bu amaçla RF tabanlı kablosuz haberleşme sistemlerinin yanında bazı farklı kablosuz haberleşme sistemlerinin de yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Farklı kullanım alanları ve amaçlarına sahip bu kablosuz haberleşme sistemleri günlük hayatımızda büyük önem arz etmektedir. Ancak yoğun kullanım talebi, bilgi artışı ve yüksek veri iletim hızına duyulan ihtiyaca karşılık kullanılacak bant genişliğinin sınırlı olması ve artık yoğun doluluk oranına yaklaşması nedeniyle alternatif teknolojilere ihtiyaç artmaktadır. Bu nedenlerle yürütülen çalışmalar, elektromanyetik spektrumda oldukça

geniş ve regüle edilmemiş bir aralığa sahip olan görünür ışık bandını göz önüne getirmektedir (Ertuna, 2016).

2.3. Görünür Işık Haberleşmesi

Yakın zamanda ilgi görmeye başlayan bir alan olsa da VLC, görünür ışığın aydınlatmanın yanı sıra haberleşme için kullanıldığı eski bir tekniktir. Ateş ve dumanın eski medeniyetlerce haberleşme amaçlı kullanıldığı bilinmektedir. Ayrıca deniz fenerleri aracılığı ile deniz taşıtlarının birbirleri ve kara ile bağlantısı görünür ışık haberleşmesi için eskiden beri var olan bir tekniktir ve ilkel bir yöntem ile bilgi modüle edilmiş bile sayılabilir. Yine Çin Seddi'nde kuleler arasında haberleşme önceden fenerler aracılığıyla sağlanmakta idi. 1880 yılında Graham Bell, güneş ışığı demetine telsiz telefon mesajı yükleyerek 213 metre uzağa göndermeyi başarmıştır (Gfeller ve Bapst, 1979). Ancak o zamanlar VLC hak ettiği ilgiyi görmemiştir.

VLC, Li-Fi (Light Fidelity) teknolojisinin gün yüzüne çıkması ile ilgi görmeye başlamıştır. Işığa bağlı veri iletimi olarak adlandırabileceğimiz Li-Fi, Optik Kablosuz Haberleşmenin (Optical Wireless Communication – OWC) alt başlığı olarak anılabilir. OWC, elektromanyetik spektrumda kızılötesi, görünür ve ultraviyole frekanslarının kullanılabilirdiği, kablosuz veri iletim imkânı sağlayan bir teknolojidir. Kullanmak için herhangi bir lisans gerektirmeyen optik bantlarda çalışıyor olması, yüksek bant genişliğine sahip olması ve düşük maliyeti ile OWC günümüz kablosuz haberleşme sistemlerine göre bazı uygulamalarda yardımcı, bazı uygulamalarda ise güçlü bir alternatif teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. OWC'nin sahip olduğu üstün özellikler ve geniş uygulama alanları ile haberleşme sistemleri arasından sıyrılarak verimli ve düşük maliyetli bir sistem olarak öne çıkacağı düşünülmektedir.

Optik kablosuz haberleşme; VLC'nin yanı sıra Ultraviyole ve Kızılötesini kapsayan Serbest Alan Optik (Free Space Optics – FSO) Haberleşmesini de kapsar. Ancak Harald Haas önderliğinde yapılan çalışmalar ile 2011 yılında Li-Fi teknolojisini dikkat çekici hâle gelmiştir. Öyle ki laboratuvar ortamında yapılan deneylerde saniyede 224 gigabyte gibi bir hıza ulaşılması ve tek bir yanıp sönen LED ile bir baz istasyonundan daha fazla

veri aktarımı gerçekleştirebilmesi günümüzde ihtiyaç olan veri iletim hızına rahatlıkla yeteceğini göstermektedir (Dimitrov ve Haas, 2015). Bu ve benzeri çalışmalar VLC sistemlerini daha da ilgi çekici hale getirmektedir.

VLC, RF sistemlere alternatif olarak karşımıza birçok avantajı ile çıkmaktadır.

- Kablosuz haberleşmede hızla artan talep arttıkça RF bandı daha sıkışık hâle gelmektedir. RF bandı 3 kHz ile 300 GHz frekans aralığında sınırlı iken görünür ışık bandı 430 THz ile 750 THz aralığındadır ve RF bandına göre yaklaşık 1000 kat daha geniştir (Parikh ve ark., 2013).
- Işık elektromanyetik girişimlere neden olmayacağı için uçaklar, nükleer santraller gibi elektromanyetik girişim bağışıklığı (Electromagnetic Interference Immunity – EMI) gerektiren ortamlarda kullanılmak için uygundur (Wang ve ark., 2017a).
- Küçük ve kompakt VLC modülleri aydınlatma altyapısına kolaylıkla uygulanabilir. Modülasyon ünitesi, dijital-analog dönüştürücü ve sürücü devreleri LED'lere kolaylıkla bütünleştirilebilir. Yine fotodiyot, analog-dijital dönüştürücü ve diğer sinyal işleme üniteleri harici, taşınabilir bir alıcı olarak üretilerek kullanılabilir.
- Var olan aydınlatma sistemleri ile VLC modülleri kolaylıkla birleştirilebilir. Böylece tamamen kablosuz bir sistem yapılmasa dahi var olan aydınlatma sistemleri yeniden kullanılarak düşük bir maliyetle VLC sistemi kullanılır hâle getirilebilir.
- Floresan veya akkor gibi geleneksel aydınlatma kaynaklarının aksine LED'ler enerji tüketimini %80 oranında azaltabilecek, yeni nesil yeşil aydınlatma kaynakları olarak kabul edilmiştir (Chow ve ark., 2011). Yapılan çalışmalar sonucu tüm aydınlatma kaynaklarının LED'ler ile değiştirilmesi durumunda küresel elektrik tüketiminin %50'ye kadar düşeceği beklenmektedir (Kavehrad, 2010).
- LED'ler geleneksel aydınlatma kaynaklarının aksine uzun ömürlüdürler. Nem gibi çevresel etkilere karşı toleranslı olmaları bakım kolaylığı sağlamaktadır. Düşük güç tüketimi ile yüksek aydınlatma ve düşük ısı üretimi yaparak enerji verimliliği sağlar (Sarbazı, 2014).
- Kızılötesi LED ve yoğunlaştırılmış lazerlerin aksine aydınlatma amaçlı kullanılan LED'ler difüzyon ışık kaynağıdır. Ayrıca LED'ler RF veya mikrodalga cihazları gibi radyasyon üretmez ve içlerinde cıva gibi tehlikeli maddeler barındırmaz.

Ayrıca sera gazıyla ilişkisi de göz önüne alındığında, VLC ile aydınlatma ve haberleşme görevleri yerine getirilirken çevre ve insan sağlığı açısından bir sorun oluşmadığı görülmektedir.

- Radyo dalgalarının opak maddelere nüfuz edebilmesi geniş alanla ulaşma konusunda avantaj gibi görünse de bilgi güvenliği konusunda dezavantaj olarak RF haberleşmede karşımıza çıkmaktadır. Işığın katı, opak maddelerden geçememesi daha güvenli bir haberleşme bağlantısı sağlamakla birlikte VLC'yi kapalı bir alanda sınırlar.
- LED'lerin elektromanyetik parazitlerden etkilenmemesi de veri aktarımını güvenli hâle getirir.
- LED'lerin anahtarlama süresinin düşük olması veri iletiminin hızını olumlu yönde etkiler.
- Beyaz LED'ler için enerji verimi günümüzde 200 lm/W'tan daha fazladır, bu da yüksek enerji dönüşüm verimi sağlar.

VLC, RF haberleşmedeki sınırlı bant genişliği, semboller arası girişim, elektronik hassasiyet gibi olumsuz etkenlere karşı en iyi alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Çizelge 2.2'de VLC ile RF haberleşme sistemleri bazı temel konular için karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.2. VLC ve RF haberleşme sistemlerinin karşılaştırılması

Özellikler	VLC	RF
Kullanılabilir Bant Aralığı	430 THz ile 750 THz arası	3 KHz ile 300 GHz arası
Yayın Alanı	Sınırlı	Daha geniş
Sistem Karmaşıklığı	Düşük	Yüksek
Mesafe	Kısa	Kısa ve uzun
Güvenlik	İyi	Kötü
Elektromanyetik girişim	Yok	Var
Harici Güç Gereksinimi	Gerektirmez	Gerektirir
Materyal Maliyeti	RF'e göre daha düşük	Yüksek
Kapsam	Aydınlatma ve Haberleşme	Haberleşme

VLC bu avantajları ile göz önüne çıkarken kullanılabilceği alanlar için de çalışmalar devam etmektedir. Günümüzde insanların zamanının çoğunu kapalı alanlarda geçirdiği göz önüne alındığında VLC'nin rahatlıkla kullanım alanı bulabileceği düşünölmektedir. Örneğin; konum belirleme açık alanlarda GPS ile kolaylıkla sağlanabilirken, kapalı alanlarda GPS ile konum belirleme oldukça zordur. Kurulacak bir VLC sistemi ile kapalı alanlarda konum belirleme işlemleri kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Bunun için 2015 yılından itibaren bazı şirketler LED kullanarak konumlandırma sistemlerini ticarileştirmeye çalışmışlardır. Fransa'nın Lille kentinde bulunan Carrefour mağazasında müşterilerin ilgilendikleri ürünleri bulmalarına ve ilgili indirim bildirimlerini takip etmelerine yardımcı olmak için Philips'in akıllı aydınlatma cihazları ile bir VLC sistemini kullanmıştır (Philips, 2015). Bina, yeraltı trenleri, hastane gibi yerlerde kimlik belirlemek için kullanılan görünür ışık kimlik sistemleri (Visible Light Identification – VL ID) kullanılabilceği öngörülmektedir. Yine ses iletimlerinde kırmızı, yeşil, mavi LED'lerin kullanılabilceği üzerine çalışmalar yapılmaktadır (Zhang ve ark., 2018). Ayrıca LED'ler aracılığıyla akıllı bir robotun kontrol sinyalleri gönderilebilir ve robotun tanımlı varış noktasına ulaşabilmesi için yönlendirilmesi sağlanabilir (Hu ve ark., 2016). 2011 yılında Harald Haas tarafından duyurulan Li-Fi uygulamaları da çoğunlukla VLC sistemlerini kapsamaktadır. Bu sistemler sinyaller arası girişime neden olmayacaklarından hastanelerde örneğin MRI cihazının kullanılacağı alanlarda kullanılabilir. Kapalı alanlarda LED tabanlı sistemler veri hızını arttırabilecek olmasından dolayı LAN (Local Area Network – Yerel Ağ)'ların kurulumunda kullanılabilir. Müze, sergi, havaalanları, hastane gibi yerlerde bilgilendirme amaçlı ya da uçaklarda kabin içi yüksek hızlı veri iletimi için LED tabanlı VLC sistemleri kullanılabilir.

Yine de VLC uygulama alanları sadece kapalı alanlarla sınırlı değildir. Arabaların birbirleri ve trafik lambaları ve işaretcileri arasındaki haberleşmeleri açık alandaki VLC uygulamalarına örnek olarak verilebilir (Cui ve ark.,2011). Açık alan uygulamalarına bir örnek de su altı haberleşme sistemleri verilebilir. RF dalgalarının suda iyi iletilmemesi nedeniyle su altı haberleşmesi için VLC uygulamalarının önü açılmıştır (Farr ve ark., 2010).

VLC’de bilginin ışık aracılığıyla taşındığı bilinmektedir. Bu da verici olarak kullanılacak LED’de bir yoğunluk modülasyonu ve alıcı olarak kullanılacak fotodetektörde doğrudan sezim yöntemini gerekli kılar (Intensity Modulation/Direct Detection – IM/DD). Ayrıca ışığın doğası gereği pozitif ve gerçel değerli olması modülasyon işleminde kullanılan sinyalin de aynı özellikleri taşıması gerekliliğini ortaya çıkarır. Bu özellikler göz önüne alındığında modülasyon işlemi hem ışığın doğasına uygun hem de verimli olarak belirlenmelidir. Günümüzde VLC’nin yaygın kullanım alanına ulaşacak olması modülasyon türünün belirlenmesi veya kullanılan modülasyon türünün VLC için geliştirilmesini gerektirmektedir. VLC için modülasyon türleri Bölüm 2.5’te incelenmiştir. Bunların yanı sıra tüm haberleşme sistemlerinde olduğu gibi VLC sistemleri için de önemli kavramlar vardır.

- Bit Hata Oranı (Bit Error Rate – BER) haberleşme sistemlerinin performanslarının yani kalitelerinin belirlenmesi için önemli bir kavramdır. Temel olarak BER, belirli bir zaman aralığında iletilen hatalı bit sayılarının toplam bit sayısı ile oranıdır. Hatalı bitler, gürültü ve girişim gibi istenmeyen bazı parametreler sonucu oluşur. Yani bir sistemde BER değeri fazla ise sistem performansı yani kalitesi düşük demektir. Bu nedenle yapılan çalışmalarda ana odak noktası haberleşme sisteminin BER değerini düşürmektir.

$$BER = \frac{\text{Hatalı Bit Sayısı}}{\text{Toplam Bit Sayısı}}$$

(2.1)

- Haberleşme sistemleri için bir diğer önemli kavram ise Sinyal Gürültü Oranı (Signal Noise Ratio - SNR)’dır. BER gibi haberleşme sisteminin performansını, kalitesini gösterir. Temel olarak SNR, sinyal gücü ile gürültü gücü arasındaki oran olarak ifade edilebilir. Yani SNR seviyesi yüksek ise sistemin performansı, kalitesi yüksektir. SNR, Eşitlik 2.1’de verilen şekilde hesaplanabilir.

$$SNR = \frac{P_{\text{sinyal}}}{P_{\text{gürültü}}}$$

(2.2)

Yapılan çalışmalar sonucu sistem performansı açısından SNR değerinin 0 dB ile 30 dB aralığında olması gerektiği bilinmektedir (Neokosmidis ve ark., 2009).

VLC sistemlerinde, BER oranının düşük olması ve SNR oranının yüksek olması sistem performansının, kalitesinin yüksek olduğunu gösterir. Bu nedenle VLC için yapılan tüm çalışmalarda BER ve SNR oranları göz önüne alınmaktadır.

2.4. Görünür Işık Haberleşmesi İçin Standartlar

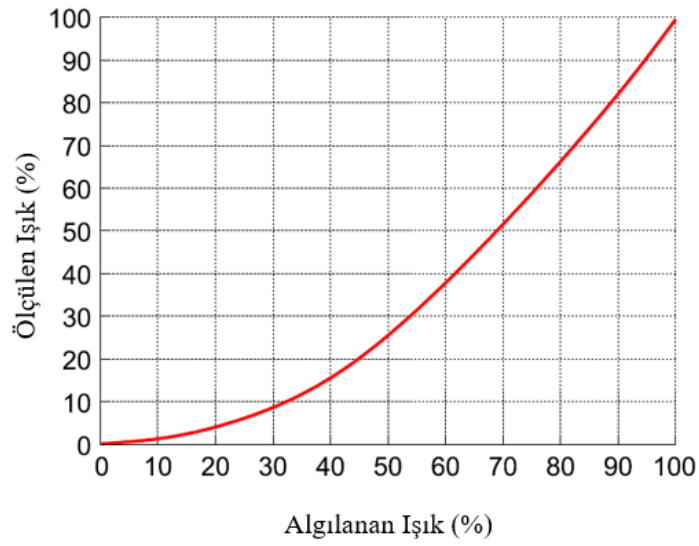
VLC teknolojisi gelişen teknolojiler ile ve kullanım alanlarının artması ile çeşitli uluslararası ve ulusal standardizasyon kuruluşlarından büyük ilgi görmüştür. Bu nedenlerle fiziksel (Physical Layer – PHY) katman protokolleri ve medya erişim kontrolü (Media Access Control – MAC) katman protokollerini uyumlu hâle getirmek için ilgili standartları geliştirmek ve geliştirilen teknolojilerin uygulamalara ivedilikle aktarılması gerekliliği doğmuştur. Bu amaçla yapılan çalışmalarda görülmüştür ki görünür ışık bandınının haberleşme için kullanılması amacıyla aşılması gereken bazı zorluklar vardır ve bu zorluklar;

- 1- Titreşimin azaltılması (Flicker mitigation)
- 2- Karartma desteği (Dimming support)

olarak sıralanabilir. Titreşim, rahatsız edici, ışık yoğunluğu dalgalanmaları ve ark gibi zamana bağlı değişken yüklerin neden olduğu bir güç kalitesi sorunudur (Rea, 2000). Bununla birlikte baş ağrısı, epileptik nöbetlerin artması gibi sağlık sorunlarına da yol açabilir. Bu, titremeye maruz kalan retina alanına ve ışığın zamanla değişimine (frekans ve modülasyon derinliği) ve diğer faktörlere bağlıdır (Lehman ve Wilkins, 2014). Bu nedenlerle ışık yoğunluğundaki değişikliklerin insan gözünün algıladığından daha hızlı gerçekleşmesi gerekir. IEEE 802.15.7 standardında zararlı etkilerinden korunmak için titremenin 200 Hz'den daha hızlı olması gerektiği önerilir (Anonim, 2011). Yani VLC için kullanılan herhangi bir modülasyon türü daha yüksek veri hızı sağlarken titremeyi de azaltmalıdır.

Farklı türlerde aktiviteler gerçekleştirmek için farklı aydınlık seviyelerine ihtiyaç duyulur (Zukauskas ve ark., 2002). Örneğin, çoğu kamuya açık alanda gerçekleştirilen

basit görsel uygulamalar için 30-40 lüks aralığında bir aydınlık yeterli iken ofis veya ev uygulamalarında 300 – 1000 lüks gibi daha yüksek aydınlatma aralığı gerekmektedir (Pathak ve ark., 2015). Bu aralığın kontrolü ise karartma desteği sayesinde gerçekleştirilebilir. Karartma; aydınlatma elemanının daha az akım gerektirdiği, daha az ısı ürettiği, enerji ve kullanım ömrü açısından yararlı bir kavramdır (Uçar ve ark., 2016). LED sürücü devrelerindeki gelişmeler sayesinde, enerjiden tasarruf etmek için uygulama gereksinimine bağlı olarak bir LED'i karartmak ve keyfi bir seviyeye getirmek mümkün hâle gelmiştir. Eğer bir LED keyfi bir seviyeye ayarlanabiliyor ise insan gözü tarafından algılanan ışık üzerindeki etkisinin de bilinmesi gerekmektedir. Ölçülen ışık ile algılanan ışık arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığı bilinmektedir ve Şekil 2.1'de gösterilmiştir. (Rea, 2000).



Şekil 2.1. Algılanan ışığın ölçülen ışığa göre grafiği

İnsan gözü göz bebeğinin büyümesinden / küçülmesinden dolayı gerçek ölçülen ışığı farklı algılar; yani, göz bebeğini daha fazla ışığın girmesine izin verecek şekilde genişleterek aydınlatma seviyesini düşürebilir. Bu durumda algılanan ışık, Eşitlik 2.2'den hesaplanabilir.

$$\text{Algılanan Işık (\%)} = 100 \times \sqrt{\frac{\text{Ölçülen Işık (\%)}}{100}}$$

(2.3)

Buna göre ölçülen ışığın % 1'i kadar kısılan bir lambanın, insan gözü tarafından %10 kadar algılandığı anlamına gelir. Bu da VLC için önemli bir durumdur çünkü uygulamaya veya istenen enerji tasarrufuna bağlı olarak keyfi bir karartma seviyesi seçebilirken haberleşme karartmadan etkilenmemelidir. Yani, veriler isteğe bağlı herhangi bir karartma seviyesinin destekleneceği biçimde modüle edilmelidir (Pathak ve ark., 2015).

IEEE 802.15.7'da titreşim ve karartma desteği konularına yoğunlaşarak fiziksel bazı standartlar belirlenmiştir (Anonim, 2011). Bu standart ilk olarak 2011 yılında belirlense de daha sonra 2014 yılında toplanan bir çalışma grubu tarafından VLC'yi daha çok OWC sistemlerine benzetmek amaçlı yapılan çalışma ile IEEE802.15.7r1 revizyonu yayınlanmıştır (Anonim, 2014). IEEE 802.15.7 standardına göre VLC için PHY I, PHY II, PHY III olarak 3 tip fiziksel yapıdan bahsedilebilir.

PHY I – daha düşük hız oranlarına sahip (11.67 kb/s'den 266.6 kb/s'ye), uzun mesafeli, açık alan uygulamalarını destekler.

PHY II – daha yüksek hız oranlarına sahip (1.25 Mb/s'den 96 Mb/s'ye), belirli noktalar arası (point-to-point), kapalı alan uygulamalarını destekler.

PHY III – yüksek hız oranlarına sahip (12 Mb/s'den 96 Mb/s'ye), çok renkli ışık kaynaklı uygulamaları destekler.

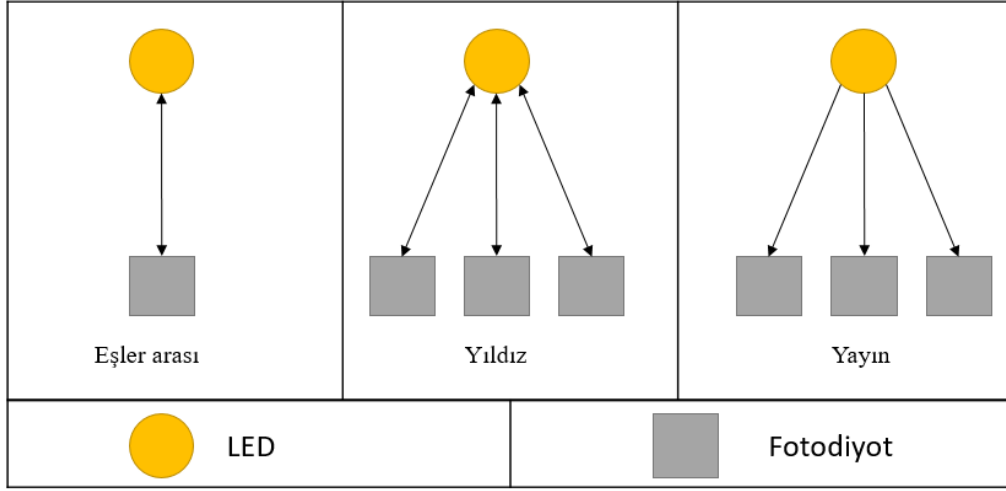
PHY I ve PHY II, tek bir ışık kaynağı için tanımlanmıştır ve Açma-Kapama Anahtarlama (On-Off Keying – OOK) ile Değişken Darbe Konum Modülasyonunu (Variable Pulse Position Modulation – VPPM) destekler. PHY III ise farklı frekanslarda yani farklı renklerde çoklu optik kaynakları kullanılır ve Renk Kaydırmalı Anahtarlama (Color Shift Keying – CSK) modülasyonunu destekler.

Farklı modülasyon şemaları, veri oranları ve farklı karartma aralıkları arasında denge sağlanmasına imkân tanır. Örneğin, karartma koşulları altında, OOK modülasyonu, telafi süresi ekleyerek sabit aralık ve değişken veri hızı sağlarken, VPPM modülasyonu,

darbe genişliğini ayarlayarak sabit veri hızı ve değişken aralık sağlar. IEEE 802.15.7 ile üç PHY tipi de titremeyi azaltır ve karartmayı desteklerken birbirleriyle bir arada bulunabilecek şekilde hazırlanmışlardır.

Ayrıca IEEE 802.15.7 ile her bir PHY'nin ışığı modüle etmesi için bir kodlama metodu belirlenmiştir. Bu metotlar; hat kodlamak için RLL (Run Length Limited – Sınırlı Çalışma Uunluğu), kanal kodlamak için FEC (Forward Error Correction – İleri Hata Düzeltme) olarak isimlendirilir ve alt metotlara sahiptirler. Bunlara ek olarak da çeşitli kanal koşullarını karşılamak, aydınlatma parlaklığını garanti etmek için farklı FEC şemaları ve RLL kodları eklenebilmektedir. RLL hat kodları, potansiyel olarak saat ve veri kurtarma (Clock and Data Recovery – CDR) algılama sorunlarını ve titremeye neden olabilecek 0 ve 1'lerin uzun sürelerini önlemek için kullanılır. RLL hat kodları girişte rastgele veri sembolleri olsa da çıkışta eşit sayıda 0 ve 1 sağlayarak DC dengesini sağlar (Rajagopal ve ark., 2012). IEEE 802.15.7 ile Manchester, 4B6B, 8B10B gibi çeşitli RLL hat kodları tanımlanmıştır. Manchester kodlamasında “0” yerine “aşağı” geçiş (“10”) ve “1” yerine “yukarı” geçiş (“01”) kullanılır. 4B6B kodlaması 4 bitlik bir sembolü, tekrarlanan 6 bitlik bir sembole eşler. Benzer şekilde 8B10B, 8 bit sembolünü 10 bit sembolüne eşler. Eklenen bitlerin sayısı, Manchester kodlamasında en yüksek olanıdır ve daha iyi dengeleme gerektiren düşük veri hızı hizmetleri için uygun bir seçimdir. Öte yandan, 8B10B, eklenen ilave bitlerin sayısını azaltır (yüksek veri hızı), ancak DC dengeleme açısından düşük performans gösterir (George ve ark., 2014). Reed - Solomon (RS) ve Convolutional Codes (CC – Kıvrımlı Kodlar) gibi FEC şemaları, yine CDR sorunlarına karşılık sistemin iyi çalışabilmesi için IEEE 802.15.7 standardı ile desteklenmektedir.

MAC katmanında ise, IEEE 802.15.7, eşler arası (peer-to-peer), yıldız (star) ve yayın (broadcast) olmak üzere üç farklı topolojiyi destekler. Bu farklı topoloji türleri şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Farklı topoloji türleri

Eşler arası topoloji, iki cihaz arasındaki bağlantı için koordinatör (veya ana eleman) olarak görev yapan bir cihazı içerir. Her iki cihaz da kullanıcı ve koordinatör arasında bir bağlantı kurduğundan, birbirleriyle iletişim kurabilir. Bu topoloji tipik olarak yüksek hızlı Yakın Alan İletişimi (Near Field Communication - NFC) için daha uygundur.

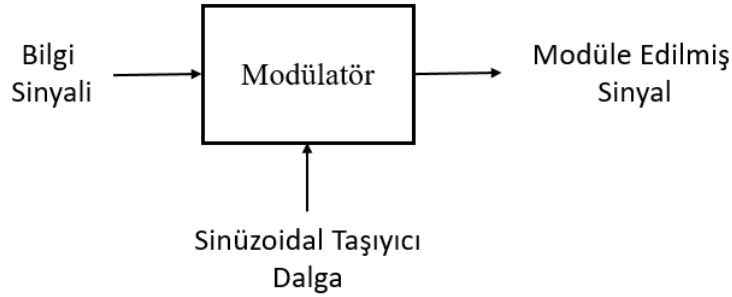
Yıldız topolojisi; koordinatör olarak görev yapan bir ana cihaza bağlı birçok istemci, kullanıcı cihaz olabilir. Bu topoloji VLC kablosuz erişim ağları için tam olarak uygun olarak görülür (Pathak ve ark., 2015). Ancak MAC tasarımı, özellikle aynı çarpışma alanındaki çift yönlü bağlantılardan zordur.

Yayın topolojisi; yıldız topolojisinden farklı olarak, istemci yani kullanıcı cihazlar, herhangi bir geri bağlantı oluşturmadan yalnızca ana LED vericisinden veri alabilir. Bu topoloji VLC sistemlerinde, ağ boyunca LED'ler aracılığıyla bilgi yayınlamak için kullanılabilir. Açık bir ilişkilendirme gerekmediğinden, yayın topolojisi MAC tasarımını basitleştirir (Rajagopal ve ark., 2014).

MAC katmanı topolojiler hariç, başlatma/sürdürme prosedürleri, birleştirme/ayırma prosedürleri, renk fonksiyonu destek mekanizması, aydınlatma ve karartma destek mekanizması, mobilite destek mekanizması, renk stabilizasyonu gibi ana görevlerden de sorumludur (Wang ve ark., 2017a).

2.5. Görünür Işık Haberleşmesi İçin Modülasyon

Modülasyon, iletilmek istenilen işaretin yani bilgi sinyalinin bir taşıyıcıya bindirilerek istenilen biçim ve teknikte iletilmesidir (Ugweje, 2000). Optik sistemlerde haberleşme kanalı, kablolu sistemler için fiber ya da bakır tel olabilirken kablosuz sistemler için genel olarak havadır. Kablolu haberleşme sistemlerinde sinyal, fiber ya da bakır tel üzerinden elektrik sinyali olarak iletilir. Kablosuz sistemlerde ise sinyal, radyo dalgaları ve ışık aracılığıyla aktarılır. İletimden önce sinyalin kanala uygun hale gelmesi için modüle edilmesi gerekir (Öztürk, 2016). Modülasyon ile frekans bölgelerinden daha fazla faydalanılabilir, bozucu etkiler azaltılabilir, verici alıcı arasındaki haberleşme güçlendirilebilir ve iletim ortamına uyum artırılabilir; yani verinin olduğu gibi en verimli şekilde alıcıya ulaşması sağlanabilir. Bu nedenle modülasyon türleri sayısal haberleşme sistemleri ve görünür ışık haberleşme sistemleri için önemli bir kavramdır.



Şekil 2.3. Modülasyon işlemi

Modülasyon işleminde temel olarak aktarılması istenen veri, bilgi sinyali modülatör aracılığı ile modüle edilir ve taşıyıcı bir sinüzoidal dalga üzerine bindirilir. Haberleşme sistemlerinde birçok farklı modülasyon türü vardır. Ancak VLC’de veriler, ışık sinyalinin faz veya genliği olarak kodlanamamaktadır (Pathak ve ark., 2015). Bu, faz ve genlik modülasyon tekniklerinin VLC’de uygulanamayacağını, RF haberleşmede benimsenen modülasyon tekniklerinden farklı tekniklerin kullanılması gerektiğini gösterir. Bilginin optik sinyale dönüştürülüp, LED ışığı yoğunluğunun insan gözünün algılayamayacağı ve aydınlatmayı etkilemeyeceği şekilde modüle edilmesi gerekliliği bu farklılığı oluşturur. Demodülasyon ise alıcıdaki doğrudan algılamaya bağlıdır. Bu tür

modülasyon ve Demodülasyon teknikleri IM/DD modülasyonları olarak bilinir. VLC’de IM/DD modülasyon tekniğine göre bilginin sadece ışık şiddeti aracılığı ile taşınması, kullanılacak optik sinyallerin, RF haberleşmeden farklı olarak gerçel ve pozitif değerli olmasını gerektirir (Yeşilkaya ve ark., 2015). Bu VLC sistemlerinde kullanılacak modülasyon türleri için aşılması gereken bir zorluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer modülasyon türlerinden farklı olarak, VLC için herhangi bir modülasyon sadece daha yüksek veri hızına ulaşmakla kalmayıp aynı zamanda insan gözü tarafından algılanan ışığın gereksinimlerini de karşılamalıdır. Bu gereksinimler ve modülasyon için önemleri Bölüm 2.4’te titreşimin azaltılması ve karartma desteği olarak açıklanmıştır. Bu zorluklar göz önüne alındığında RF haberleşme sistemlerinin aksine VLC sistemleri için kullanılacak modülasyon türleri oldukça kısıtlanmaktadır.

Uygun olarak seçilen modülasyon tekniği haberleşme sisteminin daha iyi performans göstermesini sağlar. VLC sistemlerinin performansı yüksek yol kaybı, doğal veya yapay ışıkların neden olduğu gürültüden önemli seviyede zarar görebilirler. Yüksek yol kaybı VLC sistemlerinde oldukça yüksek optik güç seviyelerinin kullanımını gerektirir. Ayrıca VLC sistemleri kullanılan LED, fotodiyot gibi optoelektronik cihazların hızlarından da zarar görebilir. Yani bir VLC sisteminin performansı çevre koşullarına, veri hızına, teknik çözümlere ve belirli bir sistemin uygulanmasına bağlı olarak değişir. Sistemin bu değişikliklerden olumlu etkilenebilmesi için doğru bir modülasyon tekniğinin uygulanması önemlidir.

VLC’de modülasyon türleri taşıyıcılarına göre tek taşıyıcılı, alt taşıyıcılı ve çok taşıyıcılı modülasyonlar olmak üzere sınıflandırılabilir (Netsianda ve ark., 2017). Tüm modülasyon teknikleri, haberleşme sisteminin performansı bakımından bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir ve belirli uygulamalara göre kullanılabilir. Örneğin; kanal verimliliğine ihtiyaç duyulan haberleşme sisteminde çok taşıyıcılı modülasyon teknikleri tercih edilmelidir. Kullanılacak modülasyon türü belirlenirken, sistemin değişken kanal davranışlarından olumsuz etkilenmemesine de dikkat edilmelidir (Yeşilkaya, 2015).

2.5.1. Optik modülatörler

Polarizasyon, yoğunluk ve faz gibi özellikleri kontrol ederek ışığı modüle eden cihazlardır. Optik modülatörler doğrudan (direct) ve dışarıdan, harici (external) modülasyon olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilir. Doğrudan modülasyonun bazı uygulamalar için yeterli olmadığı, artan hız gereksinimlerini karşılamadığı bilinmektedir (Öztürk, 2016). Bu nedenle dışarıdan, ışık tabanlı kullanılabilen harici optik modülatörlerden bahsedilecektir.

Elektro-optik modülatörler

Elektro-optik etki prensibine bağlı olarak çalışan cihazlardır. Bazı özel malzemelerin üzerine elektrik alanı uygulandığında optik olarak özellikleri değişir. Düşük frekanslı veya DC elektrik alan uygulandığında bu tür malzemelerin kırılma endeksleri değişir. Bu değişim büyük olmamasına rağmen ortamdaki geçen ışığın üzerinde önemli bir etkisi vardır ve bu da elektro-optik etkinin temelini oluşturur.

Elektro-optik malzemenin üzerine elektrik alanı uygulandığında iki ana etki oluşur. Birincisi, elektrik alanına göre malzemenin kırılma endeksi üzerinde doğrusal bir etki olan Pockels etkisidir. Bu etkiye göre elektro-optik malzeme üzerine uygulanan elektrik alanı ile kırılma endeksi arasında doğrusal bir orantı vardır. İkincisi ise, elektrik alanına göre kırılma endeksi üzerinde ikinci dereceden etkileyen Kerr etkisidir. Bu etkiye göre elektro-optik malzeme üzerine uygulanan elektrik alanı ile kırılma endeksi arasında ikinci dereceden, yani karesel bir orantı vardır (Morkoç, 2009).

Elektro-optik modülatörler de diğer modülatörler gibi faz, güç ve polarizasyon gibi bazı temel özellikleri modüle etmek için geliştirilmiş cihazlardır. Bu modülatörlerde modülasyon işleminin gerçekleşebilmesi için elektrik alanı oluşturulmalıdır. Elektrik alanı üretmek için ise bazı elektrik sinyallerine ihtiyaç vardır. Bu nedenle elektro-optik modülatörler sinyal kontrollü modülatörler olarak da isimlendirilebilir (Datta ve Das, 1990).

Elektro-emilim modülatörleri

Franz-Keldysh (FK) etkisi ile çalışan cihazlardır. Bu etki, yarı iletken bir malzemenin optik emiliminin, üzerine uygulanan elektrik alanı ile değişebileceğini gösterir. Elektrik alanını, elektrik geriliminin uygulanması ile oluşur. Ayrıca oluşan elektrik alanı etkilediği yarı iletken malzemenin etkin bant aralığını da değiştirir. Yarı iletken malzeme üzerine elektrik alanı uygulandığında malzemenin etkin bant aralığı küçülme gösterir. Elektro-emilim modülatörlerinin çalışma prensibi arkasında önemli bir kavram bulunmaktadır; bant aralığının enerjisi, yarı iletken malzemeye giren gelen ışığın enerjisinden daha büyükse, malzeme saydam hâle gelir. Böylece, gelen ışık malzemedan kolayca geçebilir. Ayrıca malzemeye elektrik alanı uygulandığında, bant boşluğu enerjisinin küçülmesinden dolayı malzeme gelen ışığı emmeye başlar (Zheludev, 2007). FK etkisi kullanılarak yarı iletken malzemeler ışık sinyali için modülatör olarak kullanılır. Örneğin, elektrik alanını uygulayarak lazer ışının yoğunluğu ayarlanabilir (Öztürk, 2016). Lazer ışınının yoğunluğu elektrik alanı kullanılarak kontrol edilir ve yarı iletken malzemedeki emilimin değişikliğine dayanır. Bu nedenle bu tür modülatörlere elektro-emilim modülatörleri denir. Daha düşük tahrik gerilimine ihtiyaç duymaları, yüksek hızlı modülasyon gerektiren uygulamalarda kullanılabilmeleri ve ayrıca kolay uyum sağlayabilme gibi özelliklerinden dolayı elektro-emilim modülatörleri daha avantajlı olarak görülmektedir (Agraval, 2002).

Girişimölçer modülatörler

Genellikle bu modülatörler optik ölçüm sistemlerinde sensör olarak kullanılırlar. Bütün sistemlerde girişim, sistem performansını olumsuz etkilediğinden istenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkar. Ancak, girişimölçerlerin ışığı modüle etmek için girişim özelliğini kullanması olumlu bir durumdur. Örneğin uyarıcı ışık, dalgalarının birden fazla ışına bölünmesi için ışın ayırıcı ile etkileşir ve ortaya iki ayrı ışın çıkar. Bu iki ışın bir süper pozisyon örneği olarak hareket eder ve yeniden bir araya gelseler de faz farkı oluşur. Bu durum harici koşullar hakkında bilgi edinilmesini sağlar (Öztürk, 2016). Mach-Zender modülatör, Fabry-Pérot modülatör ve Michelson modülatör gibi bilinen farklı girişimölçer modülatörler vardır.

2.5.2. Tek taşıyıcı modülasyon

Verilen tek bir taşıyıcıya yüklenerek iletimin gerçekleştirildiği modülasyon türleri tek taşıyıcı modülasyon (Single-Carrier Modulation – SCM) olarak bilinmektedir. Haberleşme sistemlerinde temel olarak kullanılan çoğu modülasyon yöntemleri SCM türüdür.

Açma - Kapama Anahtarlama (On – Off Keying – OOK) Modülasyonu

OOK modülasyonu, IEEE 802.15.7 standardı ile darbe genlik modülasyonunun (Pulse Amplitude Modulation – PAM) sadece iki seviyeli özel türü olarak kabul edilmiştir (Anonim, 2011). OOK modülasyonunda veri bitleri LED'in açık ve kapalı olması durumuna göre sırasıyla 1 ve 0 olmaktadır. Buna göre OOK sinyali Eşitlik 2.3'te verildiği gibidir.

$$s(t) = A_m(t) \cos(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (2.4)$$

Burada A_c , yani A sabit genlik, $m(t)$ 0 ya da 1 değeri alabilen mesaj sinyali, f_c , taşıyıcı sinyalin frekansını ve T ise zamanı gösterir. Buradan güç;

$$P = \frac{A^2}{2} \quad (2.5)$$

Olarak bulunabilir. Güç aracılığı ile;

$$A = \sqrt{2P} \quad (2.6)$$

Olarak genlik hesaplanır. Enerji ise;

$$E = PT \quad (2.7)$$

Güç ve zamanın çarpımı olarak bulunur. Bu eşitliklere göre OOK sinyal eşitliği yeniden yazılırsa;

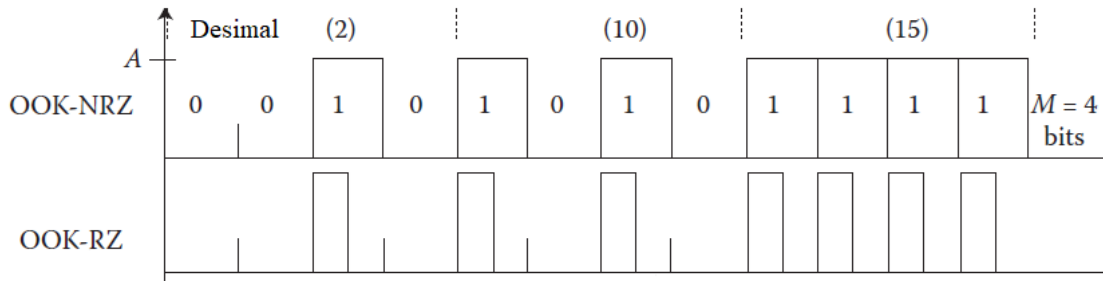
$$s(t) = \sqrt{E} \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (2.8)$$

Ve bu eşitliğin Fourier dönüşümü;

$$S(f) = \frac{A}{2} M(f - f_c) + \frac{A}{2} M(f + f_c) \quad (2.9)$$

olarak bulunur.

Sade ve kolay uygulanabilir olması nedeniyle çoğunlukla kablolu iletişimde kullanılan OOK modülasyonu VLC sistemleri için de tercih edilmektedir. İlk başlarda mavi ışık yayan sarı fosforlu bir kaynak ile beyaz ışık üretilen VLC sistemi için OOK modülasyonu kullanılmıştır (Dahril ve ark., 2018). Burada vericideki sarı fosforun yavaş tepki süresinden kaynaklanan birkaç megahertz seviyesinde sınırlı transfer hızı önemli bir sınırlayıcı olmuştur (Anonim, 2011). OOK modülasyonu sıfıra dönüşlü (Return to Zero - RZ) ve sıfıra dönüşsüz (Non Return to Zero – NRZ) olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir. NRZ düzeninde, bit süresine eşit süreye sahip bir darbe 1'i temsil etmek için iletilirken, RZ düzeninde darbe yalnızca bitin kısmi süresini işgal eder.



Şekil 2.4. Örnek OOK-NRZ ve OOK-RZ grafiği

Eşitlik 2.1’de SNR değerinin hesaplanması gösterilmiştir. Bu değere bağlı olarak OOK-NRZ ve OOK-RZ için BER aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$BER_{OOK-NRZ} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{SNR}\right) \quad (2.10)$$

$$BER_{OOK-RZ} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \sqrt{SNR}\right) \quad (2.11)$$

OOK-NRZ ile kurulan VLC sisteminde, beyaz LED kullanılmıştır ve 10 Mbps veri hızına ulaşılmıştır (Grubor ve ark., 2007). Bu sistemde sarı fosfor bileşenin yavaş yanıt süresini kaldırmak için mavi filtre kullanılmıştır. Daha sonra yapılan çalışmalarda ise 100 Mbps (Park ve ark., 2007) ve 125 Mbps (Minh ve ark., 2008) veri hızlarını sınırlandırmak ve elde etmek için mavi filtrelemeyi alıcıdaki basit eşitleme ile birleştirme denenmiştir. OOK modülasyonu ile gerçekleştirilen VLC sistemlerinin performansını arttırmak için çalışmalar yapılırken uygun fotodiyot seçiminin de önemli olduğu göz önüne alınmalıdır. Yapılan deneyler ile çığ fotodiyotunun, P-I-N fotodiyoduna göre daha iyi çalıştığı gözlemlenmiştir ve bu sayede veri hızı 230 Mbps’ye yükselmiştir (Vucic ve ark., 2009a). Beyaz ışık elde etmek için, RGB frekanslarının kombinasyonu da kullanılabilir. RGB LED’lerin en önemli avantajı, yavaş tepki sürelerine sahip olmamasıdır. Bu nedenle daha sonraki çalışmalarda çoğunlukla RGB LED’ler kullanılmıştır. Ancak bu modülasyon yöntemi VLC sistemleri için aydınlatma kontrolünün sağlanması ve veri akışı için pek uygun görülmemiştir (George ve ark., 2014).

Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation – PWM)

Darbe süresi içine kodlanmış veriyi iletir ve her darbe içine bir bitten fazla veri işlenebilir. Ancak bu durumda sürenin uzaması gerekebilir. Bu modülasyonda, darbelerin genişliği bir dijital darbe şeklinde modülasyon sinyali alırken, istenen karartma seviyesine bağlı olarak da dengelenebilir. Bu nedenle modülasyon başarımı ve karartma konusunda başarılı bir yöntemdir. Karartma gereksinimine bağlı olarak da veri hızı yerleştirilebilir ve ayarlanabilir (Dahril ve ark., 2018). PWM ile gerçekleştirilen VLC sistemlerinde, daha yüksek veri hızlarının %0 ile %100 arasında herhangi bir

karartma seviyesi elde edilebileceği ve veri hız sınırı 4.8 kbps olarak gözlemlenmiştir (Kwon, 2010).

Darbe Konum Modülasyonu (Pulse Position Modulation – PPM)

VLC’de herhangi bir modülasyon darbenin konumuna bağlıdır. PPM, veri iletiminde dikgen frekansların kullanıldığı dikgen modülasyon tekniklerinden biridir. Sembol süresi, PPM tekniğinde eşit süreli, t , zaman dilimlerine bölünür ve her bir zaman diliminde bir darbe iletilir. VLC için yapılan deneylerde ilk başlarda basit olduğundan bu teknik kullanılmıştır (Ntogari ve ark., 2011). PPM tekniği, önceleri kızılötesi (Infrared – IR) haberleşmesi için kullanılmıştır ancak, yetersiz kanal koşulları nedeniyle PPM yerine kıvrımlı kodlara dayanan farklı tekniklerin kullanılması önerilmiştir (Georghiadis, 1994).

Temel olarak PPM’de iki yoğunluk seviyesi vardır ve buna bağlı olarak BER değeri hesaplanabilir.

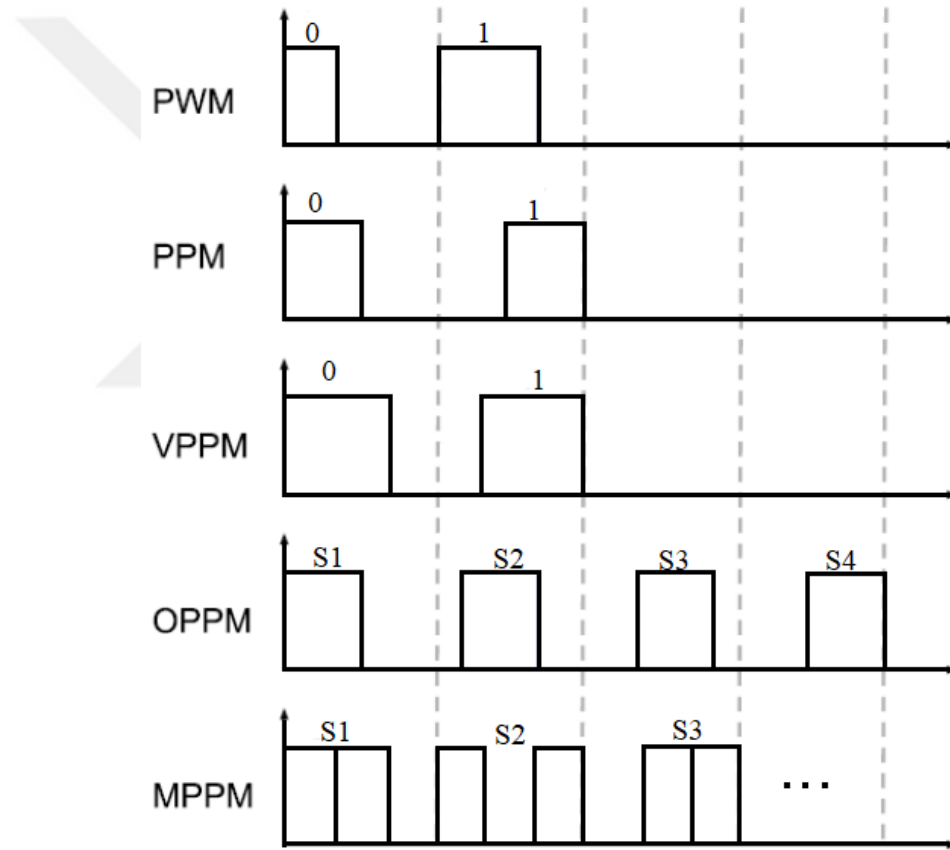
$$BER \geq \frac{M}{2} Q\left(\sqrt{\frac{ME}{2N_0}}\right) \quad (2.12)$$

Bu eşitlikte M , yoğunluk seviyesi, E elektrik enerjisi, N_0 gürültü gücünün spektral yoğunluğunu gösterir. Q değeri ise eşitlik 2.12’de verilmiştir.

$$Q(x) = \frac{1}{2\pi} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (2.13)$$

Daha yüksek veri hızları elde etmek için tekrarlanan ve kıvrımlı kodlu PPM teknikleri denenmiştir (Gfeller ve ark., 1996). Düşük spektral verimlilik ve PPM’de sembol süresi başına sadece bir darbenin veri oranını kısıtlaması nedenleriyle zaman içerisinde farklı darbe pozisyonu temelli modülasyon teknikleri ortaya çıkmıştır. Değişken PPM (Variable PPM – VPPM), genellikle karartma kontrolü ve veri iletimi için kullanılan PPM şemalardır. Örtüşen PPM (Overlap PPM – OPPM), sinyallerin bir darbe tarafından daha uzun sembol süresinde iletildiği PPM modülasyon türüdür. OPPM’nin sadece daha yüksek spektral verim elde etmekle kalmayıp, aynı zamanda daha yüksek

veri hızlarıyla birlikte çok çeşitli karartma seviyelerinin elde edilebileceğini göstermiştir (Bai ve ark., 2010). OPPM, tek bir darbe süresinin arasında sayısız sinyalin iletilmesine izin verir ancak darbe süresi içindeki sinyallerin şekil 2.5'te gösterildiği gibi tutarlı olması gerekmez (Dahril, 2018). OPPM'nin aksine daha yüksek spektral verimliliğe sahip bir PPM modülasyon türü olan MPPM (M-ary PPM) üzerinde de çalışmalar yapılmıştır (Georghiadis, 1994). Her iki PPM modülasyon türünü de kullanarak OMPPM olarak bir modülasyon türü denenmiştir (Sugiyama ve Nosu, 1989). OMPPM tekniğinde birden fazla darbe pozisyonu tek bir optik sinyali temsil etmektedir.



Şekil 2.5. PWM, PPM, VPPM, OPPM ve MPPM modülasyon tekniklerinin farkı

Bu, OMPPM tekniğinin MPPM'deki uzantısız veri transferinin gürültüsüz kanalının spektral verimliliğini arttırabileceğini de göstermektedir. PPM modülasyon tekniği, geniş bir uygulama yelpazesi ile belirgin şekilde daha iyi güç verimi ile ortogonal bir modülasyon tekniğidir. PPM için ortalama güç ihtiyacı OOK'ten daha düşüktür, çünkü

spektrumun DC ve düşük frekans bileşenini önler, ancak bant genişliği açısından daha az verimlidir (Karunatilaka ve ark., 2015).

Şekil 2.5’de PWM, PPM, VPPM, OPPM, MPPM modülasyon şemalarının farkları verilmiştir. Verilen grafiklerde S_n ($n=1, 2, 3, \dots$), n ’inci sembolü göstermektedir.

Dördül Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation – QAM)

Hem analog hem de dijital iletişim için kullanılan bir modülasyon tekniğidir. Tek taşıyıcılı olabileceği gibi daha fazla taşıyıcılı da olabilir. Taşıyıcı sinyalin faz ve genlik değerleri değiştirilerek uygulanır. QAM ile iletilen sinyal verilen eşitlik ile hesaplanabilir.

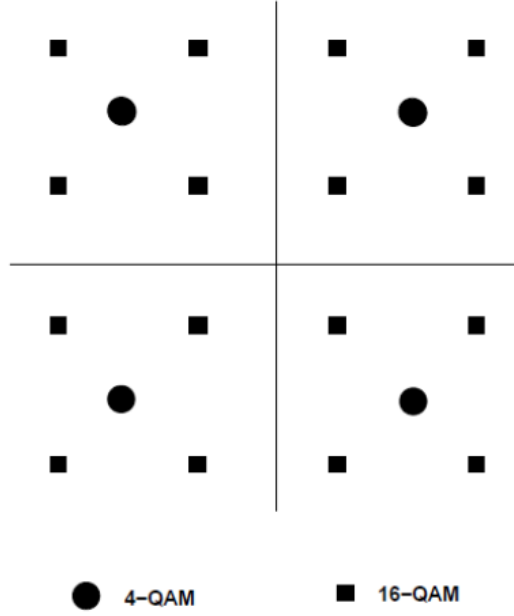
$$s_i(t) = Ag(t) \cos(\theta_i) \cos(2\pi f_c t) - Ag(t) \sin(\theta_i) \sin(2\pi f_c t) \quad (2.14)$$

Burada; s_i iletilen sinyali, $g(t)$ sinyal şekillendiriciyi, ifade eder. Buna bağlı olarak iletilen enerji,

$$E = \int_0^T s_i^2(t) dt = A^2 \quad (2.15)$$

olarak hesaplanabilir.

QAM kullanılarak, 16, 64, 128 veya daha fazla bitler için faz ve genlik konumu elde edilebilir. QAM modülasyonunda, örneğin, 2-QAM için, genellikle sinüzoidal formda olan iki taşıyıcı, birbirleriyle faz kayması ile ayrılır. Bu nedenle, QAM faz içi (I) ve dördül (Q) olmak üzere iki farklı bileşen içerir. 4-QAM ve 16-QAM için örnek takımuydu dağılımı şekil 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.6. 4-QAM ve 16-QAM için takımuydu dağılım grafiği

M-QAM ile gerçekleştirilen birçok farklı benzetim sonuçları bit başına düşen enerjiye karşı hata olasılıkları karşılaştırıldığında; M değeri arttıkça sistem performansının azaldığı gözlemlenmiştir (Öztürk,2016).

2.5.3. Çok taşıyıcılı modülasyon

Diğer haberleşme sistemlerinde olduğu gibi VLC sistemleri için de aktarılan veri oranının artması amaçlanmaktadır. Bu amaçla çok taşıyıcılı modülasyona (Multi-Carrier Modulation – MCM) yönelik çalışmalar yapılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan MCM türü, birbirine paralel olacak şekilde veri akışları dikgen (ortogonal) alt taşıyıcılar ile modülasyon işlemini gerçekleştiren ortogonal frekans bölmeli çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) yöntemidir (Gawende ve ark., 2016). VLC sistemlerinde 3Gb/s'nin üzerinde yüksek veri hızı, basit eşitleme sağlaması ve semboller arası girişime (Inter Symbol Interference – ISI) karşı dayanıklı olması gibi avantajları nedeniyle yoğun bir şekilde tercih edilmektedir (Wang ve ark., 2017b).

$$s(t) = \text{Re} \left\{ v(t) e^{\frac{j2\pi kt}{T}} \right\} = \sum_{k=0}^{N-1} |X_k| \cos(2\pi \left[f_c + \frac{k}{T} \right] t + \text{arg}[X_k])$$

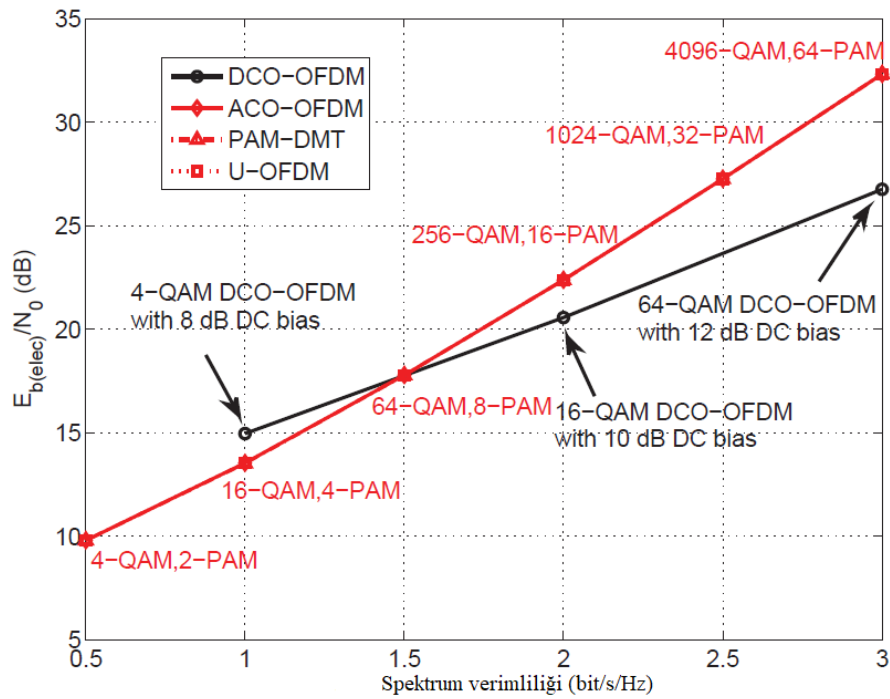
(2.16)

Eşitlik 2.15 İle OFDM’de iletilen sinyal gösterilmiştir.

OFDM, dijital verileri çoklu taşıyıcı frekanslarda kodlamanın bir yöntemidir. Bu, geleneksel iki boyutlu genlik/faz modülasyonlarına ilave olarak bir boyutun daha eklendiği modülasyon tekniğidir. Ancak bu teknik ışığın doğası gereği tam olarak kullanılamamaktadır. Normalde kullanılan OFDM sistemleri karmaşık, pozitif ve negatif olmak üzere çift kutuplu sinyaller üretmektedir. IM/DD tekniğinde ışık şiddeti yalnızca pozitif ve gerçel değerler almaktadır. Bu da optik OFDM sistemlerini kısıtlar ve bazı ön işlemleri gerekli kılar. OFDM sistemlerindeki bu kısıtlamaya çözüm olması amacıyla, alt-taşıyıcılar aracılığıyla iletilen sinyaller Hermisyen (Hermitian) simetrik olacak biçimde seçilir. Böylece OFDM çerçevesinin bant verimliliği %50 oranında azaltılarak optik kanal üzerinden aktarılan sinyal gerektiği gibi gerçel değerli olur. Hermisyen simetrisi genellikle ters hızlı Fourier dönüşümünden (Inverse Fast Fourier Transform – IFFT) sonra gerçel değerli sinyaller üreten frekans bölgesi (Frequency Domain - FD) sembollerine uygulanır. Bu gerçel değerli sinyallerin sadece pozitif değerli olması için ise birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Bunlar biri Asimetrik Olarak Kırpılmış Optik OFDM (Asymmetrically Clipped Optical OFDM - ACO-OFDM)’dir. ACO-OFDM’de sadece otomatik olarak simetrik zaman alanı sinyaline yol açan tek alt taşıyıcılar modüle edilir (Armstrong, J. ve Lowery, A., 2006). Bir diğer yöntem ise DC Eklemeli Optik OFDM (DC Biased Optical OFDM - DCO-OFDM)’dir. DCO-OFDM’de tüm alt taşıyıcılar modüle edilir, ancak sinyali tek kutuplu yapmak için pozitif bir doğru akım eklenir (Armstrong ve ark., 2006). Bunlar farklı olarak, darbe genlik modülasyonlu ayırık çoklu ton modülasyonu (Pulse Amplitude Modulated Discrete Multitone – PAM-DMT), tek kutuplu OFDM (Unipolar OFDM – U-OFDM) ve Flip OFDM gibi farklı OFDM türleri de bulunmaktadır.

Daha yüksek veri hızları ve daha düşük güç tüketimi elde edilmesi için, son zamanlarda yapılan çalışmalar ile enerji ya da spektral açıdan verimli optik OFDM türleri önerilmiştir (Wang ve ark., 2017b). Asimetrik olarak kırpılmış DC eklemeli optik

OFDM (Asymmetrically clipped DC biased optical OFDM – ADO-OFDM), hibrit ACO-OFDM (Hybrid ACO-OFDM – HACO-OFDM), asimetrik olarak kırılmış mutlak değerli optik OFDM (asymmetrically clipped absolute value optical OFDM - AAO-OFDM), katmanlı ACO-OFDM (Layered ACO-OFDM – LACO-OFDM), spektral ve enerji verimli OFDM (Spectral and Energy Efficient OFDM – SEE-OFDM), optik çift modlu endeks modülasyonlu OFDM (Optical Dual-Mode Index Modulation aided OFDM – DM-OFDM) gibi örnekler vardır.



Şekil 2.7. DCO-OFDM, ACO-OFDM, PAM-DMT ve U-OFDM modülasyon türleri arasındaki performans karşılaştırılması

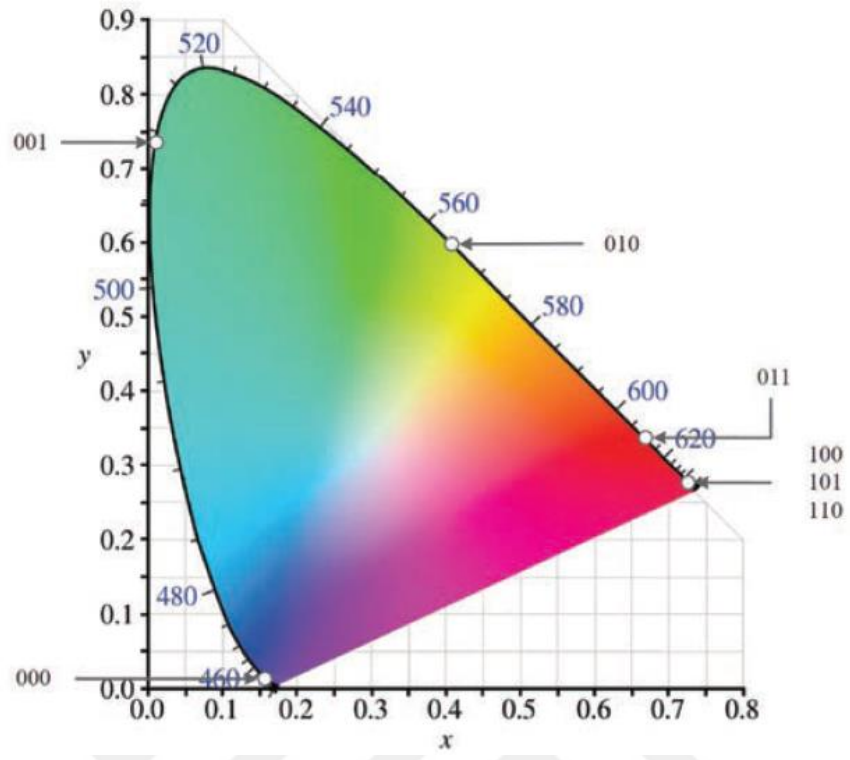
Şekil 2.7’de DCO-OFDM, ACO-OFDM, PAM-DMT ve U-OFDM şemaları arasındaki performans karşılaştırması verilmiştir. Burada eğriler 10^{-3} BER değerindeki $E_b(elec)/N_0$ 'a karşı spektral verimlerini göstermektedir.

E_b/N_0 yani bit başına enerjinin gürültü gücü spektral yoğunluk oranı, OFDM için eşitlik 2.16’de verildiği şekilde hesaplanabilir.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{E\{|x_{k,m}|^2\}}{\log_2 M} \frac{P_0}{\sigma_N^2} \quad (2.17)$$

2.5.4. Işığa bağlı özel modülasyon

Düşük veri hızının ve diğer modülasyonlardaki sınırlı karartma destek sorunlarının üstesinden gelebilmek için IEEE 802.15.7 standardı ile özellikle VLC’de kullanılması için Renk Kaydırmalı Anahtarlama (Color Shift Keying – CSK) modülasyonunu önermiştir. CSK modülasyonu, geçtiğimiz son birkaç yıl içerisinde ilgi çekmeye başlamıştır (Elgala ve ark., 2009). Beyaz ışık üretmek için; mavi LED ve sarı fosfor kullanılması, LED’lerin hızlı anahtarlama özelliğini yavaşlatır ve yüksek veri hızı iletişimini engeller (Dahril ve ark., 2018). Buna karşılık RGB LED’ler kullanılarak beyaz ışık üretmek daha verimlidir. CSK modülasyonu da bu RGB LED kaynağındaki üç farklı rengin yoğunluğunu kullanarak sinyali modüle eder. Mantık olarak şekil 2.8’de verilen, CIE 1931 tarafından tanımlanan renk uzayı kromatiklik şemasına dayanır. Bu diyagramda yedi renk kodu (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110), görünür spektrumu bölen yedi bandın merkezlerine karşılık gelmektedir. Diyagramda insan gözüyle algılanabilen tüm renkler, x ve y olmak üzere iki farklı renklilik parametresine eşleştirilerek verilmiştir.



Şekil 2.8. CIE 1931 Kromatiklik şeması

Çizelge 2.3. CSK'da kullanılan yedi banda ait renk kodu, merkez ve kromatik koordinatlar

Bant Aralığı (nm)	Renk Kodu	Merkez (nm)	Koordinatı (x , y)
380 - 478	000	429	(0.169 , 0.007)
478 - 540	001	509	(0.011 , 0.733)
540 - 588	010	564	(0.402 , 0.597)
588 - 633	011	611	(0.669 , 0.331)
633 - 679	100	656	(0.729 , 0.271)
679 - 726	101	703	(0,734 , 0.265)
726 -780	110	753	(0.734 , 0.265)

VLC sistemleri için bahsedilen modülasyon türlerinde birçok farklı çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar incelendiğinde BER, SNR ve veri oranlarına göre birbirleri ile karşılaştırıldığında Çizelge 2.4. ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 2.4. Farklı modülasyon türlerinin BER, SNR ve veri oranı değerlerine göre karşılaştırılması (Wang ve ark., 2012), (Elgala ve ark., 2009)

Modülasyon Türü	BER	SNR (dB)	Veri Oranı
OOK	En düşük	Yüksek	En yüksek
PPM	Yüksek	Orta	Düşük
PWM	Yüksek	Düşük	En düşük
OFDM	Yüksek	Düşük	En yüksek
CSK	Düşük	Orta	Orta

2.5.5. Çoklu erişim metotları

İletim için aynı ortamı kullanan birden fazla kullanıcı varsa, genellikle çoklu erişim yöntemleri kullanılır. Çoklu erişim, zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA), frekans bölmeli çoklu erişim (FDMA) ve kod bölmeli çoklu erişim (CDMA) gibi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir (Öztürk, 2016).

Zaman bölmeli çoklu erişim metodu (Time-Division Multiple Access - TDMA)

Bu yöntem OFDM ve Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – OFDMA) sistemlerinde kullanılır. TDMA'da, her kullanıcının veri iletimini gerçekleştirmek için frekansları aynıdır ancak zaman dilimleri farklıdır. Zaman farklı alanlara ayrılarak her kullanıcı belirli bir zaman dilimine atanır, ardından birer birer iletim kullanılır. Yani TDMA için eşzamanlı iletim yapılamaz.

Frekans bölmeli çoklu erişim (Frequency-Division Multiple Access - FDMA)

FDMA, OFDMA sisteminde kullanılır ancak OFDM sistemlerinde kullanılamaz. TDMA'nın aksine, kullanıcıların aynı zaman dilimini farklı frekansta kullanmalarından dolayı eşzamanlı iletim mümkündür. Yani, farklı kullanıcılar iletim ortamını aynı anda paylaşabilirler ve bu, frekans bölünmesi ile sağlanır. OFDMA hem TDMA hem de FDMA'ya dayandığından, OFDM sadece TDMA'ya dayandığından, bu teknikler arasındaki ana fark eşzamanlı iletimi olduğu söylenebilir.

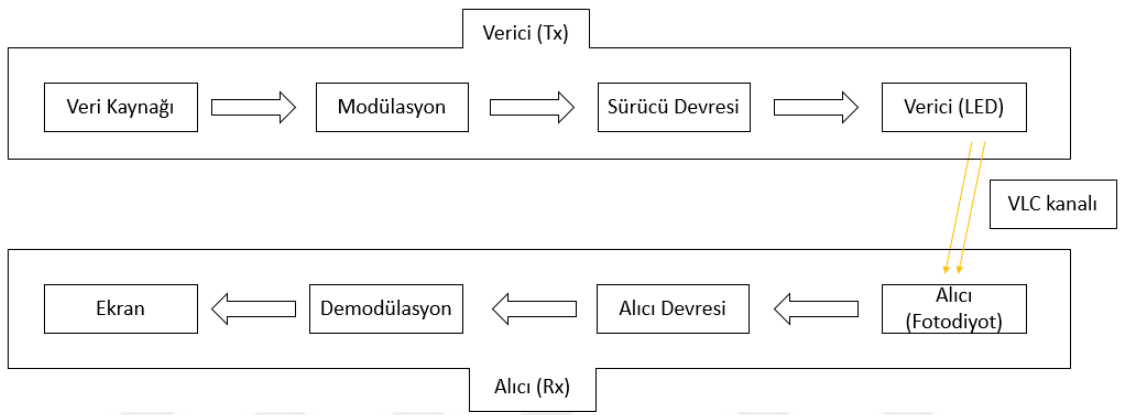
Kod bölmeli çoklu erişim (Code-Division Multiple Access - CDMA)

Kod bölmeli çoklu erişim yöntemi, yayılı spektrum yöntemi olarak sayılabilir. Benzer şekilde, birden fazla kullanıcı spektrumunu aynı anda kullanabilir, ancak CDMA'daki tüm kullanıcılar için ayrı bir imza dizisi vardır. Verilerin bant genişliğini yaymak için sözde rastgele kod kullanılır ve her aktarım kendi sözde rastgele kodlarıyla kodlanır. Ayrıca, alıcı bireysel kullanıcıyı bu özel koddan ayırt edebilir. CDMA'da, farklı kullanıcılar hem sıklık hem de zaman alanlarıyla örtüşür (Peucheret, 2009).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyaller

Temel olarak VLC sistemi; bilginin aktarılması için bir ışık kaynağı ve sürücü sistemi yani verici, aktarımın gerçekleştiği ortam olan kanal ve ışık sinyaline duyarlı alıcı sisteminden oluşur.



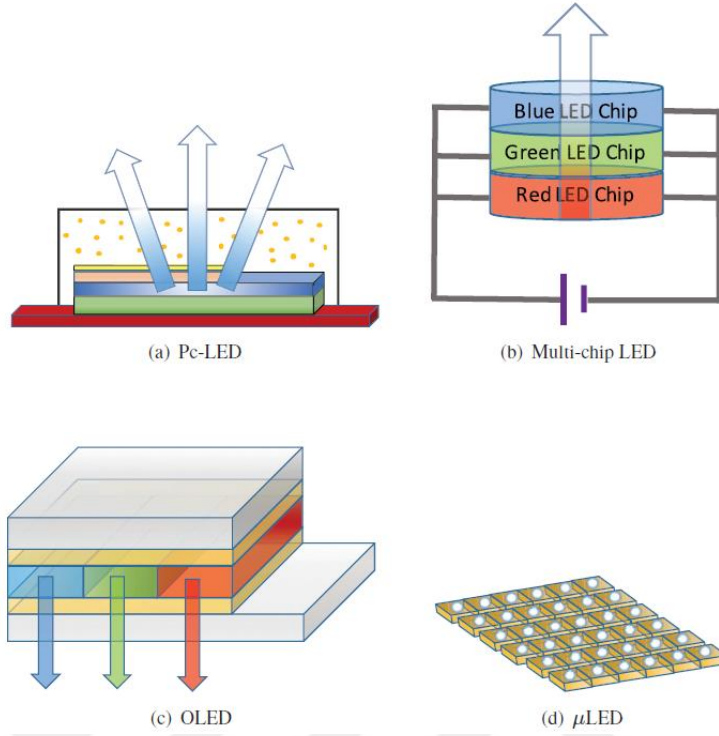
Şekil 3.1. VLC sistem yapısı

3.1.1. Verici

Görünür ışık haberleşmesi için hem ışık kaynağı hem de verici olarak ışık yayan diyot (Light Emitting Diode – LED) ve Lazer Diyot (Laser Diode – LD) kullanılabilir. Ancak düşük maliyet, hızlı açılıp kapanma süresi, yüksek parlaklık seviyesi, düşük gerilimle çalışabilmesi ve tabii görünür ışık bandında olması gibi özellikleri nedeniyle çoğunlukla verici olarak LED’ler tercih edilir. Ayrıca LED’ler görünür aralıktaki lazer diyotlar gibi insan gözüne de zarar vermedikleri için de tercih edilir (Sarbazı, 2014). Buna göre, LED tabanlı VLC sistemlerinde verici sistemleri temel olarak; sinyal üretici (veri kaynağı), RLL hat kodlama ve FEC kanal kodlama mekanizması, modülatör, LED sürücüsü ve bir veya daha fazla LED’i kapsar. Sürücü devresi, LED’lerden geçen akımı kontrol eder. Eğer LED tabanlı bir haberleşme sistemi ise sürücü devresi LED’lerden geçen akımı kontrol etmenin yanı sıra veriyi de modüle eder.

LED'ler ilk kullanıldığı zamanlarda yalnızca zayıf kırmızı ışık verebiliyorlarken gelişen teknoloji ile günümüzde görünür ışık, morötesi, kızılötesi gibi çeşitli dalga boylarında ve yüksek parlaklıkta ışık verebilir hâle gelmiştir (Ertuna, 2016). LED'in amaçlanan aydınlatmayı sağlaması için kullandığı elektriğe oranı ışık faydalılığı olarak adlandırılabilir. 2015 yılında sınıfının en iyisi olan LED'lerin ışık faydalılığı ortalama 113 lümen/watt (Lm/W) kadardır ve bu oranın 2020 yılında 200 Lm/W olacağı tahmin edilmektedir (Penning ve ark., 2016). VLC sistemlerinde LED'in aydınlatma ve haberleşme gibi iki farklı amaçla aynı anda kullanılıyor olması sistem tasarımını önemli hâle getirmektedir. Çünkü her iki işlem aynı anda gerçekleşirken birbirlerine bozucu herhangi bir etkide bulunmamalıdır. Bu nedenle VLC sisteminin performansı, kullanılacak LED armatürün yapısına bağlıdır ve doğru seçim yapılması gereklidir. Hem kapalı hem de açık alan uygulamalarında genellikle aydınlatma amaçlı beyaz ışık kullanılmaktadır. Nesnelerin renkleri, beyaz ışık altında doğal ışığın altındaki renklerine benzediği için aydınlatma amaçlı beyaz ışık tercih edilir (Pathak ve ark., 2015). Katı hâl aydınlatmasında (Solid-State Lighting), beyaz ışık iki farklı şekilde üretilebilir. İlk yöntemde beyaz ışık, sarı fosfor kaplaması olan mavi bir LED ile üretilir. Mavi ışık sarı fosfor kaplamadan geçtiğinde, birleşim sonucu ortaya beyaz ışık çıkar. Beyaz ışığın farklı renk sıcaklığına sahip halini üretmek için sarı fosfor tabakasının kalınlığı değiştirilir. Diğer yöntemde ise beyaz ışık elde etmek için, üç ana renk olan kırmızı, yeşil ve mavi (RGB) renkli çipler kullanılır. Her çip aynı anda renk yayar ve bir araya gelen ışık ortaya beyaz ışık çıkarır. Tipik olarak, kırmızı, yeşil ve mavi LED'ler, malzeme sistemine bağlı olarak bir spektrum bandı yayar. Kırmızı LED'lerin dalga boyu 625 nm, yeşil LED'lerin dalga boyu 525 nm ve mavi LED'lerin dalga boyu 470 nm civarındadır (George ve ark., 2014).

Bununla birlikte LED'ler de yapısal olarak farklı türlerde incelenebilir.



Şekil 3.2. Farklı LED türleri (Wang ve ark., 2017a)

Phosphor Converted (pc-)LED'ler: Fosforlu dönüştürülmüş LED'ler mavi ışığın bir kısmını yeşil, sarı ve kırmızıya diğer kısmını ise beyaz ışık halinde dışarı sızdıran üzeri fosfor tabakası ile kaplı mavi LED'lerdir. Bu LED'ler düşük maliyetlidirler ancak fosforun neden olduğu yavaş yanıtı nedeniyle bant genişliği sınırlaması vardır.

Çok-çipli (Multi-Chip) LED'ler: Çok çipli LED'ler, beyaz ışık üretmek için kırmızı, yeşil ve mavi gibi farklı renkler yayan üç veya daha fazla LED çipinden oluşur. Bu üç ayrı LED'i birleştirilerek oluşturulan bu kaynak TriLED (TLED) olarak da adlandırılmaktadır (Dahril ve ark., 2018). Farklı çiplerin ışık yoğunluğuna bağlı olarak renk kontrolü sağlanır.

Organik (Organic - O) LED'ler: Anot ve katot arasında ince film sıkıştırılmış organik yarı iletkenlerdir. Aydınlatma prensipleri inorganik LED'lere göre farklıdır. Elektron deliği çiftinin yeniden birleşmesiyle, tekli veya üçlü eksiton (uyarım) olarak adlandırılan yüksek enerjili bir moleküler durum ortaya çıkar. Bu durum da ışığın

yayılmamasına neden olur. Ortaya yayılan ışığın dalga boyu bant boşluğu yerine tabaka malzemesi ile alakalıdır.

Mikro (μ) LED'ler: Diyot dizisi halinde oluşturulan μ LED'ler son zamanlarda VLC sistemleri için geliştirilmeye başlanmıştır. 1.5 Gbps'ye kadar hızlara izin veren yüksek yoğunluklu paralel iletişimi içeren ekran panelleri olarak kullanılma potansiyeline sahiptir.

3.1.2. Alıcı

VLC için alıcı olarak fotodiyotlar ve optik kameralar kullanılabilir. Ancak genel olarak PIN (Positive-Intrinsic-Negative) ve APD (Avalanche Photo Diode) fotodiyot olmak üzere 2 farklı tip fotodiyot kullanılır.

PIN (Positive-Intrinsic-Negative - PIN) fotodiyotlar p + ve n + katkılı bölgeler arasında nispeten büyük bir iç yarı iletken malzeme bölgesi yerleştirilerek oluşturulur.

Çığ fotodiyodu (Avalanche Photo Diode – APD), yapısal olarak P-I-N fotodiyoduna çok benzer. Aradaki fark, iç katman tarafından emilen her foton için birden fazla elektron deliği çiftinin üretilebilmesidir.

Alıcı olarak kullanılacak bu iki farklı fotodiyot tipinin karşılaştırılması Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. PIN ve APD fotodiyotların karşılaştırılması (Hranilovic, 1988)

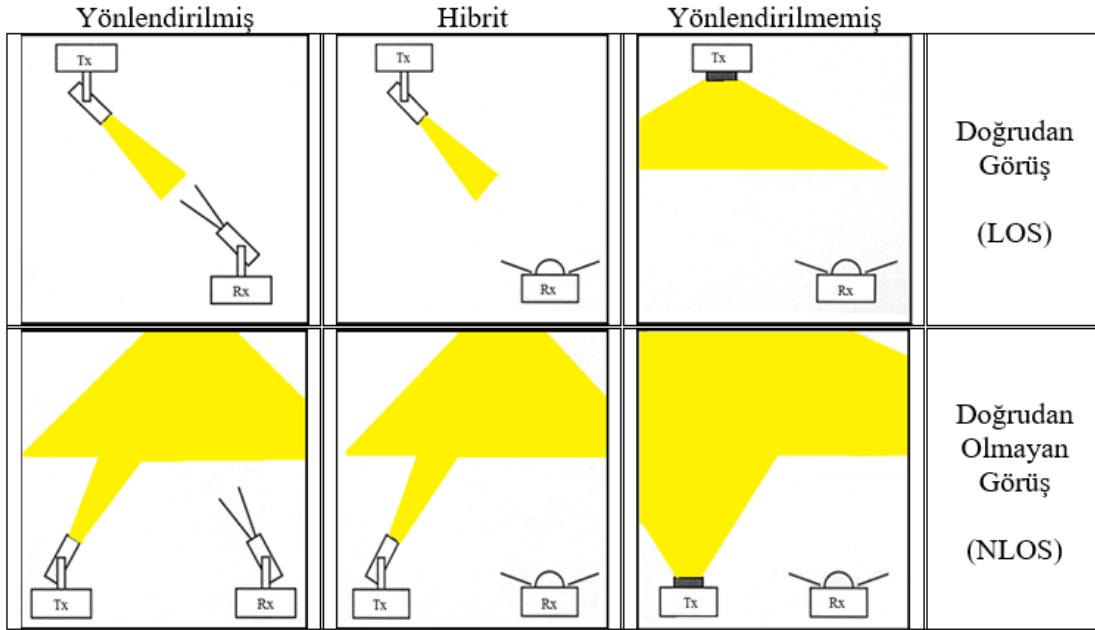
Karakteristik	PIN fotodiyot	Çığ (APD) fotodiyot
Modülasyon bant genişliği	10 MHz'den 10 GHz'e	100 MHz'den 10 GHz'e
Fotoakım kazancı	1	$10^2 - 10^4$
Özel devre gereksinimi	Gerektirmez	Yüksek ön gerilim voltajları ve sıcaklık dengeleme devreleri
Lineerlik	Yüksek	Düşük
Maliyet	Düşük	Yükseğe yakın

3.1.3. Kanal

VLC, OWC sistemlerinin alt başlığı olarak kabul edilir. Bu sistemlerde verinin aktarıldığı ortam olarak bilinen kanal, havadır. Ancak uygulamadaki baskın gürültüye bağlı olarak farklı şekillerde modellenebilir. Serbest alan optik yoğunluk kanalı, ayrık zamanlı Poisson kanalı ve serbest alan yoğunluğu kanalı yaygın olarak kullanılan kanal modelleridir (Wang ve ark., 2017a).

VLC sistemlerinde haberleşmeyi etkileyen önemli bir etken ise alıcı ile verici arasındaki bağlantı şeklidir. Doğrudan görüş (Line-of-Sight - LOS) ve doğrudan olmayan görüş (Non-Line-of-Sight - NLOS) gibi iki farklı VLC bağlantı şekli olduğu söylenebilir. LOS bağlantı şeklinde, alıcı ve verici arasında hiçbir engel bulunmaz ve vericiden çıkan veri doğrudan alıcıya ulaşır. NLOS bağlantı şeklinde ise vericiden çıkan veri alıcıya yansıma, kırılma, saçılma gibi yollarla ulaşır. VLC sistemlerinde, bağlantı şekillerini belirleyen bazı özellikler vardır. Bu özellikler vericinin ve alıcının yönlendirilmesine bağlıdır. LED bağımsız olarak yönlendirilebilirken, alıcı yönlendirilirken görüş alanı (Field of View –FOV) açısı dikkat edilmesi gereken bir husustur. Vericiden odaklı olarak gönderilen ışık alıcıda yüksek sinyal enerjisi oluşturur ve alıcının FOV açısının azalması ile farklı kaynaklardan gelecek herhangi bir bozucu girişim sinyalinin etkisi de azalır. Alıcı ve verici arasındaki kanalın matematiksel olarak modellenmesinde de bu bağlantı şekillerinin ayrı ayrı veya beraber göz önüne alınması gerekir (Çelik, 2018).

Yönlendirilmiş FOV açılarında alıcı ve verici yönleri kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Hibrit FOV açılarında ise sadece alıcının yönü belirlenebilir. Yönlendirilmemiş FOV açısında ise alıcı ve verici yönleri değiştirilemez.



Şekil 3.3. Farklı bağlantı şekilleri (Kahn ve Barry, 1997)

3.2. Yöntem

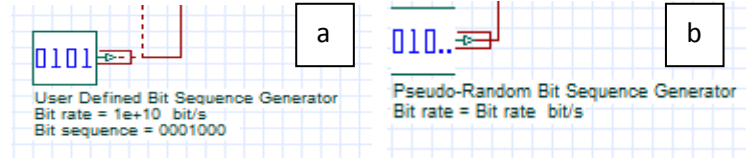
VLC sisteminin benzetimi Optiwave Corporation'a ait Optisystem yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optisystem, sistemin performansını en düşük maliyet, güç ve zamanla analiz etmek için optik iletişim bileşenlerinin gerçekçi bir şekilde modellenmesi için sistem düzeyinde bir benzetim sistemi olarak kullanılmaktadır. Optik modülasyon yöntemi değiştirilerek, sistem kazancı ve kalite faktörü de göz önüne alınarak verimli bir VLC sistemi oluşturulmak istenmiştir. Böylece optik modülasyon yöntemlerinin VLC sistemi üzerindeki etkileri de gösterilmiş olacaktır.

3.2.1 Kullanılan bileşenler

Optisystem'de VLC sistemi benzetiminin gerçekleştirilebilmesi için kullanılan bazı bileşenler vardır. Ve bu bileşenler sistemin ihtiyacı ve kullanıcının isteğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

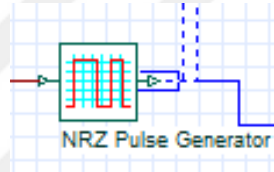
User Defined Bit Sequence Generator (Kullanıcı Tanımlamalı Bit Dizi Üreteci), iletilmek üzere kullanıcı tarafından tanımlanan bit dizisi üretir. Örneğin; 0001000

şeklinde kullanıcı tarafında belirtilen diziyi üretir. Pseudo Random Bit Generator – PRBSG (Sözde Rastgele Bit Üretici) ise %50 oranında 0 ve 1 olarak rastgele bit dizisi üretir.



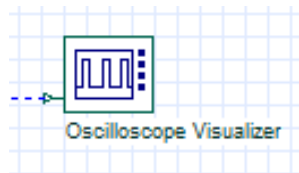
Şekil 3.4. Kullanıcı Tanımlı Bit Dizi Üretici (a) ve PRBSG (b)

NRZ Pulse Generator (NRZ Darbe Üretici), 0'a dönüşsüz darbeler üretir. Giriş sinyali binary iken çıkışı elektrik sinyalidir.



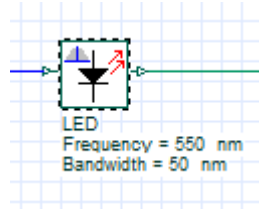
Şekil 3.5. NRZ Darbe Üretici

Oscilloscope Visualizer (Osiloskop Görüntüleyici), kullanıcının zaman alanındaki elektrik sinyallerini hesaplamasını ve görüntülemesini sağlar. Sinyal genliği ve oto bağlantısı görüntülenebilir.



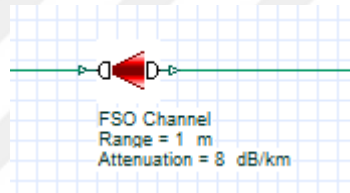
Şekil 3.6. Osiloskop Görüntüleyici

LED, aydınlatma amacı dışında modüle edilen optik sinyali kanal aracılığıyla alıcıya iletir.



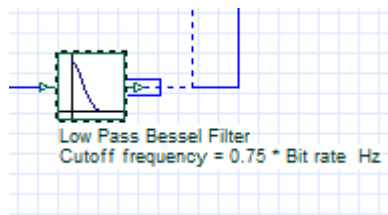
Şekil 3.7. LED

FSO Channel (FSO Kanal), iki teleskopun bir alt sistemi ve aralarındaki boş alan kanalıdır. En iyi görüş alanı serbest karasal bağlantıların modellenmesi için uygundur. Optisystem benzetim yazılımında optik kablosuz iletişim (OWC) kanal ve dağıtık kanal gibi farklı kanal türleri de bulunmaktadır.



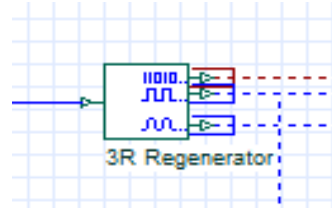
Şekil 3.8. FSO Kanal

Low Pass Bessel Filter (Alçak Geçiren Bessel Filtresi), Bessel frekans transfer fonksiyonu ile filtreleme işlemi yapar.



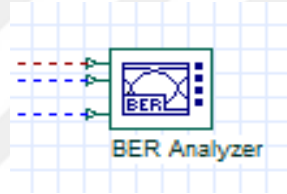
Şekil 3.9. Alçak Geçiren Bessel Filtresi

3R Regenerator (3R Rejeneratörü), elektrik sinyali üretir. Çıkış portundan bir tane binary iki tane elektriksel sinyal alınır.



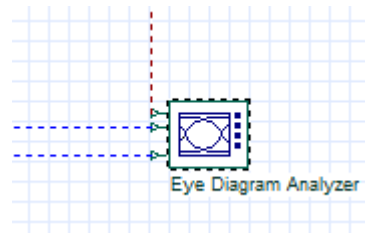
Şekil 3.10. 3R Rejeneratör

BER Analyzer (BER Analizörü), kullanıcının bir elektrik sinyalinin bit hata oranını otomatik olarak hesaplayıp görüntülemesini sağlar. BER değerini Gaussian ve Chi-Squared gibi farklı algoritmalar kullanarak tahmin edebilir. Q faktörü, göz açma, göz kapatma, sönme oranı, göz yüksekliği, titreme vb gibi göz diyagramından farklı ölçümler türetebilir. FEC değerini hesaba katarak BER modellerinin çizilip sistem hata ve paylarının tahmin edilmesini sağlar.



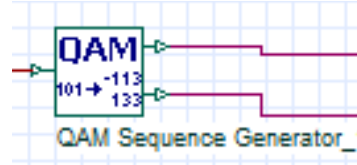
Şekil 3.11. BER Analizörü

Eye Diagram Analyzer (Göz Diyagramı Analizörü), kullanıcı için elektriksel sinyalin göz diyagramını otomatik olarak hesaplar ve görüntüler. Q faktörü, göz açma, göz kapatma, sönme oranı, göz yüksekliği, maske ihlali oranı vb gibi göz diyagramına bağlı ölçümleri hesaplayabilir. Ayrıca histogramları ve standart göz maskelerini görüntüleyebilir.



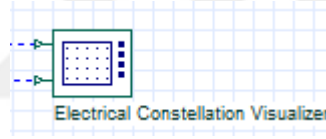
Şekil 3.12. Göz Diyagramı Analizörü

QAM Sequence Generator (QAM Dizi Üretici), Dördül Genlik Modülasyonu olan QAM'i kullanarak binary sinyallerden M'li sembol dizisi oluşturur. M değeri sembol başına düşen bit değeridir (b/sym) ve kullanıcı tarafından sistem özelliklerine bağlı olarak belirlenir. Örneğin b/sym oranı 4 ise, 16 QAM ile sistem gerçekleştirilir.



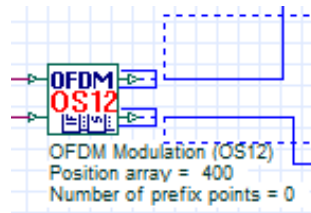
Şekil 3.13. QAM Dizi Üretici

Electrical Constellation Visualizer (Elektriksel Takımyüdü Görüntüleyici), faz içi ve dördül fazlı elektrik sinyallerini gösterir. Ayrıca kutup şeması da gösterilebilir ve M'li sinyaller için sembol hatası olasılığını hesaplar.



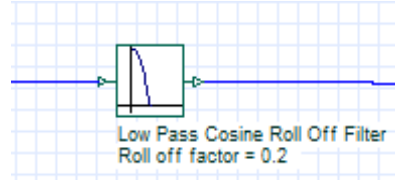
Şekil 3.14. Elektriksel Takımyüdü Görüntüleyici

OFDM Modulation (OFDM Modülasyon), VLC sisteminde OFDM modülasyonunun gerçekleştirildiği bileşendir. QAM dizi üreticiden gelen M'li semboller bu bileşene gelir ve burada dijital sinyali çoklu dikgen alt taşıyıcılara modüle eder. Giriş sinyali M'li iken çıkış sinyali elektrik sinyalidir ve faz içi (In-phase) ve dördül (Qadrature) bileşenlerden oluşur.



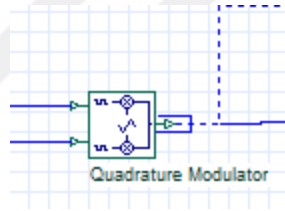
Şekil 3.15. OFDM Modülasyon

Low Pass Cosine Roll of Filter (Alçak Geçiren Kosinüs Filtresi), gelen elektrik sinyaline kosinüs dönüş frekansı transfer fonksiyonunu uygulayarak çıkışında filtrelenmiş elektrik sinyali verir.



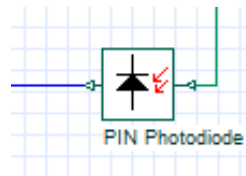
Şekil 3.16. Alçak Geçiren Kosinüs Filtresi

Quadrature Modulator (Dördül Modülâtör), temel bant sinyali sinüzoidal taşıyıcılarla çarpılarak geçiş bandına dönüştürülür. Bunun nedeni ise iletilecek olan sinyalin yüksek frekanslı taşıyıcı sinyal ile modüle edilmesidir. Bu işlem I bileşenin kosinüs sinyali ile çarpılırken, Q bileşenin sinüs sinyali ile çarpılması ile bu blokta gerçekleştirilir.



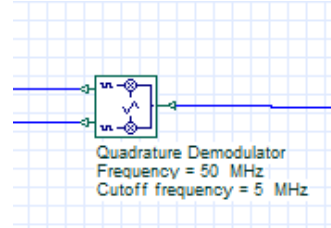
Şekil 3.17. Dördül Modülâtör

Photodiode PIN (PIN fotodiyot), üzerine düşen optik sinyali elektrik sinyaline dönüştürür.



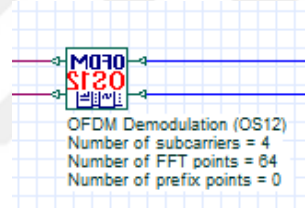
Şekil 3.18. PIN fotodiyot

Quadrature Demodulator (Dördül Demodülör), PIN fotodiyottan gelen elektrik sinyalini demodüle eder. Bir giriş ve faz içi (I) ve dördül (Q) bileşenli iki çıkışa sahiptir. Demodülörün frekansı, Quadrature Modülör'ün frekansına eşit olmalıdır.



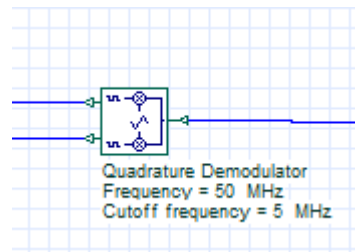
Şekil 3.19. Dördül Demodülör

OFDM Demodulator (OFDM Demodülör), OFDM sinyali dijital sinyale demodüle eder.



Şekil 3.20. OFDM Demodülör

QAM Sequence Decoder (QAM Dizi Dekoderi), M'li sinyalleri binary (ikili) sinyale çevirir.

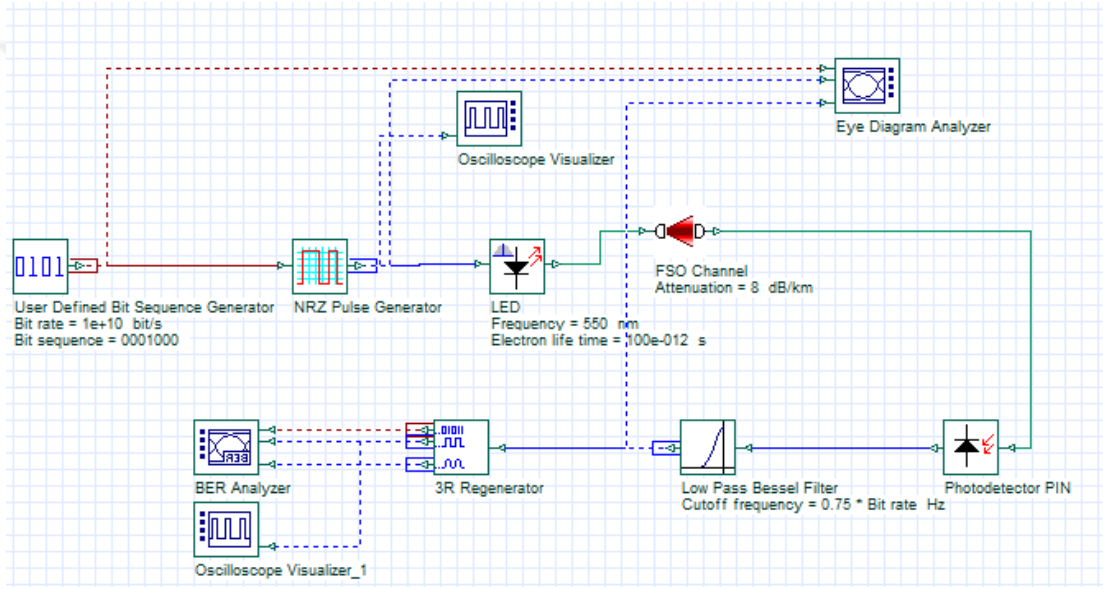


Şekil 3.21. QAM Dizi Dekoderi

3.2.2 OOK-NRZ modülasyonu ile VLC sistemi

VLC sisteminin temel çalışma mantığını sade bir biçimde incelemek amaçlı NRZ-OOK ile bir VLC sistemi simule edilmiştir. Bu sistemde LED'in optik yoğunluğu, tüm bit aralığının 1 bit değeri tarafından dolduğu ve 0 bit değerinde darbe oluşturmadığı için 1 ve 0 darbeleri arasında sıfıra dönmez (Jain ve ark., 2014).

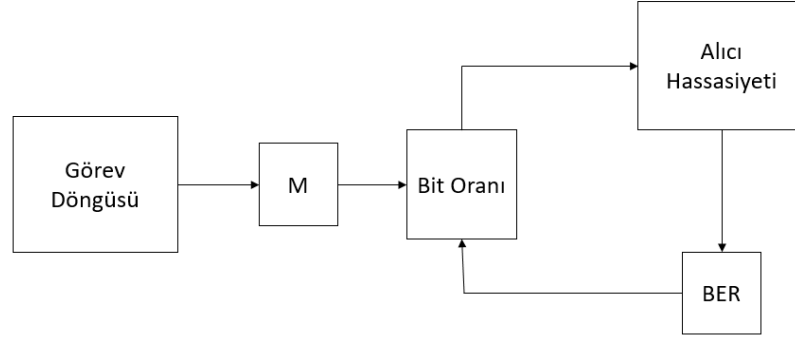
Şekil 3.22'de OOK-NRZ modülasyonlu VLC sistemi benzetimi gösterilmiştir.



Şekil 3.22. OOK-NRZ sistemi

3.2.3. M-QAM-OFDM modülasyonu ile VLC sistemi

M, binary sayısını temsil eder ve kullanıcı tarafından sistem ihtiyaçlarına göre belirlenmektedir. M-QAM OFDM'de, yaklaşık sembol oranının orijinal sembol hızından daha büyük olmamasını sağlamak için öncelikle M değerinin artırılması gerekir. Ancak bit hızı arttıkça, alıcı hassasiyeti azalır ve daha kötü BER performansı elde edilir. Artan BER değeri, iletişim kalitesini, Şekil 3.23'de gösterildiği gibi bir döngü oluşturan, doğru alınan bitler açısından korumak için daha yüksek bit hızı gerektirir.



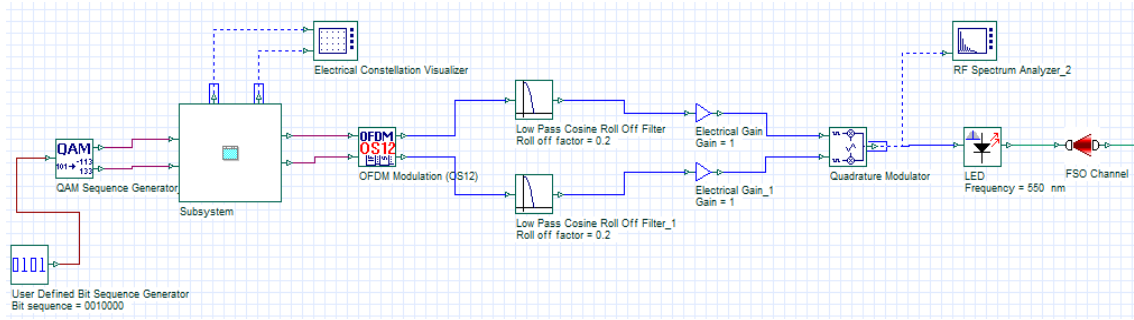
Şekil 3.23. M-QAM-OFDM VLC sistemi için BER değeri

M-QAM-OFDM VLC sistemlerinde görev döngüsü M değerine bağlıdır. Bu ilişki Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

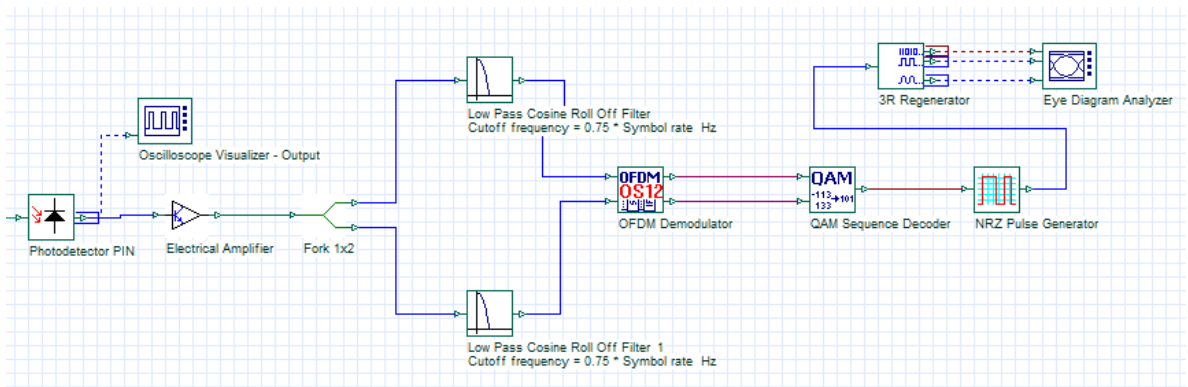
Çizelge 3.2. M değeri ile Görev döngüsü ilişkisi (Wang ve ark., 2012)

Görev döngüsü	0.1	0.2	0.3 – 0.5	0.6 – 0.9	1.0
M	64	32	16	8	4

Optisystem benzetim yazılımı ile 4-QAM-OFDM VLC sistemi oluşturulmuştur. Sistem için verici Şekil 3.24, alıcı ise Şekil 3.25 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.24. M-QAM-OFDM Verici Sistemi ve Kanalı



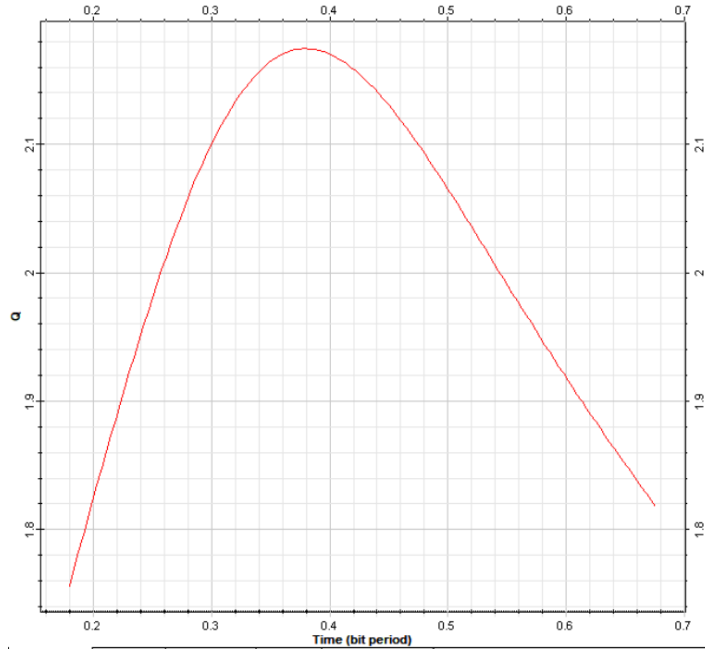
Şekil 3.25. M-QAM-OFDM Alıcı Sistemi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

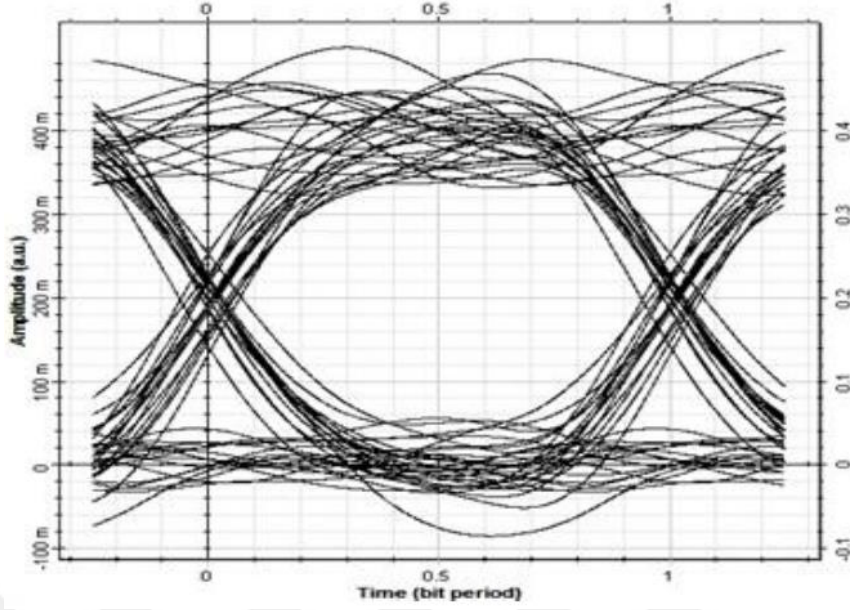
VLC için temel bir modülasyon yöntemi olan NRZ-OOK ile verimliliğine karşın karmaşık yapısı ile göz önüne çıkan M-QAM-OFDM modülasyon şemaları kurularak iki farklı benzetim yapılmıştır.. Doğrudan görüş hattı herhangi bir engel ile bozulmayan VLC sistemi düşünülerek hazırlanan benzetim sonuçlarında düşük BER oranı ve yüksek sistem performansı elde etmek amaçlanmıştır.

4.1. OOK-NRZ VLC Sistemi

Verici tarafından gönderilen sinyal ile alıcı tarafından alınan sinyalin benzer olması verimli haberleşme sisteminin verimli olması için temel amaçlardan biridir. Sinyal ne kadar az bozularak ulaşırsa sistem o kadar verimlidir denilebilir. LOS yapıda hazırlanan bir VLC OOK-NRZ modülasyonlu sistemde iletilen ve alınan sinyaller birbirine benzerlik gösterse dahi kanaldan, çevresel etkenlerden kaynaklanan farklılıklar oluşur. Ancak sistem performansını görmek için BER ve Göz Diyagramları incelenmelidir. Şekil 4.1’de elde edilen BER diyagramı, Şekil 4.2’de ise göz diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.1. OOK-NRZ VLC sisteminin BER grafiği

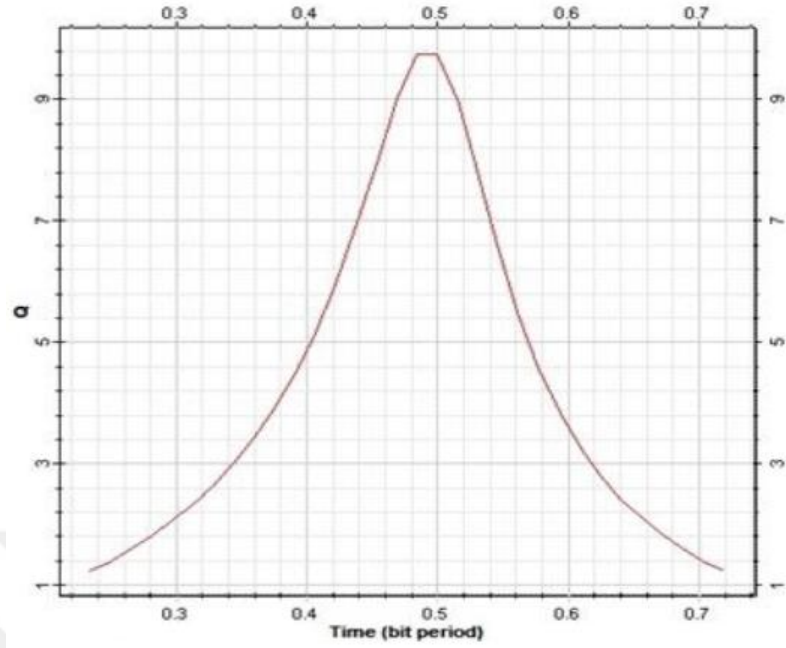


Şekil 4.2. OOK-NRZ VLC sistemi için göz diyagramı

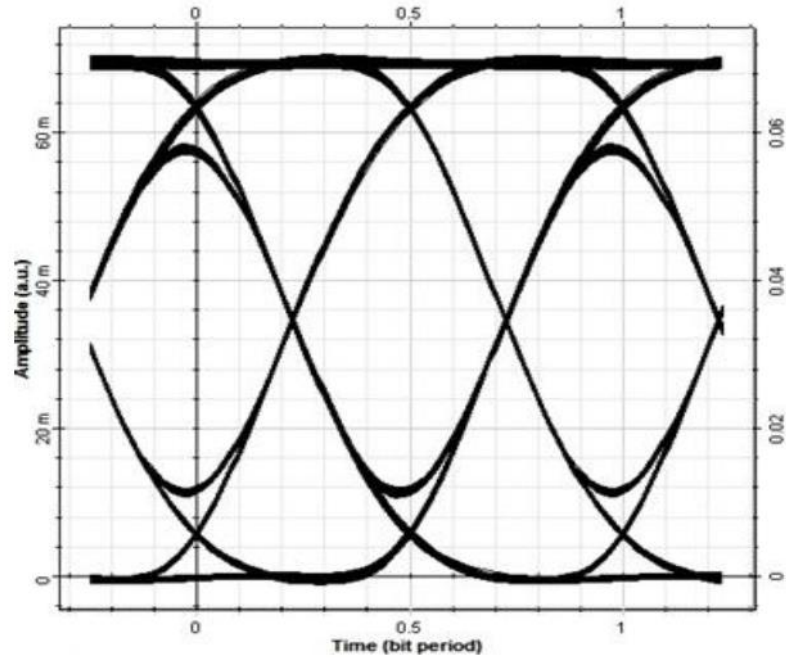
Şekil 4.1'e göre OOK-NRZ VLC sisteminde elde edilen BER değeri 6.19×10^{-9} 'dur. OOK-NRZ VLC sisteminin en iyi örnekleme anını veren göz diyagramı tam simetrik olmasa dahi simetriye yakın olması, karartma kontrolünün ve sistemin başarımının yüksek olduğunu gösterir. Ancak yine de bu tekniğin yüksek veri hızlarında yeterli olmayacağı daha önceki çalışmalardan bilindiği gibi M-QAM-OFDM VLC sistemlerinde daha yüksek sistem başarımı elde edileceği beklenmektedir.

4.2. M-QAM-OFDM VLC Sistemi

Hazırlanan sistemde M değeri 4 olarak seçilmiş ve 4-QAM-OFDM modülasyonu ile VLC sistemi kurulmuştur. Elde edilen BER grafiği Şekil 4.3'te ve göz diyagramı Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. M=4 için M-QAM-OFDM VLC sisteminin BER grafiği



Şekil 4.4. M=4 için M-QAM-OFDM VLC sisteminin göz diyagramı

4-QAM-OFDM sistemi için elde edilen BER değeri 10^{-23} olarak gözlemlenmiştir. Göz diyagramının simetrikliği ise sistem başarımının yüksek olduğunu göstermektedir. Elde edilen benzetim sonuçlarıyla karartma kontrolü ve değişken M-QAM OFDM VLC

sistem başarımı gözlemlenmiştir. İletişim kalitesini, doğru alınan bitlerin sayısı bakımından korumak için, M önce görev döngüsüne göre değiştirilebilir, ardından veri hızının ayarlanması gerekir. Sonuçlar, gerekli sembol oranlarının, her zaman karartma kontrol şemasının gerçek sistemde uygulanmasını kolaylaştıran farklı görev döngülerine sahip orijinal sembol oranından daha küçük olduğunu göstermektedir.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma, VLC sistemlerinde veri aktarımında kullanılan modülasyon tekniği ile yüksek performans elde etmek için yapılmıştır. Bu amaçla çalışmada iki farklı modülasyon tekniği kullanılmıştır. OOK-NRZ modülasyon tekniğine göre, BER diyagramında elde edilen değer 6.19×10^{-9} 'dur. Bu değer sistem performansı açısından incelendiğinde daha önceki çalışmalar referans edilerek başarılı olduğu görülmektedir. OOK-NRZ modülasyonlu VLC sisteminin göz diyagramına bakıldığında, simetriye ve temize yakın bir diyagram görülmektedir. Yani veriler alıcı tarafından rahatlıkla algılanabilir. Ancak bu sistemin yüksek veri hızlarında yeterli olmayacağı kanaati oluşmuştur. M-QAM-OFDM modülasyon tekniği ile M değeri 4 kabul edilerek, VLC sisteminin BER diyagramına bakılmıştır ve BER değeri 10^{-23} olarak gözlemlenmiştir. Yine bu modülasyon tekniği ile elde edilen göz diyagramına bakıldığında tam simetrik ve açık olduğu gözlemlenmiştir. Yani bu sistem ile aktarılan veriler alıcı tarafından çok daha kolay bir şekilde algılanabilecektir.

Yapılan çalışmada sonucu iki farklı modülasyon tekniği için sistem performanslarının karşılaştırılmıştır. 4-QAM-OFDM için tüm sistem parametrelerinin en iyi performansı gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle titreşimin azaltılması, karartma desteği gibi haberleşme sisteminin gereksinimlerini karşılayacak, daha az hata ile yüksek hızda veri iletimi sağlamak için düşük dereceli modülasyon tekniklerinin kullanılabilirliği gözlemlenmiştir. Özellikle karartma desteği sağlarken verimli bir şekilde uzun mesafedeki yüksek hızlı veriyi iletmek için kanal kalitesine uygun bir modülasyon tekniği seçilmelidir. Görev döngüsü, bit hızı, ışın sapması ve iletim mesafesi iyi iletişim bağlantısı için göz önünde bulundurulması gereken parametrelerdir. Yapılan benzetim analizlerinin sonucu, 4-QAM-OFDM'nin düşük görev döngüsünde yüksek veri hızı elde etmek için daha iyi olduğunu göstermektedir. Daha sonraki çalışmalarda M-QAM-OFDM VLC sistemi için M değeri görev döngüsü gereği değiştirilerek farklı değerler için sonuçlar karşılaştırılabilir.

VLC'ye artan yoğun ilgi nedeniyle geçtiğimiz son birkaç yılda birçok farklı kaynak ortaya çıkmıştır. VLC için gerçekçi kanal modelinin oluşturulması, güç dağılımı analizleri, farklı modülasyon türleri ile VLC sisteminin gerçekleştirilmesi gibi birçok farklı amaçla hazırlanmış çeşitli kaynaklar incelendiğinde hala VLC için bu başlıklar

için bilgi ve çalışmaların yetersiz olduğu aşikârdır. Ve yine VLC sistemleri için alıcıların, vericilerin ve kanalların özel karakteristikleri nedeniyle çeşitli sinyal işleme ve en uygun hâle getirme (optimizasyon) konuları da VLC sistemleri için önemli olduğu kadar yetersizdir de. Bu nedenlerle daha sonraki yapılacak çalışmalarda farklı deneylerle ve benzetimlerle VLC sistemlerinin eksiklerinin giderilmesi gerekmektedir. Daha uzun mesafelerde, yüksek veri iletim hızına ulaşabilen modülasyon teknikleri ile VLC sistemleri gerçekleştirilebilir. Ayrıca VLC sisteminin kullanılabileceği birçok farklı uygulama alanı olduğu bilinmektedir. VLC ile mekatronik sistem tasarımları yapılarak uygulama alanlarına katkıda bulunulabilir ve yeni alanlar katılabilir.



6. KAYNAKLAR

- Afgani, M., Haas, H., Elgala, H. ve Knipp, D., 2006. Visible Light Communication Using OFDM. 2nd International Conference on Testbeds & Research Infrastructures for the DEvelopment of NeTworks & COMmunities (TRIDENTCOM 2006), 1-3 Mart. Barcelona, İspanya.
- Agraval, G. P., 2002. Fiber-Optic Communication Systems. John Wiley & Sons, 561 p. New York, Amerika Birleşik Devletleri.
- Al-Quatayri, M. A. ve Jeedella, J. S., 2010. Integrated Wireless Technologies for Smart Homes Applications. Smart Home Systems. Editör: M. A. Al-Quatayri. Reijeka, Croatia: InTech, 17-42.
- Anonim, 2003. Visible Light Communications Consortium (VLCC). http://www.vlcc.net/modules/xpage1/?ml_lang=en (25.01.2019).
- Anonim, 2007. JEITA: CP-1221 Visible Light Communications System www.jeita.or.jp/japanese/standard/book/CP-1221/ ve JEITA: CP-1222 Visible Light ID System <https://www.jeita.or.jp/japanese/standard/book/CP-1222/> (25.10.2018).
- Anonim, 2011. Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light. IEEE Standart 802.15.7, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Parça 15.7. New York, Amerika Birleşik Devletleri.
- Anonim, 2011a. Elektrik Elektronik Teknolojisi, Kablosuz Ağ Teknolojileri, MEB, Ankara, Türkiye. <http://www.megep.meb.gov.tr> (18.11.2018)
- Anonim, 2014. The IEEE 802.15.7r1 Study Group. <http://www.ieee802.org/15/> (12.10.2018).
- Anonim, 2019. Telsiz İşlemlerine İlişkin Usul Ve Esaslar Hakkında Yönetmelik. <http://www.mevzuat.gov.tr> (28.03.2019)
- Armstrong, J. ve Lowery, A., 2006. Power Effecient Optical OFDM. Electronics Letters, 42 (6), 370 -372.
- Azhar, A. H., Tuan-Anh, T. ve O'Brien, D., 2010. Demonstration of High-Speed Data Transmission Using Mimo-Ofdm Visible Light Communications. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) Workshops, 5-10 Aralık, 2010, Miami, FL, Amerika Birleşik Devletleri.
- Azhar, A., Tran, T. ve O'Brien D., 2013. A Gigabit/s Indoor Wireless Transmission Using MIMO-OFDM Visible Light Communications. IEEE Photonics Technology Letters, 25 (2), 171 – 174.
- Bai, B., Xu, Z. ve Fan, Y., 2010. Joint LED dimming and high capacity visible light communication by overlapping PPM. The 19th Annual Wireless and Optical Communications Conference (WOCC 2010). 14 – 15 Mayıs 2010. Shangai, Çin.
- Bouchet, O., Porcon, P., Wolf, M., Grobe, L., Walewski, J. W., Nerreter, S., Langer, K., Vucic, J., Kamalakis, T., Ntogari, G. ve Gueutier, E., 2010. Visible-Light Communication System Enabling 73 Mb/s Data Streaming. IEEE Globecom 2010 Workshop on Optical Wireless Communications, 6 – 10 Kasım. Miami, Florida, Amerika Birleşik Devletleri.
- Chow, C. W., Yeh, C. H., Liu, Y. F. ve Liu, Y., 2011, Improved Modulation Speed of LED Visible Light Communication System Integrated to Main Electricity Network. Electron Letters, 47 (15), 867 – 868.
- Cui, K., Chen, G., Xu, Z. ve Roberts, R. D., 2011. 2nd IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 5 -9 Kasım 2011. Houston, Amerika Birleşik Devletleri.

- Çelik, Y., 2018. Görünür Işık Haberleşmesi için Yeni Nesil Fiziksel Katman Teknikleri. (Doktora Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Dahril, F. A., Ali, S. ve Jawaid, M. M., 2018. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, 18 (2), 117 – 125.
- Datta, S. ve Das, B., 1990. Electronic Analog of the Electro-optic Modulator. Applied Physics Letters, 56 (7), 665 - 667.
- Dimitrov, S. ve Haas, H., 2015. Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi. Cambridge University Press, 224 p, England.
- Elgala, H., 2010. A Study on the Impact of Nonlinear Characteristics of LEDs on Optical OFDM. (Doktora Tezi), School of Engineering and Science Jacobs University, Bremen.
- Elgala, H., Mesleh, R. ve Haas, H., 2009. Practical considerations for indoor wireless optical system implementation using OFDM. 10th International Conference on Telecommunications. 8- 10 Haziran 2009. Zagreb, Hırvatistan.
- Elgala, H., Mesleh, R. ve Haas, H., 2011. Indoor Optical Wireless Communication: Potential and State-of-Art. Communications Magazine, IEEE, 49 (9), 56-62.
- Ertuna, A. D., 2016, Görünür Işık İle Haberleşme ve Sistem Tasarımı. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü / Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Falciasecca, G. ve Valotti, B., 2009, Guglielmo Marconi: The Pioneer of Wireless Communications, European Microwave Conference (EuMC), Rome, Italy.
- Farr, N., Bowen, A., Ware, J., Pontbriand, C. ve Tivey, M., 2010. Integrated, Underwater Optical/Acoustic Communications System. IEEE OCEANS, 24 – 27 Mayıs, 2010, Sydney, NSW, Avustralya
- Fernandez, A. R., 2012. Applications for Wireless Sensor Networks : Tracking with Binary Proximity Sensors. (Bitirme Tezi), Faculty of E.U.I.T. Telecomunicación (UPM), Madrid.
- Gawende, P., Sharma, A. ve Kushwaha, P., 2016. Various Modulation Techniques for LiFi. Smart And Innovative Technologies In Engineering And Sciences, 5 (3), 121 -125.
- George, J. J., Mustafa, M. M., Osman, N. M., Ahmed, N. H. ve Hamed, D. M., 2014. A Survey on Visible Light Communication. International Journal of Engineering And Computer Science. 3 (2), 3805 – 3808.
- Georghiades, C., 1994. Modulation and coding for throughput-efficient optical systems. IEEE Transactions on Information Theory, 40 (5), 1313 -1326.
- Gfeller, F. R. ve Bapst, U., 1979. Wireless In-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation. Proceedings of the IEEE, 67 (11), 1474-1486.
- Gfeller, F., Hirt, W., Langei M. de ve Weiss, B., 1996. Wireless Infrared Transmission: How To Reach All Office Space. Proceedings of Vehicular Technology Conference – VTC, 28 Nisan – 1 Mayıs 1996. Atlanta, Amerika Birleşik Devletleri.
- Grubor J., Lee, S. C. J., Langer, K. D., Koonen, T. ve Walewski, J. W., 2007. Wireless high-speed data transmission with phosphorescent white-light LEDs. 33rd European Conference and Exhibition of Optical Communication - Post-Deadline Papers (published 2008), 10 – 20 Kasım 2007. Berlin, Almanya.

- Grubor, J., Randel, S., Langer, K. D. ve Walewski J. W., 2008. Broadband Information Broadcasting Using LED-Based Interior Lighting. *Journal of Lightwave Technology*, 26 (24), 3883-3892.
- Hranilavic, S., 1988. *Wireless Optical Communication Systems*. Springer Science and Business Media. Boston, Amerika Birleşik Devletleri.
- Hu, J., Gong, C. ve Xu, Z., 2016. Demonstration of a Robot Controlling and Positioning System Based on Visible Light. 8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). 13 -15 Ekim 2016. Yangzhou, Çin.
- Jain, A., Bahl, R. K. ve Banik, A., 2014. Demonstration of RZ-OOK Modulation Scheme for High Speed Optical Data Transmission. Eleventh International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), 11 - 13 Eylül, Vijayawada, Hindistan.
- Kahn, J. M. ve Barry, J. R., 1997. Wireless Infrared Communication. *Proceedings of the IEEE*, 85 (2), 265 - 298.
- Karunatilaka, D., Zafar, F., Kalavally, V. ve Parthiban, R., 2015. LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art. *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, 17 (3), 1649 – 1678.
- Kavehrad, M., 2010. Sustainable Energy-Efficient Wireless Applications Using Light. *IEEE Communication Magazine*, 48 (12), 66-73.
- Khalid, A. M., Cossu, G., Corsini, R., Choudhury, P. Ve Ciaramella, E., 2012. 1-Gb/s Transmission Over a Phosphorescent White LED by Using Rate-Adaptive Discrete Multitone Modulation. *IEEE Photonics Journal*, 4 (5), 1465 – 1473.
- Komine, T. ve Nakagawa, M., 2004. Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System Using LED Lights. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 50 (1), 100-107.
- Kulhavy, K., 2001. Old but fascinating open hardware: 10MBit 1400m airlink w/ LEDs. <http://www.ronja.twibright.com> (22.04.2019).
- Kwon, J. K., 2010. Inverse Source Coding for Dimming in Visible Light Communications Using NRZ-OOK on Reliable Links. *IEEE Photonics Technology Letters*, 22 (19), 1455 – 1457.
- Lehman, B. ve Wilkins, A. J., 2014. Designing to Mitigate the Effects of Flicker in LED Lighting. *IEEE Power Electronics Magazine*, 1 (3), 18 -26.
- Li, H., Chen, X., Huang, B., Tang, D. ve Chen, H., 2014. High Bandwidth Visible Light Communications Based on a Post-Equalization Circuit. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26 (2), 119 – 122.
- Mahon, B., 2003. *The Man Who Changed Everything: The Life of James Clerk Maxwell*. John Wiley-Sons, 256 p, Chichester, West Sussex.
- Minh, H. L., O'Brien, D. ve Faulkner, G., 2009. 100-Mb/s NRZ Visible Light Communications Using A Postequalized White LED. *IEEE Photonics Technology Letters*, 21 (15), 1063 - 1065.
- Minh, H. L., O'Brien, D., Faulkner, G., Zeng, L., Lee, K., Jung, D. ve Oh, Y., 2008. High-Speed Visible Light Communications Using Multiple-Resonant Equalization. *IEEE Photonics Technology Letters*, 20 (14), 1243 – 1245.
- Morkoç, H., 2009. *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices, Materials Properties, Physics and Growth*. John Wiley & Sons, 1311 p, Weinheim, Almanya.

- National Instruments, 2013. Case Study: Using New Technologies to Design and Test Wireless Receivers. RF and Communication Technology Forum, National Instruments.
- Neokosmidis, I., Kamalakis, T., Walewski, J., Inan B. ve Sphicopoulos, T., 2009. Impact of Nonlinear LED Transfer Function on Discrete Multitone Modulation: Analytical Approach. *J. Lightwave Technologies*, 27(22), 4970–4978.
- Netsianda, R. E., Ouahada, K. ve Ndjiongue, R., 2017. A Comparative Study of Different Modulations for Visible Light Communications : International Conference on Advances in Computing, Control and Networking (ACCN-2017), Şubat 2017, Bangkok, Tayland.
- Ntogari, G., Kamalakis, T., Walevski, J. ve Sphicopoulos, T., 2011. Combining illumination dimming based on pulse-width modulation with visible light communications based on discrete multitone. *IEEE/OSA J. Optical Communication Network*, 3 (1), 56 – 65.
- Öztürk, M., 2016. Optical Power Distribution and OFDM/OFDMA Modulation for Visible Light Communication. (Yüksek Lisans Tezi), Doğa ve Uygulamalı Bilimler Enstitüsü/Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara.
- Pang, G., Kwan, T., Chan, C. ve Liu, H., 1999. LED Traffic Light as a Communications Device. *Proceedings 199 IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems (Cat. No.99TH8383)*, Tokyo, Japonya.
- Parikh, H., Chokshi, J., Gala, N. ve Biradar, T., 2013. Wirelessly Transmitting a Grayscale Image Using Visible Light. *International Conference on Advances in Technology and Engineering (ICATE)*, 23-25 Ocak, 2013, Mumbai, Hindistan.
- Park, S. B., Jung, D. K., Shin, H. S., Shin, D. J., Hyun, Y. J., Lee, K. ve Oh, Y. J., 2007. Information Broadcasting System Based on Visible Light Signboard. 7th, IASTED international conference on wireless and optical communications. Montreal, Kanada.
- Pathak, P. H., Feng, X., Hu, P. ve Mohaptra, P., 2015. Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17 (4), 2047 – 2077.
- Penning, J., Stober, K., Taylor, V. ve Yamada, M., 2016. Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications. U.S. Department of Energy Solid-State Lighting Program. Editör: Navigant Consulting. Amerika Birleşik Devletleri.
https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/energysavingsforecast16_2.pdf (12.01.2019)
- Peucheret, C., 2009. Direct and External Modulation of Light. Ders Notu, Technical University of Denmark, Danimarka.
- Philips, 2015. Carrefour in France Installs Philips LED Based Indoor Positioning System. <http://www.lighting.philips.com/main/cases/cases/food-and-large-retailers/carrefour-lille.html> (23.03.2019).
- Rajagopal, S., Kim, D., Li, Y. ve Khan, F., 2014. Flexible and Integrated Framen Structure Design for Supporting Multiple Topologies With Visible Light Communication. United States Patent. Amerika Birleşik Devletleri.
- Rajagopal, S., Roberts, R. D. ve Lim, S., 2012. IEEE 802.15.7 Visible Light Communication: Modulation Schemes and Dimming Support. *IEEE Communications Magazine*, 50 (3), 72 – 82.

- Rea, M. S. 2000. The IESNA Lighting Handbook: Reference and Application. Illuminating Engineering Society of North America, 1004 p. Kuzey Amerika.
- Sarbazi, E., 2014. Channel Modelling and Characterization for Visible Light Communications. (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü /Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Özyeğin Üniversitesi, İstanbul.
- Shannon, C.E., 1998. Communication in the Presence of Noise. Proceedings of the IEEE, 86 (2), 447-457.
- Sugiyama, H. ve Nosu, K., 1989. MPPM: A Method for Improving The Band-Utilization Efficiency in Optical PPM. Journal of Lightwave Technology, 7 (3), 465 – 472.
- Tanaka, Y., Haruyama, S. ve Nakagawa, M., 2000. Wireless Optical Transmissions With White Colored Led for Wireless Home Links. 11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. PIMRC 2000. Proceedings (Cat. No.00TH8525), Londra, Birleşik Krallık.
- Tsonev, D., Chun, H., Rajbhandari, S., McKendry, J. J. D., Videv, S., Gu, E., Haji, M., Watson, S., Kelly, A. E., Faulkner, G., Dawson, D. M., Haas, H. ve O'Brien, D., 2014. A 3-Gb/s Single-Led OFDM-Based Wireless VLC Link Using A Gallium Nitride μ LED. IEEE Photonics Technology Letters, 26 (7), 637 – 640.
- Uçar, S., Turan, B., Çöleri Ergen, S., Özkasap, Ö. ve Ergen, M., 2016. Dimming Support for Visible Light Communication in Intelligent Transportation and Traffic System. IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. İstanbul, Türkiye.
- Ugweje, O. C., 2000. Modulation and Demodulation Techniques in Communication Systems, Communication Systems Seminar, 28 June 2000, The University of Akron, Ohio, Amerika Birleşik Devletleri.
- Uysal, M. ve Nouri, H., 2014. Optical Wireless Communications an Emerging Technology. 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Graz, Avusturya
- Uysal, M., Ghassemlooy, Z., Bekkali, A., Kadri, A. ve Menouar, H., 2015. Visible Light Communication for Vehicular Networking: Performance Study of a V2V System Using a Measured Headlamp Beam Pattern Model. IEEE Vehicular Technology Magazine, 10 (4), 45 -53.
- Vucic, J., Kottke, C. ve Nerreter, S., 2009a. 125 Mbit/s Over 5m Wireless Distance by Use of OOK-Modulated Phosphorescent White LEDs. European Conference on Optical Communication (ECOC), 20-24 Eylül, 2009, Viyana, Avusturya.
- Vucic, J., Kottke, C., Nerreter, S. ve Buttner, A., 2009b. White Light Wireless Transmission at 200Mb/s Net Data Rate by Use of Discrete-Multitone Modulation. IEEE Photonics Technology Letters, 21 (20), 1511 – 1513.
- Vucic, J., Kottke, C., Nerreter, S., Langer, K. ve Walewski, J. W., 2010. 513 Mbit/s Visible Light Communications Link Based on DMT-Modulation of a White LED. Journal of Lightwave Technology, 28 (24), 3512-3518.
- Wang, Z, Mao, T. ve Wang, Q., 2017b. Optical OFDM for Visible Light Communication. 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 26 -30 Haziran. Valencia, İspanya.
- Wang, Z., Wang, Q., Huang, W. ve Xu, Z., 2017a. Visible Light Communications: Modulations and Signal Processing. IEEE Press. Editör: Tariq SAMAD. Piscataway, NJ.

- Wang, Z., Yu, C., Zhong, W. D., Chen, J. ve Chen, W., 2012. Performance of Variable M-QAM OFDM Visible Light Communication System with Dimming Control. 17th Opto-Electronics and Communications Conference. 23 Ağustos 2012. Busan, Güney Kore.
- Wu, F. M., Lin, C. T. ve Wei, C. C., 2012. 1.1-Gb/s White-LED-Based Visible Light Communication Employing Carrier-less Amplitude and Phase Modulation, IEEE Photonics Technology Letters, 24 (19), 1730 – 1732.
- Yeşilkaya, A., Miramirkhani, F., Alsan, H. F., Başar, E., Panayırıcı, E. ve Uysal, M., 2015. Görünür Işık Kanallarının Modellenmesi ve Optik OFDM Sistemleri için Başarım Analizi. EMO Bilimsel Dergi, 5 (9), 19-31.
- Zhang, Y., Wang, J., Zhang, W., Chen, S. ve Chen, L., 2018. LED-Based Visible Light Communication for Color Image and Audio Transmission Utilizing Orbital Angular Momentum Superposition Modes. Optics Express, 26 (13), 17300 – 17311.
- Zheludev, N., 2007. The Life and Times of the LED-a 100-Year History, 1 (4), 189 - 192.
- Zhu, H., Zhang, M., Wang, C., Guo, X., Zhang, Y., 2015. Design of a Visible Light Internet Access System. 2015 Seventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks, 7 – 10 Haziran, 2015. Sapporo, Japonya.
- Zukauskas, A., Shur, M. ve Gaska, R., 2002. Introduction to Solid-State Lighting. Wiley, 224 p. Hoboken, NJ, Amerika Birleşik Devletleri.

7. ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Pınar UZUN
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Yılı : Ordu / 1994
E-posta Adresi : pinaruzun@klu.edu.tr
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Bilgileri

DERECE	ALAN	EĞİTİM BİRİMİ	MEZUNİYET
YÜKSEK LİSANS	Mekatronik Mühendisliği A.B.D.	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi – Fen Bilimleri Enstitüsü	2019
LİSANS	Mekatronik Mühendisliği	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi – Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi	2016
LİSE	Fen Bilimleri	Ordu Anadolu Lisesi	2012

Deneyim

YIL	YER	GÖREV
2019 -	Kırklareli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi	Araştırma Görevlisi
2018 - 2018	UTEK Mühendislik Müşavirlik A.Ş.	Mekatronik Mühendisi
2017 - 2018	Teknomer Harita Mekatronik Müh. Ltd. Şti.	Mekatronik Mühendisi