

T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİNDE PERFORMANS ANALİZİ
VE TEST CİHAZI TASARIMI

Uğur BEKÇİBAŞI

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Kubilay TAŞDELEN

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ISPARTA - 2022



© 2022 [Uğur BEKÇİBAŞI]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Tarihçe	6
2.2. Motivasyon.....	7
2.3. VLC'nin Kısa Tarihi.....	8
2.4. VLC	9
2.5. İnternet ve VLC.....	16
2.6. İletişim Mimarisi	18
2.6.1. Vericiler	18
2.6.2. Alıcılar.....	19
2.7. Standartlar	19
2.8. Ağ Topolojileri	20
2.8.1. Eşler Arası Erişim	21
2.8.2. Yıldız Erişim	21
2.8.3. Yayın Erişimi	21
2.9. Fiziksel ve MAC Katmanları	21
2.9.1. Fiziksel Katman	22
2.9.2. Görüş Hattı.....	22
2.9.3. Titreşim	23
2.9.4. Gürültü ve Girişim	24
2.9.5. Uplink	25
2.9.6. Karartma	26
2.9.7. Hareketlilik	27
2.9.8. Yol Kaybı.....	27
2.9.9. Yayılım	27
2.9.10. Gürültü	28
2.9.11. MAC Katmanı	28
2.9.12. TDMA	28
2.9.13. SDMA	29
2.9.14. CSMA	29
2.9.15. OFDMA	30
2.9.16. CDMA	30
2.10. Göz	30
2.11. LED	31
2.12. Görünür Işık Haberleşmesi Uygulamaları	39
2.13. Fiziksel Katmanlar.....	41

2.14. Fiziksel Katman 1	43
2.14.1. Modülasyon	43
2.14.2. OOK modülasyonu	43
2.14.3. VPPM modülasyonu.....	44
2.14.4. CSK modülasyonu.....	45
2.14.5. Çalışma uzunluğu sınırlı kodlama	45
2.14.6. 4B6B kodlama	46
2.14.7. Manchester kodlama.....	46
2.14.8. İleri hata düzeltme	47
2.14.9. Reed-Solomon	47
2.14.10. Harmanlayıcı.....	48
2.14.11. Konvülasyon kodları	49
2.14.12. Çerçeve formatı	50
3. GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞME DENEY DÜZENEKLERİ	55
3.1. BeagleBone Black.....	55
3.2. Yazılımsal Fiziksel Katman	56
3.3. Deney Düzeneği 1 – LED-ve-LED Haberleşme.....	58
3.3.1. Optik Algılayıcı LED	59
3.4. Deney Düzeneği 2 – LED-ve-Optik Algılayıcı Haberleşme.....	64
3.5. Deney Düzeneği 3 – Yüksek Güçlü LED-ve-Optik Algılayıcı Haberleşme	66
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	67
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	74
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ.....	85

ÖZET

Doktora Tezi

GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİNDE PERFORMANS ANALİZİ VE TEST CİHAZI TASARIMI

Uğur BEKÇİBAŞI

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Kubilay TAŞDELEN

Kablosuz iletişim, haberleşme sistemleri içinde en hızlı gelişen iletişim alanıdır. Günümüz ihtiyaç sıralamasında artık kablosuz iletişimin önemli bir yeri bulunmaktadır. Yapıları gereği kablosuz iletişim sistemleri girişimlerden fazla miktarda etkilenmektedir. En önemli çalışma alanı ise iletişim kalitesinin artırılması ve girişimlerin olumsuz etkilerinin en aza indirilmesi kablosuz iletişimde büyük öneme sahiptir. Bu amaçla yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak iletişim kalitesi üzerine olmaktadır.

Kablosuz Optik Haberleşme alt alanlarından Görünür Işık Haberleşmesi de IEEE 802.15.7 standardı alındığından itibaren hızlı bir gelişim göstermiştir. Aydınlatmanın iletişim yeteneği ile beraber kullanıldığı haberleşme yapısı, benzer haberleşme sistemlerinden daha az girişim etkenleri nedeni ile daha iyi iletişim kalitesi sunmaktadır. Haberleşme; uygun fiziksel katman, ortam erişim ilkeleri ve protokol desteği sağlamasına rağmen iletim ortamında bulunan insan olgusu nedeniyle hassas bir yapıya sahiptir.

Bu tez çalışmasında IEEE 802.15.7 standartlarını destekleyen bir Görünür Işık Haberleşmesi test cihazı tasarımı yapılmıştır. Test cihazının fiziksel katman 1 üzerindeki çalışma performansı incelenmiştir. Haberleşmeyi etkileyen değişkenlerden ortam ışığı, iletişim mesafesi, iletilecek veri yükü miktarı, iletişimde kullanılacak filtre ve farklı güçteki LED aydınlatmalar ile deney setinin performansı incelenmiştir.

Hazırlanan deney seti, iletişim standartlarını karşılamada başarılı bir performans sergilemiştir. İletişim standartlarında hazırlanan girişim önleyici mekanizmalara rağmen deney setinde yapılan haberleşmenin ortam ışık girişiminden etkilendiği gözlemlenmiştir. İletişim kanalında doğal yoğunluk filtresi kullanımı sonucu harici girişimlerin azaldığı, iletişim hızının arttığı gözlemlenmiştir. İletişimde kullanılacak aydınlatma elemanı gücünün de iletişim hızını arttırdığı görülmüştür. Hazırlanan test cihazı ile beş (5) metre iletişim mesafesine ve 35 kb/s iletişim veri hızına ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde Görünür Işık Haberleşme Sistemi tasarımı için öneriler sunulmuş ve kısıtlamaları tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Görünür Işık Haberleşme, İletişim Sistemi Sinyalizasyonu, İletişim Sistemleri, Kablosuz İletişim, Performans Analizi, Sistem Performansı.

2022, 85 sayfa



ABSTRACT

Ph.D. Thesis

PERFORMANCE ANALYSIS AND TEST DEVICE DESIGN IN VISIBLE LIGHT COMMUNICATION

Uğur BEKÇİBAŞI

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electronics And Communications Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Kubilay TAŞDELEN

Wireless communication is the fastest growing communication field among communication systems. Wireless communication has an important place in today's need list. Due to their structure, wireless communication systems are highly affected by interference. The most critical work area is to increase communication quality and minimize the adverse effects of initiatives in wireless communication. Studies conducted for this purpose are mainly on the quality of communication.

Visible Light Communication, one of the sub-fields of Wireless Optical Communication, has developed rapidly since the IEEE 802.15.7 standard was received. The communication structure in which lighting is used and its communication capability offers better communication quality due to less interference than similar communication systems. Communication; Although it provides the appropriate physical layer, media access principles and protocol support, it has a sensitive structure due to the human phenomenon in the transmission environment.

In this thesis, a Visible Light Communication test device that supports IEEE 802.15.7 standards has been designed. The operating performance of the test device on physical layer 1 was examined. The performance of the experimental set was investigated with ambient light, communication distance, amount of data load to be transmitted, filter to be used in communication and LED lighting of different power.

The prepared experimental set showed a successful performance in meeting the communication standards. Despite the anti-interference mechanisms prepared in the communication standards, it was observed that the communication in the experiment set was affected by the ambient light interference. As a result of the use of a natural density filter in the communication channel, it was observed that the external interferences decreased, and the communication speed increased. It has been observed that the power of the lighting element to be used in communication increases the communication speed. The prepared test device has a communication distance of five (5) meters and a communication data rate of 35 kb/s. As a result of the outcomes obtained, suggestions

for Visible Light Communication System design are presented, and its limitations are discussed.

Keywords: Visible Light Communication, Communication System Signaling, Communication Systems, Wireless Communication, Performance Analysis, System Performance.

2022, 85 pages



TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Dr. Öğretim Üyesi Kubilay TAŞDELEN'e teőekkürlerimi sunarım. Literatür araştırmalarımnda yardımcı olan değerli hocam Doç. Dr. İsmail Serkan ÜNCÜ'ye teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım. Anneme...

Uğur BEKÇİBAŞI
ISPARTA, 2022



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Fotofon.....	3
Şekil 2.2. Optik haberleşme bileşenleri	4
Şekil 2.3. Kablosuz optik haberleşme bileşenleri	5
Şekil 2.4. Elektromanyetik spektrum	10
Şekil 2.5. Görünür ışık haberleşmesi blok yapısı	12
Şekil 2.6. pLiFi yapısı.....	17
Şekil 2.7. Linux lambda yapısı.....	18
Şekil 2.8. Ortam erişim topolojileri.....	21
Şekil 2.9. Görüş hattı ve görüş alanı olmayan yansımalar	23
Şekil 2.10. CSMA/CD-HA protokolü.....	29
Şekil 2.11. Göz ve algılayıcılar	31
Şekil 2.12. CIE 1931 renk uzayı	32
Şekil 2.13. Eklemeli renk sistemi.....	33
Şekil 2.14. Güneş ışığı - insan yapımı aydınlatma türleri.....	33
Şekil 2.15. LED iç yapısı	34
Şekil 2.16. Beyaz ışık üretimi için LED türleri.....	34
Şekil 2.17. Fosfor dönüştürülmüş beyaz LED spektrumu	36
Şekil 2.18. İnsan gözünde beyaz algılama	38
Şekil 2.19. Fiziksel katmanlar	41
Şekil 2.20. Veri kodlama değişkenleri	43
Şekil 2.21. OOK blok çizimi.....	44
Şekil 2.22. OOK modülasyon tekniği	44
Şekil 2.23. VPPM blok çizimi	45
Şekil 2.24. VPPM modülasyon şeması	45
Şekil 2.25. Manchester kodlama görüntüsü	47
Şekil 2.26. 8 bitlik örnek bir verinin Manchester kodlaması	48
Şekil 2.27. FEC (n,k) örneği	48
Şekil 2.28. Harmanlayıcı blok yapısı.....	49
Şekil 2.29. 1/3 oranlı evrişim kodlama	49
Şekil 2.30. 1/2 oranlı evrişim kodlama	50
Şekil 2.31. 1/4 oranlı evrişim kodlama	50
Şekil 2.32. 2/3 oranlı evrişim kodlama	51
Şekil 2.33. Kontrol dizisi hata kontrolü	54
Şekil 3.1. BeagleBone Black geliştirme kartı	56
Şekil 3.2. Deney seti	57
Şekil 3.3. Alıcı-Verici	57
Şekil 3.4. Katman tasarımı	58
Şekil 3.5. Deney seti 3 terminal ekranı <i>ifconfig</i> komutu çıktısı.....	58
Şekil 3.6. Deney seti 1 terminal ekranı <i>iperf</i> komut çıktısı.....	59

Şekil 3.7. Fiziksel katman haberleşme örneği.....	59
Şekil 3.8. LED-ve-LED haberleşme tasarımı	59
Şekil 3.9. Deney seti 1	60
Şekil 3.10. LED'e paralel bağlı kondansatör ile alıcı olarak kullanımı.....	61
Şekil 3.11. LED'in alıcı olarak kullanımı	61
Şekil 3.12. L-53SRC-J4 LED'inin yükselme düşme zamanı	62
Şekil 3.13. LED-ve-LED blok tasarımı.....	63
Şekil 3.14. LED-ve-Optik algılayıcı haberleşme tasarımı	64
Şekil 3.15. Alıcı-Verici ünite	65
Şekil 3.16. Yüksek güçlü Led-ve-Optik algılayıcı haberleşme tasarımı	66
Şekil 3.17. Yüksek güçlü LED için deney seti tasarımı.....	66
Şekil 4.1. Farklı veri tekrarı hazırlama hızı ve mesafelerinde veri transfer hızı	67
Şekil 4.2. Farklı ortam ışığı ve mesafe değişkenlerinde veri transfer hızı.....	69
Şekil 4.3. Farklı mesafe ve veri yükünde veri transfer hızı	70
Şekil 4.4. arklı filtreler ve mesafelerde veri transfer hızı	71
Şekil 4.5. Farklı LED tiplerinde veri transfer hızı	72
Şekil 4.6. Yazılım değişkenlerinin veri transfer hızına etkileri	72
Şekil 4.7. Donanım değişkenlerinin veri transfer hızına etkileri	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. IEEE 802.15.7 fiziksel katman performansları	11
Çizelge 2.2. Modülasyon tekniklerinin karşılaştırılması	15
Çizelge 2.3. Görünür ışık ve benzer haberleşme sistemleri karşılaştırması.....	16
Çizelge 2.4. IEEE 802.15.7 standartlarında sunulan yapılar.....	20
Çizelge 2.5. VLC modülasyon teknikleri ve titreşim kontrol yöntemleri	24
Çizelge 2.6. LED’lerde renk üretimi.....	35
Çizelge 2.7. Fiziksel ve görsel birimler	37
Çizelge 2.8. Beyaz ışık oluşturmak için gerekli dalga boyları arasındaki ilişki	38
Çizelge 2.9. Katman I standartları	42
Çizelge 2.10. Katman II standartları	42
Çizelge 2.11. Katman III standartları	43
Çizelge 2.12. 4B6B kodlama şeması	46
Çizelge 2.13. Manchester kodlama	47
Çizelge 2.14. Reed-Solomon polinom tablosu.....	48
Çizelge 2.15. MAC çerçeve formatı	51
Çizelge 2.16. MAC çerçeve kontrol alanı	51
Çizelge 2.17. Çerçeve türü alt alanı	52
Çizelge 2.18. Hedef adresleme modu alt alanı.....	53
Çizelge 2.19. Çerçeve formatı	54
Çizelge 3.1. Elektronik Bileşenler.....	56
Çizelge 4.1. Deney seti değişkenleri.....	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASK	Genlik Kayması Anahtarlama
CDMA	Kod Bölmeli Çoklu Erişim
CDR	Zamanlama ve Veri İyileştirme Algoritması
CSK	Renk Kaydırma Anahtar Modülasyonu
CSMA	Taşıyıcı Dinleme Çoklu Erişim
FEC	İleri Hata Düzeltme
GPS	Konum Belirleme Sistemi
IM	Yoğunluk Ayarlı Modülasyon
IoL	Işıkların İnterneti
IoT	Nesnelerin İnterneti
IR	Kızılötesi İletişim
LED	Işık Yayan Diyot
MA	Çoklu Erişim
MAC	Medya Erişim Kontrolü
MIMO	Çoklu Giriş Çoklu Çıkış
ND	Doğal Yoğunluk Filtresi
OFDM	Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
OOK	Aç-Kapa Anahtarlama
OVS	Optik Kablosuz Haberleşme Sistemi
pc-LED	Fosfor Dönüştürülmüş LED
PHY	Fiziksel Katman
RF	Radyo Haberleşme
RLL	Uzunluk Sınırlı Hat Kodlama
SNR	Sinyal-Gürültü Oranı
SPI	Seri Çevresel Arayüz
SSH	Güvenli Veri İletişimi
TDMA	Zaman Bölmeli Çoklu Erişim
Treshold	Eşik Değeri
UV	Ultraviyole Filtre
VLC	Görünür Işık Haberleşmesi
VLCC	Görünür Işıklı Haberleşme Konsorsiyumu
VLID	Görünür Işık Kimlik Sistemi
VPPM	Değişken Darbe Konum Modülasyonu
WOC	Kablosuz Optik Haberleşme
WPAN	Kablosuz Kişisel Alan Ağı
WSN	Kablosuz Algılayıcı Ağlar

1. GİRİŞ

Teknoloji gelişiminde fiber optik haberleşmenin günümüze katkıları gibi görünür ışık haberleşmenin de katkıları beklenmektedir. Işık ile aydınlatmanın zorunlu olduğu ortamlarda kablosuz iletişime yeni bir seçenek sunan görünür ışık haberleşmesi; manyetik yayılım yapmaması, bundan etkilenmemesi ve tek bir yapı ile gerek aydınlatma gerekse de iletişimi mümkün kılması gibi üstünlüklere sahiptir. Tez çalışmasında amaç; görünür ışık haberleşmesi standardı olarak belirlenmiş IEEE 802.15.7 standartlarını destekleyen bir deney seti hazırlanması ve görünür ışık haberleşmesi için geniş kapsamlı bir verim ölçütünün belirlenmesidir.

Görünür ışık haberleşmesi; insan gözünün algılayabildiği 370 – 780 nm dalga boyunda yapılan kablosuz bir haberleşme türüdür. IEEE 802.15.7 standardı olarak belirlenmiş yapıda, optik haberleşmenin önemli sorunu olan etkin bir ortam erişim protokolü sağlanması ve bu standarda özel ışığın titreme etkisinin elimine edilmesi için gerekli öneriler sunulmuştur. Günümüz çalışma ortamlarının çalışma şartlarına uygun hale getirilebilmesi için sıklıkla aydınlatılması gerekmektedir. Bu noktada görünür ışık haberleşmesi gibi aydınlatma ve veri transferinin beraber sunulduğu yapılar özgün değer olarak ön plana çıkmaktadır. Mevcut akademik çalışmalardan farklı olarak hazırlanan deney seti; farklı ışık kaynakları, alıcı çeşitleri, lens çeşitleri ve çalışma şartlarındaki değişikliklerin haberleşmeye etkilerini içeren geniş kapsamlı bir tabloyu içerecektir.

Tez çalışmasının ilk deney sisteminde alıcı-verici olarak sadece LED'in kullanıldığı bir yapı tasarlanmıştır. Deneyde verici olarak kullanılan LED yapısı iç kapasitif özelliği ile aynı zamanda alıcı bir devre elemanı olarak kullanılmıştır. Yarı çift yönlü olarak gerçekleşen haberleşmede; LED'in foto diyot olarak kullanımı sağlanmış, kısa mesafe – kısıtlı bant genişliği için kullanımlara uygun temel bir yapı sağlanmıştır. İkinci deney düzeneğinde yapı düşük güçlü LED ve alıcı olarak optik algılayıcının bulunduğu şekilde düzenlenmiştir. Üçüncü deney düzeneğinde ise yapı yüksek güçlü LED ile optik algılayıcı kullanılarak oluşturulmuştur. Tüm deney düzeneklerinde haberleşme IEEE 802.15.7 standartlarında fiziksel katman 1 üzerinden sağlanmaktadır. Çalışmada iletişim mesafesinin 5 metre mesafeye kadar sağlandığı; 35 kb/s iletişim veri hızına

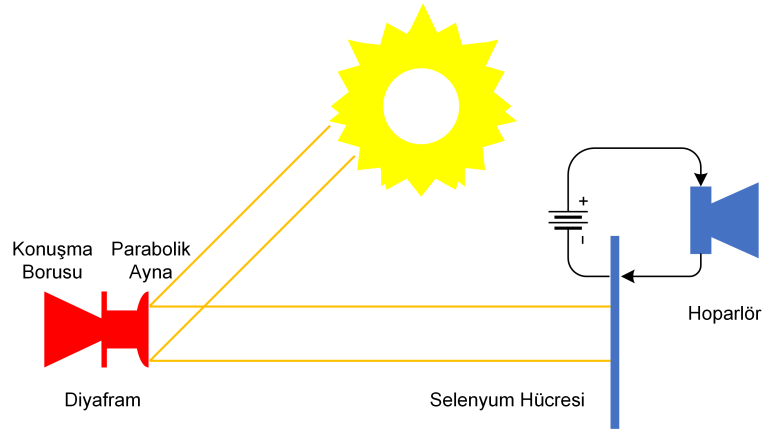
ulaşabildiği görülmüştür. Haberleşmede aydınlatma gücü - iletişim performansı arasında doğru orantı bulunmuş; ortam aydınlatmasının olumsuz girişimlere neden olduğu ve iletişim üzerinde yaklaşık %15'lik performans kaybına neden olduğu görülmüştür. Deney değişkenlerinden filtre kullanımında ise doğal yoğunluk filtresinin iletişim üzerinde %25'e kadar performans artışına neden olabildiği görülmüştür. İletişim kanalı üzerindeki aydınlatma miktarı, iletişim mesafesi, veri yükü, iletişim kanalında kullanılan filtre ve iletişim LED'i deney değişkenlerinin incelendiği çalışmada görünür ışık haberleşmesini etkileyen faktörler incelenmiş ve sonuçlar ışığında tartışılmıştır.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Optik bilgi haberleşmesi, M.Ö. 800 yıllarında Eski Yunanlılar ve Romalıların kullandığı ateş ile olabileceği gibi; M.Ö. 150 yıllarında Kızılderililerin kullandığı duman ile veya 1966 yılında Kao ve Hockham'ın çalışmasındaki cam fiberi ile de olabilir (Kao ve Hockham, 1966).

İlk kablosuz optik haberleşme, 1880 yılında Alexander Graham Bell tarafından fotofon deneyi ile yapılmıştır. Deneyde ses sinyalleri optik lens yardımı ile verici olarak kullanılan ayna üzerinde güneş ışını modüle edilmiştir. İletişim kanalı olarak atmosfer kullanılmış ve 213 metre mesafedeki alıcıya iletmıştır. Alıcıda, ses sinyali taşıyan modüleli ışık, odak noktasında bulunan selenyum ile tekrar ses sinyali elde edilmiştir (Bell, 1880). Bell'in kendisi tarafından yaratılan bu cihaz, Şekil 2.1'de görülebileceği gibi bir verici ve bir alıcı tarafından oluşturulmuştur. Sistem güneş ışığının bir ayna yardımı ile yansıtılmasına dayanır. İnce yüzeyli ayna arkasından konuşulması güneş ışığının ayna tarafından yansıtılırken modüle edilmesini sağlar. Alıcı kısımda bulunan parabolik ayna ise ışığı bir selenyum hücreğine yansıtır. Bell tarafından patenti alınan başka bir cihaz olan telefonun popüleritesine rağmen, bilim adamı her zaman fotofonu en büyük icadı olarak görmüştür.



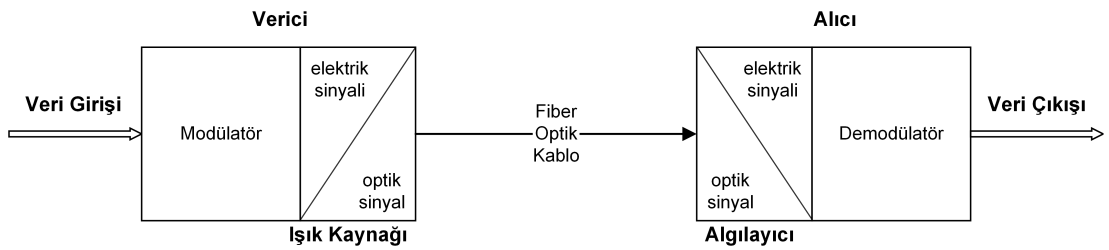
Şekil 2.1. Fotofon

1962 yılında MIT Lincolns Laboratuvarında yapılan araştırmada galyum-arsenik ışık yayan diyot kullanılarak televizyon sinyallerinin iletimi 50 kilometre mesafede gerçekleştirilmiştir (Rediker, 1987). Bu deney, kablosuz optik haberleşmenin ilk önemli başarısı kabul edilir. Benzer şekilde 1963 Amerika Birleşik Devletlerinde,

Panamint Tepesi ve San Gabriel Dağı arasında helyum-neon lazere modüle edilen ses sinyalinin 190 kilometre mesafede iletimi sağlanmıştır. Çalışmalar 1970 yılında Goodwin tarafından yayına alınmıştır (Goodwin, 1970). 1970 yılında Nippon Elektrik Şirketi (NEC) Japonya’da ticari olara veri iletişimi için ilk lazer bağlantıyı 14 kilometre mesafede tam çift yönlü olarak gerçekleştirmiştir. 1970 sonrasında kablosuz optik haberleşme iletişim sistemine yapılacak herhangi bir sızmanın alıcı tarafında doğrudan algılanabilmesi nedeniyle daha çok askeri amaçlı olarak araştırılmaya devam edilmiştir.

Haberleşme ihtiyaçlarının arttığı günümüzde, teknoloji gelişimine öncülük eden haberleşme yapısı optik bilgi haberleşmesi türlerinden fiber optik ile olmuştur. Dış ortamdaki yalıtılmış cam fiberi üzerinden alıcı-vericiler aracıılığı ile ışık taşınımını temel alan fiber haberleşme halen günümüze iletişim altyapılarının birleştiricisi konumundadır. Yapı, dış ortamdaki yalıtıldığı için verimli şekilde çalışabilmekte ve girişimlerden etkilenmemektedir.

İletişimde kullanılacak optik veri ışığın yoğunluk, faz veya frekansı modüle edilerek taşınır. Optik bağlantıda başarılı bir haberleşmenin sağlanabilmesi için alıcı-verici arasında direkt görüş gereklidir. Haberleşmede kullanılan yapı üç ana bileşene sahiptir. Bunlar; elektrik sinyallerini ışık sinyallerine çeviren bir verici, sinyalleri iletmek için bir optik kanal ve optik sinyalleri algılayıp elektrik sinyallerine çeviren bir alıcı. Şekil 2.2’de Optik haberleşme bileşenleri görülmektedir.



Şekil 2.2. Optik haberleşme bileşenleri

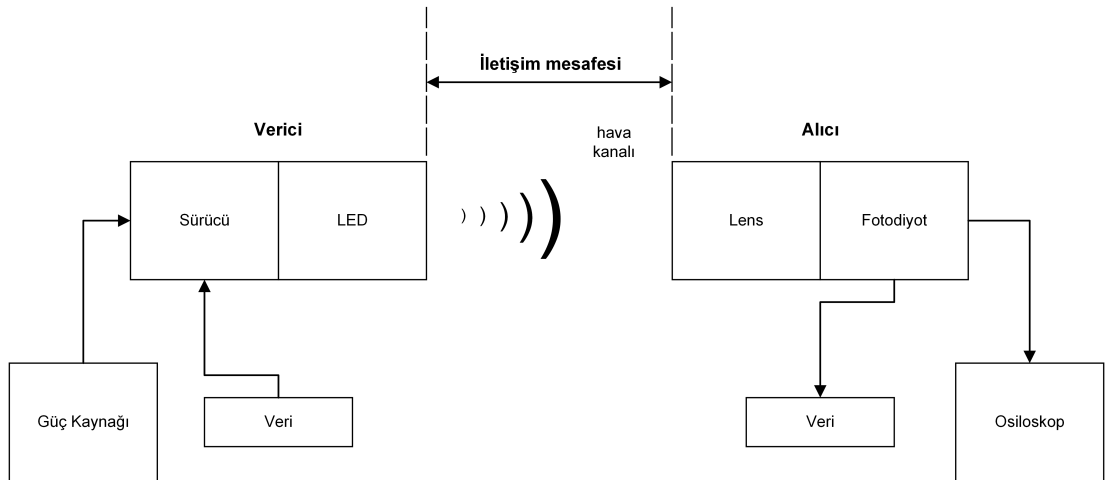
İletişimde karşılaşılan sorunların başında ise haberleşme ihtiyacı duyulan her lokasyona ulaşılması gereken kablo gelmektedir. Sorunu aşmak için tasarlanan ilk Kablosuz Optik Haberleşme (KOH) sistemleri birbirini gören iki noktaya yerleştirilen cihazların lazer ışın demeti kullanılarak yapılmıştır. Haberleşme yapısı 800 nm - 1550 nm dalga boyları arasındaki lazer ışın demeti kullanılarak birbirini gören iki noktada veri iletişimi sağlar.

Optik haberleşmeden farklı olarak iletim ortamı olarak atmosferi kullanır. İletişim ortamı olarak kullanılan atmosfer;

- Duman veya çeşitli parçacıkların bulunduğu durumlar olan sis, kar, yağmur gibi meteorolojik olaylar,
- Açık hava etkileri olan molekül soğurumu (Rayleigh Saçılması (Young, 1981)),
- Türbülans etkileri,

gibi ışığın yayılımı üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Bu durum alıcı-vericilerde hassas optik elemanların kullanımı, hassas ayar ile açı ayarlamalarını zorunlu kılar. Benzer şekilde iletim ortamının getirdiği bozucu etkiler yapının zorlukları olarak nitelendirilir.

Son yıllardaki ticari gelişmenin temel nedeni bu sistemleri destekleyen cihazlardaki gelişmeler ve yerel ağlardaki artan bant genişliği ihtiyacı olmuştur. Fiber optik sistemlerin kurulumunun maliyet dezavantajından ötürü kablosuz optik haberleşme daha uygun bir alternatif haline gelmiştir. Şekil 2.3’de kablosuz optik haberleşme sisteminin bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Kablosuz optik haberleşme bileşenleri

2009 yılı itibariyle yapılan çalışmalarda kablosuz optik haberleşme sistemi ile iki sabit nokta arasında bütün hava koşulları göz önüne alındığında 3,5 km iletim mesafesinde çift yönlü olarak 1.25 Gbps veri hızına ulaşabilmektedir (Popoola, 2009). Kapasiteyi daha da artırmak için dalga boyu bölmeli kablosuz optik haberleşme sistemleri üzerinde deneysel

olarak çalışılmakta ve radyo frekansı üzerinde farklı modülasyon teknikleri ile kablosuz optik haberleşmeye adapte edilmek istenmektedir (Popoola, 2009). Optik kablosuz haberleşme özellikle son kullanıcının bant genişliği ve yüksek veri hızı gereksinimlerini karşılayabilen, tamamlayıcı bir teknoloji olduğunu kanıtlamıştır. Saydam trafik iletimi ve veri protokolleri ile mevcut erişim ağına hızlı bir şekilde adaptasyon sağlamaktadır (Popoola, 2009).

İletişim sistemlerinde iletilen veri miktarı, modüle taşıyıcının bant genişliği ile doğrudan ilişkilidir ve yaklaşık taşıyıcı frekansın % 18'si oranındadır. 10^{12} - 10^{16} Hz aralığındaki optik bant 1800 THz veri bant genişliğine izin vermektedir. Optik haberleşmenin günümüz son kullanıcı iletişiminin çoğunluğunu sağlayan Radyo Haberleşme (RF) sistemlerine olan üstünlüğü de bu bant genişliğinden gelmektedir.

2.1. Tarihçe

Dünya çapında mobil cihazların sayısı son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Akıllı telefonlar, tabletler ve bu cihazlar üzerindeki algılayıcılar insanların günlük yaşamlarını kolaylaştırmaları nedeni ile yaygınlaşmaktadır. Kullanıcıların sürekli iletişim halinde olma ihtiyacı ve bu gereksinim nedeni ile sürekli algılama ihtiyacı giderek daha güçlü hale gelmektedir.

Güçlü ve sürekli bağlantılı mobil cihazların popülerleşmesine ek olarak, bilgi işlem alanında bir sonraki büyük gelişimin yaklaşmakta olan Nesnelerin İnterneti (IoT) olduğu görülmektedir. Elektronik cihazların her birinin direkt olarak internet ile bağlantısını öngören yapının mevcut elektromanyetik spektrumdaki yoğunluğu aşırı arttıracağı görülmektedir. Teknolojinin günümüzde tam anlamıyla hayata geçememe sorunu da burada yatmaktadır.

Günümüz elektromanyetik spektrum yoğunluğu (Wi-Fi Spectrum Crunch) hızlı şekilde artan kalabalıklaşma nedeni ile akademik camianın ve endüstrinin ciddi sorunu haline gelmiştir. Sorun, kablosuz kaynaklar için büyük bir talebin olduğu ortamlarda oluşur ve mevcut kablosuz iletişim altyapısı uygun kaynakları sağlayamaz hale gelir. Kaynakların daha verimli kullanımı ve spektrumun daha detaylı ayırımı için 2013 yılında Haas

kablosuz haberleşme için görünür ışığın kullanımını önermiş (Haas, 2013) ; 2014 yılında ise Baylis ve arkadaşları radyo sinyalleri için akıllı yönlendirmeler sunmuştur (Baylis vd., 2014).

Elektromanyetik spektrum sıkışması sorununu çözmek için yeni teknolojiler arasında, Görünür Işık İletişimi büyük bir potansiyel sunmaktadır (Pohlmann, 2010), (Haas, 2015). Bu tür kablosuz optik iletişim biçimlerine olan ilgi, radyo frekansı sistemleriyle iş birliği yapma olasılığı göz önüne alındığında artmıştır (Rahaim vd., 2011). Araştırmacıları bu yeni araştırma alanına çeken bir diğer faktör, Wi-Fi cihazlarında kullanılanlardan çok daha yüksek frekanslarda çalışma olasılığıdır. Bu frekansların kullanımı, çok yüksek hızlarda (teorik olarak terabayt/s) kablosuz iletişime izin vermektedir. Ek olarak, LED'ler gibi yeni ışık yayan teknolojiler daha popüler hale geldikçe optik kablosuz iletişim için yeni bakış açıları yaratmaktadır (Haruyama, 2013), (Wang vd., 2013c).

2.2. Motivasyon

Dünyadaki mobil cihazların sayısındaki üstel artış, özellikle ışığın kontrol edilebildiği ve dış faktörlerden daha az parazitlenmiş olduğu kapalı ortamlarda, Wi-Fi teknolojilerinin tamamlayıcısı olarak VLC'nin incelenmesi için büyük bir teşvik haline gelmiştir (Gujjari, 2012). Benzer şekilde iç mekanda VLC teknolojilerinin uygulanması mevcut altyapıları kullanarak daha basit olacaktır.

Son dönemde VLC çalışmasında araştırmayı sınırlayan faktörlerden biri olarak ticari ampullerde akkor veya floresanlarda kullanılan, hassas ve yüksek hızlı aydınlatma kontrolüne izin vermeyen teknoloji gösterilebilir. LED ampullerin son on yılda popülerleşmesi, araştırma için yeni fırsatlar sunmuştur. Günümüzde TV ekranları, akıllı telefonlar ve otomobiller LED'lerle donatılmış cihazlar arasındadır. Teknolojinin ilerlemesi ve LED fiyatlarının popülerleşmesiyle birlikte, araştırmaların çoğu, bu tür bir ışık kaynağının vericiler olarak ve hatta alıcılar olarak kullanılmasına odaklanmıştır (Tsonev vd., 2013), (Schmid vd., 2013), (Wang ve Chi, 2014).

Radyo frekansının aksine, görünür ışık spektrumu lisanslı değildir, bu nedenle cihazlar herhangi bir frekansta iletebilir (Jovicic vd., 2013a). Radyo dalgalarının spektrumunda

frekans KHz seviyesinden GHz seviyesine değişirken, görünür spektrum frekansı 1.000 kat daha fazladır. Ayrıca, insan sağlığına zararlı olabilecek kızılötesi ve ultraviyole aksine, görünür ışık spektrumu tehlike oluşturmaz. Diğer taraftan radyo dalgaları duvarlar gibi engelleri geçebilir, böylece geleneksel bir kablosuz ağ davetsiz misafirler tarafından herhangi bir zaman diliminde ele geçirilebilir. VLC sistemlerinde, tipik olarak görünen ışık aslında veridir. Başka bir deyişle, ışığın özellikleri nedeniyle, iç mekân VLC sistemi RF sistemlere göre çok daha güvenlidir (Classen vd., 2016).

2.3. VLC'nin Kısa Tarihi

Işık, her zaman insanlar tarafından birbirleriyle iletişim kurmak için kullanılan elementler arasında olmuştur. Eski zamanlardan beri, ışığın bir iletişim aracı olarak kullanılması dünyadaki birçok kültürde görülmüştür. Bu anlamda, işlevsel bir Görünür Işık Haberleşme sisteminin bir örneği yüzyıllar önce, Antik Yunan'da kaydedilmiştir. Tarihçi Polybius, bilgi alışverişinde bulunmak için meşalelerin kullanıldığı sistem üzerine bir iletişim geliştirmiş ve yayıcı - alıcı arasında bir anlaşma yapılarak alfabe 5 meşale seti ile temsil edilmiştir (Holzmann, 1991).

On sekizinci yüzyılın sonunda, Napolyon Fransa'sında, mühendis Charles Chappe optik telgrafi icat etmiştir (Dilhac, 2001). Mekanizma, regülatör adı verilen uzun bir çubuğa tutturulmuş, göstergeler adı verilen iki yanal çubuktan oluşmaktaydı. Yanal gövdelerin dönmesiyle, bir dizi farklı sembol oluşturmak mümkündü. Optik telgraflar, 10 ila 15 kilometre mesafedeki kulelere yerleştirildi. Bu yapıyı ve verimli kodlamayı kullanarak, kilometrelerce uzaktan görülebilen 98'e kadar farklı kombinasyon oluşturmak mümkündü. Birkaç on yıl içinde, Fransa yüzlerce telgrafla donatılmış ve 50 yıldan fazla süre hizmet eden ve daha sonra elektrikli telgraf sistemi ile değiştirilen büyük bir iletişim ağı oluşturulmuştur.

Optik medya yoluyla iletişim ancak 1970'lerde dikkat çekmiştir. Bu dönemde çalışmalar kablosuz optik haberleşmenin, özellikle kızılötesi, potansiyelini elektromanyetik spektrumun bandının THz ölçeğinde keşfetmenin mümkün olduğu bir iç ortamda göstermiştir (Gfeller ve Bapst, 1979). 1 Mbps'ye kadar ulaşılan veri hızından sonra

1990'ların sonlarında, kızılötesi sistemler 50 Mbps'ye kadar veri hızına ulaşılmıştır (Marsh ve Kahn, 1996).

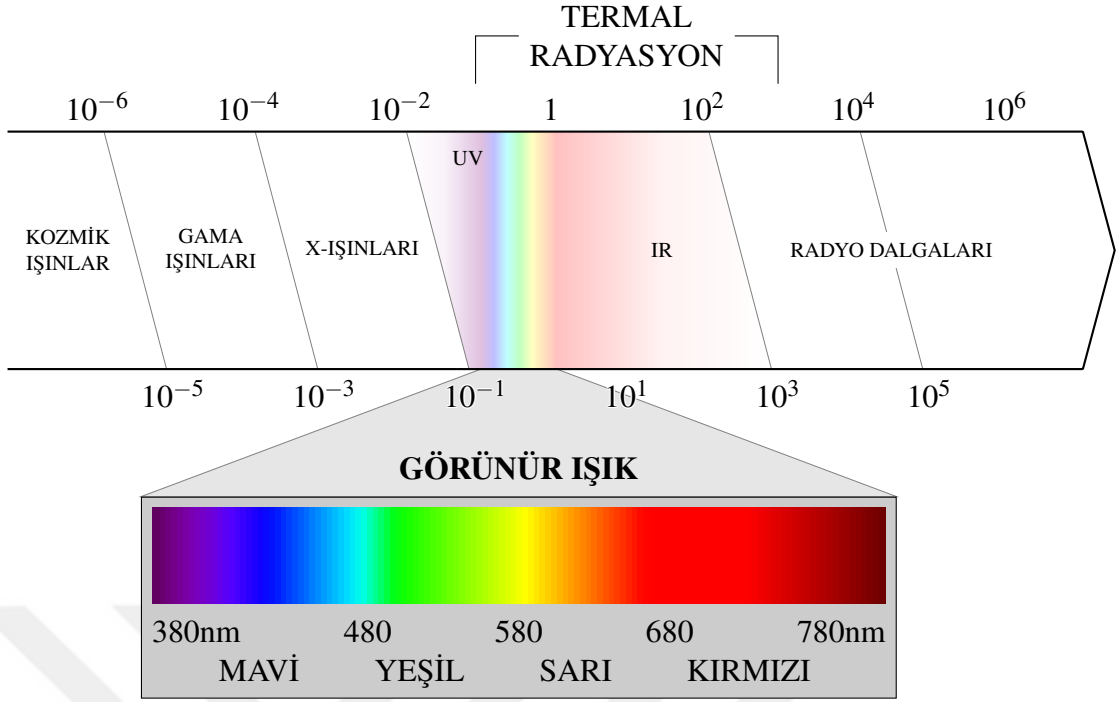
Günümüzde, VLC kapsamlı bir şekilde çalışılmaktadır. NASA (Boroson vd., 2012), (Luzhanskiy vd., 2016), Disney (Schmid vd., 2013) ve Philips (Signify, 2016) gibi endüstri ve akademiden önemli isimlerinin bu alanda araştırmaları vardır.

2.4. VLC

Optik Kablosuz Haberleşme Sistemlerinden (Optical Wireless Communications- OWS) biri olan Görünür Işık Haberleşmesi (Visible Light Communication (VLC)) günümüz RF bandında gerçekleşen haberleşmeye destek sağlayacak yeni bir haberleşme teknolojisi olarak hazırlanmıştır. Haberleşmede, iki veya daha fazla nokta arasında bilgi aktarımı gözün görebildiği ışık bandı olan 370 nm ile 780 nm arasındaki alıcı/vericiler kullanarak yapılır. Şekil 2.4'da elektromanyetik spektrumun, radyo dalgalarının bulunduğu düşük frekanslardan, gama radyasyonunun bulunduğu yüksek frekanslara kadar olan aralığını gösterilmektedir. Bu aralıktaki ışık dalgalarını modüle ederek aktarılan herhangi bir bilgi Görünür Işık Haberleşmesi olarak kabul edilebilir. Wi-Fi teknolojisini içeren radyo dalgalarının 3 KHz ile 300 GHz arasında değişen frekansları kapsadığı spektrumda; görünür ışık frekansları 430 THz ile 770 THz arasında değişmektedir ki bu da tüm radyo frekans alanında 10.000 kat daha büyüktür (Haas, 2013). Haberleşmenin gerçekleştirilmesi için gerekli yapı gereği katı hal aydınlatma grubundan LED lamba teknolojisi kullanılır ve uzun ömürlü kullanım, düşük güç tüketimi, hızlı anahtarlama, düşük maliyet gibi ayırt edici özelliklere sahiptir. IEEE konsorsiyumu tarafından 802 LAN/MAN komitesi grubunda, 802.15 Kablosuz Kişisel Alan Ağı (Wireless Personal Area Network (WPAN)) alt grubunda yer almaktadır. 802.15.7 çalışma grubuna atanan yapı 2011 yılında konsorsiyum tarafından standart olarak belirlenmiştir.

Görünür Işık Tayfı göz ile;

- 370 – 450 nm aralığında Mor,
- 450 – 495 nm aralığında Mavi,



Şekil 2.4. Elektromanyetik spektrum

- 495 – 570 nm aralığında Yeşil,
- 570 – 590 nm aralığında Sarı,
- 590 – 620 nm aralığında Turuncu,
- 620 – 780 nm aralığında Kırmızı olarak algılanır.

VLC temel bileşenleri; verici LED diyotlar, alıcı foto algılayıcılar ve diğer haberleşme sistemlerinde olduğu gibi fiziksel katman (PHY) ve ortama erişim protokolüdür (MAC). Sistemde iletişim; LED'in aydınlatma ve sinyal vericisi olarak, atmosferin iletim ortamı olarak ve foto algılayıcının alıcı olarak kullanılması ile sağlanır. LED ışığın veri sinyali ile modüle edilmesi, görünür ışığın optik taşıyıcı olarak da kullanılmasını sağlar. Kapalı alanda görünür ışıkla iletişim kanalları, mevcut kızılötesi iletişim (IR) ile bağlantı konfigürasyonlarının benzer olması nedeniyle, temel alınarak yapılandırılmıştır.

İletim ortamı olarak alt grubunda bulunduğu kablosuz optik kablosuz haberleşme sistemleri gibi atmosfer kullanılır. VLC, RF haberleşmesine destek sağlayacak bir tasarı olması yanı sıra günümüzde aydınlatma ile haberleşmenin beraber sağlanması ile haberleşme sistemlerine yeni bir seçenek sunmuştur. Doğal ışık ile aydınlatılmayan

ofis ortamları ve aydınlatmanın zorunlu olduğu yerler için görünür ışık haberleşmesinin özgün değeri olan haberleşme yetisi ön plana çıkmaktadır. Benzer şekilde iletişimin manyetik yayılım olmadan yapmaması, manyetik yayılımdan etkilenmemesi gibi üstünlüklere de sahiptir. Standartlarda belirlenen iletişim hızları günümüz iletişim hızlarına göre daha yavaş kalması ve iletişimin olmazsa olmazı aydınlatmanın zorunlu olması gibi olumsuzlukları da mevcuttur.

IEEE 802.15.7 standardı olarak belirlenmiş yapıda optik haberleşmenin önemli sorunu olan etkin bir ortam erişim protokolü sağlanması ve bu standarda özel ışığın titreme etkisinin elimine edilmesi için gerekli öneriler sunulmaktadır.

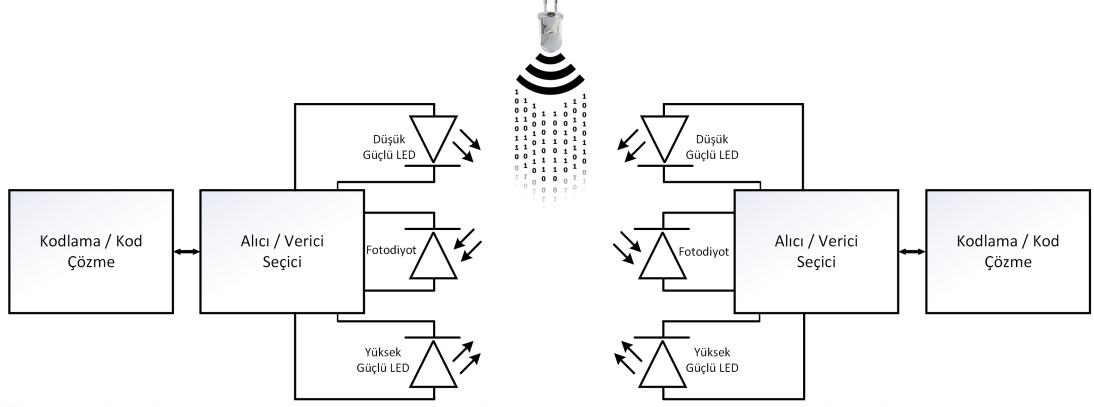
Farklı çalışma ortamları ve şartları için tasarlanan fiziksel katmanların modülasyon ve veri hızları karşılaştırması Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. IEEE 802.15.7 fiziksel katman performansları

Fiziksel Katman	Modülasyon	Saat Hızları	Veri Hızları
Katman 1	OOK-VPPM	200/400 kHz	11.67 - 266.6 kb/s
Katman 2	OOK-VPPM	≤ 120 MHz	1.25 - 96 Mb/s
Katman 3	CSK	12/24 MHz	12 - 96 Mb/s

Görünür ışık ile haberleşme üzerine çalışmalar 2003 yılında Japon şirketleri arasında oluşturulan Görünür Işıklı Haberleşme Konsorsiyumu (Visible Light Communication Consortium – VLCC) ile başlamıştır (Haruyama, 2007). 2007 yılında Görünür Işık ID Sistem (Visible Light ID System) Standardı ve 2008 yılında Görünür Işık Haberleşme Sistem Standardı yayınlanan ulusal standartlardır (Lab, 2007). Japon Elektronik ve Enformasyon Teknolojisi Endüstri Ortaklığı (JEITA) bu standartları JEITA CP-1221 ve JEITA CP-1222 olarak kabul etmiştir. 2011 yılında IEEE tarafından görünür ışık haberleşme fiziksel ve medya erişim katmanları 802.15.7 VLC Görev Gurubu (IEEE, 2011) tarafından standardize edilmiştir. MAC ve PHY katmanlarının özelliklerini belirleyen bu standart kısa mesafe kablosuz kişisel alan ağ iletiminde (Wireless Personal Area Networks (WPAN)) görünür ışıkla iletişimin teşvik edilmesini sağlayan bir dönüm noktası olmuştur.

Şekil 2.5’de blok yapısı sunulan tasarımda verici olarak LED’lerin, alıcı olarak ise optik algılayıcı veya LED’in tercih edilebileceği iletim ortamının hava olduğu bir yapı sunulmaktadır (Dietz vd., 2003a).



Şekil 2.5. Görünür ışık haberleşmesi blok yapısı

RF haberleşmesine spektrum açısından zengin bir alternatif olarak VLC hem araştırmacıların hem de endüstrinin ilgisini çekmektedir (Li vd., 2014a)(Liu vd., 2011). VLC, RF iletişiminin kablosuz spektrumdaki yoğunluk problemini çözen öncü bir teknoloji olarak gösterilmiştir ve yeni nesil ağ sistemlerinin altyapısını oluşturma potansiyeline sahiptir.

VLC ağlarının yazılımla uyarlanması için yapılan çalışmalar, bu alandaki araştırmaların hızlandırılma ihtiyacını göstermektedir (Wang vd., 2015c)(Baranda vd., 2013)(Qiao ve Haas, 2014). Benzer şekilde internete bağlanarak akıllı hale gelecek cihaz sayısının artması gelecekte yeni bir altyapı türüne, Işıkların İnternetine (IoL) öncülük edebilir.

Teknolojinin bakır kablolardan fiber optik kablolarına geçerken yaşadığı olağanüstü atılımın daha küçük ama kapsamlı benzeri, radyo haberleşmesi yerine veya radyo haberleşmesi ile kullanılacak görünür ışık haberleşmesi ile olacaktır.

Olumlu özelliklerine ek olarak VLC sistemlerinin tasarım ve kullanımında karşılaşılabilecek zorluklarda bulunmaktadır. Haberleşme kapsama alanı, ortam aydınlatması ve doğal ışıkların olumsuz girişimleri, iletişimin aydınlatma kaynağının renk kalitesini etkilemesi, çift yönlü ve mobil iletişim sağlamanın diğer iletişimlere göre zorluğu sistemin zorluklarını oluşturmaktadır.

Yapıda; aç-kapa anahtarlama (On-Off Keying (OOK)), değişken darbe konum modülasyonu (Variable Pulse Position Modulation (VPPM)) ve renk kaydırma anahtar modülasyonu (Color Shift Keying Modulation (CSK)) teknikleri kullanılır. Kullanılan bu modülasyon tekniklerinden OOK ve VPPM modülasyonları sinyalin kapatılıp-açılması prensibine; CSK modülasyonunda ise bir veya birden çok ışık kaynağının istenilen rengi oluşturması prensibine dayanır.

Haberleşmenin çözülmesi gerekli sorunlarından biri ışığın titreşim etkisinin insan tarafından algısıdır. Diğer haberleşme sistemlerinde ihtiyaç duyulmayan bu durum yapının insanların algı sınırları içinde çalışması sebebiyle önemlidir. Göz, biyolojik yapısı nedeniyle 24 Hz ve üzeri frekansa sahip ışığın kapanıp açılmasını algılayamamakta; ancak uzun bir süreçte ışığın parlaklık ve şiddetindeki değişimleri gözlemleyebilmektedir. Işık kaynağının açılıp kapatılması insan gözünün algılayamayacağı düzeyde olsa bile beynin anahtarlamaı algılaması ve gözün yorgunluğu olarak anlamlandırması söz konusudur. Sistemde alıcı olarak kullanılan elektronik malzemeler ise anahtarlama modülasyonlarını kolaylıkla algılayabilmektedirler. Diğer bir sorun ise doğrudan veya dolaylı girişimlerin elimine edilmesidir. İki olgunun da aşılabilmesi için gerekli protokol detayları IEEE 802.15.7 standardında belirlenmiştir.

Titreşim problemi için; 1986 yılında Farrell monitörlerde (Farrell, 1986), 2003 yılında Halpin akkor flamanlı ampuller üzerinde (Halpin vd., 2003), yılında Millett ise video oyunları (Millett vd., 1997) üzerine çalışmalarda bulunmuşlardır. IEEE 802.15.7 çalışma grubu titreşim problemi yaşamamak adına iletişim kanalını sürekli boş veri ile meşgul tutulmasını ve intra-mesaj girişiminden korunmak içinde Manchester veya 4B6B kodlamasının kullanılmasını önerilmiştir (IEEE, 2011). Önerilen çözüm sadece master cihaz için ve altyapı modunda geçerlidir. Ad-hoc modunda yapı titreşime izin verilmektedir.

Titreme etkisinin azaltılması parametresi diğer kablosuz haberleşme sistemlerinde bulunmayan bir ihtiyacın sonucu oluşur. Kullanılacak ortamda insan faktörünün bulunması ve görsel duyunun ve göz konforunun etkilenme ihtimali parametrenin önemini belirtmektedir. Aydınlatma sistemlerinde meydana gelen dalgalanmalar

genel olarak istenmeyen bir durumdur ve insan gözü tarafından kısmen algılanabilir düzeydedir. Yapılan çalışmalar sonucu maksimum titreme zaman periyodu 5ms olarak belirlenmiş ve VLC sistemleri için 200 Hz'den yüksek frekanslar emniyetli olarak değerlendirilmiştir (M. V. Bhalerao vd., 2013). Kullanılan aydınlatmanın titreme etkisi, yapıda kullanılan modülasyon tekniklerinin ortalama iletilen güç üzerinde değişkenliğe neden olmasından ve LED'lerin aydınlık düzeyleri üzerinde dalgalanma etkisi yaratmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle sabit ortalama gücü sağlayabilmek için modülasyon tekniklerinde kısıtlamalar bulunmaktadır (Noshad ve Brandt-Pearce, 2013).

Diğer bir sorun olan gölgeleme etkisi, ortamda bulunan engeller veya hareketli nesnelere nedeniyle oluşur. Aydınlatma kaynağından alıcıya olan direkt görüşün bloke olması, haberleşme kanalının zamanla değişen yapıda olmasına neden olur. Işığın mat nesnelere geçememesi nedeniyle görüş hattı bloke olabilir. Benzer şekilde parlak veya yansıtıcı yüzeylerden yansımalar nedeniyle oluşacak gölgeleme de haberleşmeyi olumsuz etkileyebilir. Böyle durumlarda görüş olmayan hattan yansıyan ışıklar kanallarda girişime neden olur ve çözüm olarak alıcının bloke etme olasılığı düşünülerek görüş açısı daraltılmasına gidilir. Böylece sistemin gölgelemeye karşı toleransı arttırılacağı gibi ortamdaki girişimlerden etkilenme durumu da azalır (Noshad ve Brandt-Pearce, 2013). Yine de etkilerin sonuçları için kesin çözümün bulunması protokol ile mümkün değildir. Bu nedenle gölgeleme etkisi sistem tasarımında göz önüne alınması gereken bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sabit renk kontrolü LED'in fiziksel yapısı ile ilgilidir ve besleme gerilimi, sürücü tekniği, açma-kapama frekansı ve kullanım süresine göre değişimler gösterir. Günümüzde yeni nesil akıllı aydınlatma sistemleri; akıllı kontrolörler ile yaşlanma sürecini izlemekte ve ihtiyaç duyulduğunda aydınlatmanın dalga boyunda meydana gelebilecek kaymalar renk profilini düzeltme yeteneği ile tolere edilmektedir. Renk aralığının kontrol edilebilir olması, aydınlatma aşamalarını insan faktörlerine uyumlu hale getirme yeteneği nedeniyle ihtiyaç duyulan bir özelliktir. Benzer şekilde yapıda tek renkli ışık kaynağı yerine farklı renklerden oluşan ışık kaynakları kullanılabilen ve her bir kaynağın parametreleri değiştirilerek renk aralığı / sıcaklığı belirlenebilmektedir (Butala vd., 2012).

VLC araştırmalarının günümüzde haberleşme hızı konusuna yoğunlaşmaları nedeniyle aydınlatma kalitesine yönelik sorunlar tam olarak dile getirilmemiştir. Haberleşmenin yüksek hızlara erişilirken ortaya çıkan renk kalitesi ve enerji tüketimi kısıtlarının hiçe sayılması sistem tasarımında karşılaşılan önemli sorunlardandır. Çizelge 2.2’de 2013 yılında Noshad ve Brant-Pearce tarafından yapılan çalışma ile kullanılacak modülasyonun VLC sistemlerine nasıl bir etki yapacağına dair izelge sunulmuştur (Noshad ve Brandt-Pearce, 2013).

Çizelge 2.2. Modülasyon tekniklerinin karşılaştırılması

Modülasyon	Karartma Kontrolü Desteği	Doğrusal Olmama zelliğine Duyarlılık	Spektral Verimlilik	Renk Solması ve Glgelemeye Karşı Duyarlılık	Isı Etkisine Karşı Duyarlılık	Titreme Etkisi
OFDM	Hayır	Yüksek	3-4	Yüksek	Düşük	Orta
SM	Hayır	Alçak	2	Yüksek	Orta	Yüksek
VPPM	Evet	Alçak	1	Düşük	Yüksek	Orta
MPPM	Evet	Alçak	1	Düşük	Orta	Düşük
EPPM	Evet	Alçak	1	Düşük	Yüksek	Düşük
MEPPM	Evet	Alçak	2-3	Orta	Düşük	ok Düşük

Diğer taraftan VLC sistemlerinin RF sistemlerinin yerine uygulaması süreci, kullanıcının kullanım rahatlığı dikkate alındığında g kısıtları nedeniyle gerçekleştirilmesi zor bir uygulamadır. Kişinin hareket özgürlüğünü kısıtlamadan ve göz algısını etkilemeden yapılacak haberleşme için henüz çözümlenmemiş sorunlar vardır.

Teknoloji gelişmesi ile yaşanan diğer bir süreç de Nesnelerin İnterneti (Internet of Things - IoT) olarak adlandırılan düşük enerji ihtiyacı ile çalışan cihazların sunucular ile doğrudan veya dolaylı olarak bağlantı kurması olmuştur. Düşük bant genişliği ihtiyacı ve kablosuz iletişim yetenekleri ile kabul gören yapılardan Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA)ve VLC zmleri akademik olarak öne çıkmıştır.

Günümüz nesnelerin interneti olarak adlandırılan atılımlar ile bilgisayarlarda yaşanan sürecin benzeri her bir elektronik aygıt için tekrar yaşanmaktadır. Her bir cihazın birbirleri, buldukları ortam veya uzak bir sunucu ile haberleşmesinin nn açan bu yapı, internet ve çoklu ortam gibi geniş bant iletişimine gerek duymamaktadır.

İnternet ve benzeri haberleşme ihtiyaçlarının, çoklu ortam uygulamalarının geniş bant iletişim gerektirdiği dönemde denenen fiber optik haberleşme teknolojisi başarısı ile tüm dünyada kabul görmüş ve yaygın etkileri günümüz haberleşme altyapısını değiştirmiştir. Çözümün en zor kısmı uygulama safhasında son kullanıcıya olan ulaşımda yaşanmaktadır. Her alanda kullanıcıya kablo ile ulaşılmasının zorluğu sorununa kablosuz optik haberleşme sistemleri ile çözüm aranmıştır. Geleceği yönlendirmedeki bir başka başarıda aydınlatma ve haberleşmenin eş zamanlı olarak sağlandığı Görünür Işık Haberleşme Teknolojisinin de Nesnelerin İnterneti alanına katkısı veya kendi alanını oluşturarak Işığın İnterneti (IoL) alanı yaratması muhtemeldir. Düşünceyi destekleyici olarak benzer haberleşme sistemleri ile karşılaştırması Çizelge 2.3'de sunulmuştur.

Çizelge 2.3. Görünür ışık ve benzer haberleşme sistemleri karşılaştırması

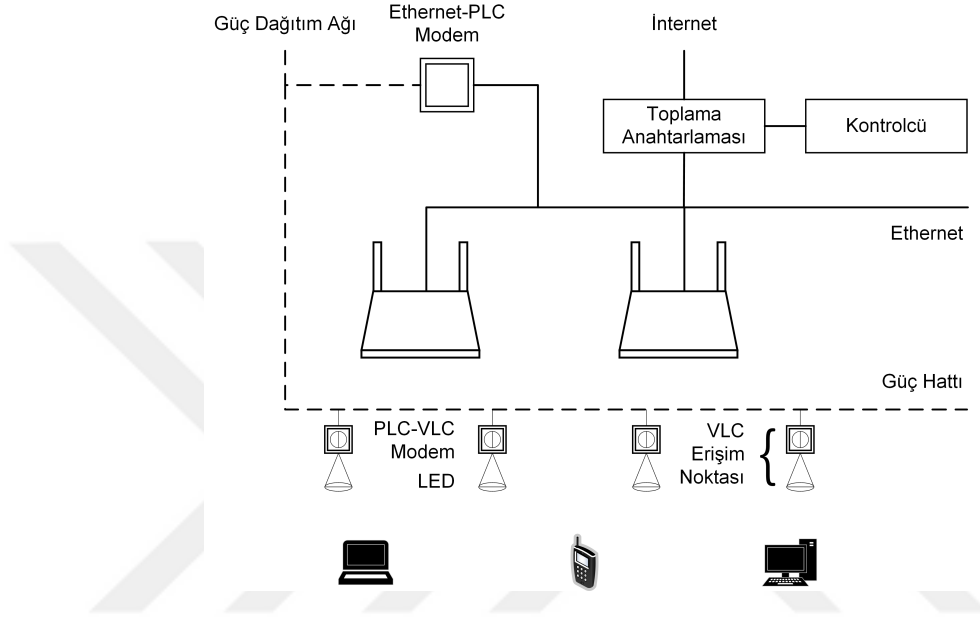
	Radyo Frekans	Kablosuz Algılayıcı Ağ	İnfrared	Kablosuz Optik	Görünür Işık
İletim Katmanı Girişimleri	İletim Ortamı Şartları ve Elektromanyetik	İletim Ortamı Şartları ve Elektromanyetik	İletim Ortamı Şartları ve Optik	İletim Ortamı Şartları ve Optik	İletim Ortamı Şartları ve Optik
Hizmet Amacı	İletişim	İletişim	İletişim	İletişim	Aydınlatma ve İletişim
Direkt Görüş Şartı	Yok	Yok	Var	Var	Var
Haberleşme Mesafesi	Geniş	Dar	Dar	Geniş	Dar
Mobil Kullanım	Oldukça İyi	İyi	Sınırlı	Yok	Oldukça Sınırlı
Güç Tüketimi	Orta	Oldukça Az	Az	Orta	Az - Orta
Bant Genişliği	Lisans Sınırları İçinde	Oldukça Az	Oldukça Az	Lisans Sınırları İçinde	Neredeyse sınırsız
Görünürlük	Yok	Yok	Yok	Yok	Var
İşlev	Haberleşme	Haberleşme	Haberleşme	Haberleşme	Aydınlatma + Haberleşme
Güvenlik	Sınırlı	Sınırlı	Yüksek	Yüksek	Yüksek

Karşılaştırması sunulan haberleşme yöntemlerinden VLC, potansiyel olarak insan sağlığı konusunda zararlı olabilecek bir olguya sahip olmamasına, güvenliğin kolayca sağlanabileceği çalışma şartlarına, maliyet etkinliğine, neredeyse sınırsız bant genişliğine ve çevresel girişimlerden bağımsız bir sinyal iletişimine sahiptir. Özellikle elektromanyetik ışıma ve girişimlerden etkilenmemesi haberleşme alanına göre yapıyı rakipsiz kılmaktadır.

2.5. İnternet ve VLC

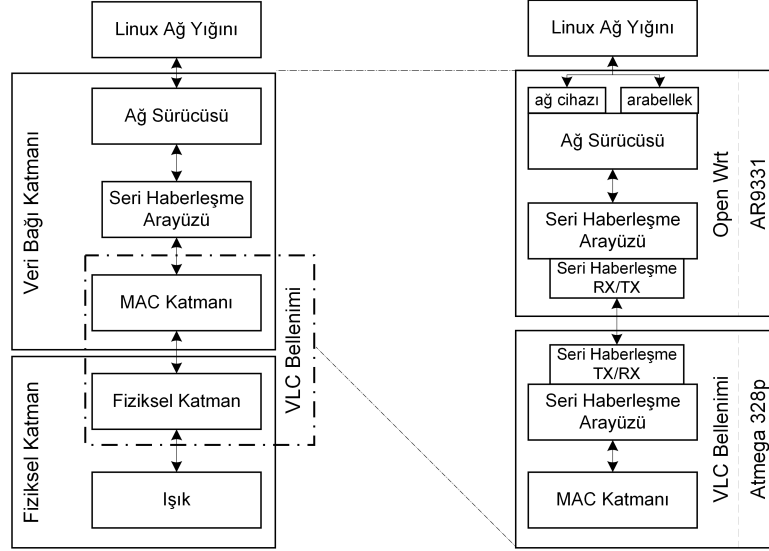
Alandaki diğer çalışmalar, VLC Haberleşmesini tamamlamak için diğer teknolojileri kullanarak farklı çözümler getirmeye çalışırken, oluşturulan sistemlerin alt katmanlarını (PHY ve MAC) daha yüksek olanlara entegre etmek için mekanizmalar aramaktadır.

Hibrit platform PLifi, Wi-Fi'yi VLC'ye birleştirmek amacıyla oluşturuldu (Hu vd., 2016). Vurgulanan zorluklar arasında LED'lerin İnternet ile bağlantısı bulunmaktadır. Şekil 2.6'da görülebileceği gibi, PLifi mimarisinde, Wi-Fi erişim noktası, bir Ethernet-PLC modem kullanarak Güç Hattı Haberleşmesi (PLC) teknolojisini kullanır. Buna karşılık, PLC ağı bir PLC-VLC modem aracılığıyla LED ampule bağlanır. Bu şekilde, paketler Wi-Fi erişim noktasından LED'e yönlendirilir.



Şekil 2.6. pLiFi yapısı

Son birkaç yılda, birçok araştırma türü, doğrudan İnternet protokolleri yığımına entegre edilmiş VLC'yi, Wi-Fi gibi herhangi bir radyo frekansı teknolojisi olmadan ele almaya başlanmıştır. Schmid ve ark. 2015 yılında, VLC kullanarak ticari LED ampuller ile hazırladığı bir çalışma sunmuştur (Schmid vd., 2015). Önerilen mimaride, ticari bir LED ışığı içerisine VLC kullanımı için gerekli donanım ve Linux işletim sistemi kullanıldı. Bunun için ampul, ışığın modülasyonundan sorumlu VLC sürücüsünü çalıştıran bir yongada sistem (SoC) içerecek şekilde değiştirilir. VLC yazılımı, birden fazla cihaz arasında ağ oluşturma sağlamak için Fiziksel ve MAC katmanlarını uygular. Şekil 2.7, önerilen VLC sisteminin mimarisini sunmaktadır. Yapının parçaları şunlardır: Wi-Fi etkin SoC modülü, SoC modülü ile mikro denetleyici arasındaki iletişim arayüzü (bağlantı UART arayüzü (Evrensel Asenkron Alıcı Verici) üzerinden yapılır), üretici yazılımını içeren mikro denetleyici, amplifikatörler, foto diyotlar ve son olarak LED.



Şekil 2.7. Linux lamba yapısı

2.6. İletişim Mimarisi

VLC sistemlerinin ana bileşenlerini bir verici, bir alıcı ve genellikle iletişim protokolü olarak üç katmanlı yapı oluşturur (Khan, 2017). Araştırmacılar VLC sistemlerinin mimarisini tanımlarken çoğunlukla fiziksel, bağlantı ve uygulama katmanlarını tartışmaktadır (Schmid vd., 2013).

LED'ler verileri yoğunluk ayarlı modülasyon yoluyla iletir. Alıcı, LED'in görüş hattında olmalıdır. Böylece bilgiyi içeren ışık demetlerini alır. Işık iletimi sırasında, parçacıkların difüzyonu ve ortam ışığının doğal paraziti nedeniyle ışık sinyal kalitesinde bir kayıp olacaktır. Paraziti azaltmak için filtreler kullanılabilir. Alıcı düğümünde, ışık foto algılayıcılar üzerine düşer ve akımı değiştirir. Amplifikatörlerin kullanılması, sinyalleri parazite ve gürültüye daha az eğilimli hale getirir (Schmid vd., 2014). Son olarak, sinyal gönderilen bilgileri almak için demodüle edilir.

2.6.1. Vericiler

Genel olarak LED'ler VLC sistemlerinde verici olarak kullanılır. Yapı, LED'lerden geçen akımı kontrol etmekten sorumlu bir sürücü içerir ve aydınlatmanın yoğunluğunu doğrudan etkiler. Başka bir deyişle, LED'e gelen akım, LED'in yüksek frekansta

yayıdığı ışık sinyallerini manipüle eden ve böylece haberleşmesi insan gözüyle algılanamaz hale getiren transistörler tarafından kontrol edilir (Pathak vd., 2015).

2.6.2. Alıcılar

Alıcılar ışığı yakalamaktan ve elektrik akımına dönüştürmekten sorumludur. Genel olarak VLC yapılarında alıcı olarak foto diyotlar tercih edilir (Schmid vd., 2016b). Bununla birlikte, foto diyotlar son derece hassastır ve ultraviyole ve kızılötesi (Wang vd., 2015a) gibi görünür ışık spektrumunun ötesindeki dalgaları da yakalarlar. Ayrıca dış ortamda ve güneş ışığına maruz kalarak olması gerekenden daha hızlı saturasyona girer; gönderilen veriyi alamayabilirler. Bu nedenle, ışığı yakalamak için LED'lerin kendisi gibi başka bileşenler de kullanılabilir (Wang vd., 2014).

Foto diyotların aksine, LED'ler belirli durumlarda onları verimli kılan özelliklere sahiptir. Bir LED , foto diyotlara kıyasla daha düşük bir bant aralığı algılayarak gürültü ve parazit varlığını azaltır. Ek olarak, LED'lerin hassasiyeti zaman düzleminde kararlıdır. Ana avantaj olarak LED'lerin hem vericiler hem de alıcılar olarak çalışabilmesi sadece bir LED'li bir sistem oluşturmayı mümkün kılar.

2.7. Standartlar

IEEE 802.15.7 standardının çoğu fiziksel ve MAC katman özelliklerine. Genel olarak, IEEE standardı fiziksel katmanı üç çalışma moduna ayırır: PHY I, PHY II ve PHY III. IEEE 802.15.7 uyumlu herhangi bir sistem en azından PHY I veya PHY II modlarını uygulamalıdır. PHY III modunu uygulayan sistem, PHY II'yi de uygulamalıdır.

PHY I çalışma modu, kısa çerçeveli harici uygulamalar için tasarlanmıştır. PHY II ve PHY III modları yalnızca bir kodlama türünü destekler. PHY I modu veri hızları 11 Kbps ile 266 Kbps arasında değişirken; PHY II modu veri hızları 1,25 Mbps ila 96 Mbps arasında; PHY III çalışma modu, 12 Mbps'den 96 Mbps'ye kadar veri hızlarında çalışır. PHY III çalışma modu, çok çipli LED'ler için geliştirilmiş bir modülasyon şemasına sahiptir.

Ek olarak, karartma ve titreme gibi haberleşme için önemli kavramlar standartta ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bir görünür ışık haberleşme sistemi ışık yoğunluğunun; haberleşmeyi etkilemeyecek şekilde manipüle edilmesine izin vermelidir.

Standart ayrıca VLC'deki güvenlik sorunlarını da ele almaktadır. Bu anlamda ışık, radyo dalgalarından farklı özelliklere sahiptir ve VLC sistemlerinin güvenliği ile ilgili yeni yönergelere izin verir. Işık dalgası yönlendirilebilir fakat görünür olduklarından sinyalin takip edilmesi kolayca tespit edilebilir. Buna rağmen, önerilen şifreleme mekanizması, üst katmanlar tarafından oluşturulan simetrik anahtarlara dayanmaktadır. Şifreleme mekanizması tarafından sunulan güvenlik hizmetleri arasında gizlilik, özgünlük ve tekrar koruması bulunmaktadır.

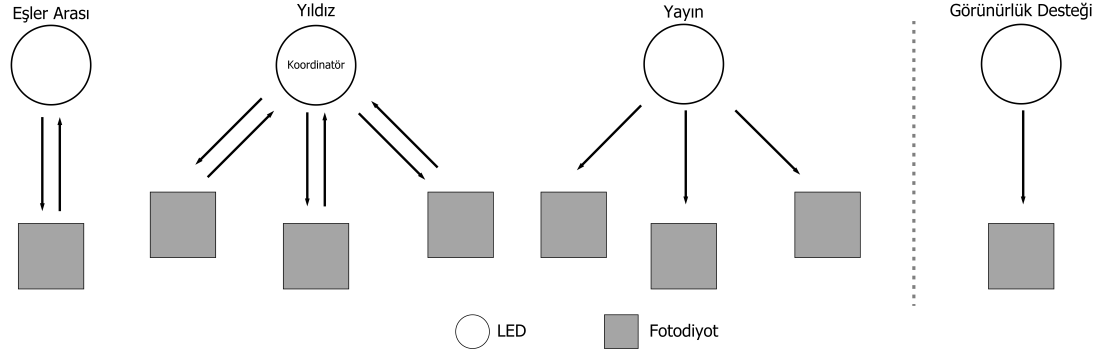
2.8. Ağ Topolojileri

Bir bilgisayar ağında, ağ topolojisi aygıtların nasıl organize edildiğini ve dağıtıldığını ve bilgilerin nasıl paylaşılacağını tanımlar (Tanenbaum, 2011). Bu hem mantıksal hem de fiziksel bir bakış açısıyla yapılır. Çizelge 2.4'te görülebileceği gibi, her biri kendi özelliklerine sahip altyapı, mobil ve araçlar dahil olmak üzere VLC sistemlerindeki cihaz türlerini ele almaktadır. Standart ayrıca VLC sistemleri için topolojileri ve modülasyon mekanizmalarını da belirtir. VLC standardına göre, VLC sistemleri için dikkate alınan üç cihaz sınıfı vardır. Bunlar altyapı, mobil ve araçlardır.

Çizelge 2.4. IEEE 802.15.7 standartlarında sunulan yapılar

	Altyapı	Cep	Araç
Sabit koordinatör	Evet	Hayır	Hayır
Enerji kaynağı	Geniş	Sınırlı	İlimli
Işık kaynağı	Yoğun	Zayıf	Yoğun
Hareketlilik	Hayır	Evet	Evet
Mesafe	Kısa/Uzun	Kısa	Uzun
Veri hızı	Yüksek/düşük	Yüksek	Alçak

Üç cihaz sınıfı içinde IEEE 802.15.7 standardı üç ağ topolojisine destek sunar. Bunlar Şekil 2.8'de gösterildiği üzere Eşler Arası (Peer-to-Peer), Yıldız (Star) ve Yayın (Broadcast) topolojileridir.



Şekil 2.8. Ortam erişim topolojileri

2.8.1. Eşler Arası Erişim

Eşler arası bir topolojide, bir cihaz kapsama alanındaki herhangi biriyle iletişim kurabilir. Bağlı cihazlardan biri koordinatör rolünü üstlenir. Koordinatör rolü, örneğin bir kanalda iletişim kurmak için ilk cihaza atanabilir.

2.8.2. Yıldız Erişim

Bir yıldız topolojisinde, koordinatör adı verilen merkezi bir denetleyici vardır ve koordinatör ile ağdaki her cihaz arasında iletişim kurulur. Yıldız topolojisindeki her ağ, tek bir yıldız ağıyla ilişkili bir tanımlayıcı olduğu için diğer ağlardan bağımsız olarak çalışır.

2.8.3. Yayın Erişimi

Topolojide, bir aygıt ağ oluşturulmadan başkalarına bilgi gönderebilir. İletişim, bu durumda, tek yönlüdür.

Yukarıda belirtilen topolojilere dayanarak, IEEE 802.15.7, fiziksel katmanda bir dizi modülasyon tekniğinin yanı sıra, bağlantı katmanındaki belirli protokolleri de sunar.

2.9. Fiziksel ve MAC Katmanları

VLC sistemlerinde ışık kodlaması/kod çözme ve modülasyon/demodülasyon için kullanılan CSK (Color Shift Keying), OOK (On-Off Keying ve OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) gibi temel teknikler fiziksel katmanda ve CSMA/CA,

CSMA/CD, CSMA/CD-HA gibi çoklu erişim protokolleri ise Bağlantı katmanında uygulanır.

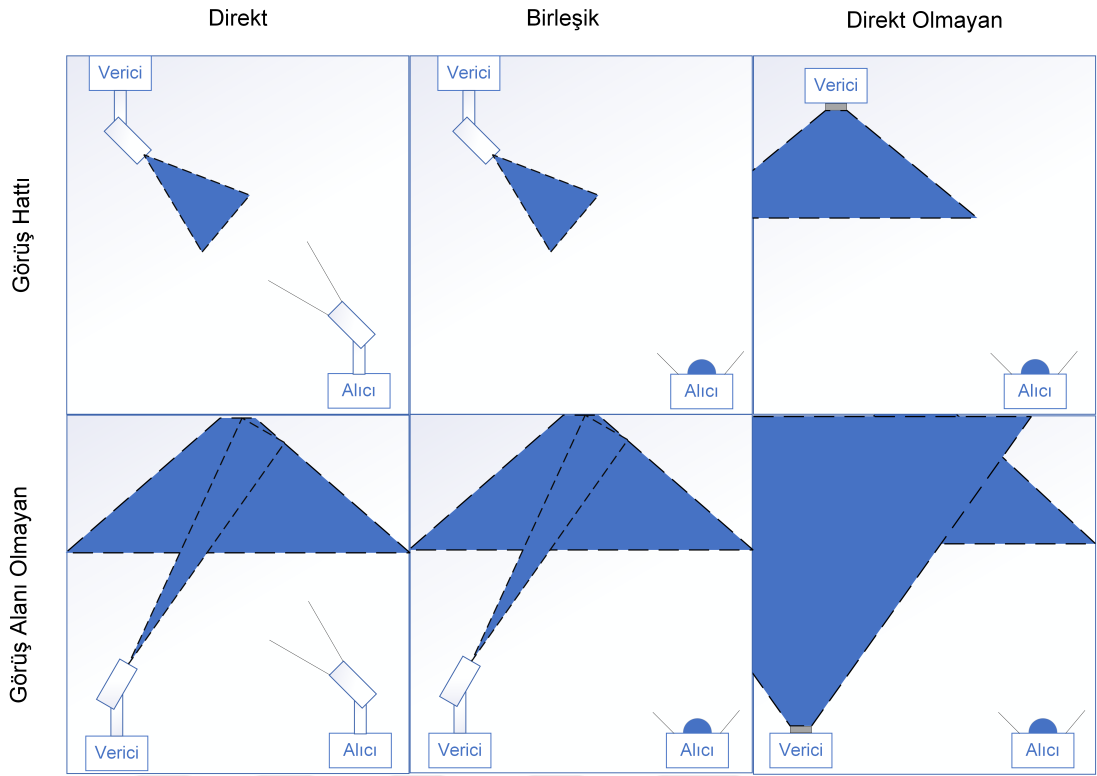
2.9.1. Fiziksel Katman

Fiziksel katman, bükülmüş bir çift veya radyo dalgaları gibi bir iletişim kanalı aracılığıyla veri (bit) iletmekten sorumludur. Bir sistemin fiziksel katmanında ele alınması gereken konular, sinyallerin temsili, bu sinyallerin nasıl gönderileceği, iletişimin kurulması, elektronik arayüz elemanlarının dahil edilmesi ve senkronizasyon gibi konuları içerir (Tanenbaum, 2011). Fiziksel katman VLC’de de benzer işlevi yerine getirir ve iletim ortamı olarak ışık kullanılır.

2.9.2. Görüş Hattı

VLC tabanlı iç mekân sistemlerinde, kullanıcının ışık kaynağının görüş alanı içinde olduğu varsayılır. Birçok iç mekân aydınlatması senaryosunda ise, aydınlatma kasıtlı olarak yansıma veya kırılma ile yapılır. Abajurlar, kapaklar ile kaplanır ve duvarlara veya diğer nesnelere doğru döndürülür. Işık kaynağının kapalı konumlardan doğrudan görüntülenmesine izin vermeyen bu tür aydınlatma ayarları, iletişim ve kullanıcı deneyimi üzerinde etkili olabilir.

İç mekân VLC sistemlerini içeren uygulamaların çoğu doğrudan görüş tabanlı bir mekanizma önermektedir. Haberleşmede alıcı, vericinin görüş alanı içinde olmalıdır. Bu mekanizmanın sunduğu başlıca avantaj, sinyalin daha güçlü bir alınmasıdır (Cui vd., 2010), (Komine ve Nakagawa, 2004), (Grobe vd., 2013). Literatürde bulunan diğer konfigürasyonlar arasında doğrudan görüş olmayan mekanizmalar ve dağınık ışık bulunmaktadır. Bununla birlikte, bu yapılandırmaların sinyal kaybı nedeniyle veri hızı açısından sınırlamaları vardır. direkt görüş yapılandırması ve direkt olmayan görüş konfigürasyonları arasındaki temel fark, daha geniş bir açının daha zayıf bir sinyale yol açtığı, daha dar bir açının daha güçlü bir sinyale yol açtığı vericinin açısı ve yönünden büyük ölçüde etkilenen alınan ışığın yoğunluğudur. Şekil 2.9’da bir VLC yapısında karşılaşılabilecek durumlar sunulmaktadır.



Şekil 2.9. Görüş hattı ve görüş alanı olmayan yansımalar

Kullanıcılar VLC uygulamalarını kullanırken bir ortamda hareket edebilir. Alıcının cihazı akıllı telefon gibi bir mobil cihaz olduğunda, kullanıcı sürekli yer ve yön değiştirebilir. Bu nedenle, alıcı vericiyi doğrudan görmese bile, yüksek hızlı iletişim için teknikler geliştirmeye ihtiyaç vardır. Gölgeleme varlığı, alıcıya ulaşan ışığı büyük ölçüde azaltabilir. Bu durumda, engeller tarafından yansıtılan ışık, sistemin ışık engelleme alanlarına dayanıklı olarak verimli bir şekilde tepki vermesi için kullanılabilir.

2.9.3. Titreşim

Titreme etkisi, VLC için büyük bir zorluktur ve insanlar tarafından algılanabilen ışığın parlaklığındaki dalgalanma olarak tanımlanabilir. Genellikle, bu sorun bir ofis veya süpermarket gibi iç mekân VLC sistemlerini etkileyen çalışmalarda ele alınmaktadır. Işık dalgalarının modülasyon mekanizmasına bağlı olarak, insan gözü tarafından algılanabilen salınımlar olabilir, bu da rahatsızlığa ve sağlık risklerine neden olabilir (Wilkins vd., 2010). Bu nedenle, ışık açma / kapama durumunu veya yoğunluğunu modüle etmeye ihtiyaç vardır. Açma / kapama frekanslarının en küçüğü, insanın onları algılama etkisinden daha büyüktür ki bu da yaklaşık 3 KHz'dir. Daha düşük

veri hızlarına neden olan düşük frekanslı iletişimler ile bunların neden olduğu titreme arasında bir bağ vardır (Jovicic vd., 2013a).

Kısa menzilli VLC için IEEE 802.15.7 standardı, titreme sorununu azaltmak için bazı yöntemler tanımlar. Titreme, çerçeve içi ve çerçeveler arası titreme olarak kategorize edilebilir. Çerçeve içi titreme, çerçeveler arasında tespit edilen parlaklık salınımı; çerçeveler arası titreme, bitişik iletimler arasındaki salınımdır.

Çerçeve içi titreme durumunda, Çizelge 2.5’de sunulan her modülasyon türü için belirli teknikler kullanılır. Örneğin, Açma-Kapama Anahtarlama modunda, çalışma uzunluğu sınırlayıcı kodlama uygulanarak titreşim önlenir. Değişken Darbe Konum Modülasyonu (VPPM) yapısı gereği çerçeveler arası titremeye neden olmaz. Son olarak, Renk Kaydırma Anahtar Modülasyonu (CSK), birden fazla ışık kaynağına farklı güç uygulanırsa titremeye neden olabilir. Çerçeveler arası titreşim durumunda, salınım LED’in boşa kalma süresi ile bilgi gönderme süresi arasında gerçekleşir (Oh, 2013). Bu tür salınımları azaltmak için, IEEE 802.15.7 standardı Çizelge 2.5 çözümlerini önermektedir: LED’in boşa olduğu süre boyunca, parlaklık, boşa kalma deseni olarak bilinen insanlar tarafından algılanan frekansın üzerinde tutulur.

Çizelge 2.5. VLC modülasyon teknikleri ve titreşim kontrol yöntemleri

Modülasyon	Çerçeve içi titreşim	Çerçeveler arası titreşim
OOK	RLL kodlama	Boşa kalma deseni
VPPM	-	Boşa kalma deseni
CSK	Farklı kaynaklar için aynı güç	Boşa kalma deseni

2.9.4. Gürültü ve Girişim

Bir Wi-Fi ağında, aynı frekansta iletim yapan aygıtlar birbirine müdahale edebilir. Işık bir iletişim ortamı olarak kullanıldığında, doğal ışık, özellikle dış ortam uygulamaları durumunda, VLC’yi bozan, iletişimde bir parazit kaynağı haline gelir. Doğal ışığa ek olarak, yapay ışıklar da iletişime müdahale eder ve hatta alıcıyı saturasyona sokabilir. Alıcıda parazite neden olan bir diğer faktör de çoklu yol problemdir. Sinyalin yayılmasının esas olarak tel ile sınırlı olduğu kablolu bir iletişimden farklı olarak, Görünür Işık Haberleşmesinde sinyal, LED lambalar yönünde ortamda yayılabilir,

ancak aynı zamanda kırılma ve yansıma da dahil olmak üzere, alıcıya birden fazla ulaşabilir.

Aydınlatma için kullanılan diğer ışık kaynaklarının (LED, akkor lamba, floresan) bulunduğu ortamlarda çalışan VLC sistemleri gürültünün etkisi altında olacaktır. Moreira ve ark. (Moreira vd., 1997), yapay ışıklar tarafından üretilen paraziti karakterize ederek ve ışık girişimini tanımlamak için bir model önermişlerdir. Yazarlar, girişim sunan üç ampul sınıfı tanımlar: telli ve iki tip floresan lamba (Moreira vd., 1997). Nispeten eski bir eser olmasına rağmen, incelenen lamba türleri günümüzde hala kullanılmaktadır.

Paraziti ve gürültüyü azaltmaya yönelik çözümler, optik filtrelerin kullanımını içerir. Filtrelerin kullanılmasıyla, doğal ışık kaynaklarından gelen girişimler azaltılabilir (Moreira vd., 1997). Benzer şekilde gürültüyü azaltmak için sinyal amplifikatörleri de kullanılabilir (Schmid vd., 2016a).

Ayrıca, belirli gürültü ve parazit türleri için alıcı türleri de belirlenebilir. Foto diyotlar son derece hassas olma eğilimindedir, çünkü görünür spektrumdaki ışığı yakalamanın yanı sıra, kızılötesi ve ultraviyole dalgalarını da yakalarlar. Öte yandan, bir LED'i alıcı olarak kullanırken, durum değişir. LED'ler aynı zamanda algılayıcıdır, ancak yalnızca ilettiklerine yakın dalga boylarında algılama sağlarlar, örneğin doğal ışıklar için bir filtre görevi görürler. Foto diyot ve LED arasındaki farkın bir incelemesi olarak hem foto diyot hem de LED'in alıcı olarak kullanıldığı iç-dış mekan ortamlarında foto diyot hızla doygunluk seviyesine ulaşırken, algılayıcı olarak LEDin kullanılması ile veriler başarıyla alınmıştır (Wang vd., 2014).

2.9.5. Uplink

VLC ile oluşturulmuş kullanışlı bir iletişim sistemi, çift yönlü bağlantıya izin vermelidir. LED ampuller hem VLC vericisi hem de ışık kaynağı olarak kullanılabilir. Alıcıda, modüle edilmiş ışığı almak için basit bir foto diyot kullanılabilir.

Aslında, bölgedeki birçok çalışma tek yönlü iletişim (Khalid vd., 2012), (Cossu vd., 2012) üzerine odaklanmaktadır. Akıllı telefonlar ve diğer düşük güçlü cihazlar için VLC uygulamaları, LED ampul vericilerine geri bilgi gönderme ile ilgili birçok sorun da sunmaktadır. Kapalı bir ortamda, uplink için görünür ışığın kullanımı zordur ve uygun olmayabilir. Mobil cihazlara, çoğu zıt yönlerde birden fazla ışık kaynağı eklemek, insan gözlerinde rahatsızlığa neden olabilir. Bununla birlikte, görünür ışık, bir VLC mimarisinde (Wang vd., 2013b) uplink bağlantıyla başa çıkma yaklaşımlarından biridir. Ek olarak, radyo frekansı (Rahaim vd., 2011), kızılötesi (Grobe vd., 2013) alıcı-verici gibi teknolojiler uplink bağlantıyı kurmak için kullanılabilir.

VLC uplink'e alternatif olarak radyo frekansının kullanılması bazı avantajlar sunar. Örneğin, kişisel cihazlar üzerinde görünür ışık vericilerine ihtiyacımız yoktur. Bununla birlikte, RF alıcı-vericilerin hem VLC cihazlarında, vericide hem de alıcıda bağlanması gerekecektir. Bu yaklaşım daha yüksek bir iletişim sistemi maliyetine neden olabilir.

2.9.6. Karartma

Bir VLC sisteminde LED lambalar kullanıldığında, iletişim sinyali gücü doğrudan ışık yoğunluğu ile ilgilidir. Böylece, teorik olarak, ışık yoğunluğu ne kadar düşük olursa, iletişim aralığı ve veri iletişim hızı o kadar küçük olur (Wang vd., 2012). Karartma, kullanıcının aydınlatma ihtiyacına göre algılanan ışığın parlaklık kontrolüdür. Karartma, konforlu ortamlar ve enerji tasarrufu gibi faydalar yaratan önemli bir özelliktir.

VLC sistemleri karartmayı desteklemelidir. IEEE 802.15.7 standardı, karartma kontrolünü sağlamak için modülasyonları uyarlamak için bir dizi mekanizma tanımlar. Örneğin, IEEE standardına göre, Manchester kodlaması nedeniyle Açma-Kapama Anahtarlama modülasyonu her zaman simetrik bir sembolle gönderilir. Bu durumda, karartma kontrolünü sağlamak için, ortalama ışık yoğunluğunu ayarlamak için çerçevelere bir telafi süresi konulmalıdır.

VPPM, karartma kontrolü için uyarlanmıştır ve çerçeve içi titreşime karşı koruma sağlar. VPPM modülasyonu iki modülasyonun birleşimidir: Darbe Konumu Modülasyonu (PPM) ve Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM) (Bo Bai vd., 2010). Bu nedenle, Şekil

2.22'da gösterildiği gibi, darbenin konumu biti belirler ve genişlik, karartma kontrolü için gereken görev döngüsünü belirler.

2.9.7. Hareketlilik

Wi-Fi'de olduğu gibi, bazı VLC tabanlı sistemler mobil cihazları desteklemelidir. Bu nedenle, Görünür Işık Haberleşmesinin her yerde bulunan bir teknoloji haline gelmesi için, sistemin kapsama alanı içinde kesintisiz bir bağlantı sağlamak için mekanizmalar gereklidir. Başka bir deyişle, alıcı, bir odanın herhangi bir yerindeki gelen ışık sinyallerini algılayabilmelidir ve bunun için vericide daha büyük bir açıya ve alıcıda daha yüksek bir görüş alanı ihtiyaç vardır, bu da kırılan dalgalar tarafından daha fazla parazite neden olabilir (Karunatilaka vd., 2015).

Görünür ışık Haberleşmesi, sinyal yayılımı açısından RF'den önemli ölçüde farklıdır, çünkü alıcının vericiye göre yönelimine ek olarak büyük ölçüde direkt görüşe dayanır. Işığın Sinyal-Gürültü Oranı (SNR), alıcı hareket ettiğinde, ışık kapsama alanı içinde bile büyük ölçüde değişebilir (Zhang vd., 2015b).

2.9.8. Yol Kaybı

VLC'deki fiziksel bir katman tasarımının, LED ampullerin iki ana işlev sunduğu gerçeğini göz önünde bulundurması gerekir: aydınlatma ve iletişim. Bu nedenle, iletişimin performanslı bir şekilde gerçekleşmesi için parlaklık açısından gereksinimlerin anlaşılması gerekir. Fotometrik parametreleri, diğerlerinin yanı sıra parlaklık, renk gibi bir dizi ışık özelliğini insan görüşü perspektifinden belirler. Öte yandan, radyometrik parametreleri, ışığın elektromanyetik radyasyonunun enerjisini de ölçer. Bu parametreler sayesinde yayılan ışığın enerji miktarını temsil eden lüminans akısını hesaplayabiliriz. Işık akısına dayanarak, fiziksel katman için önemli bir değer olan yol kaybını hesaplamak mümkündür (Cui vd., 2010).

2.9.9. Yayılım

Işık dalgası yayılımı da VLC Fiziksel katmanını geliştirmek için dikkate alınması gereken önemli bir özelliktir. Kapalı ortamlarda, LED ampuller ve ışığı yansıtabilecek

yüzeyleyler gibi birden fazla verici vardır. Bu nedenle, yansıyan ışığın VLC sistemleri üzerindeki etkisini anlamak önemlidir.

2.9.10. Gürültü

Bir VLC sisteminde, gürültü iletişim performansı için önemli bir faktördür. Gün boyunca, örneğin dış mekân ortamında, güneş ışığı VLC'nin başarısız olmasına veya ışık girişimi nedeniyle önemli ölçüde bozulmasına neden olabilir. Bu durumda foto algılayıcı doygunluğunu önlemek için filtreler kullanılabilir.

2.9.11. MAC Katmanı

Birçok VLC uygulaması, birden fazla vericiyi ve alıcıyı destekleyen çoklu erişimi (MA) hedefler. Örneğin, kurumsal yapılar ve konut binaları gibi kapalı bir ortamda, bir VLC erişim noktasına (LED ampul) bağlı birden fazla kişi olabilir. Aynı anda bağlı birçok cihazla, ortama erişimi kontrol etmek, cihazı erişim noktası ilişkisine yönetmek ve hareketliliğe izin vermek için mekanizmalar oluşturmak gereklidir (Pathak vd., 2015).

VLC'de

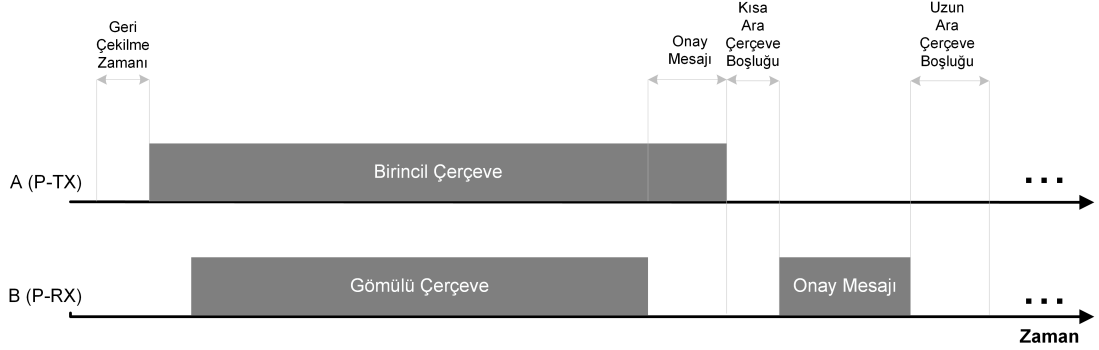
- Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (TDMA),
- Taşıyıcı Dinleme Çoklu Erişim (CSMA),
- Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (OFDMA)
- Kod Bölmeli Çoklu Erişim (CDMA)

ortam erişimleri sunulmaktadır.

2.9.12. TDMA

TDMA, geleneksel bir çoklu erişim mekanizmasıdır ve sinyali, aynı frekans kanalını paylaşan ancak; kanalın bireysel kullanımını garanti etmek için zaman aralıklarını ayrı ayrı kullanan kullanıcılara verilen çoklu zaman aralıklarına bölerek çalışır. Şekil 2.10'de

sunulan TDMA, hücresel ağların (2G ve 3G) başlangıcında kullanılmasıyla ünlüdür ve Görünür Işık Haberleşmesi için de benimsenmiştir. Optik lens kullanımı ile TDMA birden fazla cihazla haberleşmesi sağlarken daha uzun mesafelerde kullanılabilir.



Şekil 2.10. CSMA/CD-HA protokolü

2.9.13. SDMA

SDMA'nın genellikle kanal erişimi için yönlü özellikleri benimseyerek spektrumun kullanımını optimize etmesi önerilir. SDMA'da, verici aktif olan kullanıcıların konumuna göre birden fazla sinyal üretir. Bu nedenle, VLC senaryolarındaki vericilerin büyük ölçüde yönlülüğe (LED'ler) dayanması, Space-Division çoklu erişimin (Chen ve Haas, 2015) benimsenmesi için bir avantajdır.

2.9.14. CSMA

IEEE 802.15.7'de iki tür CSMA protokolü önerilir. İlkinde, koordinatör tarafından yayılan sinyaller devre dışı bırakılır. Böylece, CSMA için ayrılmamış bir rastgele erişim kanalı kullanılır. Bu nedenle, bir aygıt iletim yapmak istiyorsa, önce geri çekilme süresi olarak bilinen rastgele bir süre beklemeli ve ardından kanalın boş olup olmadığını kontrol etmelidir. Kanal meşgulse, cihaz kanala tekrar erişmeyi denemeden önce rastgele bir süre beklemelidir. Standartta önerilen ikinci CSMA tipinde, koordinatör sinyalleri etkinleştirilir ve zaman sinyal aralıklarına bölünür. Bir sinyal aralığındaki bir çerçeve, Çekişme Erişim Dönemi (CAP) ve Çekişmesiz Dönemler (CFP) gibi bilgi parçaları içerir. Bir aygıt, kanalda iletim yapmak istiyorsa, önce bir sonraki geri çekilme yuvasının başlangıcını bulmalı ve Kanal Temizlemeyi (CCA) kesmeden önce rasgele bir süre beklemelidir. Kanal boştaysa cihaz yayın yapmaya başlamalıdır. Aksi takdirde, CCA'yı tekrar çalıştırmadan önce daha fazla geri çekilme yuvası bekler. Bu protokol,

LED'ler arasında çift yönlü haberleşmesi garanti etmek için geliştirilmiş CSMA / CA gibi literatürdeki bazı araştırmalarda zaten uygulanmıştır (Wang ve Giustiniano, 2014).

2.9.15. OFDMA

OFDMA'da, birden çok kullanıcı iletişim için farklı kaynak blokları, alt taşıyıcılardan alır. Fiziksel katmanda OFDM modülasyonu kullanıldığı gibi, OFDMA da çoklu erişim için kullanılır. Bu protokolün VLC sistemlerinde uygulanmasındaki temel zorluklar enerji verimliliği ve kod çözme karmaşıklığı ile ilgilidir (Wang ve Giustiniano, 2016).

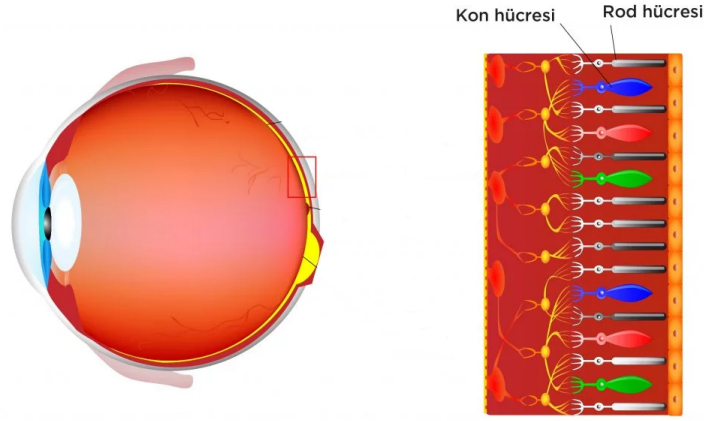
2.9.16. CDMA

Optik CDMA (OCDMA) olarak da adlandırılan Görünür Işık Haberleşmesi için CDMA, aynı kanala farklı kullanıcılar tarafından erişilebilmesi için dağıtılan ortogonal optik kodlardan (OOC) oluşur ve fiber optik ağlarda zaten kullanılan bir tekniktir (Pathak vd., 2015). OCDMA-VLC'de, verilerin açık ve kapalı LED durumları aracılığıyla zaman etki alanında kodlanabilmesi için her cihaza bir kod atanır. OOC kodları uzun olma eğilimindedir ve optik verimlilik sağlayarak iletişim performansını düşürebilir.

2.10. Göz

Görünür spektrumlu optik haberleşmenin diğer bir alıcısı insan gözüdür. Göz küresinin iç kısmı, gözün ışığa duyarlı kısmı olan retina ile kaplıdır. Işığa duyarlı rod ve cone hücreleri retinanın yapısını oluşturmaktadır. Karanlıkta görmemizi sağlayan rod hücreleri ile aydınlıkta görmemizi sağlayan cone hücreleri görsel bilgiyi ganglion hücreleri ve sinir lifleri ile beyne iletir. Rod hücreleri tüm görünür spektrumuna hassasken; cone hücreleri kırmızı, yeşil ve mavi spektral aralıkta hassas olmak üzere üç çeşittir. Şekil 2.11'de insan gözünün şematik bir örneğini göstermektedir.

Işık, kırmızı, yeşil ve mavi cone hücrelerinin farklı seviyelerde uyarılmasına neden olur. Bununla birlikte, renk ve ışık akısı hissi, belirli bir ışık kaynağının farklı bireyler arasında farklı algılanmasına yol açan öznel bir niceliktir. İnsan gözünün algısını matematik olarak karşılayabilmek ve radyometrik-fotometrik birimler arasındaki dönüşümü sağlayabilmek için 1913 yılında kurulan Uluslararası Aydınlatma Komisyonu



Şekil 2.11. Göz ve algılayıcılar

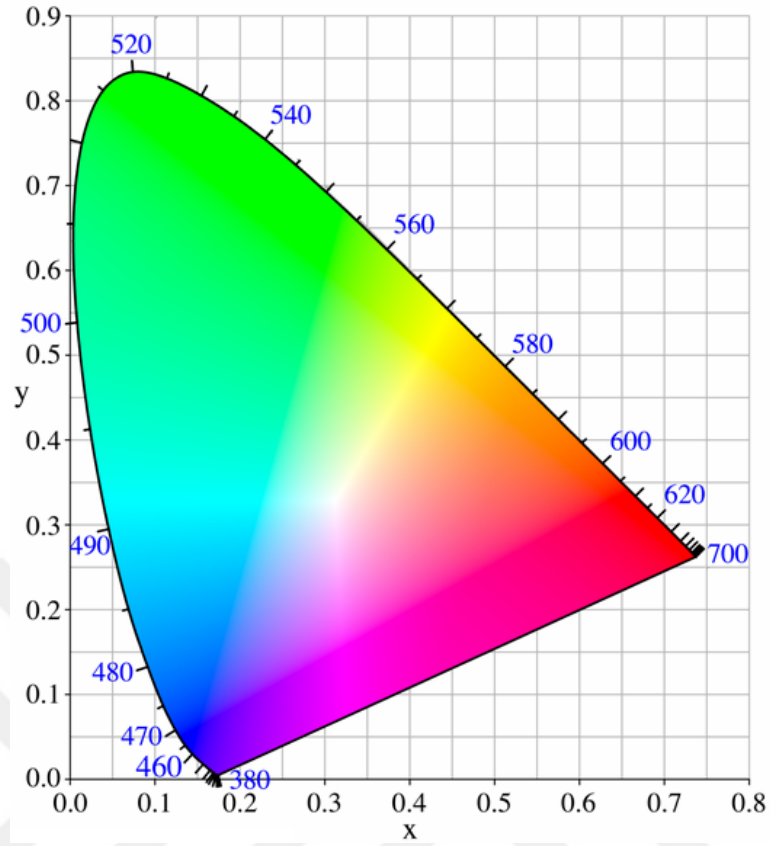
(Commission internationale de l'éclairage) tarafından bir otorite kurulmuş ve 1924 yılında CIE 1931 renk uzayı oluşturulmuştur. Görünür Işık Haberleşmesi katman 3 yapısında da temel alınan CIE 1931 renk uzayı Şekil 2.12'de sunulmuştur.

CIE 1931 renk uzayı karanlığa ışığın eklenmesi ile ortaya çıkan etkiye dayanmaktadır. Ana renkler olan kırmızı, yeşil ve mavi renklerin farklı oranda "eklenmesi" sonucu ara tonlar ve beyaz renk oluşturulur. Günümüz teknolojisindeki ekran teknolojileri de eklemeli renk sistemi ile oluşturulmaktadır. Günümüzde kullanılan LED aydınlatmalar ile oluşan eklemeli renk sisteminin bir örneği Şekil 2.13'de sunulmuştur.

2.11. LED

Günümüzde gelişen diğer bir teknoloji ise LED aydınlatma teknolojisidir. Fiyat ve uzun ömür gibi özellikleri nedeniyle, LED ampuller Görünür Işık Haberleşmesi için kullanılan ana seçenek haline gelmiştir. Bu nedenle, VLC sistemlerinde bu tür ampullerin seçilmesi yaygındır (Karunatilaka vd., 2015).

LED, ışığı yaymak için elektrolüminesans ve yarı iletken kullanan bir cihazdır. Günümüzde LED kullanımının üstel büyümesinin arkasında birçok neden vardır. Enerji verimliliği, dayanıklılık ve düşük maliyet konuların başında gelmektedir. Konutlarda kullanımı % 75 daha az enerji ile geleneksel bir akkor ampulden 25 kat daha uzun süre kullanımına olanak sağlar. Ek olarak, LED ışığının tek bir yöne odaklamak mümkündür.

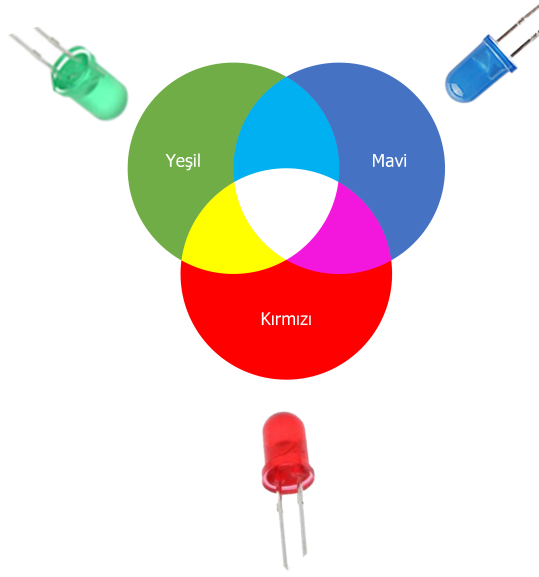


Şekil 2.12. CIE 1931 renk uzayı

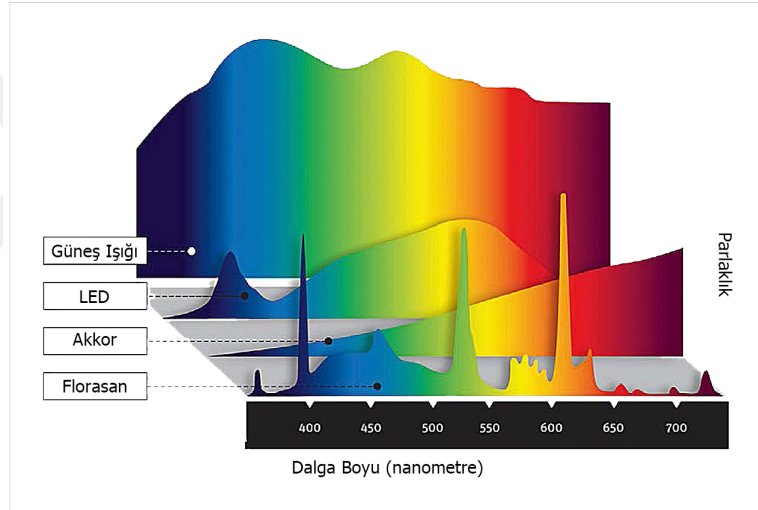
Bu avantajlardan dolayı, LED ampuller akıllı telefonlar, araçlar, video ekranlar ve tabelalar gibi çeşitli cihazlarda da sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 2.14'de de güneş spektrumuna oranla insan yapımı aydınlatıcıların bir karşılaştırması sunulmuştur.

Tercih edilmelerindeki genel özellikler

- Açılıp-kapanma sürelerinin hızı,
- Aydınlatma veriminin yüksek olması,
- Civa içermemeleri,
- Düşük güç tüketimleri,
- Düşük üretim maliyetleri,
- Küçük boyutları,



Şekil 2.13. Eklemeli renk sistemi



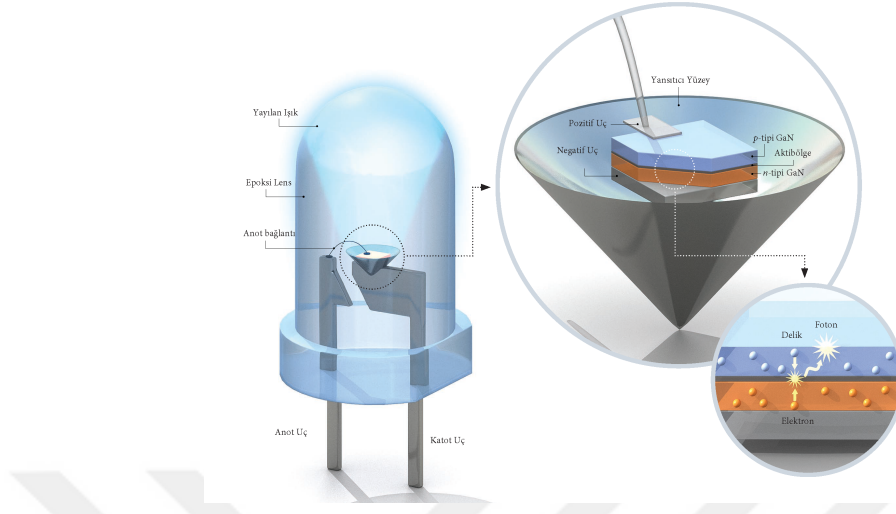
Şekil 2.14. Güneş ışığı - insan yapımı aydınlatma türleri

- Uzun çalışma süreleri

şeklinde sıralanabilir.

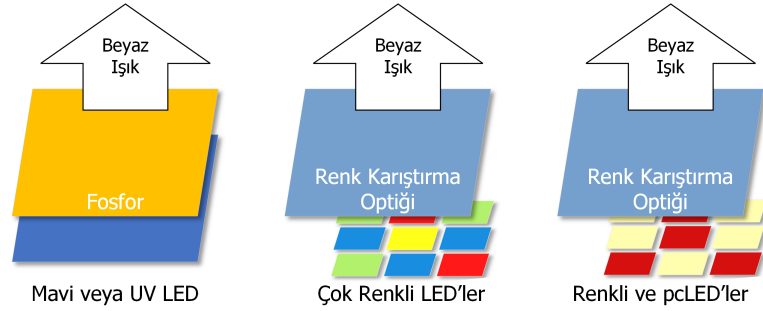
İki yarı iletken arasında elektron delikleri bulunur; elektronlar içinden aktığında, elektron deliklerini doldurur ve foton yayarlar. Şekil 2.15’da örnek bir LED iç yapısı sunulmuştur. Işık, belirli bir renge karşılık gelen düşük frekanslı dalgalardan yüksek frekanslı dalgalara kadar değişen görünür spektrumda yayılır. Örneğin kırmızı LED’ler genellikle galyum arsenit fosfitten (GaAsP) yapılıdır ve dalga boyları 630 nm ila 660 nm

arasında değişir. Çizelge 2.6’nde LED türlerinin renkleri, ilgili yarı iletken malzemesi ve yayılan ışığın dalga boyunu sunulmuştur.



Şekil 2.15. LED iç yapısı

Günümüzde, en yaygın ticari LED’ler beyaz ışık verenlerdir. Ana renkler dışında bir renge ulaşmak için renklerin üst üste bindirilmesi veya karıştırıcı optiklerle karıştırılması gerekir. Yarı iletken malzemeleriyle doğrudan ilişkili olan diğer renklerin aksine birden fazla ışık kaynağı ile oluşturulan beyaz LED’ler farklı yöntemlerle oluşturulabilir. Beyaz ışık üretimi için günümüzde kullanılan LED yapıları Şekil 2.16’de sunulmaktadır.



Şekil 2.16. Beyaz ışık üretimi için LED türleri

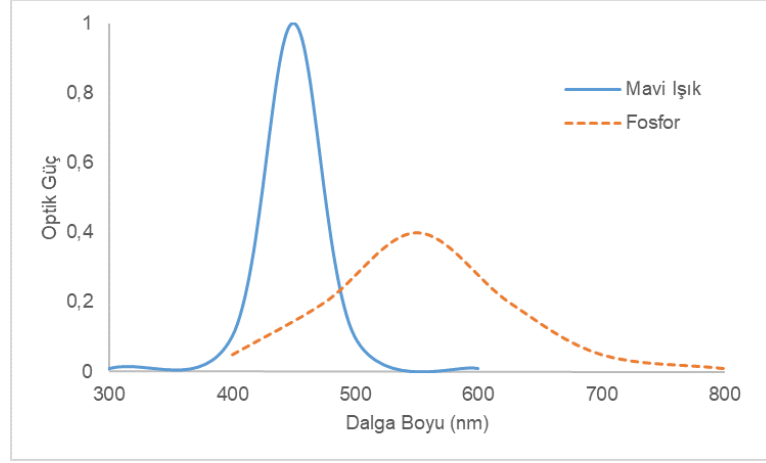
İlk yöntem beyaz ışık üretmek için fosfor kullanılmasıdır. Fosfor dönüştürülmüş LED’ler (pcLED) olarak tanımlanan yapı yarı iletken malzeme üzerine fosfor kaplanması sonucu ışımaya rengin farklılaşması temeline dayanır. Üretim kolaylığı ve uygun maliyete sahiptirler. Fakat; fosforun yavaş tepkisi nedeniyle sınırlı bir banda sahiptirler. Renk üretimi, fosfor tabakası ile kaplanmış mavi bir LED ampul kullanılarak yapılır. Mavi LED tarafından üretilen fotonlar fosfor tabakasından gönderilir ve bir

Çizelge 2.6. LED’lerde renk üretimi

Renk	Dalgaboyu (nm)	Gerilim (V)	Yarıiletken Malzeme
Kızılötesi	$780 < \lambda < 1000$	$\Delta V < 1.9$	Galyum arsenit (GaAs) Alüminyum galyum arsenit (AlGaAs)
Kırmızı	$610 < \lambda < 780$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	Alüminyum galyum arsenit (AlGaAs) Galyum arsenit fosfit (GaAsP) Alüminyum galyum indiyum fosfit (AlGaInP) Galyum(III) fosfit (GaP)
Turuncu	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	Galyum arsenit fosfit (GaAsP) Alüminyum galyum indiyum fosfit (AlGaInP) galyum(III) fosfit (GaP)
Sarı	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	Galyum arsenit fosfit (GaAsP) Alüminyum galyum indiyum fosfit (AlGaInP) Galyum(III) fosfit (GaP)
Yeşil	$500 < \lambda < 570$	$1.9 < \Delta V < 4.0$	İndiyum galyum nitrit (InGaN) / Galyum(III) nitrit (GaN) Galyum(III) fosfit (GaP) Alüminyum galyum indiyum fosfit (AlGaInP) Alüminyum galyum fosfit (AlGaP)
Mavi	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Çinko selenid (ZnSe) İndiyum galyum nitrit (InGaN) Silikon karbür (SiC) Silikon (Si)
Menekşe	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	İndiyum galyum nitrit (InGaN)
Mor	$380 < \lambda < 400$	$2.48 \Delta V 3.7$	Çift mavi/kırmızı LEDler, Mavi ile kırmızı fosfor, Beyaz ile mor plastik
Mor ötesi	$\lambda < 380$	$3.1 < \Delta V < 4.4$	Elmas (235 nm) Bor nitrit (215 nm) Alüminyum nitrit (AlN) (210 nm) Alüminyum galyum nitrit (AlGaIn) Alüminyum galyum indiyum nitrit (AlGaInN)
Beyaz		$\Delta V = 3.5$	Mavi/UV diyot ile sarı fosfor

kısmı sarıya dönüştürülür. Hem sarı hem de mavi fotonlar birleşerek gözün beyaz algıladığı ışık üretilir.

LEDler görünür ışık haberleşmesi gibi kullanım alanlarında kullanılan beyaz ışığı üretmek için InGaN bileşenli, sarı fosfor tabakasına sarılmış mavi ışınım kullanılmakta olsa da yüksek hızlı açma kapama refleksi ile tercih sebebi olmaktadır. Olumsuz bir durum olarak fosfor mineralinin ışınım üzerine yavaşlatıcı geçici tepkisi nedeni ile günümüz protokolünde modülasyon bant genişliği birkaç MHz ile sınırlı kalmaktadır (Khalid vd., 2012). Şekil 2.17 ‘de günümüzde sıkça kullanılan InGaN (indiyum galyum nitrit) bazlı LEDin beyaz ışık üretmek için gösterdiği mavi ışık – fosfor etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.17. Fosfor dönüştürülmüş beyaz LED spektrumu

Kullanım alanlarına uygun sistem tasarımları için düşük bant genişliği ihtiyaçlarına rağmen yüksek hız için yapılan çalışmalarda; 2007-2009 yılları arasında alıcı önüne eklenen mavi filtre ile sarı fosfor tabakasının yavaş tepki süresinin önüne geçilmeye çalışılmış ve 40 MHz veri transferi barajı aşılmıştır (Cui vd., 2009); (Langer ve Grubor, 2007). 2013 yılında InGaN bazlı LEDler ile yapılan denemede 1 metre mesafe sınırında 100 Mb/s veri transfer oranı yakalanmış (Tsai ve Xu, 2013); 2015 yılında ise çoklu verici-alıcı dizileri ile 1 Gb/s veri transfer oranına ulaşılmıştır (Rajbhandari vd., 2015). Farklı bir kullanım alanı olarak yine 2015 yılında LED bazlı yüksek hassasiyete sahip iç alan navigasyonu başarılı olarak test edilmiştir (Song vd., 2015).

Çalışmaları destekleyici olarak yakın zamanda LED üreticilerinin sunmaya başladığı (Cui vd., 2009) veriler olmuştur. Haberleşmede fiziksel birimler kullanılırken; aydınlatma uygulamalarında gözün frekans tepkisini de içeren görsel birimler kullanılması haberleşme için seçilecek LED çeşidini bulmada zorluklara yol açmaktadır. Bu sebeple üreticilerin sunduğu verilerin akademik çalışmalara katkısı büyüktür. Çizelge 2.7’de üreticilerin sunmaya başladığı veriler sunulmaktadır.

Yapının birincil fonksiyonu olarak görülen aydınlatma verimliliğine bağlı parametreler, veri iletişimi için kullanılan teknikler ile optimize edilmektedir. Karartma kontrolü ihtiyacı, karartma kontrolünün titreme etkisi oluşturması ve bu durumu azaltma yönelik çalışmalar tasarım için, gölgeleme etkisinin elimine edilebilmesine yönelik çalışmalar

Çizelge 2.7. Fiziksel ve görsel birimler

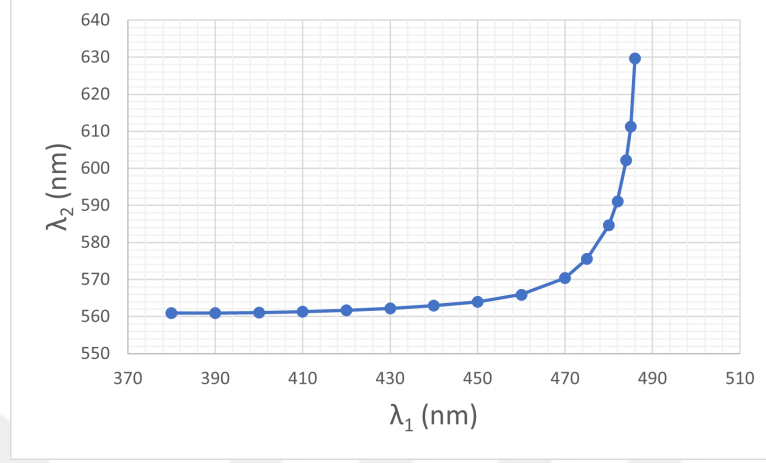
Özellik	Fiziksel	Görsel
Toplam Akı	Watt (W)	Lümen (lm)
Akı Yoğunluğu	W/cm ²	lm/cm ²
Kaynak Şiddeti	W/sr	kandela = lm/sr
Aydınlık	-	Lux (lx) = lm/m ²
Parlama	W/m ²	-

performans için, sabit renk kontrolüne yönelik çalışmalar ise konforuna katkı sağlamak için gereklidir.

Yukarıda bahsi geçen parametrelerden karartma kontrolü; aydınlatma gücünün değiştirilme ihtiyacı için gereklidir ve sabit güçlü LED ışığın birim zamanlar içinde açık kalma süresi değişimi ile kontrol edilir. Ortalama güç oranları iletişim hız miktarlarında belirleyici rol oynamaktadır. Karartma kontrolü için kullanılacak modülasyon için kısıtlamalar mevcuttur. LED'lerin yapısı gereği akım ve bağlantı noktası sıcaklık değişimlerinden etkilenmesi dalga boyu kaymasına neden olmaktadır (Beczowski ve Munk-Nielsen, 2010). Bu durum genlik modülasyonu uygulanan bir LED üzerinde renk çıkışında fark edilebilir bir değişikliğe sebep olmaktadır (Wang vd., 2013a). Bu nedenle LED yapıları dijital olarak modüle edilmiş darbe-genişlik modülasyonu ile modüler edilir (Gancarz et al., 2013). Kullanılan teknikler ile LED yapısının günümüzdeki sorunu olan yüksek ısı üretimi sorunu da soğutma yükünün azalması nedeniyle kısmi olarak çözümlenmektedir.

İkinci yöntem, LED'lerden kırmızı, yeşil ve mavi renklerin birleştirilerek beyaz ışık üretilmesidir. Çok Çipli LED'ler olarak adlandırılan yapı; üç veya daha fazla çipten oluşan ve farklı dalga boylarında ışık yayan LED türleridir. Farklı çiplerin tek bir LED kılıfı altında birleştirilmesiyle oluşturulur ve genelde beyaz ışık üretmek için tasarlanırlar. Bu tip LED'lerin en büyük avantajı, her çipin yoğunluğuna göre yayılacak renklerin kontrol edilebilmesidir. Color-Shift Keying (Renk-Kaydırmalı Anahtarlama – (CSK)) modülasyonu bu amaç için geliştirilmiştir. Bu tip beyaz LED'ler, yayılan renk üzerinde kontrol sağlar. Işık üzerinde kontrolün sağlanması açısından ise Görünür Işık Haberleşmesi için RGB ampul daha kullanışlı olma eğilimindedir.

İnsan gözünün bir aydınlatmayı beyaz olarak algılayabilmesinin CIE 1931 renk uzayı karşılığı olarak Şekil 2.18’de sunulan çizim hazırlanmıştır. Beyaz ışık tamamlayıcı olarak tanımlanan dalga boyları tablosu Çizelge 2.8’de sunulmaktadır.



Şekil 2.18. İnsan gözünde beyaz algılama

Çizelge 2.8. Beyaz ışık oluşturmak için gerekli dalga boyları arasındaki ilişki

Tamamlayıcı dalga boyu			Tamamlayıcı dalga boyu		
λ_1	λ_2	$P(\lambda_2)/P(\lambda_1)$	λ_1	λ_2	$P(\lambda_2)/P(\lambda_1)$
380	560.9	0.000642	460	565.9	1.53
390	560.9	0.00955	470	570.4	1.09
400	561.1	0.0785	475	575.5	0.812
410	561.3	0.356	480	584.6	0.562
420	561.7	0.891	482	591.1	0.482
430	562.2	1.42	484	602.1	0.440
440	562.9	1.79	485	611.3	0.457
450	564.0	1.79	486	629.6	0.668

Bir LED’in ışık kaynağı olarak çalışmak üzere tasarlanmış yarı iletken bir yapı olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte, LED’ler de optikten elektrige dönüşüm gerçekleştirebilir. Başka bir deyişle, bir LED, yaygın olarak bilinmeyen ve VLC araştırmaları arasında popülerlik kazanan, bir algılayıcı olarak da kullanılabilir. Fotoakım olarak bilinen bu fenomen LED üzerine ışık uygulandığında ışık yoğunluğu ile orantılı olarak küçük bir akımın üretilmesini sağlar (Dietz vd., 2003b).

Diğer taraftan bir foto diyot, ultraviyole ve kızılötesi dalga boylarını tespit edebilen geniş bir dalga boyu aralığına sahipken; LED, ışımaya yaptığı daha dar dalga boyu aralığında algılama yapan bir foto diyot olarak kullanılabilir. Yapılan çalışmalar sonucu LEDler için ışımaya yaptığı dalga boyunu ve daha yüksek frekanslarda algılama yapabileceği

söylenbilir (Hyunchae Chun vd., 2014a). Kırmızı bir LED kırmızı, yeşil ve mavi ışıkları algılayabilirken; mavi LED'ler sadece mavi ışığı algılayabilir.

2.12. Görünür Işık Haberleşmesi Uygulamaları

2007 yılında Elgala ve arkadaşları sistemin bina içi uygulama potansiyelini irdelemiş (Elgala vd., 2007), 2012 yılında Hanzo ve arkadaşları kablosuz efsaneler, gerçekler ve gelecek başlıklı makalelerinde sistemin geleceğine ışık tutmuşlardır (Hanzo vd., 2012). 2013 yılında Jovicic ve arkadaşlarının hazırladığı makalede görünür ışık haberleşmesinin kullanılabileceği alanlar ve potansiyeli irdelenmiş (Jovicic vd., 2013b); 2014 yılında ise artırılmış gerçeklik (Augmented Reality (AR)) uygulamasının verimli olarak kullanılmasını sağlayan eşzamanlı güdümlenici görevi üstlenmiştir (Anonim, 2013).

Araçlar: Ulaşım esnasında araçlar arasında veri iletimi sağlanabildiği gibi, trafik işaret ve işaretçileri ile sürücü arasında bağlantı kurulabilir. Benzer şekilde trafik yoğunluğu, kaza durumu ve yol ile ilgili bilgiler aktarılabilir. Araçlar arasındaki takip mesafesinin korunması için sürücü bilgilendirilebilir (Binti Che Wook vd., 2006); (Langer ve Grubor, 2007)

Sağlık Hizmetleri: Hastane ve benzeri sağlık hizmetlerinin verildiği ve elektromanyetik girişimden etkilenecek hassas cihazların kullanıldığı yerlerde iletişim alternatifi olarak güçlü bir seçenektir (Hong vd., 2008).

Bina İçi Ortamlar: Kapalı ortamlar konum belirleme sistemi (GPS) sinyallerinin iletilemediği ortamlardır. Büyük kapalı alana sahip olan yerlerde VLC teknolojisi ideal bir çözüm sunmaktadır. Çözümde gps sinyalleri gibi birden çok ışık kaynağı ile yer belirleme işlemi yapılabilir (Liu vd., 2009).

Güvenlik Uygulamaları: Kablosuz veri iletim hızının ve güveninin önem kazandığı kapalı ortamlarda VLC iletişimi radyo frekansı gibi duvar aşırı ortamlara taşınmadığı için doğal bir güvenlik bariyerine sahip olmaktadır (VLCGüvenlik, 2011).

Taşımacılık: Yolcunun yolculuk sırasında gerek aydınlatma gerekse de veri iletişimi sağlamak için VLC kullanımını mümkündür. Böylece taşıtta sadece bir noktadan dış dünya iletişimi sağlanarak taşıtın içerdiği hassas elektronik cihazlar için güvenlik önlemleri daha kolay sağlanabilir (Liu vd., 2012).

Akıllı Ev-Bina: VLC ile kapalı ortamlarda akıllı ev, akıllı bina ve akıllı aydınlatma yapıları radyo frekansı yerine mevcut elektrik altyapısı üzerinden kullanılabilir (Grubor vd., 2008).

Su Altı İletişimi: Radyo frekans dalgaları elektrik iletkenliği olan su gibi ortamında kullanılamazlar. VLC bu duruma alternatif olarak yeşil ışık kullanımı ile 60 m menzilde iletişim sağlamıştır (Salih vd., 2019). Ayrıca VLC, su altı akustiği uygulamaları için de kullanılmaktadır.

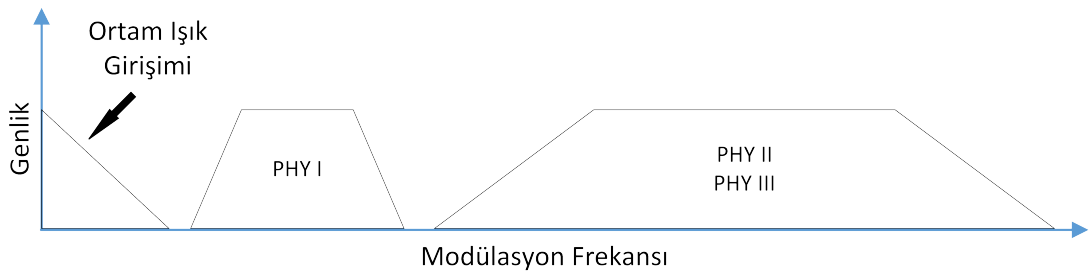
Benzer şekilde Görünür Işık Haberleşmesinin kullanılabileceği önerilen alanlar olarak aşağıdaki seçenekler sunulabilir:

- Müzeler (Elgala vd., 2007),
- İç Mekan Konum Saptaması (Lou vd., 2012)(Kuo vd., 2014) (Giustiniano vd., 2012) (Zhang ve Zhang, 2016) (Hyunchae Chun vd., 2014b),
- Saat Kalibrasyonu (Li vd., 2014b),
- Nesnelerin İnterneti (IoT) (Giustiniano vd., 2012) (Haus vd., 2019)(Wang vd., 2015c) (Wang vd., 2015b)(Li vd., 2015a),
- Yeni Yapı Olarak Işık ile Nesnelerin İnterneti (IOL) (Matheus vd., 2019),
- Yeni Nesil Yüksek Hızlı Hücresel Ağlar (Tsonev vd., 2015).
- Oyuncaktan Oyuncağa İletişim (Tippenhauer vd., 2012),
- İnsan Algılama (Li vd., 2015b),
- Mobil Etkileşim (Zhang vd., 2015a),
- Akıllı Aydınlatmalar (Wu vd., 2017),

- Doğal Afetlerde Haberleşme Ve Yardım (Lian vd., 2019),
- Savunma Sistemlerinde Güvenlik (Lian vd., 2019),
- Hastaneler (Song vd., 2015),
- Wi-Fi Spektrum Desteği (Jovicic vd., 2013b),
- Havacılık (Kumar, 2013),
- Su Altı Haberleşme (Miramirkhani ve Uysal, 2017),
- Yeni Nesil Hücresel Ağlar (Tippenhauer vd., 2012)(PureLiFi, 2020).

2.13. Fiziksel Katmanlar

IEEE 802.15.7 standardı, doğal ve yapay aydınlatmaların girişimlerinden etkilenmeyecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 2.19’te fiziksel katman düzleminde ortam ışık girişiminden bağımsız çalışmak üzere tasarlanmıştır yapı görülmektedir. Direkt-endirekt güneş ışığı, florasan ve akkor lambaların girişim etkilerinin yapıyı etkilememesi için çeşitli modülasyon ve kodlama teknikleri uygulanmıştır. Yapının çalışması için ana bileşenler; Fiziksel Katman (Physical Layer (PHY)), LED diyot, foto diyot ve Medya Erişim Kontrolüdür (Media Access Control (MAC)).



Şekil 2.19. Fiziksel katmanlar

Diğer kablosuz haberleşme sistemlerinden farklı olarak girişimler radyo bazlı değil, hava ortamının şartları, doğal ve yapay ışıkların etkileridir. Bu farklılık mevcut haberleşme sistemlerinin birbirleri üzerindeki bozucu etkilerinden uzak olmayı sağlarken; yapının kendine has zorlukları olmasına yol açar. Bu sebeple IEEE 802.15.7 standartlarında 3 farklı katman tasarımı sunulmaktadır. Farklı ihtiyaçlara uygun yapılar

oluşturmak ve yapının çalışma performansını garanti altına almak amaçlı belirlenen katman protokolleri Çizelge 2.9, 2.10, 2.11’da verilmiştir.

Çizelge 2.9. Katman I standartları

Modülasyon	RLL Kodu	Optik Saat Hızı	FEC		Veri Hızı
			Dış Kod (RS)	İç Kod (CC)	
OOK	Manchester	200 kHz	(15,7)	1/4	11.67 kb/s
			(15,11)	1/3	24.44 kb/s
			(15,11)	2/3	48.89 kb/s
			(15,11)	-	73.3 kb/s
			-	-	100 kb/s
VPPM	4B6B	400 kHz	(15,2)	-	35.56 kb/s
			(15,4)	-	71.11 kb/s
			(15,7)	-	124.4 kb/s
			-	-	266.6 kb/s
			-	-	-

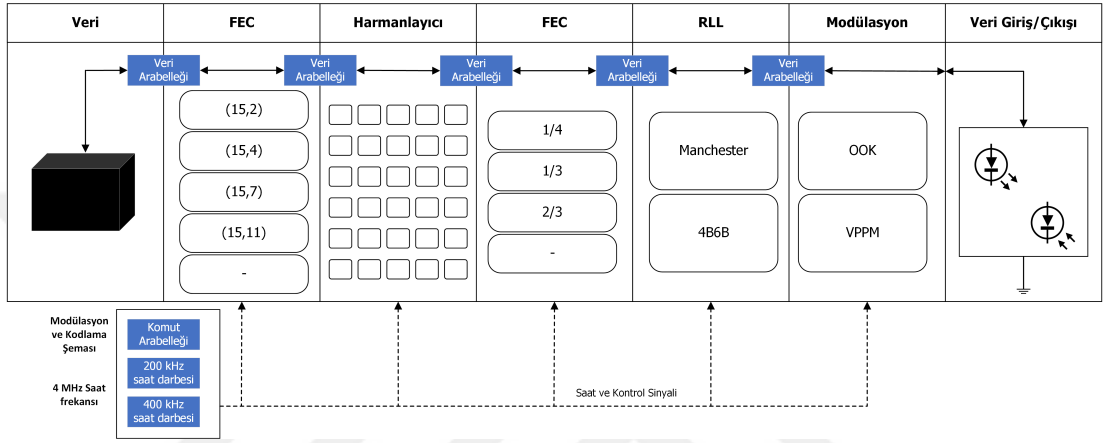
Çizelge 2.10. Katman II standartları

Modülasyon	RLL Kodu	Optik Saat Hızı	FEC	Veri Hızı
VPPM	4B6B	3.75 MHz	RS(64,32)	1.25 Mb/s
			RS(160,128)	2 Mb/s
		7.5 MHz	RS(64,32)	2.5 Mb/s
			RS(160,128)	4 Mb/s
			-	5 Mb/s
OOK	8B10B	15 MHz	RS(64,32)	6 Mb/s
			RS(160,128)	9.6 Mb/s
		30 MHz	RS(64,32)	12 Mb/s
			RS(160,128)	19.2 Mb/s
		60 MHz	RS(64,32)	24 Mb/s
			RS(160,128)	38.4 Mb/s
			RS(64,32)	48 Mb/s
120 MHz	RS(160,128)	76.8 Mb/s		
	-	96 Mb/s		

Yapı, kablosuz haberleşme sistemlerindeki gibi haberleşme sırasında verinin kodlanması, modülasyonun yapılması, verici LED kaynağı ile iletim kanalına iletimi, iletim kanalından alıcı ile algılama, demodülasyon ve kodlamanın çözülmesi işlemlerini kullanır. Şekil 2.20’da Veri Kodlama Değişkenleri sunulmaktadır. Her bir birimin performansı ve iletim kanalındaki girişimler yapının performansını etkiler. Yine diğer haberleşme sistemlerinde olduğu gibi yapıda uzunluk sınırlı hat kodlama (Run Length Limited Line Coding (RLL)), ileri hata düzeltme (Forward Error Correction (FEC)) işlemleri de tanımlanmıştır (Rajagopal vd., 2012).

Çizelge 2.11. Katman III standartları

Modülasyon	RLL Kodu	FEC	Veri Hızı
4-CSK	12 MHz	RS(64,32)	12 Mb/s
8-CSK		RS(64,32)	18 Mb/s
4-CSK	24 MHz	RS(64,32)	24 Mb/s
8-CSK		RS(64,32)	36 Mb/s
16-CSK		RS(64,32)	48 Mb/s
8-CSK		-	72 Mb/s
16-CSK	-	-	96 Mb/s



Şekil 2.20. Veri kodlama değişkenleri

2.14. Fiziksel Katman 1

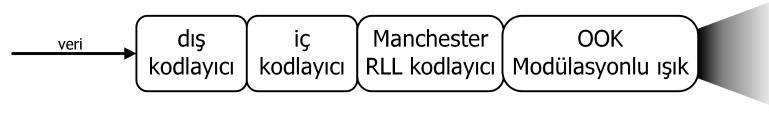
2.14.1. Modülasyon

Haberleşmede alıcı-verici arasındaki bilginin özelliklerinin önceden belirlenmiş olması gereklidir. Yapıların birbirleri ile konuşması için gerekli olan bu durum verinin modüle edilmesi ile sağlanır. Görünür Işık Haberleşmesi katman 1 yapısında OOK ve VPPM modülasyon teknikleri kullanılır.

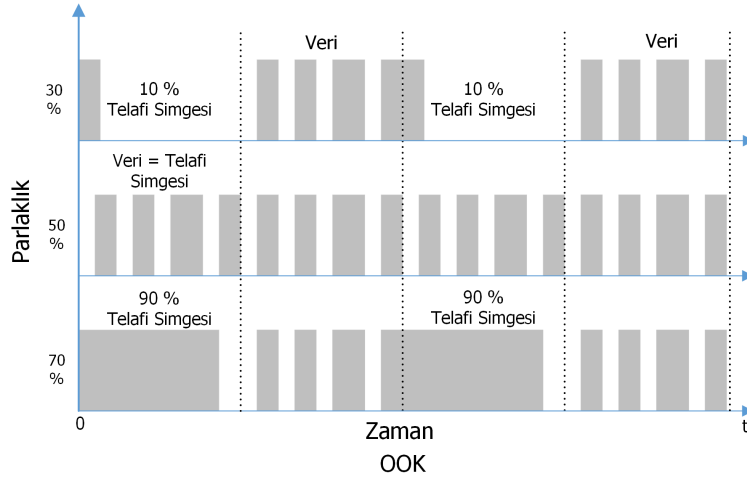
2.14.2. OOK modülasyonu

OOK, dijital verilerin kaynak sinyalin varlığı veya yokluğu ile temsil edildiği basit bir Genlik Kayması Anahtarlama (ASK) modülasyonu türüdür. Başka bir deyişle, 0 ve 1 bitleri doğrudan kaynak sinyalin genliği ile ilgilidir. OOK kavramı VLC fikrine uyarlanabilir, çünkü iletişim kurmak için ışığın modüle edilmesi gerekir. Işığı modüle etmenin basit ve kolay bir yolu, LED'i açıp kapatmaktır, bu da 1 ve 0 olarak alınacak ve

demodüle edilecektir. OOK modülasyon blok şeması Şekil 2.21’de, modülasyon örneği ise Şekil 2.22’de sunulmaktadır.



Şekil 2.21. OOK blok çizimi



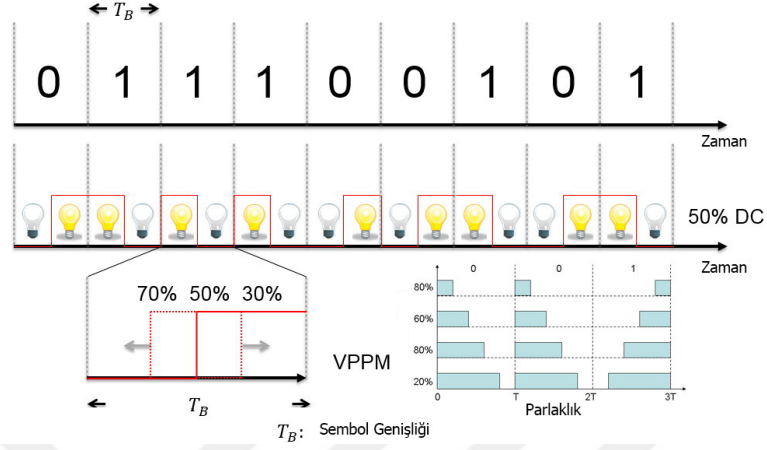
Şekil 2.22. OOK modülasyon tekniği

2.14.3. VPPM modülasyonu

VLC sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir diğer teknoloji VPPM’dir. Bu yöntem iki farklı modülasyon türü kullanır: Darbe Konumu Modülasyonu (PPM) ve Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM). Darbe Konumu Modülasyonunda, darbenin genişliği ve genliği sabittir. Bununla birlikte, sinyalin dijital değeri, zamana göre darbenin bulunduğu konum tarafından verilir (Elgala vd., 2011). PPM’nin avantajlarından biri uygulama kolaylığıdır. Ancak, her sembol için yalnızca bir darbe yayılır ve bu da veri hızının sınırlı olmasına neden olur. Darbe Genişliği Modülasyonu sinyalin uzunluğuna göre çalışır ve genişliğini zamana göre belirler. Darbe Genişliği Modülasyonunda, darbenin uzunluğu, belirli bir zaman periyoduna göre değerini belirler. Değişken Darbe Konum Modülasyonu ilk olarak IEEE 802.15.7 standardı, iletişim sağlamak için PPM ve karartma kontrolünü desteklemek için PWM kullanır. VPPM modülasyon blok şeması Şekil 2.23’de, modülasyon örneği ise Şekil 2.24’de sunulmaktadır.



Şekil 2.23. VPPM blok çizimi



Şekil 2.24. VPPM modülasyon şeması

2.14.4. CSK modülasyonu

Sinyal, çoklu çip olarak bilinen bir LED türünü oluşturan üç rengin yoğunluğuna göre ayarlanır. Genellikle kırmızı, yeşil ve mavi renkli üç veya daha fazla LED çipinden oluşur. Renkler, birlikte beyaz ışık üretmek için kullanılır. OOK ve VPPM modülasyonları düşük veri hızlarına sahiptir, bu nedenle IEEE 802.15.7 standardı, özellikle Görünür Işık Haberleşmesi için veri hızlarını artırmak için bir çözüm olarak CSK modülasyonunu önermektedir. CSK modülasyonu, Şekil 2.12’de sunulan CIE 1931 renk diyagramına dayanmaktadır (Janos Schanda, 2007). RGB kaynağının seçilebileceği yedi dalga boyu bandı mevcuttur. Bu köken, CSK sembolleri noktalarının bulunduğu üçgenin köşesini belirler. Her sembolün renk noktası, RGB yoğunluğunun modüle edilmesiyle üretilir.

2.14.5. Çalışma uzunluğu sınırlı kodlama

Çalışma uzunluğu sınırlı kodlama (RLL) tekniğinin amacı uzun süreli aynı değere sahip verilerinin artarda gelmesi ile; vericide oluşabilecek kırışma etkisi, alıcıda oluşabilecek zamanlama ve veri iyileştirme (CDR) algılama problemlerine çözüm sağlamaktır. Kablosuz haberleşmede verilerin doğru alınması için alıcı tarafa referans

bir zamanlamaya ihtiyaç duyulmaktadır. Zamanlama iyileştirme adı verilen bu durum gönderilen bilgiler içine bir tetikleme bilgisi eklenerek çözümlenir. RLL kodlamayı oluşturan bu durum gönderilen ve alınması gereken bilgilerin DC dengesini sağlar.

2.14.6. 4B6B kodlama

Tüm VPPM katman I modlarında 4B6B kodlama kullanılır. 4B6B, DC dengesi ile 4 bitlik 6 bitlik kodlanmış sembollere genişletir. VPPM kodlu her semboldeki 1 ve 0 sayıları her zaman 3'e eşittir. Kodlama şeması Çizelge 2.12'de sunulmuştur.

Çizelge 2.12. 4B6B kodlama şeması

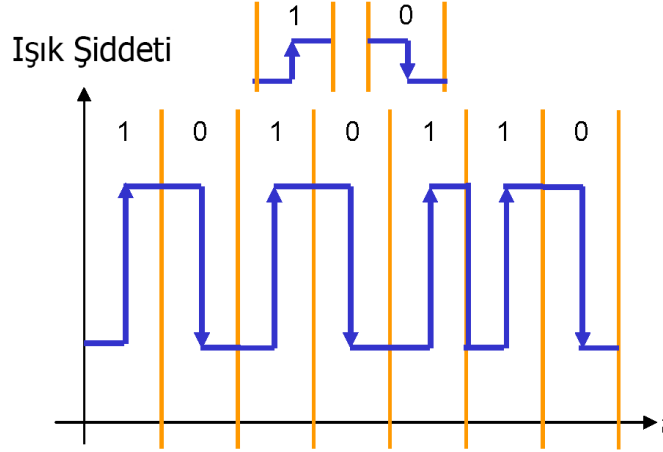
4B (Giriş)	6B (Çıkış)
0000	001110
0001	001101
0010	010011
0011	010110
0100	010101
0101	100011
0110	100110
0111	100101
1000	011001
1001	011010
1010	011100
1011	110001
1100	110010
1101	101001
1110	101010
1111	101100

2.14.7. Manchester kodlama

Manchester Kodlama Manchester kodlaması, kodlama şemasının bir parçası olarak orta bit geçişleri kullanan bir kod ailesine aittir. Manchester, maksimum çalışma uzunluğu iki olan 1/2 oranlı bir koddur. Çizelge 2.13'de gösterildiği gibi her bir bit kodlanmış 2 bit ile genişletilir. Gelen her bir verinin fiziksel katmandaki kodlaması Şekil 2.25'de verilmiştir. Şekil 2.26'de ise örnek bir 8 bit verinin Manchester kod sonucu görülmektedir.

Çizelge 2.13. Manchester kodlama

bit	Manchester kodu
0	01
1	10



Şekil 2.25. Manchester kodlama görüntüsü

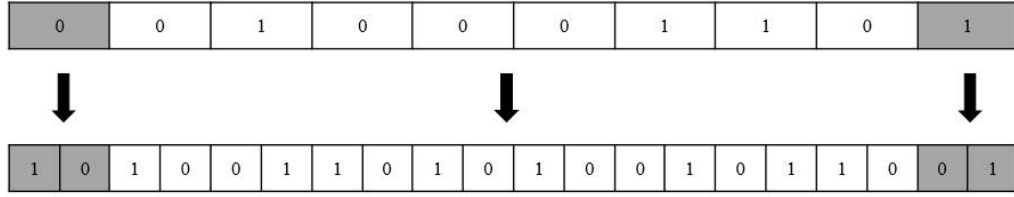
2.14.8. İleri hata düzeltme

İleri hata düzeltme (FEC), iletilecek veri üzerine hata düzeltme kodları eklenerek haberleşme tekniğidir. Veri güvenilirliğini arttırmak için kullanılır. Teknik, alıcı-verici arasında verinin doğruluğunun teyidinde gerek bırakmayan bir yetenek kazandırır. Kodlama iletilecek bilgi üzerine farklı yöntemlerle eklenen kontrol bitler ile alıcıya ulaşan veriler içinde doğruluk tespiti ve düzeltme yapması sağlanır.

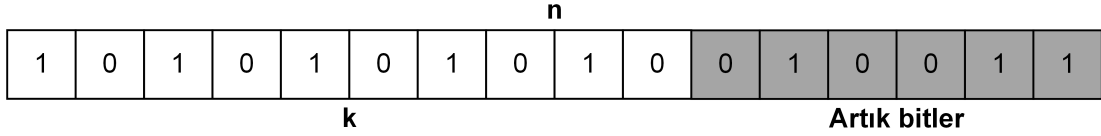
Kodlamada bilgi biti 'k', kod biti 'n' sembolleri ile ifade edilmektedir. Blok kodu olarak (n,k) şeklinde kullanılır. Şekil 2.27'de örnek bir ileri hata düzeltme örneği sunulmaktadır.

2.14.9. Reed-Solomon

Kodlamada sistematik RS kodları Galois Field polinomlarından GF(24) denklemi birlikte kullanılır. Verinin doğruluğunu sağlamak için polinom sonuçları iletilecek veri üzerine eklenerek iletilir. Kodlama yapısında tanımlama (n,k) şeklinde sunulur. Katman



Şekil 2.26. 8 bitlik örnek bir verinin Manchester kodlaması



Şekil 2.27. FEC (n,k) örneği

1 için gerekli GF(24) polinomu Denklem 2.1’de sunulmuştur. Kodlamada hata düzeltme yeteneği Denklem 2.2’de sunulmaktadır.

$$x^4 + x + 1 \quad (2.1)$$

$$t = (n - k)/2 \quad (2.2)$$

Katman 1 yapısında dış kodlamada kullanılan Reed-Solomon polinom tablosu Çizelge 2.14’de sunulmuştur.

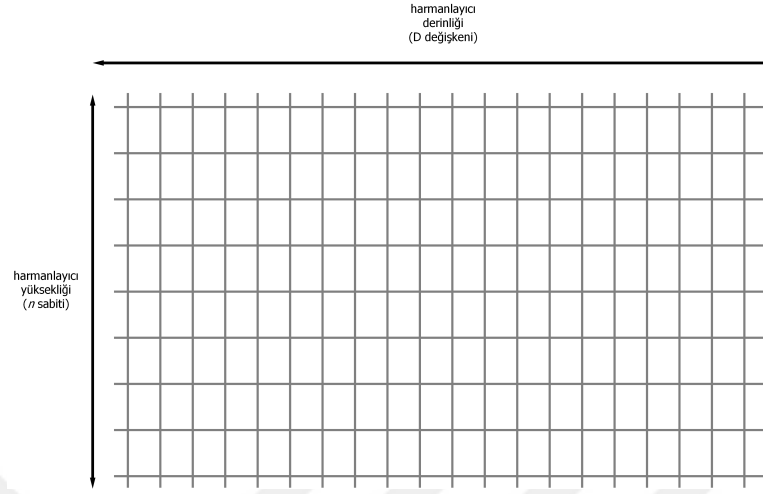
Çizelge 2.14. Reed-Solomon polinom tablosu

(n, k)	g(x)
(15,11)	$x^4 + a^{13}x^3 + a^6x^2 + a^3x + a^{10}$
(15,7)	$x^8 + a^{14}x^7 + a^2x^6 + a^4x^5 + a^2x^4 + a^{13}x^3 + a^5x^2 + a^{11}x + a^6$
(15,4)	$x^{11} + a^9x^{10} + a^8x^9 + a^4x^8 + a^9x^7 + a^{13}x^6 + a^4x^5 + a^{12}x^4 + a^4x^3 + a^5x^2 + a^3x + a^6$
(15,2)	$x^{13} + a^3x^{12} + a^8x^{11} + a^9x^{10} + a^2x^9 + a^4x^8 + a^{14}x^7 + a^6x^6 + a^{10}x^5 + a^7x^4 + a^{13}x^3 + a^{11}x^2 + a^5x + a$

2.14.10. Harmanlayıcı

Bir blok harmanlayıcı, Şekil 2.28’de gösterildiği gibi iç evrişimli kod ile dış RS kodu arasında bir ara ayırıcı olarak kullanılır. Ara ayırıcı sabit bir yükseklik olarak n’dir,

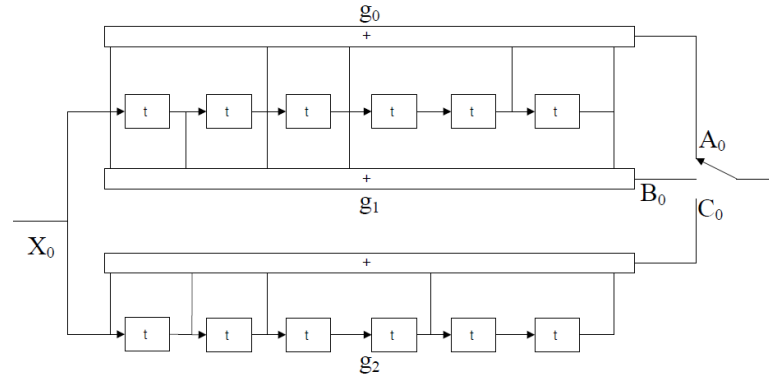
ancak çerçeve boyutuna bağlı olarak esnek bir D derinliğine sahiptir. Yapı kendinden sonraki kodlamalar için veri yükünü en aza indirmek için bir ara bellek olarak kullanılır.



Şekil 2.28. Harmanlayıcı blok yapısı

2.14.11. Konvülsiyon kodları

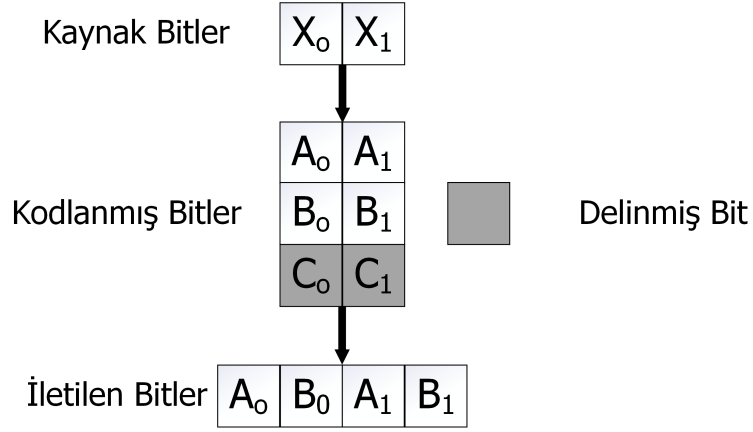
Jeneratör polinomu $g_0 = 133\ 8$; $g_1 = 171\ 8$; $g_2 = 1658$ ile kısıtlama uzunluğunun yedi ($K=7$) olan $1/3$ evrişimli koduna dayanmaktadır. Şekil 2.29'de $1/3$ oranlı evrişimli kod yapılanması sunulmuştur.



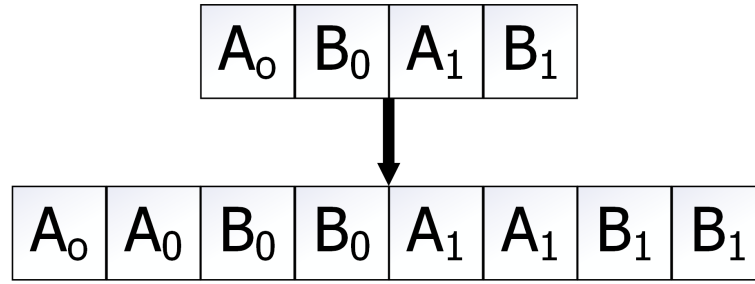
Şekil 2.29. $1/3$ oranlı evrişim kodlama

Oran $1/4$ kodu, Şekil 2.30'de gösterildiği gibi oran $1/3$ ana kodunun, oran $1/2$ koduna delinmesi ve ardından Şekil 2.31'de gösterildiği gibi basit bir tekrarlama ile elde edilir.

Katman 1 yapısında kullanılan diğer bir oran olan $1/3$ oranı Şekil 2.29'da gösterilen ana kodunun çıktıları kullanılarak elde edilir.



Şekil 2.30. 1/2 oranlı evrişim kodlama



Şekil 2.31. 1/4 oranlı evrişim kodlama

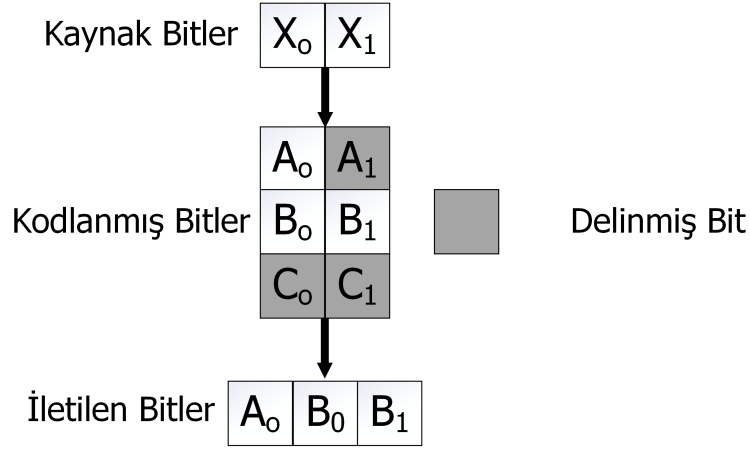
2/3 oranlı son kod ise Şekil 2.32'de sunulduğu üzere 1/3 oran kodunun delinmesi ile elde edilir.

2.14.12. Çerçeve formatı

Görünür ışık haberleşmesinde her bir MAC çerçevesi 3 temel bileşenden oluşur. Bunlar;

- Çerçeve kontrolü, sıra numarası, adres bilgileri ve güvenlikle ilgili bilgileri içeren bir MHR,
- Çerçeve türüne özgü bilgileri içeren değişken uzunlukta bir MAC Yüğü,
- FCS içeren MFR.

MAC alt katmanındaki çerçeveler, belirli sırada bir alan dizisi olarak tanımlanır. Tüm bu çerçeve formatları, fiziksel katman tarafından iletdikleri sırayla en soldaki bitin zaman içinde ilk önce iletiildiği sırayla gösterilir. Her alandaki bitler, alanın



Şekil 2.32. 2/3 oranlı evrişim kodlama

uzunluğunun k bit olduğu 0'dan $k - 1$ 'e kadar numaralandırılır. Çizelge 2.15'de MAC çerçeve formatı sunulmuştur.

Çizelge 2.15. MAC çerçeve formatı

Çerçeve Kontrolü	Sıra Numarası	Hedef VPAN Tanımlayıcısı	Hedef Adresi	Kaynak VPAN Tanımlayıcısı	Kaynak Adresi	Yardımcı Güvenlik Başlığı	Çerçeve Veri Yüğü	Çerçeve Kontrol Dizisi
		Adresleme alanları						
MHR							MAC Veri Yüğü	MFR

Çerçeve kontrol alanı 2 byte uzunluktadır. Çerçeve türünü, adresleme alanlarını ve diğer denetim bayraklarını tanımlayan bilgiler içerir. Çerçeve kontrol alanı Çizelge 2.16'de gösterildiği gibi biçimlendirilmelidir. Ayrılmış bitler iletimde sıfıra ayarlanır ve alımda yok sayılırlar.

Çizelge 2.16. MAC çerçeve kontrol alanı

Çerçeve Versiyonu	Rezerve	Çerçeve Tipi	Güvenlik Etkin	Çerçeve Bekleme	El Sıkışma Talebi	Hedef Adresleme Modu	Kaynak Adresleme Modu
-------------------	---------	--------------	----------------	-----------------	-------------------	----------------------	-----------------------

Çizelgede sunulan kontrol alanının alt alanları:

Çerçeve sürümü alt alanı: Çerçeveye karşılık gelen sürüm numarasını belirtir. Bu alt alan, IEEE 802.15.7 ile uyumlu bir çerçeveyi belirtmek için *0b00* olarak ve bu standartla uyumlu bir çerçeveyi belirtmek için *0b01* olarak ayarlanır. Diğer tüm alt alan değerleri gelecekte kullanılmak üzere ayrılmıştır.

Çerçeve türü alt alanı: Çizelge 2.17’de listelenen değerlerden birine ayarlanır.

Çizelge 2.17. Çerçeve türü alt alanı

Çerçeve tipi	Açıklama
000	Beacon
001	Veri
010	El Sıkışma
011	Komut
100	CVD
101-111	Rezerve

Güvenlik etkin alt alanı: Güvenlik Etkin alt alanı 1 bit uzunluğundadır ve çerçeve; MAC alt katmanı tarafından korunuyorsa bir bit olarak ayarlanır. Aksi takdirde bu alt alan sıfır olarak ayarlanacaktır. MHR’nin Yardımcı Güvenlik Başlığı alanı, yalnızca Güvenlik Etkin alt alanı bir olarak ayarlanmışsa mevcut olacaktır.

Çerçeve beklemede alt alanı: Çerçeve Bekleyen alt alanı 1 bit uzunluğundadır ve çerçeveyi gönderen cihaz, alıcı için daha fazla veriye sahipse bir bit olarak ayarlanır. Aksi takdirde bu alt alan sıfıra ayarlanacaktır. Bekleyen Çerçeve alt alanı, yalnızca CAP sırasında beacon özellikli bir VPAN üzerinde çalışan cihazlar tarafından veya herhangi bir zamanda beacon etkin olmayan bir VPAN üzerinde çalışan cihazlar tarafından iletilen beacon çerçevelerinde veya çerçevelerde kullanılacaktır. Diğer tüm zamanlarda, iletimde sıfıra ayarlanmalı ve alımda göz ardı edilmelidir.

El sıkışma isteği alt alanı: Onay İsteği alt alanı 1 bit uzunluğundadır ve bir veri veya MAC komut çerçevesi alındığında alıcı cihazdan bir onay gerekip gerekmediğini belirtir. Bu alt alan bir olarak ayarlanırsa, alıcı cihaz yalnızca alındıktan sonra üçüncü filtreleme düzeyini geçerse bir onay çerçevesine gönderecektir . Bu alt alan sıfıra ayarlanırsa, alıcı cihaz bir onay çerçevesi göndermez.

Hedef adresleme modu alt alanı: Hedef Adresleme Modu alt alanı, Çizelge 2.18’de listelenen değerlerden birine ayarlanacaktır.

Çizelge 2.18. Hedef adresleme modu alt alanı

Adresleme Modu	Açıklama
00	VPAN tanımlayıcısı ve adres alanları yok
01	Adres alanı yok, yalnızca yayın modu
10	Adres alanı 16 bit kısa adres içeriyor
11	Adres alanı 64 bit genişletilmiş adres içeriyor

Kaynak adresleme modu alt alanı: Kaynak Adresleme Modu alt alanında da hedef adresleme modu alt alanında olduğu gibi Çizelge 2.18'de listelenen değerlerden biri kullanılır.

Sıra numarası alanı 1 byte uzunluğundadır ve çerçevenin sıra tanımlayıcısını belirtir.

Hedef VPAN tanımlayıcı alanı, 2 byte uzunluğundadır ve çerçevenin hedeflenen alıcının adres tanımını belirtir. Bu alandaki 0xffff değeri, kanalı dinleyen tüm cihazlar tarafından geçerli bir tanımlayıcı olarak kabul edilir. Bu alan, MAC çerçevesine yalnızca Çerçeve kontrol alanının hedef adresleme modu alt alanı "10" veya "11" değerinde ise dahil edilecektir.

Hedef Adres alanı, Çerçeve kontrol alanının Hedef Adresleme Modu alt alanında belirtilen değere göre 2 - 8 byte uzunluğundadır ve çerçevenin hedeflenen alıcısının adresini belirtir. Bu alandaki 0xffff 16 bit değeri, yayını dinlemekte olan tüm cihazlar tarafından geçerli bir 16 bitlik kısa adres olarak kabul edilecek olan yayın kısa adresini temsil edecektir. Bu alan, MAC çerçevesine yalnızca çerçeve kontrol alanının hedef adresleme modu alt alanı sıfır değilse dahil edilir.

Kaynak VPAN tanımlayıcı alanı, 2 byte uzunluğundadır ve çerçeveyi oluşturan kaynak alıcısının adres tanımını belirtir. Bu alan, MAC çerçevesine yalnızca kaynak adresleme modu sıfır değilse dahil edilir. Bir aygıtın VPAN tanımlayıcısı başlangıçta bir VPAN ile ilişkilendirme sırasında belirlenir.

Kaynak adres alanı, çerçeve kontrol alanının kaynak adresleme modu alt alanında belirtilen değere göre 2 - 8 byte uzunluğundadır ve çerçeveyi oluşturanın adresini belirtir. Bu alan, MAC çerçevesine yalnızca çerçeve kontrol alanının kaynak adresleme modu alt alanı "10" veya "11" değerinde ise dahil edilecektir.

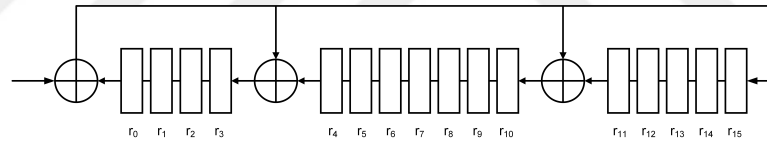
Yardımcı güvenlik başlığı alanı, değişken bir uzunluğa sahiptir ve çerçevenin gerçekte nasıl korunduğu, hangi güvenlik düzeyine sahip olduğu ve hangi anahtarlama türlerinin kullanıldığı dahil olmak üzere güvenlik işlemleri için gereken bilgileri içerir. Bu alan yalnızca güvenlik etkin alt alanı "1" olarak ayarlanmışsa mevcut olacaktır.

Çerçeve veri yükü alanı değişken bir uzunluğa sahiptir ve çerçeve türlerine özgü bilgiler içerir. Güvenlik etkin alt alanı çerçeve denetimi alanında bir değere ayarlanırsa, çerçeve verisi o çerçeve için seçilen güvenlik paketi tarafından tanımlandığı şekilde korunur.

Çerçeve kontrol dizisi alanı 2 byte uzunluktadır ve Denklem 2.3'de sunulan 16. derece standart jeneratör polinomu kullanılarak hesaplanır.

$$G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (2.3)$$

Kontrol dizisinde kullanılan polinomun kullanımı Şekil 2.33'de sunulmuştur.



Şekil 2.33. Kontrol dizisi hata kontrolü

Çalışmada fiziksel katman için kullanılan çerçeve formatı Çizelge 2.19'de sunulmuştur.

Çizelge 2.19. Çerçeve formatı

Çerçeve	Uzunluk (byte)
Başlangıç Alanı	3
Çerçeve Uzunluğu	2
Hedef Adres Alanı	4
Kaynak Adres Alanı	4
Veri Yükü Alanı	0-255
Çerçeve Kontrol Dizisi	2

3. GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞME DENEY DÜZENEKLERİ

Çalışmada IEEE 802.15.7 standartlarını Katman I düzeyinde sağlayan deney seti oluşturulmuştur. Setin işlem gücünün sağlanması için bir yongada sistem geliştirme kartı olan BeagleBone Black modeli tercih edilmiştir. Haberleşmenin verici bölümü için düşük ve yüksek güçlü LEDler, alıcı bölümü için foto diyotlar tercih edilmiştir. 3 ayrı deney tasarımı için farklı baskı devreler eşliğinde tamamlayıcı elektronik komponentler ile set tamamlanmıştır.

3.1. BeagleBone Black

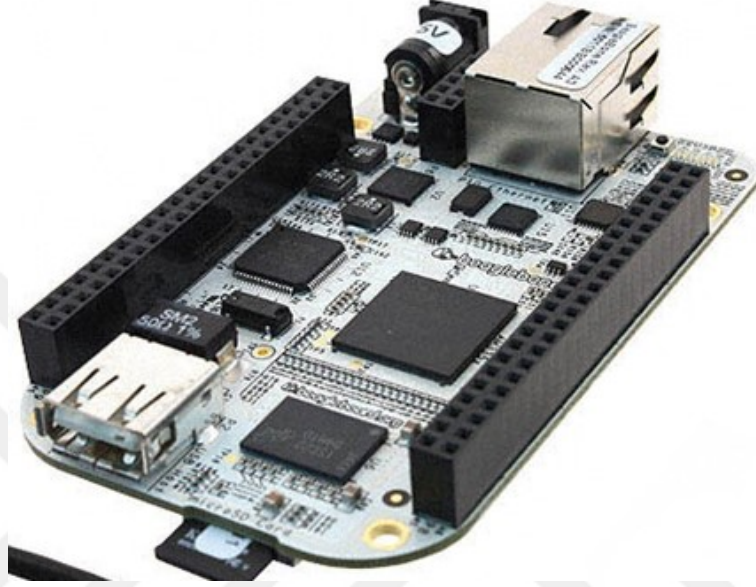
Texas Instruments firması tarafından geliştirilmiş bir yongada bilgisayar geliştirme kartıdır. Raspberry Pi modellerine benzer şekilde; mikro işlemcilerin tek başına yetersiz geldiği ve bilgisayar kullanmanın gerektiği durumlarda düşük maliyetli ve gerekli yeter donanımları üzerinden bulunduran bir yongada sistem geliştirme kartıdır. Kart donanımsal bileşenler olarak;

- 1 GHz Arm A8 işlemci,
- 512 MB hafıza birimi,
- 4 Gb katı hal depolaması,
- 65 pin giriş-çıkış portu, HDMi görüntü çıkışı, Ethernet bağlantısı, USB ve MicroSD kart okuyucu portu

içeren bir geliştirme kartıdır.

Deney seti olarak Beagle Bone Black (BBB) geliştirme kartı donanımı üzerinde Xenomai gerçek-zaman geliştirme çerçevesi ile derlenmiş 3.8 çekirdek sürümüne sahip Debian işletim sistemi tercih edilmiştir. Geliştirme kartının fiziksel görüntüsü Şekil 3.1'deki verilmiştir. Haberleşme için UDP protokolü; haberleşmedeki bant genişliğini, veri kaybını raporlayabilen *iperf* komut seti ile birlikte kullanılmıştır. Hazırlanan script ile yazılımsal olarak değiştirilebilecek, iç çalışma frekansı, taşınan yük boyutu ve verici

olarak kullanılacak LED seçimi, her 150 ölçümde bir ölçümde değiştirilecek şekilde hazırlanmıştır. Yapının donanımsal değişim gerektiren; filtre, haberleşme mesafesi ve ortam ışığı değişkenlerinin değişimleri ise manuel olarak tamamlanmıştır. Yapılan ölçümlerde 150 adet veri transfer hız ölçümü alınmış; ölçüm ortalaması tek bir sütuna indirgenmiş ve 7 sütun, 4200 satır veri seti elde edilmiştir.



Şekil 3.1. BeagleBone Black geliştirme kartı

Deney setlerinde alıcı-verici bileşenleri Çizelge 3.1’da sunulmuştur.

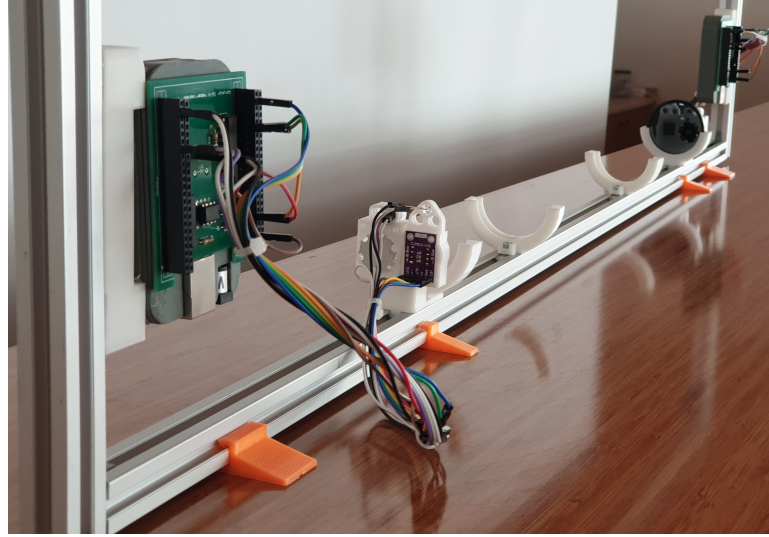
Çizelge 3.1. Elektronik Bileşenler

L-53SRC-J4	Düşük güçlü LED, 5mm, Kırmızı, 640nm
REBEL-STAR-NW100	Düşük güçlü LED, 3V, Soğuk Beyaz
XHP35	Yüksek güçlü LED, 11.3V, 4W, 3000K, Sıcak beyaz
OPT101	Fotodiyot 300-1100 nm ve transempedans amfi
BPW46	Fotodiyot 350-1120 nm
QSD2030	Fotodiyot 400-1100 nm

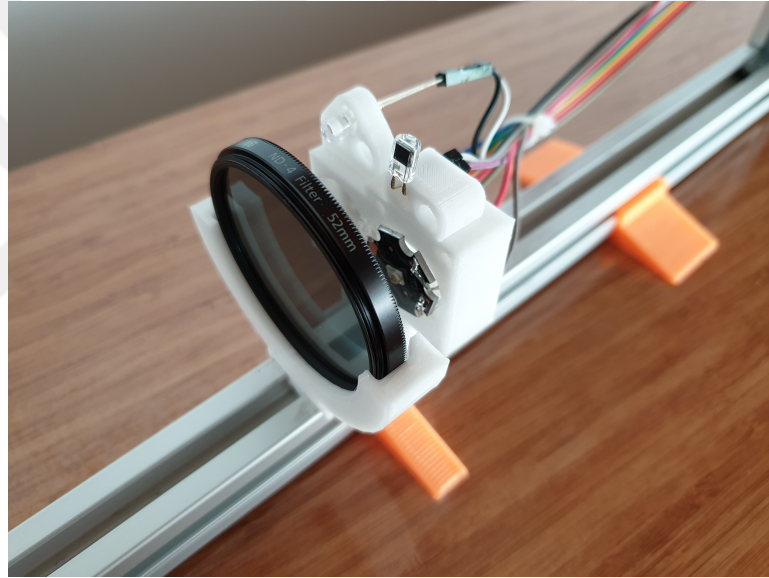
Deney setinin kontrollü veri alınması için hazırlanmış hali Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de sunulmuştur.

3.2. Yazılımsal Fiziksel Katman

Yapı BeagleBone geliştirme kartında çalışan Linux işletim sisteminde standart kütüphane verileri ile uygulama, ulaşım ve ağ katmanlarını kullanmaktadır. Geliştirilen



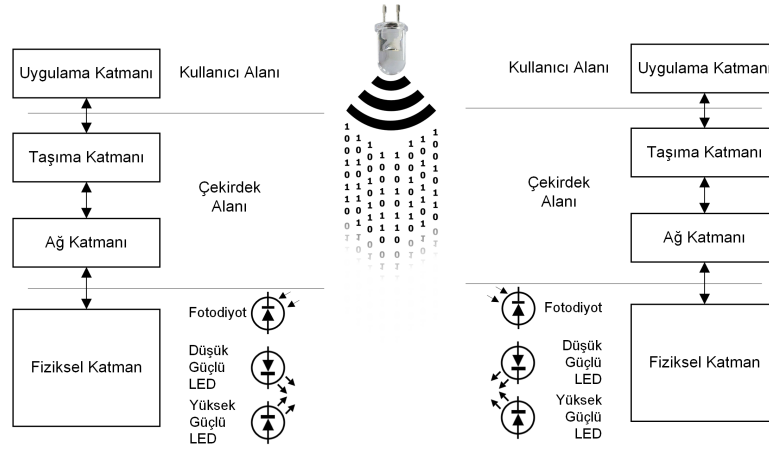
Şekil 3.2. Deney seti



Şekil 3.3. Alıcı-Verici

VLC kütüphanesi ile ağ ve taşıma katmanı hazırlanmış; fiziksel katman bağlantısı sağlanmıştır.

Yazılımsal fiziksel katman sonucu işletim sisteminde ağ kartı oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ kartı fiziksel olarak deneylerde kullanılan LED ve optik algılayıcılar ile haberleşen fiziksel katmanın tamamlayıcısıdır. Oluşturulan ağ kartının işletim sistemi üzerindeki terminal ekranında çalıştırılan *ifconfig* komut çıktısı Şekil 3.5'de sunulmuştur.



Şekil 3.4. Katman tasarımı

```

root@beaglebone:~/net_vlc# ifconfig
eth0    Link encap:Ethernet HWaddr 90:59:CE:86:32:3B
        UP BROADCAST MULTICAST MTU:1500 Metric:1
        RX packets:0 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
        TX packets:0 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
        collisions:0 txqueuelen:1000
        RX bytes:0 (0.0 B)  TX bytes:0 (0.0 B)
        Interrupt:56

lo      Link encap:Local Loopback
        inet addr:127.0.0.1 Mask:255.0.0.0
        inet6 addr: ::1/128 Scope:Host
        UP LOOPBACK RUNNING MTU:65536 Metric:1
        RX packets:12 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
        TX packets:12 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
        collisions:0 txqueuelen:0
        RX bytes:840 (840.0 B)  TX bytes:840 (840.0 B)

vlc0    Link encap:UNSPEC HWaddr 00-01
        inet addr:192.168.0.1 Mask:255.255.255.0
        UP RUNNING NOARP MTU:255 Metric:1
        RX packets:8 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
        TX packets:8 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
        collisions:0 txqueuelen:100
        RX bytes:352 (352.0 B)  TX bytes:352 (352.0 B)

root@beaglebone:~/net_vlc#

```

Şekil 3.5. Deney seti 3 terminal ekranı *ifconfig* komutu çıktısı

LED devre elemanının hem alıcı hemde verici olarak kullanıldığı deney setinin alıcı kısmında terminal ekranında çalıştırılan *iperf* komut çıktısı Şekil 3.6’de sunulmuştur.

Deney seti 2 ve 3 için hazırlanan fiziksel katmandaki haberleşme örneği Şekil 3.7’de sunulmuştur.

3.3. Deney Düzenegi 1 – LED-ve-LED Haberleşme

İlk deney düzeneginde alıcı ve verici olarak düşük güçlü LED’ler kullanılmıştır. Yapı; devrenin alıcı, verici ve buffer sinyalleri için verici uçları ve LED üzerinden gelen

```

root@beaglebone:~/net_vlc# iperf -u -s -i 2 -B 192.168.0.2
-----
Server listening on UDP port 5001
Binding to local address 192.168.0.2
Receiving 1470 byte datagrams
UDP buffer size: 160 KByte (default)
-----
[ 3] local 192.168.0.2 port 5001 connected with 192.168.0.1 port 52206
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth   Jitter    Lost/Total Datag
[ 3] 0.0- 2.0 sec   400 Bytes  1.60 Kbits/sec  6.575 ms  0/ 2 (0%)
[ 3] 2.0- 4.0 sec   400 Bytes  1.60 Kbits/sec  17.176 ms 0/ 2 (0%)
[ 3] 4.0- 6.0 sec   400 Bytes  1.60 Kbits/sec  28.162 ms 0/ 2 (0%)
[ 3] 6.0- 8.0 sec   400 Bytes  1.60 Kbits/sec  36.828 ms 0/ 2 (0%)
[ 3] 8.0-10.0 sec   600 Bytes  2.40 Kbits/sec  47.145 ms 0/ 3 (0%)
[ 3] 10.0-12.0 sec  400 Bytes  1.60 Kbits/sec  60.994 ms 0/ 2 (0%)
[ 3] 0.0-12.8 sec  2.73 KBytes 1.76 Kbits/sec  66.167 ms 0/ 14 (0%)

```

Şekil 3.6. Deney seti 1 terminal ekranı *iperf* komut çıktısı

```

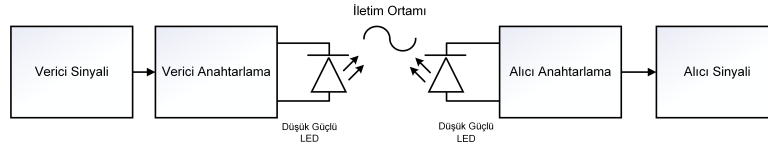
root@beaglebone:~/net_vlc# ./tx.sh
PING 192.168.0.2 (192.168.0.2) 10(38) bytes of data:
18 bytes from 192.168.0.2: icmp_req=1 ttl=64 time=415 ms
18 bytes from 192.168.0.2: icmp_req=2 ttl=64 time=410 ms
18 bytes from 192.168.0.2: icmp_req=3 ttl=64 time=419 ms
18 bytes from 192.168.0.2: icmp_req=4 ttl=64 time=405 ms
18 bytes from 192.168.0.2: icmp_req=5 ttl=64 time=408 ms

--- 192.168.0.2 ping statistics ---
5 packets transmitted, 5 received, 0% packet loss, time 2000ms
rtt min/avg/max/mdev = 405.672/411.790/419.220/4.867 ms

```

Şekil 3.7. Fiziksel katman haberleşme örneği

sinyalleri analog-dijital dönüştürücü üzerinden lojik seviyede algıladığı dönüş sinyali ucu içerir (Şekil 3.8).

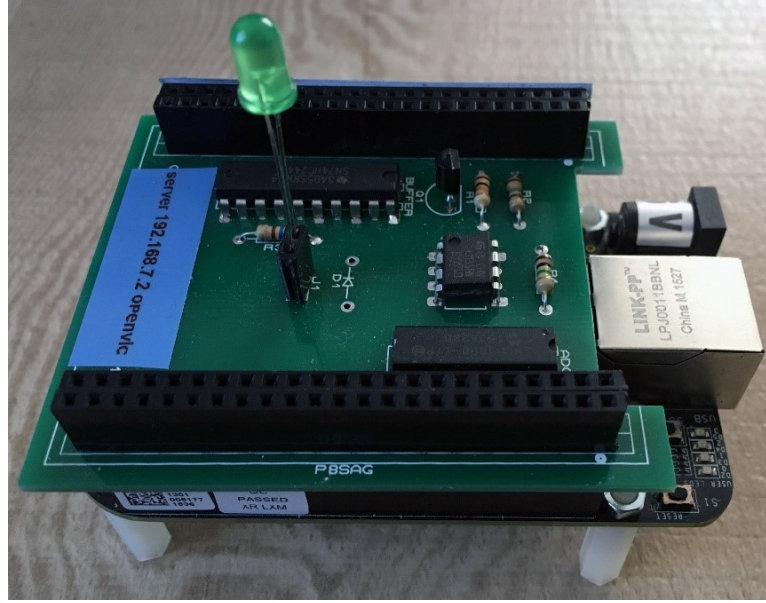


Şekil 3.8. LED-ve-LED haberleşme tasarımı

Deney için gerçekleştirilen baskı devrenin devre elemanları lehimlenmiş ve geliştirme kartı üzerinde takılmış hali Şekil 3.9'de gösterilmektedir.

3.3.1. Optik Algılayıcı LED

Foto diyot, foto transistör benzeri optik algılayıcı devre elemanları geniş bir ışınım spektrumunda algılama yapabilirler (Dietz vd., 2003a). Bu durum gerek girişlerin artmasına gerekse de algılayıcı hassasiyetinde azalmalara sebep olmaktadır. Bir diğer olumsuz durumda algılayıcının veri akışında istenilen kısmın süzülmesi sırasında kullanılacak fazla devre elemanında oluşmaktadır. Bant geçiren filtre kullanımı, mekanik filtre kullanımı ve benzeri geliştirme zorunlulukları yapının karmaşıklığı arttırmaktadır.



Şekil 3.9. Deney seti 1

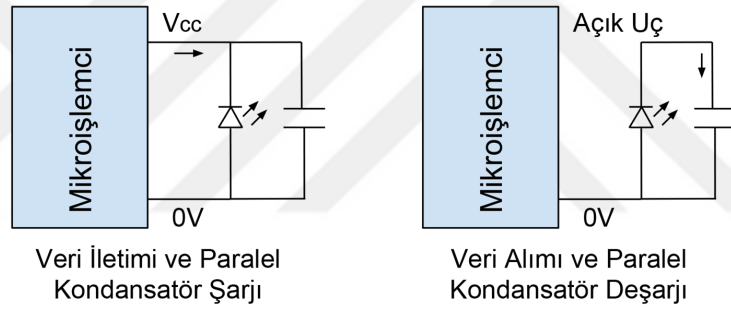
Verici olarak kullanılan LED'lerin alıcı olarak kullanılabilmesi için devre elemanının fiziksel özelliklerinin derinlerine girmek yerine her devre elemanında olan iç kapasite olgusunun bilinmesi/ölçülmesi yeterlidir. Devre elemanları üzerindeki potansiyel fark kalktığına iç kapasitif etki nedeniyle deşarj olmaya başlarlar. Doğru polarize altında kendi ışınım bandında ışık yayan LED'de üzerindeki potansiyel fark kalktığına deşarj olmaya başlar ve tekrar doğru polarize olana / ışınım yapmaya yetecek kadar potansiyel fark olana kadar devam eder. LED'in haberleşme aracı olarak kullanıldığı yapıda ise bu durum oldukça hızlı gerçekleşir. Fiziksel katman 1 yapısında maksimum 400 kHz'lik optik saat söz konusudur ve yeterli hızda LED üzerindeki potansiyel farkı ölçülünerek LED optik algılayıcı olarak kullanılabilir.

2005 yılında Acharya tarafından yapılan çalışmalarda da özel LED'lerin algılayıcı olarak kullanılması durumunda haberleşme için ek optik bir filtreye ihtiyaç duyulmadığına değinilmiş ve güneş ışığı girişimine daha dirençli oldukları vurgulanmıştır (Acharya, 2005).

Alıcı ve verici olarak LED kullanma fikri optik haberleşmedeki direkt algılama zorunluluğundan ortaya çıkmıştır. OOK tekniğinde olduğu gibi sinyalin (ışığın) varlığı "1", yokluğu "0" değerini simgeler. Alıcı olarak foto diyot ve benzeri devre elemanları

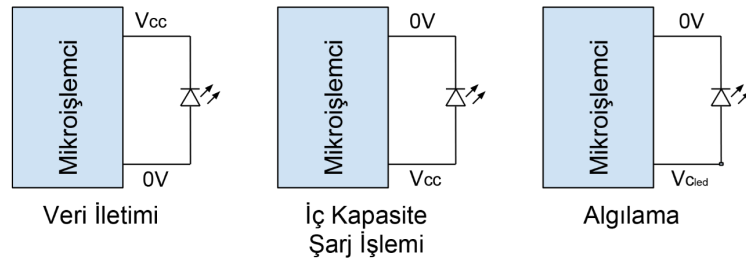
kullanılması durumunda akıma veya gerilim değerine dönüştürülen gelen ışığın şiddeti; LED'in alıcı olarak kullanılmak istenilmesi durumunda farklı yollar ile çözümlenebilir.

Örnek olarak LED'e paralel olarak bağlanacak küçük değerli kapasitörün, LED'in alıcı olarak kullanılmak istendiği zaman diliminden hemen önce şarj edilip, gelen ışığın varlık ve yokluk durumuna göre kondansatör üzerindeki gerilim miktarı ölçülebilir. Ters polarizasyon altındaki LED'e paralel kondansatörün deşarj süresi LED'in üzerine düşen ışık miktarı ile kısalabilir. Ölçülen değer seçilen kapasite değerine göre değişkenlik gösterse bile belirlenecek eşik değeri altındaki gerilim değeri ışığın varlığını yani "1" sinyalini; eşik değeri üzerindeki gerilim değeri ise gelen bir sinyal olmadığını yani "0" sinyalini gösterir. Böylece LED diyot foto diyot benzeri çalışmaya zorlanabilir ve daha öncede belirtildiği gibi bu işi çok daha dar bir ışık spektrumu arasında yapabilir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. LED'e paralel bağlı kondansatör ile alıcı olarak kullanımı

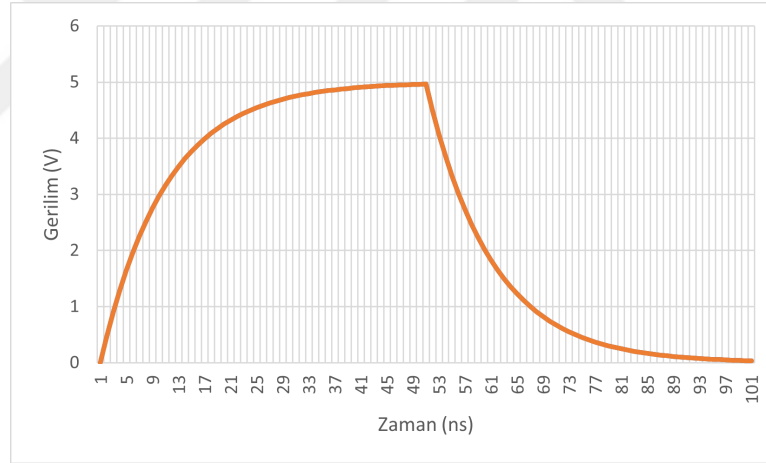
Her elektronik devre elemanı gibi LED'lerde bir iç kapasitif etkiye sahiptir ve bu etki diyotların ters polarizesinde birkaç nano saniye de olsa gözlenebilir. Yeterince hızlı şekilde LED ters polarize edilip uçları arasındaki potansiyel fark LED üzerine düşen ışığın LED'in deşarjına olan etkisi gözlenebilir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. LED'in alıcı olarak kullanımı

Bir LED, RC devresi olarak modellenebilir (Schubert vd., 1996). Modelleme birinci dereceden düşük geçişli bir filtre gibi LED'nin dijital modülasyonu için iki ayrı durum olan açık ve kapalı bilgisini içerir. Yükselme süresi olarak kabul edilen değer t_r , düşme süresi olarak kabul edilen değer t_f olarak gösterilir (Heno-Rios vd., 2020). Bu değerler üretilen LED'in içsel kapasitesi ile sınırlıdır ve üreticiler tarafından teknik dökümanlarda sağlanmaktadır.

LED-ve-LED haberleşme deney setinde kullanılan düşük güçlü Knigbright L-53SRC-J4 LED'inin teknik dökümanında iç kapasitans değeri $C_{LED}=45pf$ olarak verilmiştir. LED'in RC modeli karşılığına göre; 5 volt beslemeli bir devrede 125Ω direnç ile sürülen LED'in yükselme formülü olarak $V_s(1 - e^{-t/RC})$; düşme formülü olarak ise $V_s(e^{-t/RC})$ hesaplandığında Şekil 3.12'de sunulan süreler bulunmuştur. Hesaplamalara göre kullanılan LED'in yükselme değeri $t_r= 13,5ns$; düşme süresi $t_f= 12,5ns$ bulunmuştur.



Şekil 3.12. L-53SRC-J4 LED'inin yükselme düşme zamanı

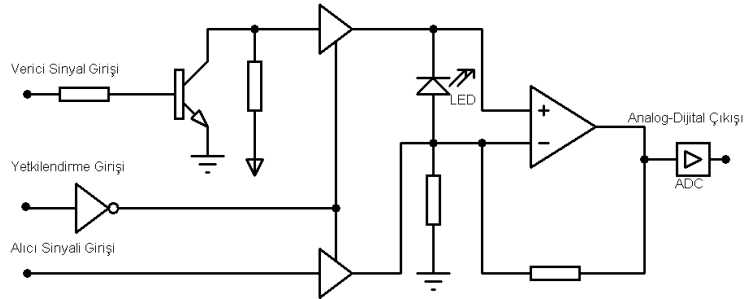
Deneyde LED verici olarak çalışırken verici ve yetki ucu aktif edilip LED doğru polarizasyon altında ışımaya sağlanır. Protokol gereği bekleme durumuna geçildiği sırada ise alıcı sinyal ucu aktif edilirken yetki ucu pasif edilip LED açık uç durumuna alınıp analog-dijital çevirici üzerinden sürekli olarak uç gerilim değerleri okunur. Daha önce açıklandığı gibi belirlenecek süre öncesi eşik değerin altına inilmesi durumu lojik "1" bilgisinin geldiği; yeterli deşarj gerçekleşmemiş ise lojik "0" bilgisinin geldiği kabul edilir. Yapı bu durumda yarı çift yönlü olarak çalışacak ve protokol performansının altında bir haberleşme sağlayacaktır. Denklem 3.1'de verinin "0"; denklem 3.2'de

verinin "1" olduğu durum sunulmaktadır. Kullanılan LED'in düşme süresine göre ölçümler her bir ölçüm veri sinyali sonrasındaki beşinci nanosaniyede ölçülmektedir. V_{eik} değeri ise 2V olarak belirlenmiştir.

$$V_{cLED}(t) > V_{esik} \rightarrow \text{sinyal} = 0 \quad (3.1)$$

$$V_{cLED}(t) < V_{esik} \rightarrow \text{sinyal} = 1 \quad (3.2)$$

Şekil 3.13'de blok tasarımı görülmektedir. Tasarım, verici görevinde 3 durumlu tampon entegresinde senkronize olmayı bekleyecek şekilde sürülen düşük güçlü LED'e sahiptir. 3 durumlu tampon sürücüsü olarak 74244 entegresi kullanılmaktadır. 200 KHz hızında çalışan veri hızında tetikleme gecikmelerini en aza indirebilmek için HCT serici yüksek hız modeli tercih edilmiştir. Entegre devrenin yetkilendirme ucu tampon kullanımı için BBB geliştirme kartından bilgi almaktadır. LED yapısı standart bağlantı olarak bir ucunun elektriksel olarak sabitlenerek tek uç ile yönetilmek yerine; anot ve katot uçları için entegrenin iki ayrı sürücü birimi kullanılmıştır. Bu şekilde LED'in alıcı olarak çalışması için uygun altyapı hazırlanmıştır.



Şekil 3.13. LED-ve-LED blok tasarımı

Haberleşmede, iletilecek verinin LED'e uygun lojik değerleri ilk olarak sürücü entegresinin anot ve katot için ayrılan girişlerine aktarılmakta; yazılım ile belirlenen karartma değeri ve protokol senkron zamanına uygun birim zamanda da yetkilendirme ucunun lojik değeri ile LED'e aktarılmaktadır. Seçilen entegrenin bir diğer özelliği ise 3. Konumda açık hat çıkışlarıdır. Bu özellik sayesinde LED, düz polarizasyon sonrası

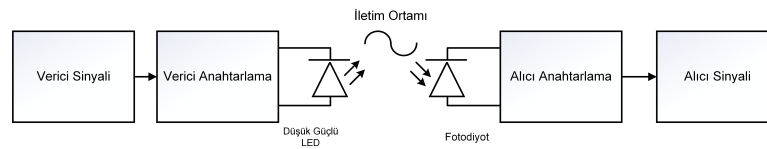
yetkisi kesilen entegrenin çıkış uçlarını açık hatta bırakması ile alıcı olarak kullanılacağı kapasitif etkisini ölçmek için uygun hale gelmektedir.

Tasarım; alıcı görevi durumunda ise LED tampon sürücü entegresi ile kapasitif olarak dolmakta, ardından açık hatta alınan uçları sayesinde üzerine düşen ışık/karanlık durumuna göre deşarj durumuna geçmektedir. Fark toplayıcı op-amp entegresi ile güçlendirilen LED üzerindeki gerilim miktarını 10 bitlik çözünürlük ile analog-dijital çevirimini gerçekleştiren MCP3008 ADC entegresi ile Seri Çevresel Arayüz (Serial Peripheral Interface – SPI) protokolü arayıcılığıyla geliştirme kartına iletilir.

ADC entegresi üzerinden sürekli olarak okunan gerilim seviyesi için bir eşik değeri belirlenmiştir. Belirlenen eşik değeri kapasitif olarak şarj olmuş LED'in ne kadar sürede deşarj olduğunu göstermektedir. Böylece LED iç yapısı gereği üzerine düşen ışık miktarına göre daha hızlı deşarj olmaktadır. Eşik değer düşüşü birim zaman olarak belirlenen süre içinde aşılmadıysa karşı tarafının bilgisi "0" olarak kabul edilmektedir. Benzer şekilde birim zaman içinde eşik değeri altına düşmüş LED üzerindeki gerilim miktarı karşı taraftaki vericinin "1" bilgisi gönderdiği anlamına gelmektedir.

3.4. Deney Düzeneği 2 – LED-ve-Optik Algılayıcı Haberleşme

İkinci deney düzeneğinde hedef, yapıya eklenecek optik algılayıcı ile tam çift yönlü çalışma ve performans arttırımıdır. İlk deneyden farklı olarak yetki sinyali gerekmeksizin verici durumda veri sinyalinin aktifliği, bekleme durumunda ise alıcı sinyalin aktifliği yeterli olacaktır. Bu deney düzeneği protokolün fiziksel katman 1 gereksinimlerini tam anlamıyla karşılamaktadır. Şekil 3.14'de deney düzeneğinin blok şeması sunulmuştur.



Şekil 3.14. LED-ve-Optik algılayıcı haberleşme tasarımı

Verici olarak NW100 LED'i ve optik algılayıcı olarak OPT101, BPW46'nın kullanıldığı setin alıcı-verici ünite resmi Şekil 3.15'de sunulmuştur.



Şekil 3.15. Alıcı-Verici ünite

Tasarım verici görevinde 3 durumlu tampon entegresinde senkronize olmayı bekleyecek şekilde sürülen düşük güçlü LED'e sahiptir. 3 durumlu tampon sürücüsü olarak 74244 entegresi kullanılmaktadır. 1 Mhz hızında çalışan veri hızında tetikleme gecikmelerini en aza indirebilmek için HCT serisi yüksek hız modeli tercih edilmiştir. Entegre devrenin yetkilendirme ucu tampon kullanımı için beaglebone geliştirme kartından bilgi almaktadır. Led yapısı standart bağlantı olarak bir ucunun elektriksel olarak sabitlenerek tek uç ile yönetilmek yerine; anot ve katot uçları için entegrenin iki ayrı sürücü birimi kullanılmıştır. Bu şekilde LED'in alıcı olarak çalışması için uygun altyapı hazırlanmıştır.

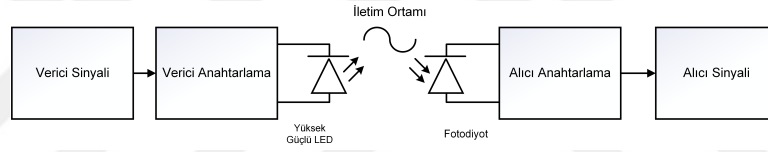
İletilecek verinin LED'e uygun lojik değerleri ilk olarak sürücü entegresinin anot ve katot için ayrılan girişlerine aktarılmakta; yazılım ile belirlenen karartma değeri ve protokol senkron zamanına uygun birim zamanda da yetkilendirme ucunun lojik değeri ile LED'e aktarılmaktadır. Seçilen entegrenin bir diğer özelliği ise 3. Konumda açık hat çıkışlarıdır. Bu özellik sayesinde led, düz polarizasyon sonrası yetkisi kesilen entegrenin çıkış uçlarını açık hatta bırakması ile alıcı olarak kullanılacak optik algılayıcı için yalıtım sağlanması amaçlanmıştır.

Alıcı görevinde kullanılan OPT101 entegresi sürekli olarak ölçümünü yapmasına karşın bilgiler sadece yazılım tarafından MCP3008 ADC entegresinin SPI protokolü arayıcılığıyla kanal seçimi üzerinden aktif edilmesiyle olmaktadır. Kanal 0 deney 2

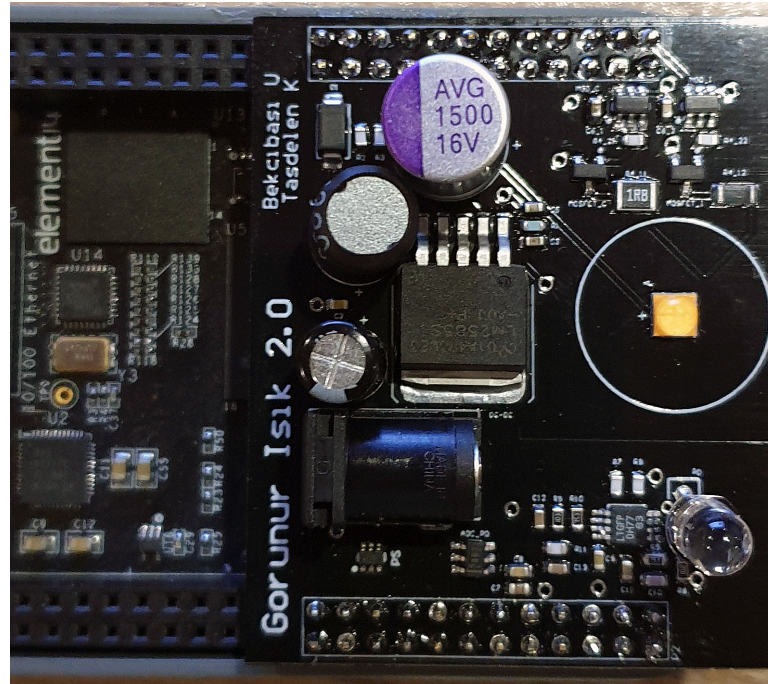
düzenegi için düşük güçlü led üzerinden gelen bilgilere ayrılmışken; kanal 1 OP101 optik algılayıcı entegresi üzerinden gelen bilgileri okumaktadır.

3.5. DeneY Düzenegi 3 – Yüksek Güçlü LED-ve-Optik Algılayıcı Haberleşme

Üçüncü deneY düzeneginde hedef, yapıya eklenecek yüksek güçlü LED ile gerek performans gerekse de haberleşme mesafesi arttırımıdır. Yüksek güçlü LED'in çalışma aralığı nedeniyle önceki deneY setinde kullanılan opamp çıkışları yetersiz kalmaktadır. Yüksek güçlü LED'in güç ihtiyacı, bu deneY setinde karta harici güç beslemesi yapılarak mosfet transistörle ile sağlanmıştır. Bu deneY düzenegi de protokolün fiziksel katman 1 ve fiziksel katman 2 gereksinimlerini altyapı tanımında tam anlamıyla karşılamaktadır. Şekil 3.16'te sistemin deneY düzenegi; Şekil 3.17'te deneY setinde verici olarak kullanılan XHP35 LED'ini ve optik alıcı olarak kullanılan QSD2030 foto diyotunu içeren elektronik devre sunulmaktadır.



Şekil 3.16. Yüksek güçlü Led-ve-Optik algılayıcı haberleşme tasarımı

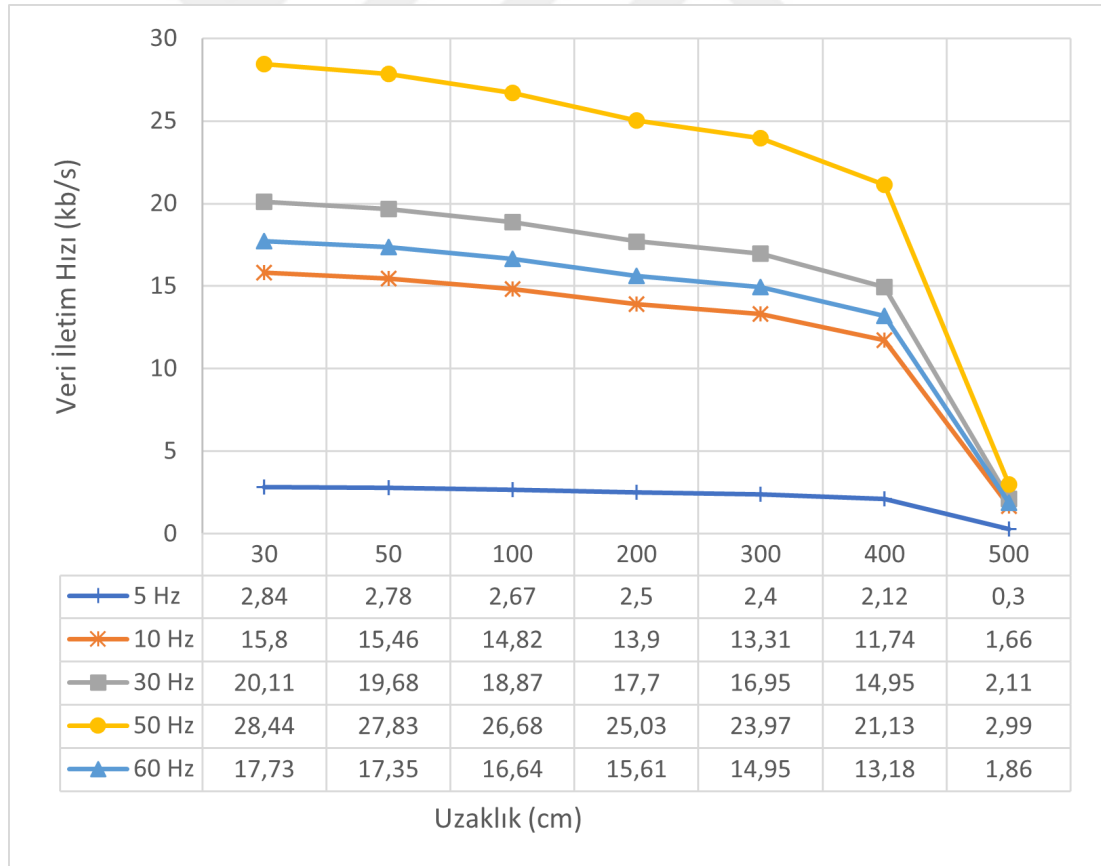


Şekil 3.17. Yüksek güçlü LED için deneY seti tasarımı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Uygulama senaryolarında kullanılan değişkenler, Çizelge 4.1’da sunulmaktadır. Performans değerlendirmesi için iletişim mesafesi, veri yükü, ortam ışığı ve LED değişkenleri seçilmiştir. Sistem tasarımı VLC tasarım amacına uygun olarak bir iç mekan uygulaması olarak düşünüldüğünden; türbülans ve dış ortam etkileri araştırılmamıştır. Ek olarak, ışık filtresi değişkeninin ultraviyole, polarize ve doğal yoğunluk olarak bulunduğu ve filtre kullanımının olmadığı hali ile iletişim performansına etkisi araştırılmıştır.

Yazılımsal fiziksel katman tasarımı nedeniyle sistem çalışma hızını doğrudan etkileyebilecek veri tekrarı hazırlama hızı değişkeni de testlere eklenmiştir. Veri hazırlama frekansının 5, 10, 30, 50 ve 60 Hz değerleri ile alıcı-verici mesafesinin 30, 50, 100, 200, 300, 400, 500 cm olduğu durumlardaki veri hızı Şekil 4.1’te paylaşılmaktadır.



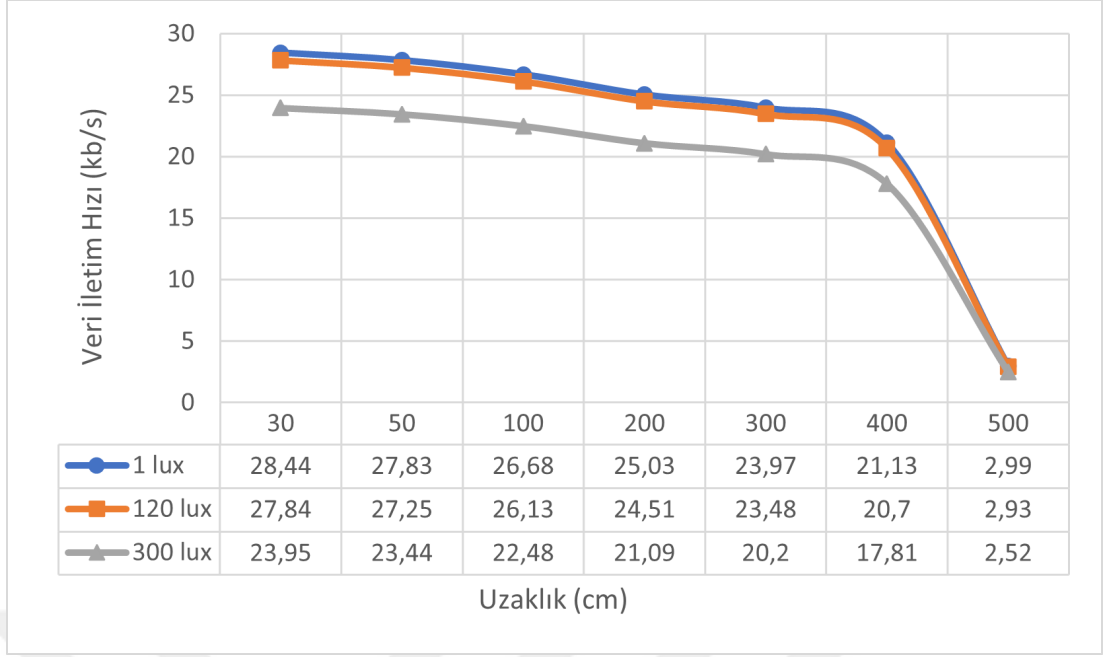
Şekil 4.1. Farklı veri tekrarı hazırlama hızı ve mesafelerinde veri transfer hızı

Veri haberleşmesi örnek olarak 1 metre mesafede 5 Hz veri hazırlama tekrar frekansında 2,67 kb/s iken; 50 Hz frekansında 26,68 kb/s değerine yükselirken; 60 Hz frekansında 16,64 kb/s değerine azalmaktadır. İletişim için veri hazırlama frekansı 5 kHz- 50 kHz aralığında arttırıldığında beklenen şekilde veri transfer hızı artmakta ve iletişim mesafesinin artması durumunda transfer hızı düşmektedir. Sebebi yapının merkezinde bulunan AM3358 işlemcisinin ARM Cortex-A8 tasarımını benimsemesi nedeniyle temel kayan nokta işlemlerinin 9 - 12 döngü alması sebebiyle işlem gücü sınırına 54-55 kHz frekansına çıkıldığında ulaşılmasıdır. İşlemci içerisinde NEON™ SIMD yardımcı işlemcisi bulunmakta ve işlemci 1 - 2 döngüde 32 bit kayan nokta işlemleri yapabilmekteyse de “double-precision binary floating-point format” desteklememesi nedeniyle iletişim hesaplamasında yardımcı işlemci kullanılmamıştır. Bu sebeple veri hazırlama tekrar frekansının 60 Hz ile test edildiği senaryolarda ortalama veri transfer hızları her ne kadar 30 kHz’den fazla olsa da 50 kHz değerlerinden aşağıda kalmaktadır. Kullanılan yongada sistem platformunun işlemci performansı nedeniyle yaşanan bu durum sonucu deneyler, veri hazırlama tekrar frekansının 50 Hz seçilmesi neticesinde sabitlenmiştir.

Çizelge 4.1. Deney seti değişkenleri

Ortam Işığı	Mesafe	Veri Yüğü	Filtre	LED
1 lux	30 cm	128 kb	Filtre Yok	Düşük Güç
120 lux	50 cm	256 kb	Ultraviöle (UV)	Yüksek Güç
300 lux	100 cm	512 kb	Polarize	
	200 cm	768 kb	Doğal Yoğunluk (ND)	
	300 cm	1024 kb		
	400 cm			
	500 cm			

Görünür ışık haberleşmesinin ortam aydınlatmasından etkilenme sonuçları Şekil 4.2’te sunulmuştur. Deneyde yazılımsal olarak veri hazırlama frekansı 50 Hz, veri yükü 1024 kb olarak; donanımsal olarak yüksek güçlü LED kullanılırken, filtrenin kullanılmadığı veriler alınmıştır. Deney değişkenleri olarak ortam ışığının 1, 120 ve 300 lux değerlerinde; alıcı-verici mesafesinin ise 30, 50, 100, 200, 300, 400, 500 cm olduğu durumlardaki veri hızı paylaşılmaktadır.

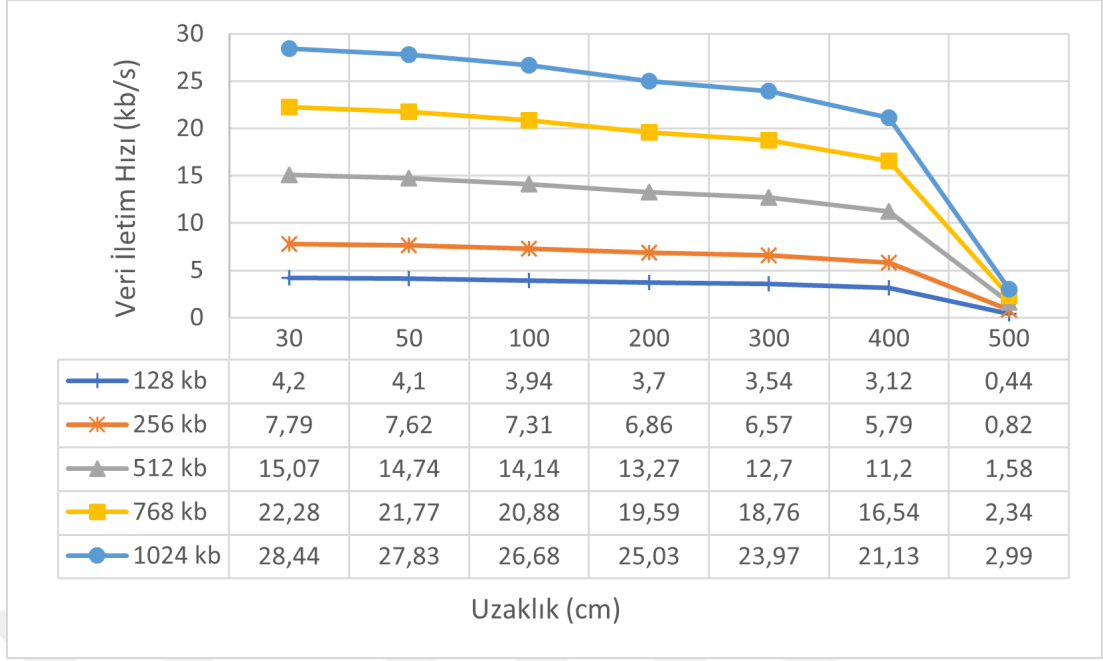


Şekil 4.2. Farklı ortam ışığı ve mesafe değişkenlerinde veri transfer hızı

Veri hızı ortam ışık girişiminin bozucu etkisi ile azalmaktadır. Veri haberleşmesi örnek olarak 1 metre mesafede 1 lux aydınlatma değerinde 26,68 kb/s iken; aydınlatma 300 lux olduğunda 22,48 kb/s'e azalmaktadır. Her ne kadar VLC yapısı ortam ışık girişiminden etkilenmeyecek tasarım sunulmuş olsa da algılayıcının göreceli spektral hassasiyeti ve algılama eşik seviyesi nedeniyle aydınlatma miktarı arttığında veri transfer hızında azda olsa bir düşüş görülmektedir. Ortam ışık seviyesinin yüksek olması, iletilen verilerin hatalı algılanmasına neden olduğu için CRC kontrolü sonucu veri doğrulama oranının düşmesi nedeniyle veri transfer hızı düşmektedir.

Veri yükünün 128, 256, 512, 768 ve 1024 kb değerleri ile alıcı-verici mesafesinin 30, 50, 100, 200, 300, 400, 500 cm olduğu durumlardaki veri hızı Şekil 4.3'te paylaşılmaktadır.

Veri haberleşmesi örnek olarak 1 metre mesafede 128 kb veri yükünde 3,94 kb/s iken; 1024 kb veri yükünde 26,68 kb/s değerine ulaşmaktadır. Beklenildiği üzere veri yükü miktarının artmasıyla veri transfer hızı artmaktadır. Veri yükü miktarının her testte iki katına çıkmasına rağmen veri transfer hızı protokolde diğer bileşenlerinde haberleşme dizisine eklenmesi nedeniyle iki katına çıkmamakta fakat tutarlı şekilde artmaktadır. Bir önceki sonuçla kıyaslanacak olursa yapının için frekansını arttırmaktansa veri yükü miktarını arttırmak veri transfer hızında belirgin farklılık yaratmaktadır.



Şekil 4.3. Farklı mesafe ve veri yükünde veri transfer hızı

Alıcı-vericiler arasına yerleştirilen filtrelerin haberleşmeye olan etkilerini görmek amaçlı filtrenin olmadığı, UV filtre, Polarize filtre, ND filtre kullanılarak alıcı-verici mesafesinin 30, 50, 100, 200, 300, 400, 500 cm olduğu durumlardaki veri hızı Şekil 4.4'te paylaşılmaktadır.

İletişim kanalında filtrenin kullanılmadığı duruma örnek olarak 1 metre mesafede 26,68 kb/s iletişim performansı sunulurken; ND filtre kullanıldığında 33,32 kb/s değerine ulaşılmıştır. Filtre testlerinde kullanılan filtrelerden dairesel polarize filtre ufuk noktası sıfır derece olarak konumlandırılmıştır. Yapısı gereği polarize filtre sadece istenen yönde yansıyan ışığın algılayıcı yüzeye ulaşmasını sağlar. Böylece cam, metal ya da su birikintisi gibi yüzeylerde görülen yansımalar kısmen veya tamamen ortadan kaldırılabilir. 300 lux aydınlık değeri ile yapılan ölçümlerde filtre kullanılan ölçümlerin filtresizlere göre daha yüksek veri transfer hızlarına ulaşma sebebi, algılayıcı yüzeye ulaşan bant genişliğindeki verinin girişimleri ve yansımaları önleyici etkisidir. Test edilen filtreler içinde en dar ve gözün algılayabildiği sınırlara yakın ışık geçirme bandına sahip olan ND filtre en yüksek veri transfer hızına ulaşmaktadır. Daha geniş bir çalışma aralığına sahip UV filtre temelde güneşten gelen ve gözle görülemeyen alanda olan UV ışıklarını engellemek dışında UV ışınının algılayıcıya çarptığında yaşanan ışık patlamalarının önüne geçmektedir. Işın tayfinin alt bandını engelleyen filtre ile veri



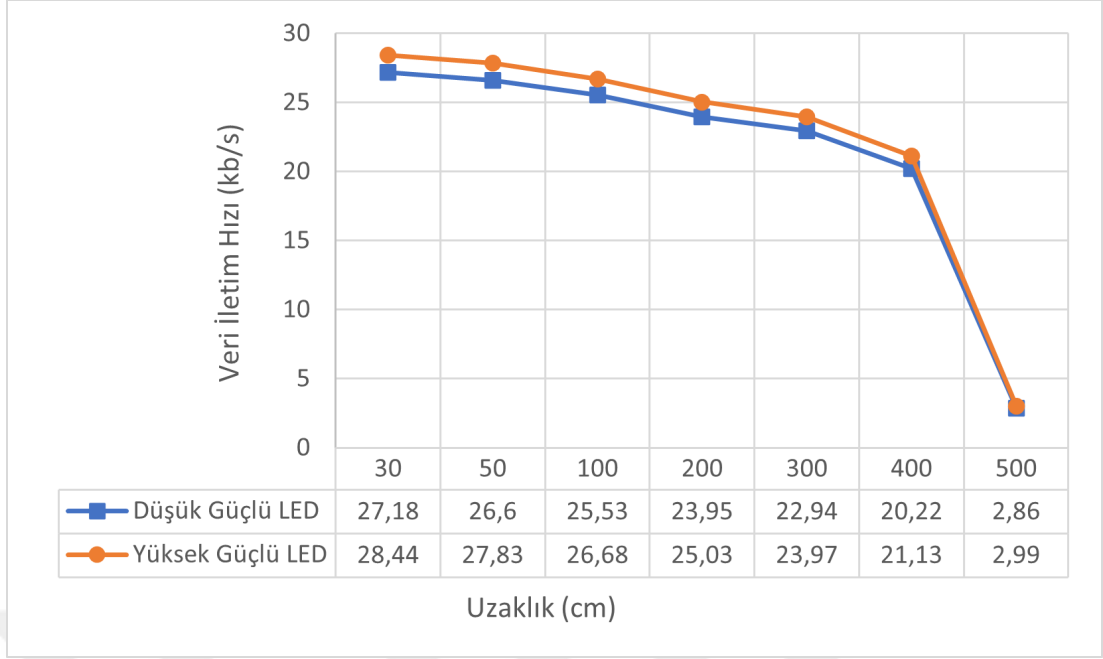
Şekil 4.4. Farklı filtreler ve mesafelerde veri transfer hızı

transfer hızı artmasına karşın tayfın göz ile görünür kısmındaki yansımaları önlememesi nedeniyle ND filtre kadar hız sağlayamamaktadır.

Verici olarak kullanılan LED'lerin farklı güçlerde seçiminin haberleşmeye olan etkilerini görmek amaçlı düşük-yüksek güçlü LED'ler ile alıcı-verici mesafesinin 30, 50, 100, 200, 300, 400, 500 cm olduğu durumlardaki veri hızı Şekil 4.5'te paylaşılmaktadır.

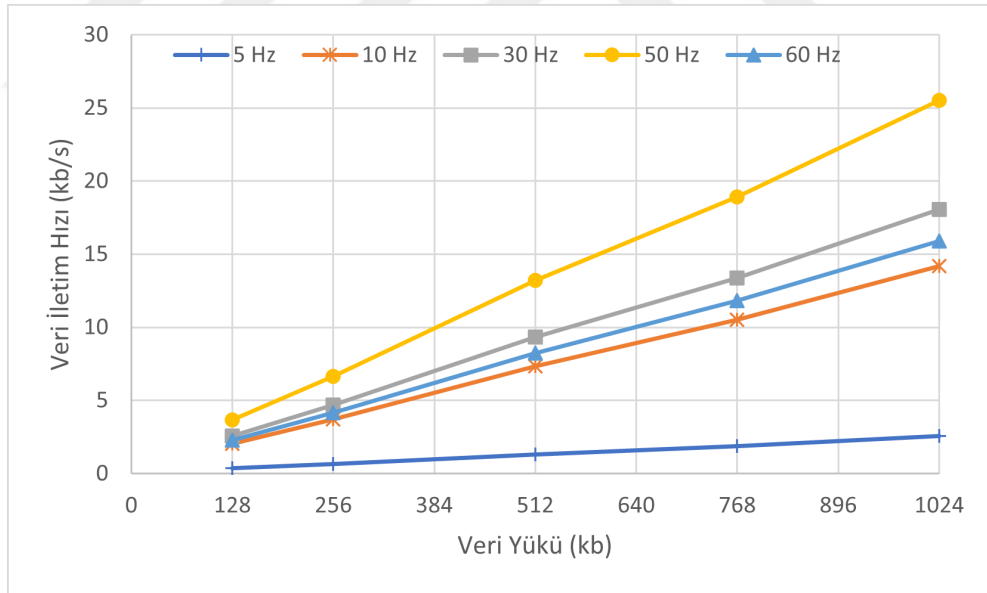
Örnek olarak 1 metre mesafede düşük güçlü LED ile yapılan haberleşmede 25,53 kb/s iletişim performansı varken; yüksek güçlü LED ile 26,68 kb/s değerine ulaşılmıştır. Beklenen şekilde yüksek güçlü LED'in kullanılması ile veri transfer hızı artmakta ve iletişim mesafesinin artması ile transfer hızı azalmaktadır. Yapı kendinden beklenildiği üzere veri yükü arttıkça veri transfer hızı artmış ve iletişim mesafesinin artması ile düşmüştür.

Veri yükü sonuçlarında tartışıldığı gibi iç veri hazırlama frekansın değiştirilmesi; veri yükü miktarı kadar olmasa da veri transfer hızına olumlu etki etmektedir. Fakat deney düzeneğinde kullanılan işlemci gücünün sınırı nedeniyle yapı 60 Hz iç frekans çalışmasında 10 ila 30 Hz veri hızı aralığında bir veri transferi gerçekleştirebilmektedir. Bu nedenle benzer bir sistem kurulumu durumunda tavsiye edilecek en yüksek iç



Şekil 4.5. Farklı LED tiplerinde veri transfer hızı

frekans hızı 50 kHz olmaktadır. Şekil 4.6’de görünür ışık haberleşme deney setinde yazılımsal değişkenlerin iletişim performansına etkisi sunulmuştur.

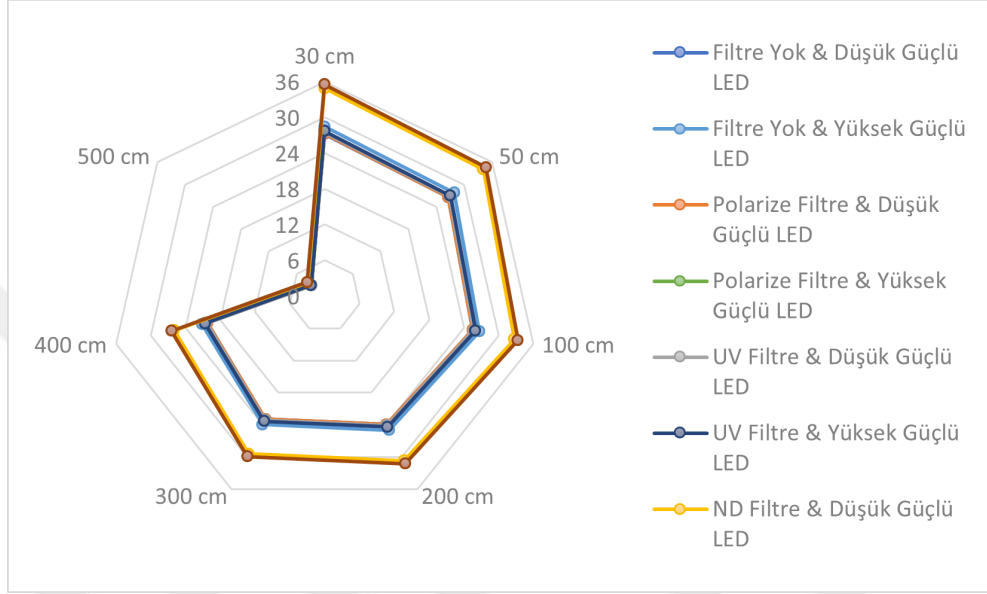


Şekil 4.6. Yazılım değişkenlerinin veri transfer hızına etkileri

İletişim sistemlerinin yalnız donanımdan oluşmadığının güzel bir örneği Şekil 4.6’de sunulmaktadır. Haberleşme sistemlerinde donanım bileşenlerinin tamamlayıcısı olan yazılım bileşenleri şekilde de görülebileceği üzere veri hazırlama ve veri yükünün yazılımsal olarak düşük tutulduğu durumlarda 5 kb/s altında bir iletişim performansı sunarken; değişkenlerin değerlerinin artırılması ile doğru orantılı olarak 25 kb/s gibi

hızlara ulaşmaktadır. Tüm haberleşme sistemlerinde benzer olan bu durum yapılan çalışmaya has, fiziksel katman tasarımının yazılım ile gerçekleştirilmesinden ötürü, daha fazla öneme sahiptir.

Şekil 4.7’de görünür ışık haberleşme deney setinde donanımsal değişkenlerin iletişim performansına etkisi sunulmuştur.



Şekil 4.7. Donanım değişkenlerinin veri transfer hızına etkileri

Yazılımsal değişkenlerin iletişim performansına etkisinin bir benzeri de donanımsal değişkenlerin seçimleri ile olmaktadır. Donanımsal değişikliklerin veri transfer hızına etkisi gözlemlendiğinde en çok etkiyi olumlu olarak doğal yoğunluk filtresi yapmaktadır. Yüksek güçlü LED’in düşük güçlü LED’e göre performansı daha iyi olmasına rağmen doğal yoğunluk filtrenin iletişim hızına etkisi LED değişiminden fazla olmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Kablosuz Optik Haberleşme Sistemlerinden Görünür Işık Haberleşme standartları için temel bir deney seti geliştirilmiştir. Görünür Işık Haberleşmesinin diğer haberleşme türlerinden farkları ortaya konmuş ve standartlarla belirlenen çalışma şartları açıklanmıştır. Haberleşmeye özgü zorlukları bulunan verici birimin alıcı olarak da kullanılabilmesi sağlanmıştır.

Yapılan çalışmada son yıllarda konu ile ilgili çalışmaların artmasına rağmen henüz standartları karşılayan bir deney setinin ve haberleşmede kullanılacak bileşen seçimi için örneklemin bulunmaması yapının motivasyonunu oluşturmuştur. Sistemin geliştirilmesi için yongada sistem geliştirme kiti üzerinde yazılımsal fiziksel katman tasarlanmıştır. Çalışma kararlılığını sağlamak için gerekli donanım bileşenleri belirlenmiş ve oluşturulan düzenekler ile yazılım, donanım ve çevresel değişikliklerinin haberleşmeye olan etkisi incelenmiştir.

Görünür Işık Haberleşmesi için haberleşmeyi etkileyecek faktörler belirtilmiştir. Bunlardan yazılımsal olarak etki gösterecek veri tekrar hazırlama hızı ve veri yükü miktarı değişkenleri seçilirken; donanımsal olarak etki gösterecek alıcı-verici ve optik filtre kullanım değişkenleri belirlenmiştir. Çevresel değişiklikler olarak da ortam ışığı ve iletişim mesafesi değişkenleri ölçümlenmiştir.

Elde edilen veriler incelendiğinde deney setinin haberleşme standartlarını başarılı bir şekilde karşıladığı gözlenirken, iletişimi etkileyen bileşenler içinde en yüksek etkiyi doğal yoğunluk filtresinin sağladığı gözlenmiştir. İletişim mesafesi ve veri yükü gibi bileşenlerin tüm haberleşme türlerinde öngörülebilir etkileri yanında optik filtre kullanımının görünür ışık haberleşmeye olan etkisinin incelenmesi literatüre bir katkı olarak değerlendirilebilir. Tasarımında ortam aydınlatmasının bozucu girişimlerinden etkilenmeyecek şekilde tasarlanan protokol yapısının pratikte kullanılan elektronik bileşenlerin mükemmel özellik gösterememesi ve çalışma toleransları gibi nedenlerle ışık girişimlerinden olumsuz etkilendiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple geliştirilecek deney setleri için haberleşmenin sağlanacağı ortamdaki aydınlatmaların bozucu girişimlerinin göz ardı edilmemesi önerilmektedir.

Elde edilen sonuçlar ışığında Görünür Işık Haberleşmesi için tasarlanacak yapılarda karşılaşılan zorlukların başında gelen bileşen seçimlerine önemli bir örneklem oluşturulmuş; haberleşmeyi etkileyen faktörler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tasarlanacak haberleşme sistemleri için aynı veya benzer bileşen tercihleri yapının çalışmasını garanti ederken; mevcut haberleşme sistemlerinin içinde özellikle filtre kullanılması durumunda performans gelişimi sağlanması öngörülmektedir.

Yapılan çalışma ile tasarlanacak haberleşme sistemlerinin çalışma kararlılığı, sistem performansı ve daha iyi iletişim sonuçları için sistem tasarımı ve bileşenler tercihlerinde; hazırlanmış haberleşme sistemlerde ise performans geliştirilmesi için önemli bir başvuru kaynağı olacağı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Acharya, Y.B., 2005. Spectral and emission characteristics of LED and its application to LED-based sun-photometry. *Opt. Laser Technol.*, 37(7), 547–550.
- Baranda, J., Henarejos, P., Gavrinca, C.G., 2013. An SDR implementation of a visible light communication system based on the IEEE 802.15.7 standard. *ICT 2013. IEEE, Dc*, (pp. 1–5).
- Baylis, C., Fellows, M., Cohen, L., Marks II, R.J., 2014. Solving the Spectrum Crisis: Intelligent, Reconfigurable Microwave Transmitter Amplifiers for Cognitive Radar. *IEEE Microw. Mag.*, 15(5), 94–107.
- Beczowski, S., Munk-Nielsen, S., 2010. Led spectral and power characteristics under hybrid PWM/AM dimming strategy. *2010 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. IEEE*, (pp. 731–735).
- Bell, A.G., 1880. The Photophone. *Science (80-.)*, 1(11), 130–134.
- BELL, A.G., 1880. The Photophone. *Am. Assoc. Adv. Sci.*, 1(11), 130–134.
- Bell, A.G., 1880. Upon the production and reproduction of sound by light. *J. Soc. Electr. Eng.*, 9(34), 404–426.
- Binti Che Wook, H., Komine, T., Haruyama, S., Nakagawa, M., 2006. Visible light communication with LED-based traffic lights using 2-dimensional image sensor. *2006 3rd IEEE Consum. Commun. Netw. Conf. CCNC 2006*, 1, 243–247.
- Bo Bai, Zhengyuan Xu, Yangyu Fan, 2010. Joint LED dimming and high capacity visible light communication by overlapping PPM. *19th Annu. Wirel. Opt. Commun. Conf. (WOCC 2010). IEEE*, (pp. 1–5).
- Boroson, D.M., Robinson, B.S., Burianek, D.A., Murphy, D.V., Biswas, A., 2012. Overview and status of the Lunar Laser Communications Demonstration. *January*, (s. 82460C).
- Butala, P.M., Chau, J.C., Little, T.D.C., 2012. Metameric modulation for diffuse visible light communications with constant ambient lighting. *2012 Int. Work. Opt. Wirel. Commun. IEEE*, 1, (pp. 1–3).
- Chen, Z., Haas, H., 2015. Space division multiple access in visible light communications. *2015 IEEE Int. Conf. Commun. IEEE, Volume 2015-Sept*, (pp. 5115–5119).
- Classen, J., Steinmetzer, D., Hollick, M., 2016. Opportunities and pitfalls in securing visible light communication on the physical layer. *Proc. 3rd Work. Visible Light Commun. Syst. - VLCS '16. ACM Press, New York, New York, USA*, (pp. 19–24).
- Cossu, G., Khalid, A.M., Choudhury, P., Corsini, R., Ciaramella, E., 2012. 34 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED. *Opt. Express*, 20(26),

B501.

- Cui, K., Chen, G., He, Q., Xu, Z., 2009. Indoor optical wireless communication by ultraviolet and visible light. *Free. Laser Commun.* IX, 7464, 74640D.
- Cui, K., Chen, G., Xu, Z., Roberts, R.D., 2010. Line-of-sight visible light communication system design and demonstration. 2010 7th Int. Symp. Commun. Syst. Networks Digit. Signal Process. (CSNDSP 2010). IEEE, (pp. 621–625).
- Dietz, P., Yerazunis, W., Leigh, D., 2003a. Very low-cost sensing and communication using bidirectional LEDs. *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, 2864, 175–191.
- Dietz, P., Yerazunis, W., Leigh, D., 2003b. Very Low-Cost Sensing and Communication Using Bidirectional LEDs. *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, Volume 2864. (pp. 175–191).
- Dilhac, J.M., 2001. The Telegraph of Claude Chappe - An Optical Telecommunication Network for the XVIIIth Century. *Inst. Natl. des Sci. Appliquées Toulouse*.
- Elgala, H., Mesleh, R., Haas, H., 2011. Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art. *IEEE Commun. Mag.*, 49(9), 56–62.
- Elgala, H., Mesleh, R., Haas, H., Pricope, B., 2007. OFDM visible light wireless communication based on white LEDs. *IEEE Veh. Technol. Conf.*, 2185–2189.
- Farrell, J.E., 1986. An analytical method for predicting perceived flicker. *Behav. Inf. Technol.*, 5(4), 349–358.
- Gfeller, F., Bapst, U., 1979. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation. *Proc. IEEE*, 67(11), 1474–1486.
- Giustiniano, D., Tippenhauer, N.O., Mangold, S., 2012. Low-complexity Visible Light Networking with LED-to-LED communication. *IFIP Wirel. Days*.
- Goodwin, F., 1970. A review of operational laser communication systems. *Proc. IEEE*, 58(10), 1746–1752.
- Grobe, L., Paraskevopoulos, A., Hilt, J., Schulz, D., Lassak, F., Hartlieb, F., Kottke, C., Jungnickel, V., Langer, K.D., 2013. High-speed visible light communication systems. *IEEE Commun. Mag.*, 51(12), 60–66.
- Grubor, J., Randel, S., Langer, K.D., Walewski, J.W., 2008. Broadband Information Broadcasting Using LED-Based Interior Lighting. *J. Light. Technol.*, 26(24), 3883–3892.
- Gujjari, D., 2012. Visible Light Communication. Ph.D. thesis, Dalhousie University, Cambridge.

- Haas, H., 2013. High-speed wireless networking using visible light. SPIE Newsroom, 2–4.
- Haas, H., 2015. Visible Light Communication. OSA, 1–72 pp.
- Halpin, S., Bergeron, R., Blooming, T., Burch, R., Conrad, L., Key, T., 2003. Voltage and lamp flicker issues: should the IEEE adopt the IEC approach? IEEE Trans. Power Deliv., 18(3), 1088–1097.
- Hanzo, L., Haas, H., Imre, S., O’Brien, D., Rupp, M., Gyongyosi, L., 2012. Wireless Myths, Realities, and Futures: From 3G/4G to Optical and Quantum Wireless. Proc. IEEE, 100(Special Centennial Issue), 1853–1888.
- Haruyama, S., 2007. Japan’s Visible Light Communications Consortium and Its Standardization Activities.
- Haruyama, S., 2013. VISIBLE LIGHT COMMUNICATION USING SUSTAINABLE LED LIGHTS Shinichiro Haruyama Graduate School of System Design and Management , Keio University , Japan. 2013 Proc. ITU Kaleidosc. Build. Sustain. Communities. IEEE, (s. 6).
- Haus, M., Ding, A.Y., Ott, J., 2019. LocalVLC: Augmenting Smart IoT Services with Practical Visible Light Communication. 2019 IEEE 20th Int. Symp. "A World Wireless, Mob. Multimed. Networks". IEEE, (pp. 1–9).
- Henao-Rios, J.L., Marquez-Viloria, D., Guerrero-Gonzalez, N., 2020. Real Time Implementation of a Hybrid Differential Manchester-PWM Encoding for Constant Data Rate under Variable Brightness in VLC Systems. 2020 IEEE Colomb. Conf. Commun. Comput. IEEE, (pp. 1–5).
- Holzmann, G.J., 1991. Design and Validation of Computer Protocols. 317 pp.
- Hong, H., Ren, Y., Wang, C., 2008. Information Illuminating System for Healthcare Institution. 2008 2nd Int. Conf. Bioinforma. Biomed. Eng. IEEE, (pp. 801–804).
- Hu, P., Pathak, P.H., Das, A.K., Yang, Z., Mohapatra, P., 2016. PLiFi. Proc. 3rd Work. Visible Light Commun. Syst. - VLCS ’16. ACM Press, New York, New York, USA, (pp. 31–36).
- Hyunchae Chun, Rajbhandari, S., Faulkner, G., Tsonev, D., Haas, H., O’Brien, D., 2014a. Demonstration of a Bi-directional visible light communication with an overall sum-rate of 110 Mb/s using LEDs as emitter and detector. 2014 IEEE Photonics Conf. IEEE, Volume 3, (pp. 132–133).
- Hyunchae Chun, Rajbhandari, S., Faulkner, G., Tsonev, D., Haas, H., O’Brien, D., 2014b. Demonstration of a Bi-directional visible light communication with an overall sum-rate of 110 Mb/s using LEDs as emitter and detector. 2014 IEEE Photonics Conf. IEEE, Volume 3, (pp. 132–133).

- IEEE, 2011. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks–Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light. IEEE Std 802.15.7-2011, 309.
- Janos Schanda, 2007. Colorimetry: Understanding the CIE System. 499 pp.
- Jovicic, A., Li, J., Richardson, T., 2013a. Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market. IEEE Commun. Mag., 51(12), 26–32.
- Jovicic, A., Li, J., Richardson, T., 2013b. Visible light communication: Opportunities, challenges and the path to market. IEEE Commun. Mag., 51(12), 26–32.
- Kao, K., Hockham, G., 1966. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. Proc. Inst. Electr. Eng., 113(7), 1151–1158.
- Karunatilaka, D., Zafar, F., Kalavally, V., Parthiban, R., 2015. LED Based Indoor Visible Light Communications: State of the Art. IEEE Commun. Surv. Tutorials, 17(3), 1649–1678.
- Khalid, A.M., Cossu, G., Corsini, R., Choudhury, P., Ciaramella, E., 2012. 1-Gb/s Transmission Over a Phosphorescent White LED by Using Rate-Adaptive Discrete Multitone Modulation. IEEE Photonics J., 4(5), 1465–1473.
- Khan, L.U., 2017. Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges. Digit. Commun. Networks, 3(2), 78–88.
- Komine, T., Nakagawa, M., 2004. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights. IEEE Trans. Consum. Electron., 50(1), 100–107.
- Kumar, N., 2013. Visible Light Communication: Concept, Technology, Challenges and Possibilities.
- Kuo, Y.s., Pannuto, P., Hsiao, K.j., Dutta, P., 2014. Luxapose : Indoor Positioning with Mobile Phones and Visible Light Categories and Subject Descriptors. Mobicom'14, 299–301.
- Lab, N., 2007. Visible Light ID.
- Langer, K.D., Grubor, J., 2007. Recent developments in optical wireless communications using infrared and visible light. Proc. 2007 9th Int. Conf. Transparent Opt. Networks, Ict. 2007, 3, 146–151.
- Li, J., Liu, A., Shen, G., Li, L., Sun, C., Zhao, F., 2015a. Retro-VLC. Proc. 16th Int. Work. Mob. Comput. Syst. Appl. - HotMobile '15. ACM Press, New York, New York, USA, (pp. 21–26).
- Li, L., Hu, P., Peng, C., Shen, G., Zhao, F., 2014a. Epsilon: A Visible Light Based Positioning System. USENIX Symp. Netw. Syst. Des. Implement. 1, (pp. 1–13).

- Li, T., An, C., Tian, Z., Campbell, A.T., Zhou, X., 2015b. Human sensing using visible light communication. Proc. Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Networking, MOBICOM, 2015-Septe, 331–344.
- Li, Z., Chen, W., Li, C., Li, M., Li, X.Y., Liu, Y., 2014b. FLIGHT: Clock Calibration and Context Recognition Using Fluorescent Lighting. IEEE Trans. Mob. Comput., 13(7), 1495–1508.
- Lian, J., Vatansever, Z., Noshad, M., Brandt-Pearce, M., 2019. Indoor visible light communications, networking, and applications. J. Phys. Photonics, 1(1), 012001.
- Liu, C.B., Sadeghi, B., Knightly, E.W., 2011. Enabling vehicular visible light communication (V2LC) networks. Proc. Eighth ACM Int. Work. Veh. inter-networking - VANET '11. ACM Press, New York, New York, USA, (s. 41).
- Liu, J., Chan, P.W.C., Ng, D.W.K., Lo, E.S., Shimamoto, S., 2012. Hybrid visible light communications in Intelligent Transportation Systems with position based services. 2012 IEEE Globecom Work. GC Wkshps 2012, 1254–1259.
- Liu, X., Umino, E., Makino, H., 2009. Basic study on robot control in an intelligent indoor environment using visible light communication. WISP 2009 - 6th IEEE Int. Symp. Intell. Signal Process. - Proc., 323–325.
- Lou, P., Zhang, H., Zhang, X., Yao, M., Xu, Z., 2012. Fundamental analysis for indoor visible light positioning system. 2012 1st IEEE Int. Conf. Commun. China Work. ICC 2012, 59–63.
- Luzhanskiy, E., Edwards, B., Israel, D., Cornwell, D., Staren, J., Cummings, N., Roberts, T., Patschke, R., 2016. Overview and status of the laser communication relay demonstration. H. Hemmati, D.M. Boroson (Eds.), Free. Laser Commun. Atmos. Propag. XXVIII. Volume 9739, (s. 97390C).
- M. V. Bhalerao, Sonavane, S.S., Kumar, V., 2013. A SURVEY OF WIRELESS COMMUNICATION USING VISIBLE LIGHT. Int. J. Adv. Eng. Technol., 5(2), 188–197.
- Marsh, G., Kahn, J., 1996. Performance evaluation of experimental 50-Mb/s diffuse infrared wireless link using on-off keying with decision-feedback equalization. IEEE Trans. Commun., 44(11), 1496–1504.
- Matheus, L., Pires, L., Vieira, A., Vieira, L.F.M., Vieira, M.A.M., Nacif, J.A., 2019. The internet of light: Impact of colors in LED-to-LED visible light communication systems. Internet Technol. Lett., 2(1), e78.
- Millett, C.J., Fish, D.R., Thompson, P.J., 1997. A survey of epilepsy-patient perceptions of video-game material/electronic screens and other factors as seizure precipitants. Seizure, 6(6), 457–459.
- Miramirkhani, F., Uysal, M., 2017. Visible Light Communication Channel Modeling for Underwater Environments with Blocking and Shadowing. IEEE Access, 6,

1082–1090.

- Moreira, A.J., Valadas, R.T., De Oliveira Duarte, A.M., 1997. Optical interference produced by artificial light. *Wirel. Networks*, 3(2), 131–140.
- Noshad, M., Brandt-Pearce, M., 2013. Can Visible Light Communications Provide Gb/s Service? *Comput. Sci.*, 1–7.
- Oh, M., 2013. A flicker mitigation modulation scheme for visible light communications. *Int. Conf. Appl. Inf. Commun. Technol.*, 933–936.
- Pathak, P.H., Feng, X., Hu, P., Mohapatra, P., 2015. Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges. *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 17(4), 2047–2077.
- Pohlmann, C., 2010. Visible Light Communication. *Semin. Kommun. der Medizintechnik*. ACM Press, New York, New York, USA, (pp. 1–14).
- Popoola, W.O., 2009. Subcarrier Intensity Modulated Free-Space Optical Communication Systems. Ph.D. thesis, University of Northumbria at Newcastle.
- PureLiFi, 2020. PureLiFi.
- Qiao, Y., Haas, H., 2014. A Software-defined Visible Light Communications System with WARP. 1st ACM Work. *Visible Light Commun. Syst.*, 2–3.
- Rahaim, M.B., Vegni, A.M., Little, T.D.C., 2011. A hybrid Radio Frequency and broadcast Visible Light Communication system. 2011 IEEE GLOBECOM Work. (GC Wkshps). IEEE, (pp. 792–796).
- Rajagopal, S., Roberts, R.D., Lim, S.K., 2012. IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support. *IEEE Commun. Mag.*, 50(3), 72–82.
- Rajbhandari, S., Chun, H., Faulkner, G., Cameron, K., Jalajakumari, A.V., Henderson, R., Tsonev, D., Ijaz, M., Chen, Z., Haas, H., Xie, E., McKendry, J.J., Herrnsdorf, J., Gu, E., Dawson, M.D., O'Brien, D., 2015. High-Speed Integrated Visible Light Communication System: Device Constraints and Design Considerations. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 33(9), 1750–1757.
- Rediker, R., 1987. Research at Lincoln laboratory leading up to the development of the injection laser in 1962. *IEEE J. Quantum Electron.*, 23(6), 692–695.
- Salih, M.H., Bin Baharudin, M.F., Ismail, S.N., 2019. Design and implementation of FPGA-based visible light communication. *ARNP J. Eng. Appl. Sci.*, 14(2), 455–469.
- Schmid, S., Arquint, L., Gross, T.R., 2016a. Using smartphones as continuous receivers in a visible light communication system. Proc. 3rd Work. *Visible Light Commun. Syst. - VLCS '16*. ACM Press, New York, New York, USA, Volume 03-07-Octo,

(pp. 61–66).

- Schmid, S., Bourchas, T., Mangold, S., Gross, T.R., 2015. Linux Light Bulbs. Proc. 2nd Int. Work. Visible Light Commun. Syst. ACM, New York, NY, USA, (pp. 3–8).
- Schmid, S., Corbellini, G., Mangold, S., Gross, T.R., 2013. LED-to-LED visible light communication networks. Proc. fourteenth ACM Int. Symp. Mob. ad hoc Netw. Comput. - MobiHoc '13. ACM Press, New York, New York, USA, (s. 1).
- Schmid, S., Richner, T., Mangold, S., Gross, T.R., 2016b. EnLighting: An Indoor Visible Light Communication System Based on Networked Light Bulbs. 2016 13th Annu. IEEE Int. Conf. Sensing, Commun. Netw. IEEE, (pp. 1–9).
- Schmid, S., Ziegler, J., Corbellini, G., Gross, T.R., Mangold, S., 2014. Using consumer LED light bulbs for low-cost visible light communication systems. Proc. 1st ACM MobiCom Work. Visible Light Commun. Syst. ACM, New York, NY, USA, (pp. 9–14).
- Schubert, E., Hunt, N., Malik, R., Micovic, M., Miller, D., 1996. Temperature and modulation characteristics of resonant-cavity light-emitting diodes. J. Light. Technol., 14(7), 1721–1729.
- Signify, 2016. Interact.
- Song, J., Ding, W., Yang, F., Yang, H., Yu, B., Zhang, H., 2015. An Indoor Broadband Broadcasting System Based on PLC and VLC. IEEE Trans. Broadcast., 61(2), 299–308.
- Tanenbaum, A.S., 2011. Computer Networks.
- Tippenhauer, N.O., Giustiniano, D., Mangold, S., 2012. Toys communicating with LEDs: Enabling toy cars interaction. 2012 IEEE Consum. Commun. Netw. Conf. IEEE, (pp. 48–49).
- Tsai, C.I., Xu, Z.f., 2013. Line-of-Sight Visible Light Communications With InGaN-Based Resonant Cavity LEDs. IEEE Photonics Technol. Lett., 25(18), 1793–1796.
- Tsonev, D., Videv, S., Haas, H., 2013. Light Fidelity (Li-Fi): Towards All-Optical Networking. Proc. SPIE OPTO. (s. 10).
- Tsonev, D., Videv, S., Haas, H., 2015. Towards a 100 Gb/s visible light wireless access network. Opt. Express, 23(2), 1627.
- Wang, J.Y., Wang, J.B., Chen, M., Song, X., 2013a. Dimming scheme analysis for pulse amplitude modulated visible light communications. 2013 Int. Conf. Wirel. Commun. Signal Process. WCSP 2013.

- Wang, Q., Giustiniano, D., 2014. Communication Networks of Visible Light Emitting Diodes with Intra-Frame Bidirectional Transmission. Proc. 10th ACM Int. Conf. Emerg. Netw. Exp. Technol. ACM, New York, NY, USA, (pp. 21–28).
- Wang, Q., Giustiniano, D., 2016. Intra-Frame Bidirectional Transmission in Networks of Visible LEDs. IEEE/ACM Trans. Netw., 24(6), 3607–3619.
- Wang, Q., Giustiniano, D., Gnawali, O., 2015a. Low-Cost, Flexible and Open Platform for Visible Light Communication Networks. Proc. 2nd Int. Work. Hot Top. Wirel. ACM, New York, NY, USA, (pp. 31–35).
- Wang, Q., Giustiniano, D., Gnawali, O., 2015b. Low-cost, flexible and open platform for Visible Light Communication Networks. HotWireless 2015 - Proc. 2nd Int. Work. Hot Top. Wireless, co-located with MobiCom 2015, 31–35.
- Wang, Q., Giustiniano, D., Puccinelli, D., 2014. OpenVLC. Proc. 1st ACM MobiCom Work. Visible Light Commun. Syst. ACM, New York, NY, USA, (pp. 15–20).
- Wang, Q., Giustiniano, D., Puccinelli, D., 2015c. An open source research platform for embedded visible light networking. IEEE Wirel. Commun., 22(2), 94–100.
- Wang, Y., Chi, N., 2014. Demonstration of High-Speed 2×2 Non-Imaging MIMO Nyquist Single Carrier Visible Light Communication With Frequency Domain Equalization. J. Light. Technol., 32(11), 2087–2093.
- Wang, Y., Shao, Y., Shang, H., Lu, X., Wang, Y., Yu, J., Chi, N., 2013b. 875-Mb/s Asynchronous Bi-directional 64QAM-OFDM SCM-WDM Transmission over RGB-LED-based Visible Light Communication System. Opt. Fiber Commun. Conf. Fiber Opt. Eng. Conf. 2013. OSA, Washington, D.C., (s. OTh1G.3).
- Wang, Y., Wang, Y., Chi, N., Yu, J., Shang, H., 2013c. Demonstration of 575-Mb/s downlink and 225-Mb/s uplink bi-directional SCM-WDM visible light communication using RGB LED and phosphor-based LED. Opt. Express, 21(1), 1203.
- Wang, Z., Zhong, W.D., Yu, C., Chen, J., Francois, C.P.S., Chen, W., 2012. Performance of dimming control scheme in visible light communication system. Opt. Express, 20(17), 18861.
- Wilkins, A., Veitch, J., Lehman, B., 2010. LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update. 2010 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. IEEE, (pp. 171–178).
- Wu, H., Xiong, J., Wang, Q., Zuniga, M., 2017. SmartVLC: When Smart Lighting meets VLC. Conex. 2017 - Proc. 2017 13th Int. Conf. Emerg. Netw. Exp. Technol., 212–223.
- Young, A.T., 1981. Rayleigh scattering. Appl. Opt., 20(4), 533.

- Zhang, C., Tabor, J., Zhang, J., Zhang, X., 2015a. Extending mobile interaction through near-field visible light sensing. Proc. Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Networking, MOBICOM, 2015-Septe, 345–357.
- Zhang, C., Zhang, X., 2016. LiTell: Robust indoor localization using unmodified light fixtures. Proc. Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Networking, MOBICOM, 0(1), 230–242.
- Zhang, J., Zhang, X., Wu, G., 2015b. Dancing with light: Predictive in-frame rate selection for visible light networks. 2015 IEEE Conf. Comput. Commun. IEEE, Volume 26, (pp. 2434–2442).

