



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÖLE DESTEKLİ KABLOSUZ OPTİK
HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN
UYARLANABİLİR MODÜLASYON

FETHULLAH SİPAHİOĞLU

DANIŞMAN


Prof. Dr. B. Sıddık Binboğa YARMAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

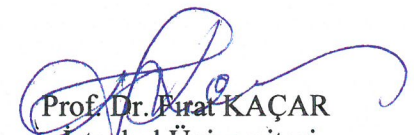
İSTANBUL-2018


Bu çalışma, 6.07.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

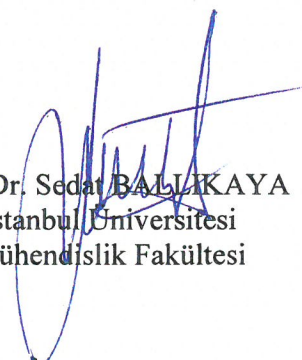
Tez Jürisi


Prof. Dr. B. Sıddık Binboğa YARMAN (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Osman Nuri UÇAN
İstanbul Altınbaş Üniversitesi
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi


Prof. Dr. Fırat KAÇAR
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Doç. Dr. Yasın ÖZÇELEP
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Doç. Dr. Sedat BALLIKAYA
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanma aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle tarafımı bilimsel ve akademik yönden eleştiri ve yönlendirmelerinden dolayı değerli hocam Prof. Dr. B. Sıddık Binboğa YARMAN'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Ayrıca çalışma süresi boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Dr. Volkan ÖZDURAN'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Çalışma süresi boyunca tarafıma destek olan ve yardımlarını esirgemeyen aileme, hocalarıma teşekkür ederim.

Temmuz 2018

Fethullah SİPAHİOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMİ NEDİR?	1
1.2. TARİHÇE	1
1.3. TEZİN AMAÇ VE KAPSAMI.....	2
2. GENEL KISIMLAR.....	4
2.1. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ	4
2.2. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN ÖZELLİKLERİ	5
2.2.1. Uygulama Alanları	6
2.3. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME BLOK DİYAGRAMI.....	7
2.3.1. Verici Yapısı.....	7
2.3.2. Atmosferik Ortam.....	8
2.3.3. Alıcı Yapısı.....	9
2.4. ATMOSFERİK TÜRBÜLANS MODELLERİ	12
2.4.1. Güç Kaybı.....	14
2.4.2. Atmosferik Türbülans Kanalı	15
2.4.3. Atmosferik Türbülanslı Kanal ve Log-normal Türbülans Modeli	16
2.5. MODÜLASYON TÜRLERİ	18
2.5.1. Gauss Atmosferik Kanal İçeren Aç-Kapa Anahtarlama	20
2.5.2. Darbe Konum Modülasyonu (DKM)	22
2.5.3. Göz Güvenliği ve Standartları	23

3. MALZEME VE YÖNTEM.....	26
3.1. GİRİŞ	26
3.2. RÖLE DESTEKSİZ UYARLANABİLİR MODÜLASYON.....	27
3.2.1. Kanal Yapısı	27
3.3. RÖLE DESTEKLİ UYARLANABİLİR MODÜLASYONLU SİSTEM MODELİ	29
3.3.1. Çöz-ve-aktar (ÇA) Röle	30
3.3.2. Röle Destekli Uyarlanabilir Modülasyon Tekniği	31
4. BULGULAR.....	36
4.1. GİRİŞ	36
4.2. RÖLE DESTEKSİZ KOH SİSTEMLERİ İÇİN UYARLANABİLİR MODÜLASYON BAŞARIM SONUÇLARI	36
4.3. RÖLE DESTEKLİ KOH SİSTEMLERİ İÇİN UYARLANABİLİR MODÜLASYON BAŞARIM SONUÇLARI	38
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	42
KAYNAKLAR.....	43
EKLER	46
EK 1. Uyarlanabilir olmayan sistemler için SDK olasılığı hesabı	46
ÖZGEÇMİŞ	49

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Kablosuz optik haberleşme sisteminin blok diyagramı.....	5
Şekil 2.2: Kablosuz optik haberleşme blok şeması.....	7
Şekil 2.3: Verici blok şeması.....	8
Şekil 2.4: Alıcı blok şeması.....	11
Şekil 2.5: Direk sezim yapan alıcının blok diyagramı.....	12
Şekil 2.7: Optik ışının giderek genişlemesi.....	14
Şekil 2.6: Eş-evreli sezim yapan alıcının blok diyagramı.....	12
Şekil 2.8: Atmosferik türbülans girdabı.....	15
Şekil 2.9: Farklı σ_l^2 değerlerinin log-normal olasılık yoğunluk fonksiyonunun normalize parlaklığa göre değişim	18
Şekil 2.10: Modülasyon türleri ağacı.....	19
Şekil 2.11: Aç-Kapa Modülasyonlu (AKM) / Sıfıra Dönen (SD) Sinyallerin Görev Süreleri	20
Şekil 2.12: AKM'nin taban fonksiyonu ve yıldız diyagramı	21
Şekil 2.13: Taban fonksiyonları ile 4-DKM gösterimi.....	22
Şekil 2.14: Farklı dalga boylarında gözün emme tepkisi.....	24
Şekil 3.1: Röle desteksiz uyarlanabilir modülasyon blok şeması.....	30
Şekil 3.2: Sıralı röle destekli uyarlanabilir modülasyonlu sistem blok şeması.....	30
Şekil 3.3: Röle destekli uyarlanabilir modülasyon sistemi algoritma akış diyagramı...	35
Şekil 4.1: Röle desteksiz uyumlu modülasyon başarımları grafiği.....	37

Şekil 4.2: Röle destekli uyumlu olmayan sistemin başarımları grafiği.....	38
Şekil 4.3: Röle destekli uyumlu modülasyon başarımları grafiği.....	39
Şekil 4.4: Röle destekli uyumlu olmayan sistemin başarımları grafiği.....	40
Şekil 4.5: Röle destekli ve destekli aynı zamanda uyarlanabilir ve uyarlanabilir olmayan sistemin başarımları grafiği.....	41



TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Çok kullanılan fotodedektörler.....10

Tablo 2.2: Atmosfer bileşenleri13

Tablo 2.3: Dalga boyu 850 nm boyutunda lazerlerin IEC 60825-1 standartlarına göre sınıflandırılması.....25

Tablo 2.4: Dalga boyu 1550 nm boyutunda lazerlerin IEC 60825-1 standartlarına göre sınıflandırılması.....25

SİMGE VE KISALTIMA LİSTESİ

Simgeler

Açıklama

$\Upsilon_{\text{uyumlu olmayan}}$: Uyarlanabilir olmayan sinyal-gürültü oranı
$\Upsilon_{\text{adaptive}}$: Uyarlanabilir sinyal-gürültü oranı
σ_n	: Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü standart sapması
σ_t^2	: Log parıldama varyansı
τ_0	: Geçici eş-evreli zaman
$\varphi_m(t)$: DKM taban fonksiyonu
σ	: Zayıflama katsayısı
c	: Işık hızı
h	: Plank sabiti
η	: Fotodedektör verimliliği
λ	: Dalga boyu
ρ	: Dedektörün tepkeme süresi

Kısaltmalar

Açıklama

A_R	: Alıcı alanının açıklığı
A_T	: Verici alanının açıklığı
AKA	: Aç-kapa anahtarlama (Aç-kapa modülasyonu)
BGV	: Bant genişliği verimliliği
C_n^2	: Türbülans yansıma parametre indeksi
ÇA	: Çöz ve aktar
DKM	: Darbe konum modülasyonu
e	: Elektron yük yoğunluğu
g	: Fotodedektör kazancı
$g_{i-1,i}$: Kanal kazancı
h_a	: Sönümlemeli kanal zayıflama katsayısı
h_l	: Yol kaybı
$i_F(t)$: Anlık fotodedektör akımı
KOH	: Kablosuz optik haberleşme
l_o	: Türbülans girdabındaki iç ölçek

L_o	: Türbülans girdabındaki dış ölçek
n_i	: Beyaz Gauss gürültüsü
P	: Atmosferik basınç
$P_{a,transmitted}$: Ortalama iletilen güç
$P_a(t)$: Anlık durum gücü
$P_{b,hedeflenen}$: Hedeflenen bit hata olasılığı
P_b	: Bit hata olasılığı
$P_{sdko,hedeflenen}$: Hedeflenen servis dışı kalma olasılığı
P_{std}	: Standart maksimum tepe güç değeri
R_s	: Sembol hızı
RF	: Radyo frekansı
SDKO	: Servis dışı kalma olasılığı
SGO	: Sinyal gürültü oranı
T_K	: Kelvin sıcaklığı
YM/DS	: Yoğunluk modülasyonlu / Direkt sezim
$x(t)$: Zaman bölgesinde iletilen yoğunlaştırılmış dalga biçimi

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÖLE DESTEKLİ KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN UYARLANABİLİR MODÜLASYON

Fethullah SİPAHİOĞLU

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. B. Sıddık Binboğa YARMAN

Kablosuz optik haberleşme sistemlerinin önemli sorunları arasında atmosferik ortamda basınç, sıcaklığa bağlı olarak sönmüleme ve parıldama olarak etki eden sinyalin gücündeki dalgalanmadır. Zaman içerisinde türbülansın bozucu etkisini azaltmak için çeşitli teknikler kullanılmıştır. Tüm bu tekniklerde, vericinin kanal durum bilgisine sahip olmadığı, alıcının kanal durum bilgisine sahip olduğu varsayıp çeşitli teknikler uygulanmıştır. Fakat yavaş değişen kanallarda ise kanal durum bilgisini anlık olarak alıcıdan vericiye iletilebilir. Bu şekilde kanal uyarlanabilir duruma getirilir. Bu yöntem uyarlanabilir modülasyon denir.

Tezde, kanalın log-normal olduğunu varsayarak, alıcı ve verici arasına röle yerleştirdikten sonra uyarlanabilir modülasyonla bant genişliği performansı test edilecektir. Uyarlanabilir modülasyon tepe güç sınırı, belli bir hata oranı ve kanalın servis dışı kalma durumu altında maksimize edilecektir. Benzetim performans sonuçları uyarlanabilir olmayan sistemlere göre daha iyi olduğunu göstermektedir.

Temmuz 2018, 63 sayfa.

Anahtar kelimeler: Kablosuz optik haberleşme, Uyarlanabilir modülasyon, Log-normal kanal, Röle

SUMMARY

M.Sc. THESIS

ADAPTIVE MODULATION FOR RELAY-ASSISTED FREE-SPACE OPTICAL COMMUNICATION

Fethullah SİPAHİOĞLU

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor : Prof. Dr. B. Siddik Binboğa YARMAN

Among the major problems of the wireless optical communication systems are fluctuations affected a fading and scintillation on the power of signals depending on pressure and temperature in the atmospheric environment. Over time, it has been used various techniques to reduce the disruptive effect of the turbulence. In all of these techniques, the various techniques have been applied, assuming that the transmitter has not the channel state information and the receiver has the channel state information. However, in the slowly changing channels, it can be transmitted the channel state information from the receiver to the transmitter as instantaneous. In this way, it can be made adaptable the channel. It is called the adaptable modulation.

In the thesis, assuming that the channel is a log-normal channel, the adaptable modulation and the bandwidth performance will be tested after placing the relay between the transmitter and the receiver. The adaptable modulation will be maximized under the peak power constraint, a fixed error rate and the outage state of the channel. The performance simulation results show to better versus to the non-adaptable systems.

July 2018, 63 pages.

Keywords: Wireless optical communication, Adaptive modulation, Log-normal channel, Relay



1. GİRİŞ

1.1. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMİ NEDİR?

Kablosuz optik haberleşme (KOH) veriyi vericiden alıcıya minimum hata oranı ile kablo bağlantısı olmadan atmosferik ortamı kullanarak lazer veya LED teknolojisini kullanan sistemlere denir. Optik haberleşmeden temel farkı fiziksel olarak iletim ortamı olarak atmosferi kullanmasıdır.

1.2. TARİHÇE

KOH sistemlerinin tarihçesi eski çağlarda duman işaretlerinde kolların, bayrakların sallanmasına kadar uzanmaktadır. Eski Amerika'da yerliler birbirleriyle haberleşmek için dumani iletişim aracı olarak kullanırlardı. Fakat hava şartları ve mesafe en büyük engeldi. Daha sonraları bayraklar kullanılmaya başlandı. Burada da mesafe ve güneş ışınları büyük engeldi.

19. asırda askeri amaçlı lambaların yanıp sönmeye kısa mesafelerde etkili bir şekilde kullanılmıştır. Mors alfabesi de elektrik sinyalleri kullanılarak askeri amaçlı kullanılmıştır. Fakat bu sistemlerde en büyük sorun atmosfer şartları ve gün ışığıydı. 1880 yılında Alexander Graham Bell, Photophone isimli sesin ışığın üzerinden iletimini sağlayan cihazı buldu. Photophone'un temel sorunu iletim yapılırken atmosferin değişken şartları iletişimi zorlaştırmaktaydı. Daha sonra sesi elektrik sinyalleri ile bir fiziksel bağlantı aracılığı ile iletimini sağlayan telefonu bulduktan sonra bu çalışmasına devam etmemiştir. Modern kablosuz haberleşmenin temeli 19. yüzyılın sonlarında elektro manyetik dalgaların keşfi ile başlar. 1885 yılında modern telgrafın icadı ile 1901 yılında ilk kablosuz telgrafın çekilmesi ile modern anlamda kablosuz haberleşme başlamıştır [1].

20. yüzyılın sonlarına doğru optik haberleşmede fiziksel olarak cam üzerine çeşitli malzemeler eklenmesi ile fiber optik kablo kullanılmaya başlanmıştır. Fiber optikler içinde ışığın kolayca yayılabilmesi ve en az kayıpla iletilebilmesi için temiz bir cam ve temiz bir plastik ortamdan oluşmaktadır. 1980'li yıllarda hücreli telefonların icadı ile de kablosuz haberleşme yaygınlaşmaya başlamıştır. Fiber optik kablo teknolojisinde ışığın kullanılması ve ilk kablosuz hücreli iletişimlerin kurulması KOH için ortam hazırlamıştır [4].

KOH üzerinde araştırmalar bu kadar erken başlamasına rağmen, haberleşmede d6nemin bant genişliği kapasitesi yeterli olduğundan, atmosferin değişken koşulları haberleşme için sorun teşkil etmesinden, elektronik elemanların yeterince hassas olmamaları ve vb. birçok sebepten dolayı hayata geçirilememiştir.

Optik elektronik devre elemanlarının zamanla hızla gelişme g6stermesi, haberleşme için bant genişliği ihtiyacının artması ve güvenli iletişimin gerekliliği ticari olarak yeni bir ortam oluşturmuştur.

KOH kullanıcıya sağladığı geniş bant, veri iletimin hızı ve daha güvenli bir veri iletimine olanak sağlamasından dolayı büyük kolaylıklar ve yenilikler sağlar. Bunu yanında geniş mesafeler ile haberleşmede atmosferik ortam şartları: sıcaklık, basınç, nem, sis, duman vb. gibi parametreler en büyük engel olarak karşımıza çıkmaktadır [4].

1.3. TEZİN AMAÇ VE KAPSAMI

KOH sistemlerinde en büyük sorunlardan bir tanesi de atmosferik t6rb6lanstır. T6rb6lansa neden olan fakt6r atmosferin sıcaklık farkının sebep olduğu iletilen sinyalin dalgalanmasına sebep olmaktadır. T6rb6lansın etkisini azaltmaya y6nelik şimdiye kadar pek çok çalışma yapılmıştır. Bu azaltıcı çalışmalardan bir tanesi de r6le destekli yapılan çalışmalardır. Bu alışmalardan Majid Safari ve Murat Uysal [26] yavaş s6n6mlenen log-normal t6rb6lanstlı kanalda r6le kullanarak servis dışı kalma olasılığı (SDKO) performansına etkisini başarım sonuçları ile elde etmişlerdir. Ivan B. Djordjevic [23] g6l6 atmosferik t6rb6lans ile m6cadele için 3 uyumlu iletim tekniği geliştirmişlerdir: Değişken hızlarda çeşitli g6 uyumu, sabit hızda kanal d6n6ř6m6, sabit hızda ve kodlama ile kesilmiş kanal d6n6ř6m6. Ohad Barsimantov ve Vladimir Nikulin [29] s6n6mleme etkisini ihmal ederek, radyo frekansları (RF) için uyumlu iletim tekniklerini araştırmışlardır. Majid Karimi ve Murat Uysal [21] hem sabit mod6lasyon boyutu ile uyumlu g66 hem de değişen mod6lasyon boyutu altında uyumlu iletim teknikleri geliştirmişlerdir. Sayed Hasan Hariq, Niyazi Odabaşioğlu ve Murat Uysal [22] uyumlu ve uyumlu olmayan sistemlerde turbo kodlamanın bant genişliğine etkisini incelemişlerdir. Hatem Nouri ve Murat Uysal [30] d6z frekanslı log-normal s6n6mlemeli kanallar 6zerinde çoklu antenlerin performans analizinde uyumlu mod6lasyon tekniklerini çalışmışlardır. Mohamed-Slim Alouini ve diğ. [31] uyumlu karma sistemlerin servis dışı kalma performansını incelemişlerdir. Ayrıca performans analizi için kanalın gamma-gamma s6n6mlemeli kanal

olduğu düşünölmüştür. Shiwen Mao ve diğ. [32] uyumlu dalga bölmeli çoğullayıcı kullanarak log-normal sönümlemeli kanallar üzerinde optik güç tahsisinin zorluklarını araştırmışlardır. Maite Brandt-Pearce ve diğ. [33] karma RF ve KOH sistemleri üzerinde çalışmışlardır. Servis dışı kalmayan log-normal sönümlemeli bir kanalın kapasitesini maksimum yapmaya çalışmışlardır. George K. Karagiannidis ve diğ. [34] iletim kaynağı ile alıcı arasına çok sayıda röle yerleştirerek çöz ve aktar sistemi uygulamışlardır. Ayrıca gamma-gamma sönümlemeli kanalda, kaynak-röle ve röle-alıcı bağlantılarında minimum sinyal gürültü oranı (SGO) seçimine dayanan tek röle seçim stratejisi gösterilmiştir. Chadi Abou-Rjeily [35] çalışmasında ise log-normal türbölanslı kanal için röle destekli kanalın bit hata oranına etkisini araştırmıştır.

Bahsedilen çalışmalarda şimdiye kadar alıcının kanal durum bilgisine sahip olduğu varsayılp, vericinin kanal durum bilgisine sahip olmadığı varsayılmıştır. Fakat yavaş sönümlemeli kanallarda kanal durum bilgisi hızlı sönümlemeli kanallarda olan kanal durum bilgisinden daha yavaş değışiklik arz ettiği için, sadece alıcıda kanal durum bilgisinin olması yavaş sönümlemeli kanallarda (log-normal) bant genişliğini verimli olarak kullanmaya olanak sağlamamakta ve hata oranını minimize etmemektedir. Yavaş sönümlemeli kanallarda kanal durum bilgisi zamanla yavaş değıştiğinden alıcıdaki kanal durum bilgisi vericiye geri besleme ile iletilerek kanalın uyarlanabilir hale getirmektedir. Bu durum bizlere modölasyon boyutunu, gücünü, bant genişliğini efektif bir şekilde ayarlayabilmemize olanak sağlamaktadır.

Tezde ilk olarak röle desteksiz ve uyarlanabilir olmayan bir sistemin başarıml sonuçları elde edilecektir. Akabinde ise röle desteksiz uyarlanabilir sistemin bant genişliğine karşı başarıml sonuçları ve röle destekli sistemlerin ne kadar başarıml sonuçları olduğu inceleneyecektir. Bu süreçlerde log-normal türbölanslı kanalın SDKO ve bit hata oranını belirli bir değerde sabitleyerek uyarlanabilir modölasyonla bant genişliği verimi (BGV) maksimum yapılacaktır. Uluslararası standartlarda (IEEE) göz güvenliği için tepe güç değerimizi belirli bir değerde sınırlandırılacaktır.

Elde edilen bulgular Monte-Carlo bilgisayar benzetimi ile gerçekleştirilecektir.

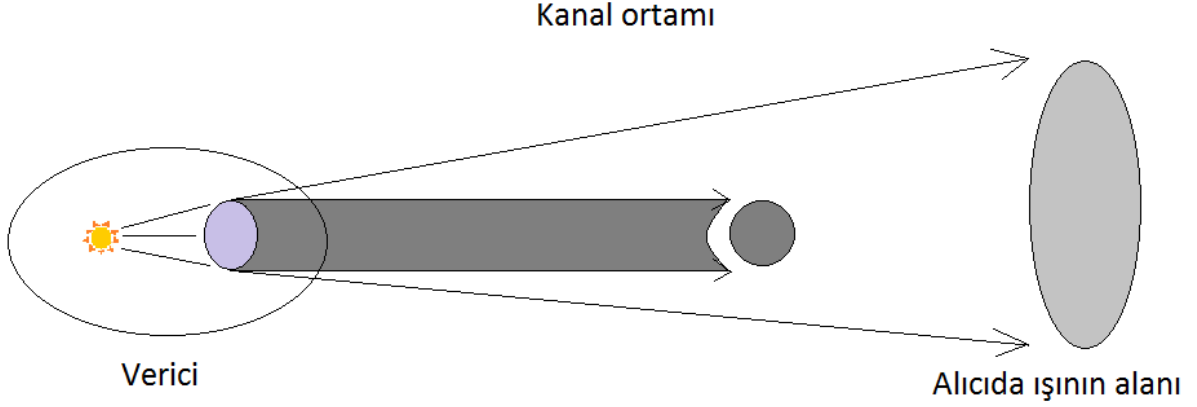
2. GENEL KISIMLAR

2.1. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

KOH sistemlerinin çalışması, elektronik tasarımı, optik tasarımı, optoelektronikleri, kanal modellemeyi, haberleşme ve bilgi kuramını, modülasyon ve denkleştirmeyi, kablosuz optik ağ yapısını içeren çok disiplinli bir çalışmadır. Kablosuz optik bağlantılar bilgiyi elektriksel giriş sinyaline cevapta, modülasyona uğramış ani optik yoğunluğu ile iletirler. Bu kanalda gönderilen bilgi iletilen optik dalganın genliği, fazı veya frekansında değil, iletilen yoğunlaştırılmış sinyalin içinde yer alır. Günümüzdeki optoelektronikler direkt olarak 10^{14} Hertz optik sinyalin frekans veya faz aralığında çalışamazlar. Bu opto-elektronik dönüşüm süreci optik yoğunluklu modülasyon olarak adlandırılır ve bu süreç 850-950 nm dalga boyunda çalışan lazer diyotlar ya da LED' ler yardımıyla gerçekleştirilir [2].

Lazere modüle edilen bilgi sinyali iletilir ve alıcı bunu demodüle ederek iletilen bilgi sinyalini tekrar elde eder. Lazerle iletilen sinyal doğrusal bir yol izler. Optik taşıyıcı $10^{12} - 10^{16}$ aralığında değişen frekansa sahiptir ve bu oranda 2000 THz veri bant genişliği elde edilmektedir. Radyo frekansı (RF) iletişim sistemiyle karşılaştırıldığında çok büyük bir artış olduğunu göstermektedir [3].

Noktadan-noktaya (point-2-point) iletişim sisteminde, haberleşme sisteminin çalışabilmesi için kaynak ve hedef arasındaki görüşün açık olması gerekir. Diğer bir ifade ile KOH sisteminde kaynak ve hedef arasında herhangi bir nesne veya engel bulunmamalıdır. Çünkü KOH sistemleri görüş alanının içinde olabilecek herhangi bir nesnenin içinden geçebilecek ışığı kullanmamaktadır. KOH sistemi blok diyagramı Şekil 2.1'de gösterilmiştir [4].



Şekil 2.1: Kablosuz optik haberleşme sisteminin blok diyagramı.

2.2. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN ÖZELLİKLERİ

KOH sistemlerinin temel özellikleri aşağıdaki gibi belirtilmiştir:

Geniş Modülasyon Bant Genişliği: Herhangi bir haberleşme sisteminde, iletilen verinin miktarı doğrudan modüle edilmiş taşıyıcının bant genişliği ile ilgilidir. İzin verilen veri bant genişliği taşıyıcının %20'si kadar olabilir. Dolayısı ile $10^{12} - 10^{16}$ frekans aralığına sahip kullanılan optik taşıyıcının veri bant genişliği 2000 THz'e kadar olabilir. Radyo frekans tabanlı haberleşme sistemlerine nazaran optik haberleşme daha büyük bilgi kapasitesi garanti eder. Bunun nedeni elektromanyetik spektrumda, ultra-violet, görünür ve kızılötesi frekanslarını içeren optik taşıyıcı frekansının radyo frekansından çok fazla büyük olmasıdır [6].

Lisanssız Spektrum: RF spektrumun sıklığı nedeniyle, komşu taşıyıcılardan gelen girişim kablosuz RF haberleşmesinde karşılaşılan en büyük problemdir. Bu girişimi minimize etmek için, düzenleyici otoriteler örneğin, Federal Haberleşme Kurulu (FCC) ve Haberleşme Ofisi (Ofcom) sıkı düzenlemeleri yerine koyar. Bunun sonucu olarak, RF spektrumun bir parçasını paylaşmak için yüksek fiyat ve birkaç ay bürokrasi gerekmektedir. Günümüzde, optik frekanslar tüm bunlardan bağımsızdır. Lisans ücretinin olmayışı ve bürokratik zaman ötelemesi, başlangıç kurulum maliyetinin düşüklüğü ve kısa sürede geliştirilebilmesinden dolayı KOH' de ki yatırım getirilerinin çok daha hızlı artmaya başladığı anlamına gelmektedir [6].

Ucuz olması: KOH gelişim maliyeti karşılaştırılabilir veri hızı ile herhangi bir RF' den daha düşüktür. KOH aynı bant genişliğini ekstra yol ve kazı maliyeti olmadan optik fiber olarak sunabilir [6].

Hava Şartlarına Bağlı: Karasal KOH' nin performansı atmosferin şartlarına bağlıdır. KOH kanalının sabit olmayan özellikleri şüphesiz en büyük zorluğu ortaya koyuyor. Fakat bu, RF ve karasal haberleşme ağları da ağır yağmurlu havalarda ve fırtınalı havalarda devre dışı olurken KOH' ya özgü değildir.

Bu bilgilere ek olarak diğer özellikleri şunlardır:

- Elektromanyetik girişimlerden etkilenmemesi
- Kablolü sistemlere rağmen, KOH sabit olmayan geri kazanılabilir bir mal olması
- Düşük güç tüketimi
- Işık daralmasından dolayı direk görüşe ve sık sıralanmaya ihtiyaç duyması

2.2.1. Uygulama Alanları

Yukarıda tartışılan KOH sistemlerinin karakteristik özellikleri erişim ve metro ağları içine alan çeşitli uygulamalar için çok cazip hale getirmektedir. Diğer teknolojileri de uygun bir şekilde tamamlamaktadır. Örneğin kablolu ve kablosuz radyo frekans haberleşmelerinde, diğerlerinin yanında koaksiyel hibrit fiberler, son kullanıcılar tarafından kullanılabilen optik fiber omurgasında bulunan geniş bant genişliği yapımında. Çoğu kullanıcı omurgasının 2 km içerisinde ya da daha kısa mesafededir. Gelişmekte olan diğer uygulama alanlarının yanında, karasal KOH aşağıda belirtilen alanlardaki kullanımı daha uygun bulunmuştur:

Son mesafe erişimi: KOH son kullanıcı ve fiber optik omurga arasında bulunan bant genişliği boşluğunu köprülemek için kullanılır. Bağlantı mesafesi 50 metreden birkaç kilometreye kadar değişebilen bağlantılar, piyasada 1 Mbps' dan 10 Gbps' a kadar değişen hızlarda kolayca elde edilebilir [4].

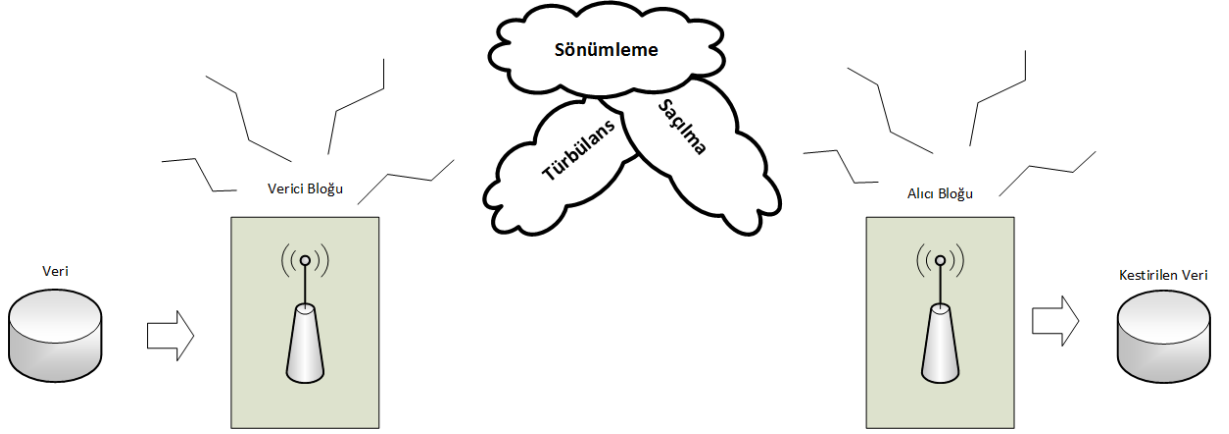
Optik fiber yedekleme bağlantısı: Ana optik fiber bağlantının zarar görmesi ya da elverişli olmadığı olaylarda, veri kaybına ya da haberleşmenin kesilmesine karşı yedeklemeyi sağlamak için kullanılır [4].

Zorlu araziler: KOH bir nehir boyunca, bir çok yoğun caddede, demir yollarında, elverişli olmayan durumlarda ya da takip etmesi çok pahalı gibi durumlarda cazip bir veri köprüsüdür.

Yüksek çözünürlüklü televizyonlar: Yüksek çözünürlüklü televizyon ya da kamera sinyallerinin büyük bant genişliği ihtiyacından dolayı, KOH yayın endüstrisinde uzak yerlerdeki kameralardan merkez ofise canlı sinyalleri taşımak için kullanılır [7].

2.3. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME BLOK DİYAGRAMI

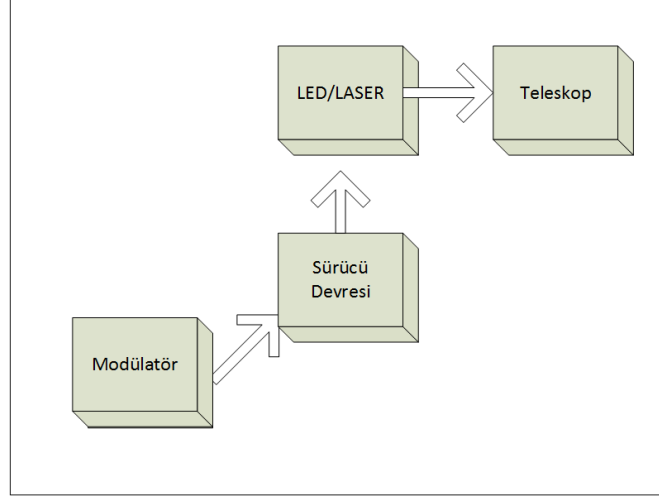
Temel bir KOH sistemi blok şeması Şekil 2.2' de gösterilmiştir. Diğer haberleşme teknolojilerinde olduğu gibi, KOH sistemleri de temelde 3 parçadan oluşur: verici, kanal ortamı ve alıcı. Her bir yapı daha sonra ilerleyen bölümlerde ele alınacaktır.



Şekil 2.2: Kablosuz optik haberleşme blok şeması.

2.3.1. Verici Yapısı

Verici yapısı KOH sistemlerinde verinin ilk olarak modülasyona uğrayıp atmosferik ortam üzerinden hedef alıcı yapısına ulaştıran çok amaçlı bloktur. Modülasyonun kullanılması yüksek veri hızını garanti eder. Verici teleskop optik radyasyonu kanalın diğer ucundaki alıcı teleskopa doğru toplar, hizalar ve yönlendirir. Verici blok şeması Şekil 2.3' te gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Verici blok şeması.

2.3.2. Atmosferik Ortam

Atmosferik kanal, kanalı oluşturan gaz moleküllerinden ve atmosferde bulunan küçük partiküllerden meydana gelmektedir. Ortamda bulunan partiküller ve gaz molekülleri saçılmaya, sönmlemeye, kırınımına, türbülansa vb. sinyalin gücünü azaltıcı veya sinyalin bozulmasına neden olabilecek parametrelerdir. Atmosferde bunların yanında sis, duman, yağmur ve diğer durumlar olabilir.

Optik bir sinyal atmosferik ortamdan geçerken, atmosferik ortamın da etkisiyle sinyalin gücünde azalma ve bu azalma ile açığa çıkan ısının değiş-tokuş durumu, sinyalin ortamda ilerlerken atmosferde bulunan moleküllerin veya partiküllerin sinyalde saçılmaya, kırılmaya, parıldamaya, dalgalanmaya ve parıldamaya sebep olması alıcı kısmında anten açıklığından daha büyük alanda iletme yol açar. Beer – Lambert kanunu atmosfer boyunca iletilen sinyalin optik alanını tanımlar [4].

$$\tau(\lambda, L) = \frac{P_R}{P_T} = \exp(-\gamma_T(\lambda)L) \quad (2.1)$$

Yukarıdaki denklemde $\tau(\lambda, L)$ ve $\gamma_T(\lambda)$ sırası ile sönmleme veya zayıflama katsayısını ve atmosferin λ dalga boyundaki geçirgenliğini temsil eder. P_T iletilen optik gücü, P_R ise L kadar mesafe sonrasında alınan optik gücü ifade eder. Bu sürecin kendisi yol kaybı olarak ifade edilir.

Işınlar saçılma, kırınım, yansıma vb. faktörlerin sonucunda dünya yüzeyi tarafından absorbe edilebilir. Bunun sonucunda dünyanın yüzeyinin ısınmasına sebep olur. Isınan bu hava

molekülleri yüzeyden atmosfere doğru yükselmeye başlar. Isınmış ve yükselmeye başlayan hava dalgası soğuk hava ile karşılaştığında atmosferin sıcaklığında dalgalanmalara sebep olur. Sonucunda atmosferin homojen yapısını homejensiz duruma getirir. Optik yayılım boyunca bu homejensiz durum sinyalde parıldamaya ve fazında gecikmelere sebep olur.

Atmosferik türbülans atmosferik basınca, rüzgar hızına, homojensizlikten dolayı yansımaya bağlıdır. Atmosferik türbülansın bilinen etkileri [5];

Işının Yönü: Işının orijinal yönünden fazının sapması, ışığın alıcıyı kaçırmasına sebep olur.

Görüntünün Dalgalanması: Alınan ışın, ışığın varış açısında ki değişimlerden dolayı görüntü düzleminde hareketlere odaklanır.

Işının Yayılması: Saçılma nedeni ile ışının ıraksaklığının artması. Bu durum alınan ışının gücünde azalmaya sebep olur.

Işının Parıldaması: Optik ışın içinde küçük ölçekli yıkıcı girişimden kaynaklanan alıcı düzlemdeki mekansal güç yoğunluğundaki değişiklikler.

Uzaysal Uyumluluğun Azalması: Türbülansla ışının fazına karşı faz uyumluluğunda kayıplar yaratır.

Polarizasyon Dalgalanmaları: Türbülans ortamından geçen ışın, alınan optik alanın polarizasyon durumundaki değişikliklerden kaynaklanır.

2.3.3. Alıcı Yapısı

Temel olarak optik alıcılar anlık iletilen sinyali çözümlerler. Alıcı blok şeması Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Alıcı yapısı aşağıdaki kısımlardan oluşmaktadır:

-**Alıcı Teleskobu:** Anlık iletilen sinyal ilk olarak teleskoptan geçer ve alıcı detektörü üzerine odaklar. Alıcı teleskobunun açıklığının gelen sinyalleri ideal bir şekilde toplayıp detektöre ortalamalarını iletebilmesi için büyük olması arzu edilir.

-**Optik Bant Geçiren Filtre:** Alınan sinyalde arka plandaki gürültüyü azaltmak için uygulanır.

-Fotodedektör: PIN diyotlar ya da çığ fotodiyotlardır. Anlık optik alanı bir elektrik sinyalinin içine evirirler. Genellikle modern lazer haberleşme sistemlerinin içinde kullanılırlar. Çok kullanılan fotodedektörler Tablo 2.1’de [3] gösterilmiştir.

-Algılama Sonrası İşlemciler: Bu devreler yüksek veri düzeltme doğruluğunun gerçekleştiği, yükseltmenin, filtrelemenin ve sinyal işlemenin gerekli olduğu devrelerdir.

Tablo 2.1: Çok kullanılan fotodedektörler [3].

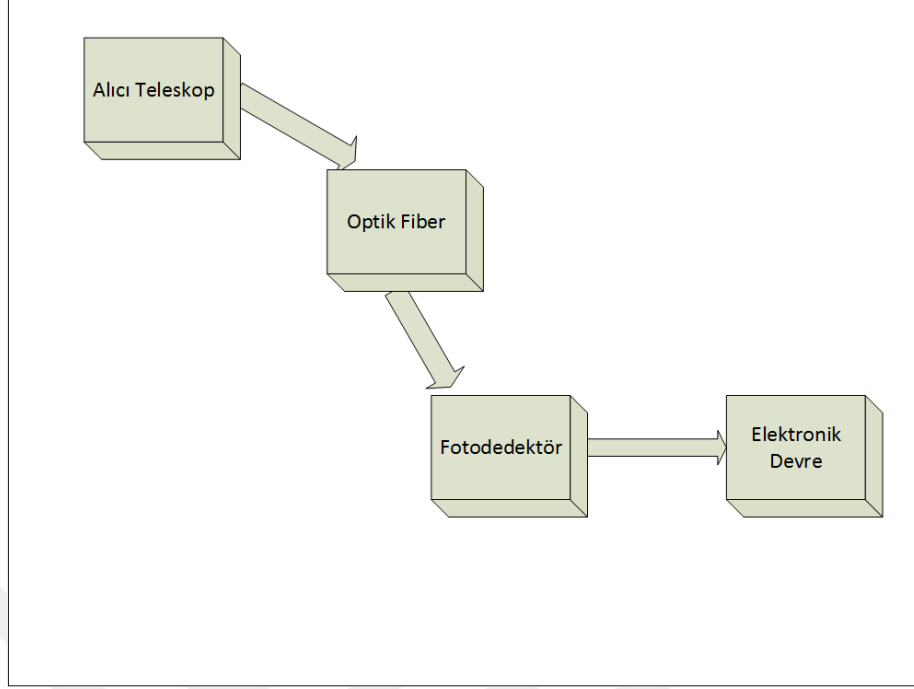
Malzeme yapısı	Dalgaboyu(nm)	Açıklama
Silikon Fotodedektörler, Geçirgenlik Yükselticili Silikon Fotodedektörler	300-1100	Kazançları düşüktür. Tepki hassasiyetleri düşüktür.
Silikon Çığ Fotodedektörler	400-1000	Kazançları ve tepki hassasiyetleri yüksektir.
InGaAs Fotodiyotlar ve InGaAs Çığ Fotodiyotlar	1000-1700	InGaAs Çığ Fotodiyotların kazançları ve tepkileri yüksek olmalarına karşın, InGaAs Fotodiyotların kazançları ve tepkileri düşüktür.

Dedektör kapasite etkisinden dolayı, yüksek hızlı dedektörler sınırlı bir görüş alanı ile doğal olarak daha küçüktür ($70 \mu\text{m}$ 2.5 Gbps, $30 \mu\text{m}$ 10 Gbps).

İki farklı alıcı tipi vardır. Bunlar direkt sezim alıcılar ve eş-evreli sezim alıcılardır.

Direkt Sezim Alıcılar: Bu tip alıcılar ani yoğunluğu ya da fotodedektörlere çarpan optik radyasyonun gücünü sezer. Dolayısı ile fotodedektörün çıkışı yük alanının gücü ile doğru orantılıdır. Uygulamaları yoğunluk modüleli optik sistemler için çok basit ve uygundur.

Eş-evreli Sezim Alıcılar: Eş-evreli alıcılar foto-karıştırma olgusu üzerine çalışır. Gelen optik alan fotodedektörün yüzeyinde yerel olarak üretilen diğer optik alan ile karıştırılır. Eş-evreli alıcı homodin ve heterodin alıcılar olarak ayrılır. Heterodin sezicide gelen radyasyonun ve yerel osilatörün frekansları farklı olmasına karşın, homodin alıcılarda yerel osilatörün frekansı ya da dalga boyu tam olarak gelen radyasyon ile aynıdır [5]. RF’ lı eş-



Şekil 2.4: Alıcı blok şeması.

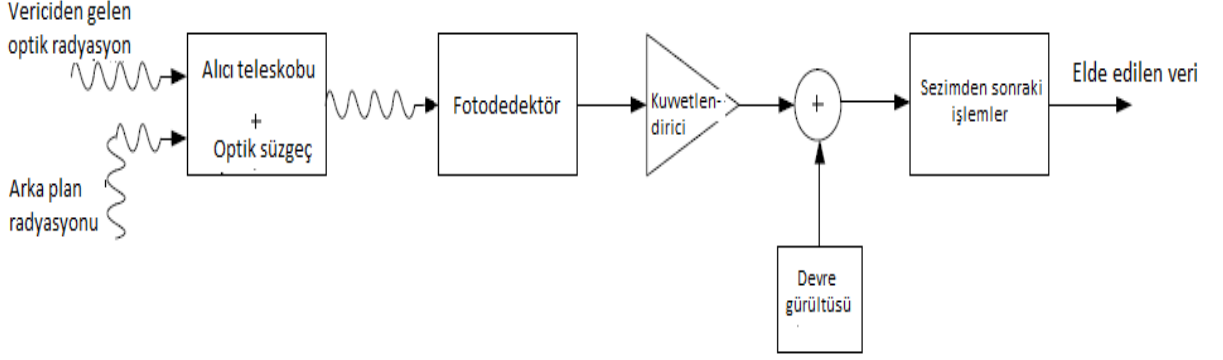
evreli sezicinin aksine, optik eş-evreli sezicide yerel osilatörün çıkışı gelen radyasyon ile aynı faza sahip olmak zorunda değildir. Eş-evreli alıcıların temel avantajları: bir ara frekansta yükseltmenin göreceli kolaylığı ve sinyalin gürültü gücüne oranı yerel osilatörün gücünü arttırmakla önemli ölçüde iyileştirilebilir.

2.3.3.1. Direkt Sezim Yapan Alıcılar

Bu sezme işleminde sezme sürecinde yerel osilatörler kullanılmazlar. Bu tip alıcılar kodlanmış bilgiyi çözmek için iletilen bilgi iletilen alanın yoğunluk değişimi ile ilişkilendirilir [8]. Dolayısı ile bu tip sezim yapan alıcılar aynı zamanda zarf sezicisi olarak da adlandırılır. Anlık durum gücü $P_a(t)$, anlık fotodetektör akımı ise [3];

$$i_F(t) = \frac{\eta e \lambda}{hc} g P_a(t) \quad (2.2)$$

Yukarıdaki denklemde g fotodetektör kazancını, e elektron yükünü, h plank sabitini, c ise ışık hızını temsil etmektedir. Direkt sezim yapan alıcının blok diyagramı Şekil 2.5'te gösterilmiştir [3].

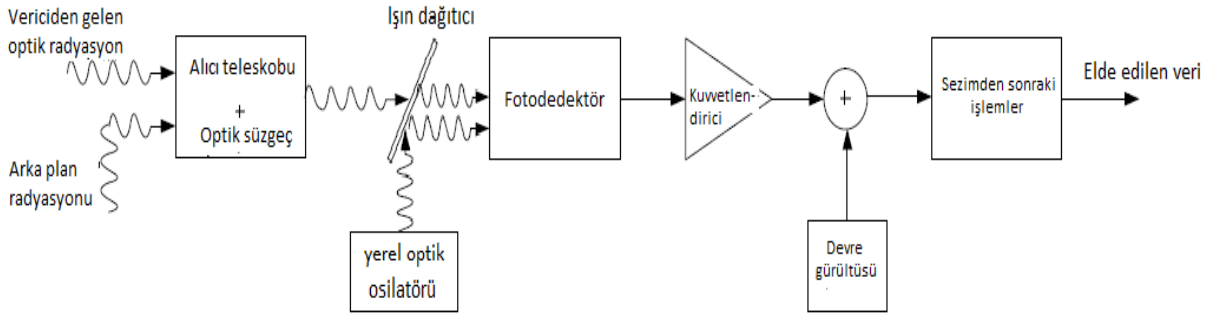


Şekil 2.5: Direk sezim yapan alıcının blok diyagramı [3].

2.3.3.2. Eş-evreli Sezim Yapan Alıcılar

Bilindiği üzere yerel osilatörler merkez frekansta ya da dalga boyunda sinyal üretmek için kullanılır. Yerel osilatörün frekansı gelen radyasyonun frekansı ile aynı olmak zorunda değildir. Optik sezimde eş-evreli sezim, radyo frekansındaki eş-evreli sezim ile aynı zamanlı değildir. Radyo frekanslı eş-evreli sezimin aksine optik eş-evreli sezimdeki yerel osilatörün çıkışı gelen radyasyon ile aynı fazda olmak zorunda değildir.

Eş-evreli sezim yapan alıcının blok diyagramı Şekil 2.6'da gösterilmiştir [3].



Şekil 2.6: Eş-evreli sezim yapan alıcının blok diyagramı [3].

2.4. ATMOSFERİK TÜRBÜLANS MODELLERİ

Atmosfer kanalı Tablo 2.2'de gösterilen gaz moleküllerinden ve atmosfer içinde bulunan küçük partiküllerden meydana gelmektedir. Kanalda ayrıca atmosferik türbülans etkisi de bulunmaktadır. Atmosferik türbülans güneş ışınlarının yerküre üzerine düşmesi ve yer yüzeyini

ısındırması sonucu ısınan hava kütleinin yükselerek soğuk hava ile karşılaşması sonucu kırınımlara ve bunun sonucu olarak da rasgele dalgalanmalara sebep olur. Atmosferik türbülans ise optik radyasyonun emilimi, saçılması, kırılmasına etki eder.

Tablo 2.2: Atmosfer bileşenleri [11].

Atmosfer bileşenleri	Yüzde
Azot	78.284
Oksjen	20.946
Argon	0.934
Karbondioksit	383
Neon	18.18
Helyum	5,24
Metan	1,70
Kripton	1,14
Hidrojen	0.55
Su buharı	1,00

Türbülans atmosferik kanalın modellenmesi için yaygın bir şekilde kabul gören ‘Taylor hipotezi’ [9], bu hipotez de türbülans girdabı sabittir ya da donuktur. Buna ek olarak sadece donmuş formda ortalama yerel rüzgarın enine bileşeni ile hareket eder. Ek olarak bu hipotez ışın demetinin ya da onun istatistiksel geçici değişimleri, ışığın yayılma yönüne dik olan yerel rüzgarın bileşeninden kaynaklanır. Buna ek olarak, geçici eş-evreli zaman, τ_0 , atmosferik türbülansın milisaniyelik düzeyde olduğu bildirilmiştir [10]. Bu değer normal bir veri sembolünün süresi ile karşılaştırıldığında çok büyüktür. Bu yüzden türbülans atmosferik kanal veri sembolünün süresi boyunca sabit kaldığı için türbülans atmosferik kanal yavaş sönümlemeli kanal olarak tanımlanır.

Atmosferin sıcaklığı ile onun yansımaya katsayısı arasındaki bağıntı 2.3’te verilmiştir [11]. Çoğu mühendislik uygulamaları için kanal sıcaklığına göre yansımının değişim hızı eşitlik 2.4’te verilmiştir [9].

$$r = 1 + 77.6(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \frac{P}{T_k} \times 10^{-6} \quad (2.3)$$

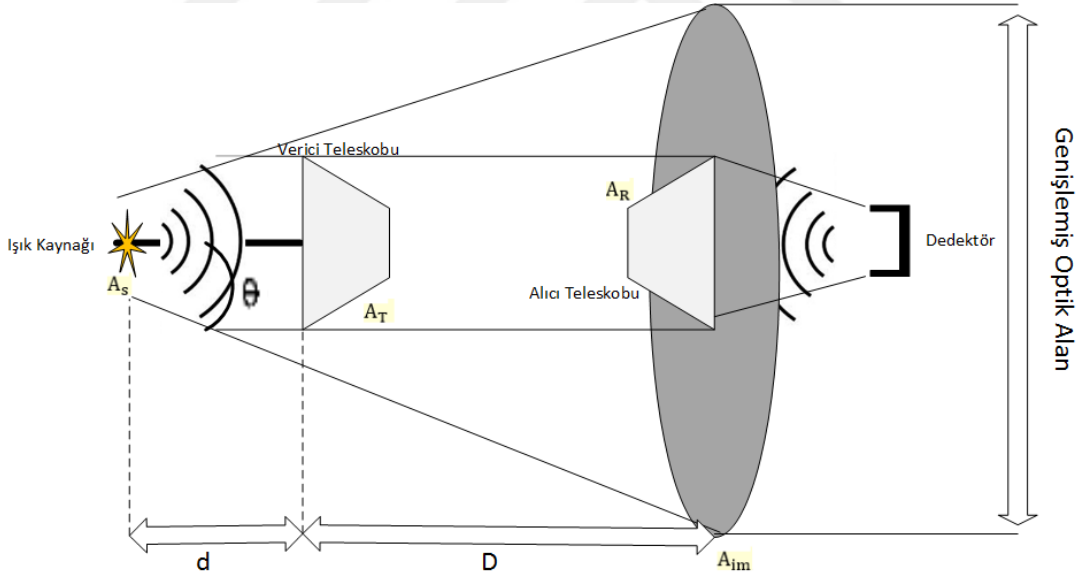
$$- dr / dT_k = 7.8 \times 10^{-5} P / T_k^2 \quad (2.4)$$

P atmosferik basıncı milibar cinsinden, T_K Kelvin cinsinden sıcaklığı, λ mikrondaki dalga boyunu temsil etmektedir. Deniz seviyesinde $-dr/dT_K \cong 10^{-6} K^{-1}$ [9]. Nemin yansımaya parametresinin dalgalanmasına katkısı optik dalga boylarında ihmal edilebilir olduğundan 2.3’de hesaba katılmaz [10].

2.4.1. Güç Kaybı

Optik radyasyon atmosferde ilerlerken sis, duman, nem, ozon gibi çeşitli engeller tarafından yutularak (emilim) enerjileri ısıya dönüşür. Bazı foton parçacıkları ise soğurulmaz fakat yönleri değişir (saçılma). Bu ve diğer engellerden dolayı optik radyasyon güç kaybına uğrar. Optik alanın geçirgenliği Beer-Lambert kuralı ile tanımlanır [12].

Şekil 2.7’de de gösterildiği üzere vericiden çıkan optik radyasyon alıcıya iletilirken giderek yayılan alanı genişler ve bu durum alıcı da alıcının optik alanının dışında genişlemeye neden olduğundan güç kaybına neden olur.



Şekil 2.7: Optik ışının giderek genişlemesi.

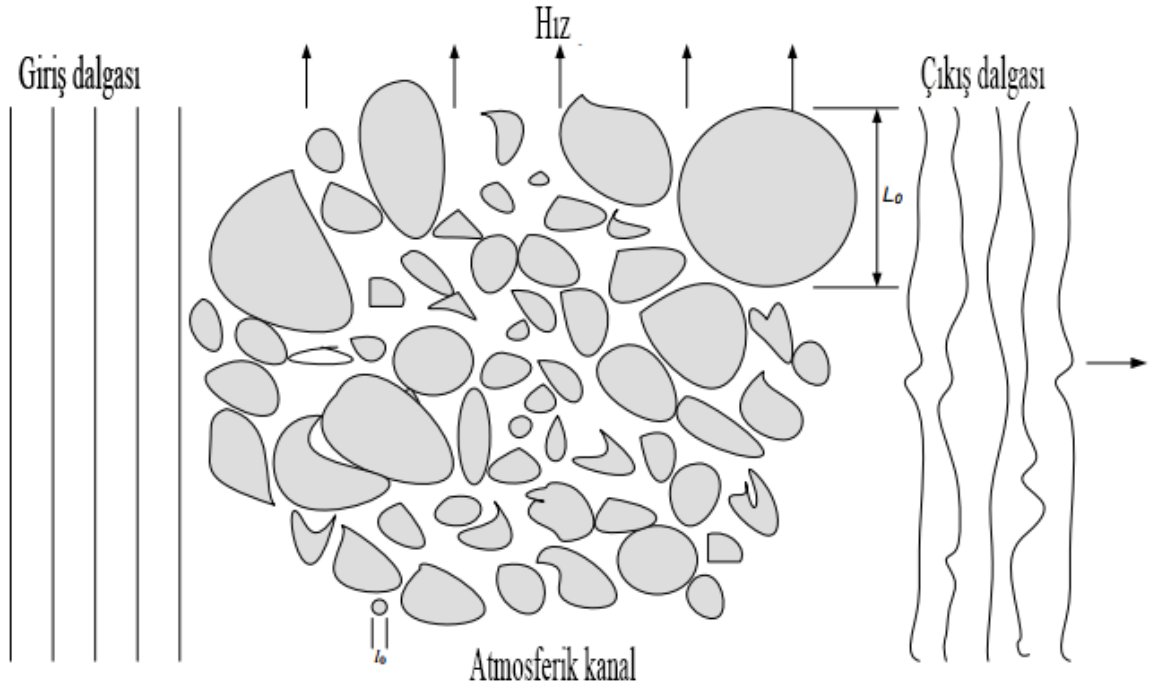
Işının genişlemesinden dolayı geometrik kayıp meydana gelir ve bu kayıp aşağıdaki gibi tanımlanır [12].

$$D_{\text{geo}} = -10 \left[\log \left(\frac{A_T A_R}{l^2 \lambda^2} \right) + 2 \log \left(\frac{4}{\pi} \right) \right] \quad (2.5)$$

Formül 2.5'te A_T verici alanının açıklığını, A_R ise alıcı alanının açıklığını göstermektedir.

2.4.2. Atmosferik Türbülans Kanalı

Atmosferik türbülans daha önce de ifade edildiği üzere atmosferik yansımaların rasgele dalgalanması ile sonuçlanır. Bu yansıma dalgalanma parametresi bir noktadan diğer noktaya haberleşmede ki atmosferik sıcaklıkta rasgele değişimlerin doğrudan son ürünüdür [5]. Bu rasgele sıcaklık değişimleri atmosferik basıncın, yüksekliğinin ve rüzgar hızının bir fonksiyonudur. Türbülans girdaplarının en küçüğü ve en büyüğü iç katsayı olan l_o ve dış katsayı olan L_o ile ifade edilir. L_o tipik olarak birkaç metre ile ifade edilirken, l_o birkaç milimetre ile ifade edilir. Bu girdap biçimi Şekil 2.8'de gösterilmiştir [3].



Şekil 2.8: Atmosferik türbülans girdabı [3].

Atmosferik türbülans, atmosferin kırılma parametresindeki homojen olmayan değişikliklerin yoğunluğuna göre alt sınıflara ayrılır. Bu sınıflar zayıf, orta, güçlü ve doymada olarak adlandırılır. Optik radyasyonun olasılık yoğunluk fonksiyonunun atmosferik türbülansın karmaşıklığından dolayı genel bir modeli mevcut değildir. Literatürde zayıf, zayıf-güçlü ve doyma modelleri ve bu modellerin karşılıkları log-normal, gamma-gamma ve negatif üstel

modellerdir [7,10]. Tezde yavaş türbülans modeli içerdiğinden dolayı log-normal türbülans modeli üzerinde durulacaktır. Diğer türbülans modelleri için [3]'e bakılabilir.

2.4.3. Atmosferik Türbülanslı Kanal ve Log-normal Türbülans Modeli

Konum ve zamana bağımlı $n(r,t)$ ile gösterilen kırılma indeksi türbülans etkisi olmayan uzayın n_0 ve türbülans içeren rasgele dalgalanma bileşeninin $n_1(r,t)$ toplamı olarak ifade edilir. Sonuç olarak;

$$n(r,t) = n_0 + n_1(r,t) \quad (2.6)$$

Kanalın yansıma indeksinin geçici değişimlerine uygulanan Taylor'ın 'dondurulmuş akışlı' hipotezine göre kanal atmosferik rüzgârın enine bileşeninden kaynaklanmaktadır. Eşitlik (2.6)'nın rasgele dalgalanan kısmı aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir:

$$n_1(r,t) = n_1(r - vt) \quad (2.7)$$

Eşitlik (2.7)'de v alanın yönüne dik yerel rüzgârın hızıdır. Atmosferik türbülansla, reaktif miktarda dalgalanma indeksinin karakterize etmek için en önemli parametre yansıma yapı parametre indeksidir. C_n^2 ile gösterilir [14]. C_n^2 değeri yükseklik ile değişir ve aşağıda ki eşitlikte verilmiş olan Hufnagel-Valley (H-V) modelini tanımlamak için yaygın kullanılır.

$$C_n^2(H) = 0.00594 \left(\frac{v}{272}\right) (10^{-5}H)^{10} \exp\left(-\frac{H}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{H}{1500}\right) + A \exp\left(-\frac{H}{100}\right) \quad (2.8)$$

Yukarıdaki eşitlikte A değeri $C_n^2(0)$ değerinde aldığı $m^{-2/3}$ civarında sayısal değerdir. H ise metre cinsinden yüksekliği ifade eder. Yansıma yapı parametresinin indeks değeri yükseklik ile değişir, fakat yatay yayılan alan için onu genellikle sabit kabul ederiz. C_n^2 tipik olarak güçlü türbülans modeli için $10^{-12} m^{-2/3}$ ile zayıf türbülans modeli için olan $10^{-17} m^{-2/3}$ değerleri arasındadır ve ortalama değeri $10^{-15} m^{-2/3}$ [13].

Log-normal dağılım zayıf türbülans modeli ve olasılık yoğunluk dağılımının fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır [10]:

$$p(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \frac{1}{I} \exp\left\{-\frac{[X-\mu_x]^2}{2\sigma_x^2}\right\} \quad (2.9)$$

Eşitlik (2.9)'da I atmosferde zayıf türbülans modelinin normal dağılımını, μ_x I log yoğunluğunun ortalamasını ve σ_x^2 ise I log yoğunluğunun varyansını temsil etmektedir.

Türbülans ortamı sayesinde yatay bir şekilde yayılan alan için, çoğu karasal uygulamalarda olduğu üzere yansıma indeksi yapı parametresi sabittir (C_n^2). Düzlem dalgalar için log parıldama varyansı aşağıdaki gibi olur:

$$\sigma_l^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2.10)$$

Türbülans ortamındaki parıldama (ışık) alanı $I = |A(r)|^2$ ile ifade edilir ve log-yoğunluğu eşitlik (2.11)' de ifade edilmiştir:

$$l = \log_e |A(r)|^2 = 2X \quad (2.11)$$

Dolayısı ile ;

$$I = \exp(l) \quad (2.12)$$

Parıldama olasılık yoğunluk fonksiyonunu elde etmek için, değişken dönüşümü yöntemi ile, $p(I) = p(X) \frac{dx}{dl}$ ile bulunur.

$$p(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_l^2}} \frac{1}{I} \exp\left\{-\frac{[\ln(I)-\mu_l]^2}{2\sigma_l^2}\right\} \quad (2.13)$$

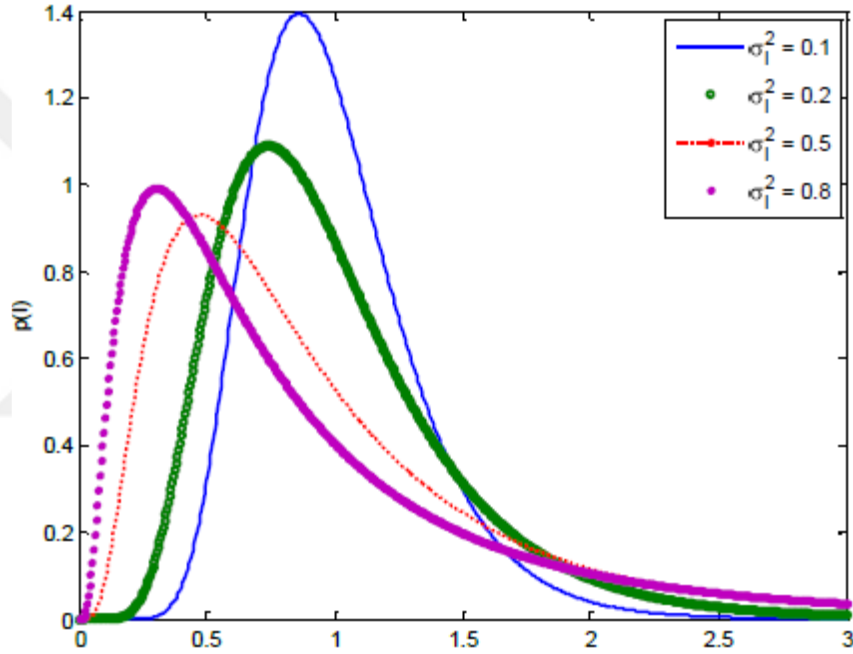
Zayıf dalgalanma bölgelerinde, parıldama (yoğunluk) dalgalanmalarının istatistiği deneysel olarak log-normal dağılıma uyduğu bulunmuştur. Eşitlik (2.11)' den log-yoğunluk varyansı, varyansın özelliğinden normal dağılım varyansının 4 katına eşittir ($\sigma_l^2 = 4\sigma_x^2$). Beklenen değeri ya da ortalaması ise normal dağılım ortalamasının 2 katına eşittir ($E[l] = 2E[X]$). Türbülans içeren saçılmada enerji kaybı olmadığı için türbülans içeren log-yoğunluğun ortalaması, türbülans içermeyen yoğunluğa eşittir [7,5]. Türbülans içeren log-yoğunluğun ortalaması gerçel değerli Gauss rasgele değişkenleri için geçerli olan standart ilişki ile elde edilir:

$$E[\exp(az)] = \exp(aE[z] + 0.5a^2\sigma_z^2) \quad (2.14)$$

$$1 = \exp(E[l] + 0.5\sigma_l^2) \quad (2.15)$$

$$E[l] = -\sigma_l^2/2 \quad (2.16)$$

Log-normal olasılık yoğunluk fonksiyonunun grafiği farklı log yoğunluk varyanslarına göre Şekil 2.9'da ki gibi çizilmiştir. σ_l^2 artarken, dağılım görüleceği üzere sonsuzluk yönünde uzun kuyruklarında daha eğik hale gelir [3].



Şekil 2.9: Farklı σ_l^2 değerlerinin log-normal olasılık yoğunluk fonksiyonunun normalize parlaklığına göre değişimi [3].

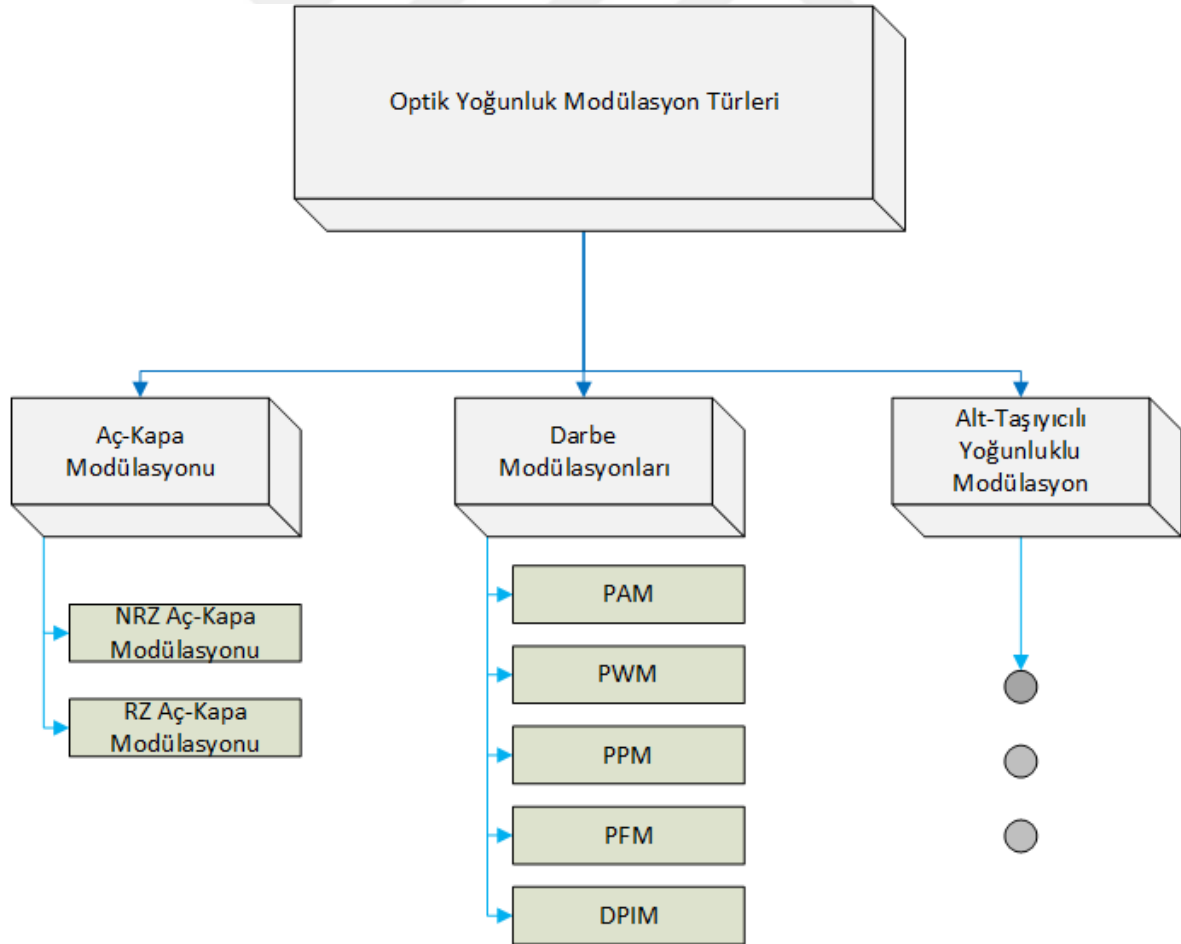
2.5. MODÜLASYON TÜRLERİ

KOH sinyallerinin veri iletimi sırasında geliştirilmiş ve kullanılan bir çok modülasyon türleri bulunmaktadır. Bunlardan sadece “Aç-Kapa Anahtarlama (AKA)” ve “Darbe Konum Modülasyonu (DKM)” üzerinde durulacaktır. Ortalama emilen optik güç her zaman sınırlı olduğu için modülasyon tekniklerinin performansı verilmiş veri hızında arzu edilen veri hata oranına göre alınan ortalama optik güç cinsinden karşılaştırılır. Fakat tek başına veri hata oranı performansı parametresi tek başına modülasyon türünü seçmede yeterli değildir. BGV ve

optimum güç bunlardan bazı parametrelerdir. Fakat bu parametreleri sınırlandıran elektronik cihazların izin verebildiği bant genişliği ve uluslararası kuruluşların kabul ettiği güç için göz sağlığı için verilebilecek maksimum güç miktarı vb.

Atmosferik türbülansa, sabit eşik-değeri seviyeli AKA'nin performansı en uygun olmamasına karşın bir sonraki bölümlerde işlenecektir. Atmosferik türbülansa, en uygun AKA performansı hakim olan parıldama dalgalanması ve gürültü ile değişebilmesi için eşik seviyesine ihtiyaç duyar, yani uyarlanabilir yapmak için.

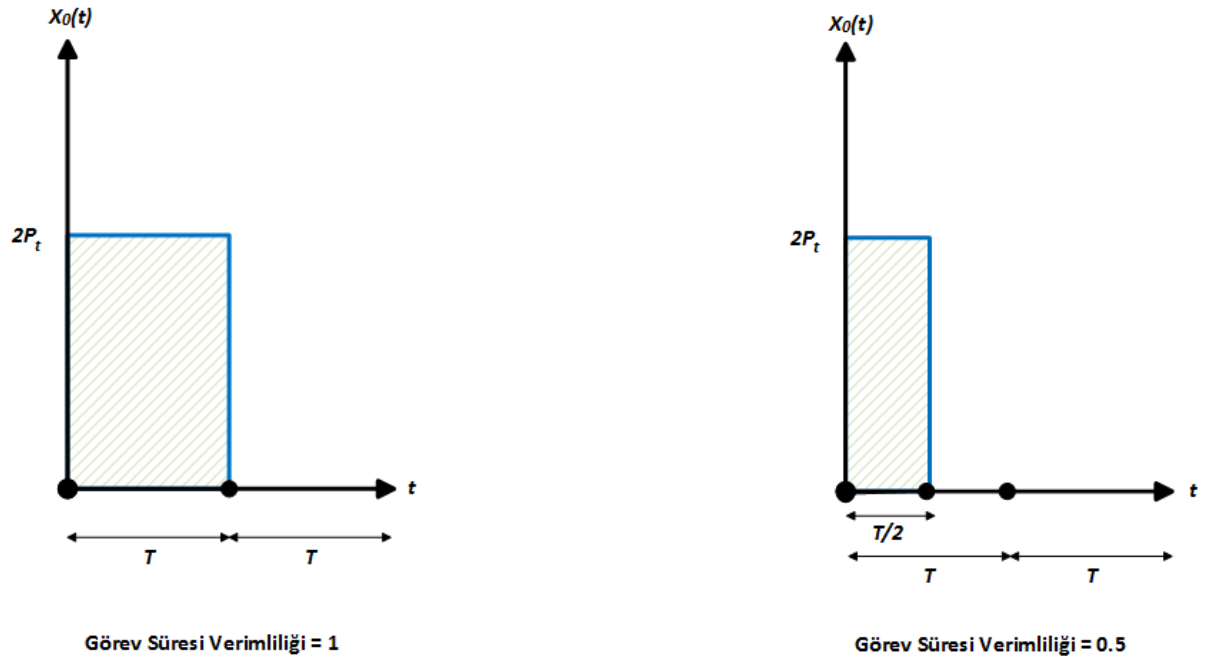
DKM ise uyarlanabilir eşik seviyesine ihtiyaç duymaz ve AKA sinyaline göre karşılaştırıldığında artmış gücünden dolayı genellikle derin KOH bağlantıları için kullanılır. Buna rağmen DKM tekniği yüksek bant genişliği ve dar senkronizasyon ihtiyacından dolayı karmaşık bir kablosuz tasarımına ihtiyaç duyar. Şekil 2.10'da modülasyon türleri ağaç diyagramı ile gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Modülasyon türleri ağacı.

2.5.1. Gauss Atmosferik Kanal İçeren Aç-Kapa Anahtarlama

KOH sistemlerinde Yoğunluk Modülasyonu / Direkt Sezim için en fazla kullanılan modülasyon yöntemi “Aç-Kapa Modülasyon (AKM)” yöntemidir. Pratik olarak gerçekleştirilebilirliği en kolay olan modülasyon tekniğidir. Bir bakıma “Genlik-Kaydırmalı Modülasyon” türünün basit biçimidir. Bir veri iletiminin gönderiminde genlik ile ifade edilirken ve darbe sinyali gönderilirken, veri iletiminin yapılmadığı zamanlarda sessiz ve duyarsız kalarak tepki vermez. Veri iletimi sırasında gerçekleşen darbelerin verimliliği adına “görev süresi (duty cycle)” vardır. Bu görev süreleri içerisinde birden küçük (yani veri iletiminde bant genişliğini tam kapasite ile kullanamaması), kullanılacak bant genişliği alanı artarken ortalama iletilen güç azalmaktadır. “Aç-Kapa Modülasyonlu / Sıfıra Dönen” sinyaller görev süreleri ile beraber Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11: Aç-Kapa Modülasyonlu (AKM) / Sıfıra Dönen (SD) Sinyallerin Görev Süreleri.

Sinyaller herhangi bir atmosfer ortamında iletilirken Gauss gürültüsü ile toplanarak iletimlerini tamamlarlar. Bu neden ile tezde performans analizi yapılırken “Sıfıra dönmeyen (NRZ) / Aç-Kapa Modülasyonu (AKM)” ‘nun toplamsal beyaz Gauss gürültülü kanaldaki performans analizi yapılacaktır.

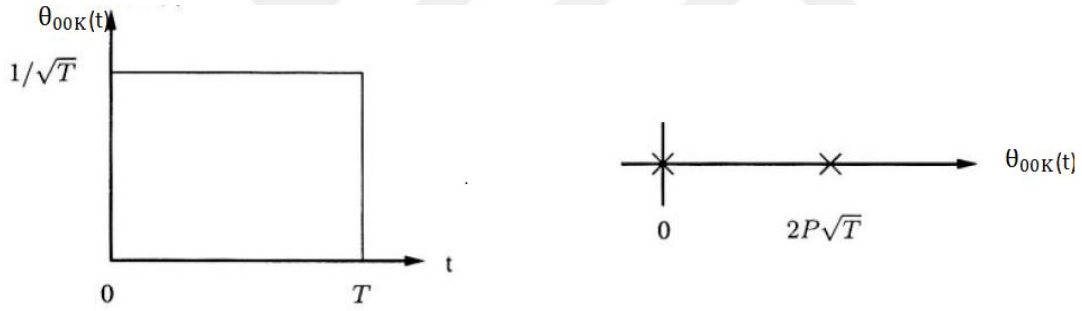
AKM ikili modülasyon türüne sahip olup, her biri eşit olasılıkla seçilip gönderildikten sonra, iletilen sinyallerin güç ortalamaları P_t 'ye eşit olması için ve iletilen veri olmadığı zaman herhangi bir güç harcanmadığından iletim yapılırken harcanan güç $2P_t$ 'ye eşit olmaktadır. Bu sinyallerin taban fonksiyonları cinsinden gösterimi eşitlik 2.17'de ifade edilmiştir [16]:

$$\theta_{00K}(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \quad (2.17)$$

Eşitlik 2.17'de ifade edilen $\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)$ zamana bağlı olarak gönderilen kare darbeyi temsil etmektedir ve tanım aralığı aşağıdaki gibidir:

$$\text{rect}(t) = \begin{cases} 1 & , \quad 0 \leq t < 1 \\ 0 & , \quad \text{diğer} \end{cases} \quad (2.18)$$

Bir boyutlu uzayda AKM'nin taban fonksiyonu aşağıda gösterilmiştir [16]:



Şekil 2.12: AKM'nin taban fonksiyonu ve yıldız diyagramı.

Hata olasılık hesabında faydalanılan yöntemlerden biri yıldız diyagramıdır. Yıldız diyagramı ile AKM kullanıldığında toplamsal beyaz Gauss gürültü altında veri hata olasılığı bit cinsinden aşağıdaki gibi verilmiştir [17]:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (2.19)$$

2.5.2. Darbe Konum Modülasyonu (DKM)

DKM, KOH sistemlerinde iletim verimliliğini arttırmaya yarayan başlıca modülasyon tekniklerinden biridir. DKM ortogonal temel-bant modülasyon tekniğidir ve herhangi bir diğer temel-bant modülasyon teknikleri ile karşılaştırıldığında üstün güç verimliliği olduğu için optik haberleşmede yaygın bir şekilde çalışılır. Bu teknik AKA modülasyonu'nun güç verimliliğini geliştirebilir ancak daha fazla karmaşık bir yapı ve daha fazla bant genişliği ihtiyacına gereksinim duyar. Daha üstün güç verimliliği özelliğine sahip olması düşük güç tüketimi olan taşınabilir cihazlar için daha uygun hale getirir.

Bu uygulamada, M-DKM boş olarak kalmış dilimler ile beraber M zaman dilimi içinde M-DKM bir zaman diliminin tek darbesinden oluşur. Bilgi bir zaman dilimi içinde sıfır olmayan optik yoğunluğun iletilmesi ile gönderilir, diğer dilimler ise kullanılmaz. $\log_2 M$ veri bitlerinin her bir bloğu M sembol ile eşleştirilir. M-DKM gösterimi seviyesini göstermek için yaygın bir şekilde kullanılır. Her sembol bir dilimi oluşturan P sabit optik darbe gücünden oluşur, geriye kalan $M-1$ dilim ise boş kalır. Darbenin pozisyonu $\log_2 M$ veri bitlerinin ondalık değerine karşılık gelir. Dolayısı ile bilgi zamanının içerisinde darbenin pozisyonuna göre kodlanır [18].

DKM için taban fonksiyonları $k \in M$ aşağıdaki gibi üretilir [16]:

$$\varphi_m(t) = \sqrt{\frac{M}{T}} \text{rect} \left(\frac{t - \left(\frac{T}{M}\right)(k-1)}{\frac{T}{M}} \right) \quad (2.20)$$

Şekil 2.13'te 4-DKM örneği gösterilmiştir [18].

Kaynak Veri	4-DKM
00	
01	
10	
11	

Şekil 2.13: Taban fonksiyonları ile 4-DKM gösterimi [18].

Taban fonksiyonları ile kanaldan gönderilen yoğunlaştırılmış dalga biçiminin zaman bölgesinde temsili aşağıdaki gibidir [16]:

$$x(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} MP \sqrt{\frac{T}{M}} \varphi_i(t - iT) \quad (2.21)$$

Darbeler yapılarından dolayı her zaman negatif olmayandır. Her bir sembolün ortalama gücü, her bir sembolün tepe değerini $M * P$ olarak ayarlayarak P 'de sabitlenir. Bu sistem içerisindeki bilgi sembol aralığı içerisinde darbenin konumunda iletilir.

DKM için hata olasılığı, her bir yıldız diyagramı takımının diğerlerine dik olduğu dikkate alınarak hesaplanabilir. Buna ek olarak her bir yıldız diyagramı nokta gösterimi diğer tüm noktalara eşit uzaklıktadır. Geometrik temsile dayanarak, bit hata olasılığı [17]:

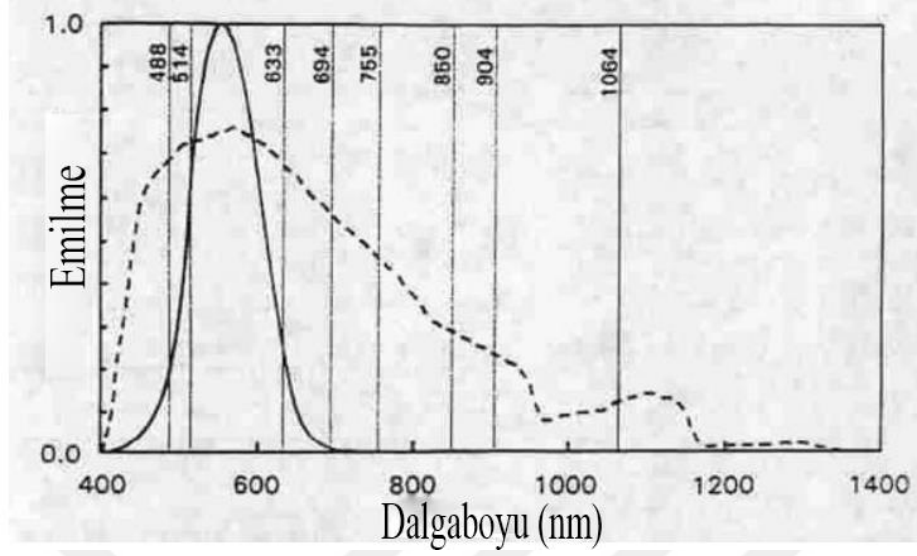
$$P_b = \frac{M}{2} Q \left(\frac{E_b}{N_o} \sqrt{\log_2 M} \right) \quad (2.22)$$

İşgal edilen first-null bant genişliği $B = \frac{M}{T} = MR_s$ olarak ifade edilir. Aşağıda belirtilen eşitlik ise verilmiş olan bant genişliği tanımına göre ve $R_s = R / \log_2 M$ olduğundan bant verimliliğini ifade eder [16].

$$\frac{R}{B} = \frac{1}{M} \log_2 M \frac{\text{bits/s}}{\text{Hz}} \quad (2.23)$$

2.5.3. Göz Güvenliği ve Standartları

Optik haberleşme sistemlerinin tasarımında, çabalar optik radyasyonun güvenli olması ve kurulabilecek temaslarda insanlara zarar vermemesini sağlamak için gayret gösterilmelidir. Optik ışınlar hem deri hem de gözde yaralanmalara sebep olabilir. Fakat gözün odaklanma yetisi ve yoğun optik enerjiden dolayı gözdeki hasar çok daha önemli. Göz retina üzerinde 0.4-1.4 μm dalga boyları civarında toplanan ışığa odaklanabilir. Diğer dalga boyları enerji odaklanmadan önce gözün ön kısmı tarafından (kornea) emilme eğilimindedirler. Şekil 2.14 farklı dalga boylarında gözün emilimini göstermektedir.



Şekil 2.14: Farklı dalga boylarında gözün emme tepkisi [19].

Optik ışının güvenliği üzerine kılavuzluk sağlayan çok sayıda uluslararası standart kuruluşlar vardır. Bunların arasında önemli olan [19];

Cihazlar ve Radyolojik Sağlık Merkezi (CDRH) - Birleşik Devletler Gıda ve İlaç İdaresi 'ndeki (FDA) bir ajanstır. Kanunlar ile yürürlüğe konulan lazerler ve lazer ekipmanları için düzenleyici standartları belirler [19].

Amerika Ulusal Standartlar Enstitüsü (ANSI) – Lazer kullanımı için standartları yayınlamaktadır. ANSI standartları kanunlar ile yürütülmez fakat çeşitli devlet düzenleme kurumları tarafından benimsenen karşılaştırılabilir yasal standartların yanında, Birleşik Devletler İş Güvenliği ve Sağlık İdaresi (OSHA) yasal standartları için temel oluştururlar [19].

Elektro-teknik Standartlandırma için Avrupa Kurulu (CENELEC) – 19 Avrupa üyesi ülkeler tarafından yapılan tavsiye üzerine elektro-teknik standartları belirleyen bir kuruluştur. CENELEC standartları yasalar ile direk yürürlüğe koyulamaz fakat IEC standartlarında olduğu üzere, ülkelerin kendileri tarafından yasal gerekliliklerin içine entegre edilmiştir [19].

Uluslararası Elektro-teknik Kurulu – Lazer ve lazer ekipmanlarını içeren tüm elektrik ekipmanları içeren uluslararası standartları belirler. Bu standartlar eş zamanlı olarak kanunlar ile yürürlüğe girmez. IEC standartlarının benimsenmesi ve uygulanması tek tek ülkelerin takdirindedir [19].

Bu organizasyonların her biri lazerlerin sınıflandırma yollarını geliştirmiştir. Özel kriterler bir kuruluştan diğerine az değişiklik gösterir. Fakat burada IEC sınıflandırması ele alınacaktır. Lazerler genellikle 4 gruba ayrılır, sınıf 1'den sınıf 4'e kadar. Sınıf 1 en az kuvvetli, sınıf 4 ise en kuvvetli sınıftır. Her bir sınıf kabul erişilebilir emisyon sınır ölçümleri ile tanımlanır. Bunlar optik kaynağın dalga boyuna, vericinin geometrisine ve kaynağın yoğunluğuna bağlıdır [16].

Tablo 2.3 ve 2.4 IEC 60825-1 ve CDRH standartlarının tekrar gözden geçirilerek özelleştirilmiş sınıflandırma sistemi için ana karakteristiği ve ihtiyaçları sunar [4].

Tablo 2.3: Dalga boyu 850 nm boyutunda lazerlerin IEC 60825-1 standartlarına göre sınıflandırılması [4].

Lazerin sınıfı	Güç (mW)	Açıklık Boyutu	Mesafe (mm)	Güç Yoğunluğu (mW/cm ²)
CDRH Sınıf I (eski)	0.076	7	200	0.20
IEC Sınıf I (eski)	0.44	50	100	0.02
IEC Sınıf IIIA (eski)	2.2	50	100	0.11
IEC/CDRH Sınıf I (yeni)	0.78	7	14	2.03
IEC/CDRH Sınıf IM (yeni)	500	7	14	1299.88
IEC/CDRH Sınıf IM (yeni)	500	50	2000	25.48
IEC/CDRH Sınıf IIIR (yeni)	3.9	7	14	10.14

Tablo 2.4: Dalga boyu 1550 nm boyutunda lazerlerin IEC 60825-1 standartlarına göre sınıflandırılması [4].

Lazerin sınıfı	Güç (mW)	Açıklık Boyutu	Mesafe (mm)	Güç Yoğunluğu (mW/cm ²)
CDRH Sınıf I (eski)	0.79	7	200	2.05
IEC Sınıf I (eski)	10	50	100	0.51
IEC Sınıf IIIA (eski)	50	50	100	2.55
IEC/CDRH Sınıf I (yeni)	10	7	14	26
IEC/CDRH Sınıf IM (yeni)	500	7	14	1299.88
IEC/CDRH Sınıf IM (yeni)	500	25	2000	101.91
IEC/CDRH Sınıf IIIR (yeni)	50	25	2000	10.19

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. GİRİŞ

Uyarlanabilir modülasyon zamanla değişen kanallar üzerinde güçlü ve spektral olarak etkili iletim sağlar. Temel öncelik iletim uygulamasını kanal karakteristiğine göre uyarlayabilmek için alıcıda kanalı kestirme olacaktır ve bu kestirimi vericiye geri beslemek olacaktır. Sönümlenmeli koşullara uyarlanmamış modülasyon kanal kalitesi zayıf olduğunda kabul edilebilir performansı korumak için sabit bağlantı marjına ihtiyaç duyar. Bundan dolayı bu sistemler kötü durum kanal koşulları için etkin bir şekilde tasarlanır. Kanala uyarlamak ihtiyaç duyulan iletim gücünü düşürür. Düşük güçte ya da yüksek veri hızında göndermek için uygun kanal koşullarından yararlanarak ortalama bit hata olasılığını azaltabilmekte veya BGV' yi arttırabilmektedir [20].

Uyarlanabilir modülasyonun ne zaman kullanılmasına belirleyecek birkaç pratik sınırlamalar vardır. Uyarlanabilir modülasyon alıcı ve verici arasında geribesleme yoluna ihtiyaç duyar, ki bazı sistemler için mümkün olmayabilir. Ayrıca, kanal güvenli bir şekilde kestirilip vericiye geri besleme ile gönderilmesinden daha hızlı değişirse, uyarlanabilir teknikler kötü performans gösterecektir. Bir çok kablosuz kanal farklı zaman ölçeklerinde değişkenlikler gösterir: Çok yollu sönümleme; bu çok hızlı değişen kanaldır, Gölgeleme; çok yavaş değişen kanaldır. Sıklıkla kanal durum bilgisi yavaş değişen kanallar izlenebilir ve uyarlanabilir. Bu durumda çoklu yol etkilerini gidermek için düz sönümlemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Kanal log-normal kanal olduğundan uyarlanabilir modülasyon bulgularında da sunulduğu üzere etkili bir performans sergilemiş olup etkin başarımlarını sonuçları sunulmuştur.

Sonuç olarak, uyarlanabilir modülasyon kanal koşullarına göre veri iletim hızını değiştirir. Kötü kanal koşullarında ortalama güç kısıtlaması altında uyarlanabilir modülasyonun BGV, veri hızını çok küçük ya da sıfıra ayarlayarak maksimum yapılır.

Bu kısımda öncelikle röle desteksiz uyarlanabilir yavaş sönümlenmeli kanalda güç sınırlaması altında, kanal durumuna bağlı olarak uygun modülasyon boyutunu seçerek BGV arttırılacaktır. Daha sonra kaynak ile hedef arasında röle ya da röleler yerleştirilerek uyarlanabilir modülasyon ile BGV' nin maksimize edilmesi incelenecektir.

3.2. RÖLE DESTEKSİZ UYARLANABİLİR MODÜLASYON

Uyarlanabilir modülasyon tekniğinde kanalın durum bilgisi alıcıda kestirilip geri besleme yöntemi ile vericiye iletilir. Verici alıcıdan gönderilen kanal durumunun kestirilmesi ile elde edilen bilgiyi uyumlu hale getirir. Uyarlanabilir modülasyon ve diğer teknikler [20]' de incelenmiştir. Fakat KOH sistemlerinde uyarlanabilir ve diğer teknikler üzerindeki çalışmalar kısıtlıdır [18,19,20]. Uyarlanabilir modülasyon ve diğer teknikleri üzerinde KOH sistemleri üzerindeki başarımlarını ve kazanımlarını görebilmek ve geliştirebilmek için daha fazla araştırmalar yapılması gerekmektedir.

Uyarlanabilir modülasyon zamanla yavaş değişen kanallarda kullanılması kanalın uyumlu zamanı, sinyalin süresinden daha büyük olduğundan dolayı daha uygundur. Bu nedenle kanal durum bilgisinin kestirilip vericiye gönderilmesi mümkün olmaktadır. Daha önce de belirtildiği üzere KOH sistemlerinde atmosferik türbülans çok yavaş değişmektedir. Kanalın uyum zamanı 1-100 ms arasındadır. Bu sebepten dolayı kanalın sönmleme etkisi olağan haberleşme hızlarında gönderilen veri bitleri için durağan kalmaktadır [24]. Sistemin zamanla yavaş değişen atmosferik türbülans için uyumlu bir hale getirilmesi iyi bir yöntem olduğu düşünülmektedir.

Tezde KOH sistemleri için uyarlanabilir modülasyonun, uyarlanabilir tekniğin uygulanmadığı sistemlere nazaran kazanımları ve başarımlarını sonuçları incelenecek; ardından uyarlanabilir modülasyonla beraber verici ve alıcı arasına röle yerleştirilerek uyarlanabilir modülasyona katkısı elde edilecektir. Tezin sonucunda hem modülasyon boyutunu hem de röle desteğinin kanal durum bilgisine göre değiştirilerek uyarlanabilir modülasyon ve röle desteği elde edilecektir.

3.2.1. Kanal Yapısı

Bölüm 2.4' te de ifade edildiği üzere optik radyasyon atmosferde bulunan partiküller ve moleküller tarafından yutulur ya da hareket yönleri değiştirilir. Bu durum da optik ışının gücünde azalmaya sebep olmaktadır. Ayrıca türbülansın atmosferde ısı dalgalanmalarına, bu dalgalanmalarında ortamın kırılma indisini etkilediğinden optik radyasyonun gücünde dalgalanmalara sebep olur.

Yoğunluk modülasyonlu/direkt sezim (YM/DS) KOH sistemleri üzerinde çalışılarak hem saçılmanın etkisinin olduğu yol kaybı (Path Loss) hem de türbülansın etkisini içeren sönümlenmeli kanal yapısı düşünülmüştür. Kanal yapısını matematiksel olarak ifade ederken h_l yol kaybını ve h_a ise türbülans içeren sönümlenme katsayısını temsil etmektedir. Ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$H = h_l h_a \quad (3.1)$$

Yol kaybı (h_l) Beer-Lambert kanununa göre aşağıdaki gibi yazılabilir [4].

$$h_l = \exp(-\sigma d) \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2' de d kaynak ile hedef arasındaki iletim mesafesini ve σ dalga boyuna, görüş mesafesine bağlı olarak zayıflama katsayısını ifade etmektedir. Zayıflama katsayısını bulmak için aşağıdaki eşitlik kullanılır [4].

$$\sigma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (3.3)$$

Eşitlik 3.3' te ifade edilen V kilometre cinsinden görüş mesafesini ve λ nanometre cinsinden iletilen optik radyasyonun dalga boyunu göstermektedir. q ise görüş mesafesine bağlı olarak Kim modeli için [4]:

$$q = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0.16V + 0.34 & 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \\ V - 0.5 & 0.5 \text{ km} < V < 1.6 \text{ km} \\ 0 & V < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (3.4)$$

Kruse modeli için [4]:

$$q = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0.585V^{\frac{1}{3}} & V < 6 \text{ km} \end{cases} \quad (3.5)$$

Optik ışın atmosfer ortamında ilerlerken daha önce bölüm 2.3 ve 2.4' te bahsedildiği üzere türbülansın neden olduğu genlik ve faz dalgalanmalarından etkilenir. Türbülansın etkisinin zayıf olduğunu varsayarak, modellemek istenildiğinde log-normal dağılım ile modellenir. Türbülansın zayıf olduğu varsayılan log-normal dağılım ile modellenen kanal $h_a = \exp(X)$

olarak ifade edilir. Burada X , μ_x ortalamalı ve σ_x^2 varyanslı Gauss rasgele değişkenini göstermektedir. Log-normal dağılımın varyansı bölüm 2.4.3' te ifade edilmiştir. Log-normal kanalın varyansı atmosferik parametreler cinsinden eşitlik 2.10' da ifade edildiği üzere $\sigma_1^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ şeklindedir. Bölüm 2.4.3' te türbülansın sebep olduğu sönümlenmenin ortalama gücü arttırmadığı veya azaltmadığı ifade edilmiştir. Dolayısı ile türbülans içeren sönümlenmeli kanalın karesinin beklenen değeri bire eşit olmalıdır ($E[h_a^2] = 1$). Bu eşitliği $\mu_x = -\sigma_x^2$ şeklinde seçerek elde ederiz. Sonuç olarak sönümlenmeli kanalın olasılık yoğunluk fonksiyonunu eşitlik 2.13'ün yardımı ile tekrar yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir [36].

$$p(h_a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} \frac{1}{h_a} \exp\left\{-\frac{[\ln(h_a) + \sigma_1^2]^2}{2\sigma_1^2}\right\} \quad (3.6)$$

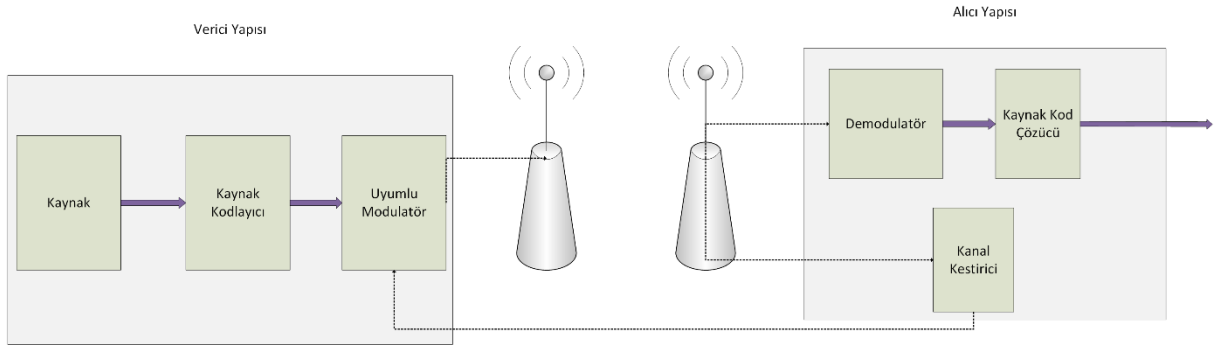
3.3. RÖLE DESTEKLİ UYARLANABİLİR MODÜLASYONLU SİSTEM MODELİ

Bu bölümde beyaz Gauss gürültü ile modellenmiş YM/DS optik kanal üzerinde röle ile desteklenmiş KOH düşünülmüştür. Seri bir şekilde yerleştirilmiş çöz-ve-aktar (ÇA) yöntemi kullanılacaktır. ÇA yöntemi kullanılacak olan sistemde röleler, KOH sistemlerinde optik verici ve alıcı arasında yönlendirilmiş ışın yayını ve izolasyon kabiliyeti sayesinde herhangi bir rölenin kendi girişimini veya diğer rölelerin bir diğer röleye olan girişimini önler. Bundan dolayı röleleri tam-çift yönlü ve KOH kanalının girişiminin olmadığı kabul edilir [25].

N tane seri bir şekilde röle ile desteklenmiş KOH haberleşme sistemi verici ile alıcı arasına yerleştirilmektedir. Düşünülen koşullar altında sistem M-DKM uygulanmış YM/DS' i kullanır. Alıcı M-DKM' nin hem sinyal darbesinde hem de iletim olmayan darbeler üzerinde sezilmiş fotoakımları toplar. Alıcı aşağıda verilen elektrik sinyalini elde eder.

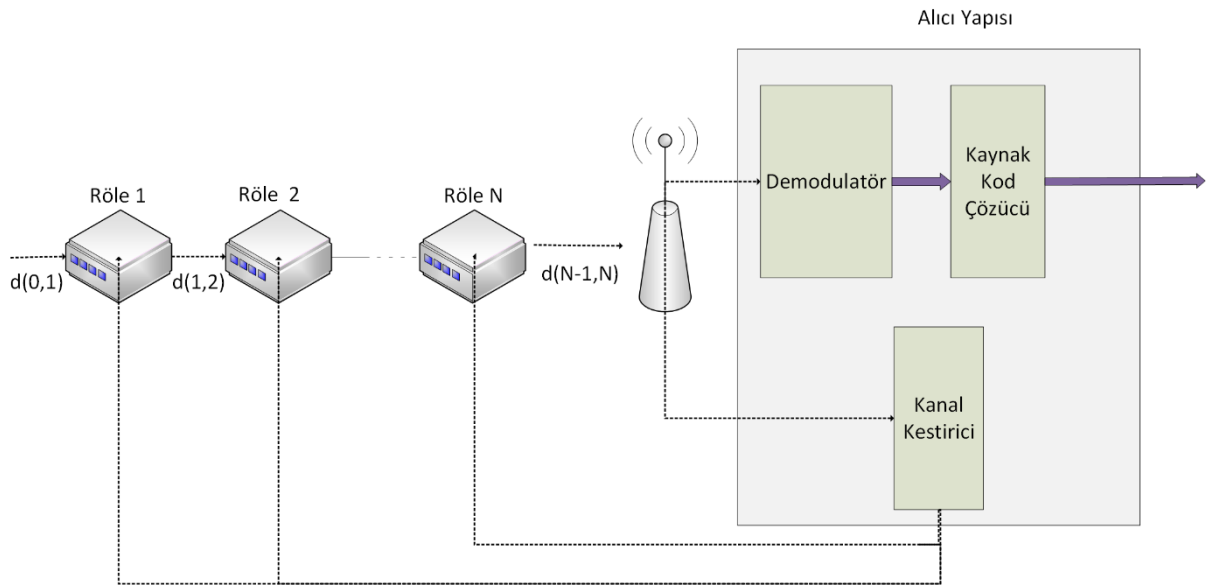
$$r_i = \rho g_{i-1,i} P_{a,transmitted} x_i + n_i \quad (3.7)$$

Verilen eşitlikte ρ dedektörün tepkeme süresini, $g_{i-1,i}$ kanal kazancını, $P_{a,transmitted}$ iletilen ortalama gücü ve n_i ise beyaz Gauss gürültüsünü ifade eder. Röle desteksiz uyarlanabilir modülasyonlu sistemin blok diyagramı aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Röle desteksiz uyarlanabilir modülasyon blok şeması.

Tezde sistem modeline seri sıralı röle desteği eklenecektir. Seri sıralı röle desteği aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Sıralı röle destekli uyarlanabilir modülasyonlu sistem blok şeması.

Şekil 3.2' de vericiden iletilen uyumlu yoğunluk modülasyonlu sinyal röleye ulaşır. Röle ÇA yöntemi ile röle direkt sezimden sonra sinyali çözer ve tekrar kanala uyumlu bir şekilde modülasyon boyutunu belirleyerek bir sonraki röleye iletim yapar. Bu iletim röle adedince alıcıya ulaşana kadar devam eder.

3.3.1. Çöz-ve-aktar (ÇA) Röle

ÇA rölede, röle direkt sezimden sonra sinyali çözer ve tekrar kanal durum bilgisine göre M-DKM ile modüle edip bir sonraki röleye veya alıcıya aktarır. I' 'nci rölede alınan sinyal eşitlik

3.7' de verilmiştir. Seri sıralanmış rölede iletilen ortalama güç ($P_{a,transmitted}$) iletilen toplam güç ile ilişkili olarak seri röle iletimi için $P_{a,transmitted} = \frac{P_{total}}{N+1}$ ile ifade edilir. Eşitlik 3.7' de ifade edilen i . ile $(i+1)$. kaynak ve hedef arasındaki kanallar normalize edilmiş sönümlenmeli kanal kazancı $g_{(i,i+1)}$ aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$g_{(i,i+1)} = h_{a,(i,i+1)}^2 L_{(i,i+1)} \quad (3.8)$$

$L_{(i,i+1)}$ parametresi i . ve j . bağlantılar arası normalize edilmiş yol kaybını ifade eder ve $L_{(i,i+1)} = h_l(d_{i,i+1})/h_l(d_{0,N+1})$ ile yazılır. Bu normalizasyon farklı mesafelerde KOH sistemlerinin performans analizlerini kolaylaştırır.

3.3.2. Röle Destekli Uyarlanabilir Modülasyon Tekniği

KOH sistemlerinde BGV' yi ve uygun iletim gücünü kullanabilmek için vericideki parametreler kanal durum bilgisine göre uyarlanabilir. Bu başlığımızda röle destekli uyarlanabilir modülasyon tekniği geliştirilecektir. Uyarlanabilir modülasyonda BGV' yi maksimum yapabilmek için kanal durumuna göre en uygun modülasyon boyutu seçilecektir. M-DKM kullanılarak uyarlanabilir modülasyon sistemi kanalın iyi olduğu durumda modülasyon boyutunu düşürecek, kanal durum bilgisinin kötü olduğu durumda ise modülasyon boyutunu arttıracaktır. Eğer kanal kazancımız belli bir eşik değerinin altına düşer ise göz güvenliği için iletim yapılmayacaktır.

Kanal durum bilgisi vericiye aktarıldığında, M-DKM için sönümlenmeli kanal katsayısına bağlı olarak koşullu bit hata oranı eşitlik 2.22' de ifade edildiği üzere $P_b = \frac{M}{2} Q\left(\frac{E_b}{N_o} \sqrt{\log_2 M}\right)$, burada $\frac{E_b}{N_o}$ ifadesini $Y_{adaptive}$ ifadesi ile yer değiştirirsek yeni ifade aşağıdaki gibi olur.

$$P_b = \frac{M}{2} Q\left(Y_{adaptive} \sqrt{\log_2 M}\right) \quad (3.9)$$

$Y_{adaptive}$ terimi kanal durum bilgisine sahip olduğu durumdaki anlık sinyal-gürültü oranı olarak düşünülür. Eşitlik 3.9' da verilen denklemde $Q(\cdot)$, $Q(a) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right) \int_a^\infty \exp(-t^2/2) dt$ ile tanımlanır ve M ise modülasyon boyutunu ifade eder. $Y_{adaptive}$ i . ve $(i+1)$. kaynak ve hedef arasındaki kanal durum bilgisine sahip anlık SGO aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Y_{\text{adaptive},(i,i+1)} = \rho g_{(i,i+1)} P_{a,\text{transmitted}} \sigma_n \quad (3.10)$$

Hedeflenen bit hata oranı $P_{b,th}$ olarak verildiğini varsaydığımızda eşitlik 3.9 tekrar $Y_{\text{adaptive},j}$ cinsinden yazıldığında aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$Y_{\text{adaptive},(i,i+1)} = \frac{1}{\sqrt{\log_2 M}} Q^{-1}\left(\frac{2P_{b,(i,i+1)}}{M}\right) \quad (3.11)$$

Daha önce bölüm 2.5’ te ifade edilen lazer ve göz güvenliği için verici gücünün tepe değerini sınırlandıran uluslararası standartlara riayet edilmesi gerekmektedir. Dolayısı ile vericiden iletilen anlık güç, uluslararası standart olarak kabul edilen maksimum güç tepe değeri P_{std} olarak verildiğinde $P_{a,\text{transmitted}} \leq P_{std}$ sınırı sağlanmalıdır. İletilen ortalama güç kanal kazancı cinsinden $P_{a,\text{transmitted}} = (Y_{\text{adaptive},(i,i+1)} \sigma_n) / (\rho g_{(i,i+1)})$ yazılabilir. Burada kanal kazancının çok düşük olduğu durumlarda iletilen ortalama güç çok yüksek olacağından dolayı standart tepe güç değerini (P_{std}) geçecektir. Kanal lazer ve göz güvenliğinden dolayı servis dışı kalacaktır. Dolayısı ile belirlenen β değerinden küçük olduğu durumlarda kanalın servis dışı kalacağı düşünülecektir ve iletilen ortalama güç ($P_{a,\text{transmitted}}$) “0” yapılacaktır. Bu koşullar kanalın servis dışı kalma durumudur. Sonuç olarak iletilen ortalama gücü aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$P_{a,\text{transmitted}} = \begin{cases} 0 & g_{(i,i+1)} > \beta \\ \frac{\sqrt{Y_{\text{adaptive},(i,i+1)} \sigma_n}}{\rho g_{(i,i+1)}} & g_{(i,i+1)} \leq \beta \end{cases} \quad (3.12)$$

Servis dışı kalma olasılığı (SDKO) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_{\text{kesinti}} = P\{g_{(i,i+1)} \leq \beta\} = P\left\{h_{a,(i,i+1)}^2 \leq \frac{\beta}{L_{(i,i+1)}}\right\} = \int_0^{\sqrt{\frac{\beta}{L_{(i,i+1)}}}} p(h_a) dh_a \quad (3.13)$$

SDKO log-normal dağılıma sahip olduğundan integralin sonucu elde etmek için log-normal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu üzerinden elde edilir. Kanalın SDKO aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_{SDKO,(i,i+1)} = \Pr(P_{a,transmitted} > P_{std}) = P\{g_{(i,i+1)} \leq \beta\} \quad (3.14)$$

$$= P\left\{h_{a,(i,i+1)}^2 \leq \frac{\beta}{L_{(i,i+1)}}\right\} = \int_0^{\sqrt{\frac{\beta}{L_{(i,i+1)}}}} p(h_a) dh_a$$

$$= \int_0^{\sqrt{\frac{\beta}{L_{(i,i+1)}}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \frac{1}{h_a} \exp\left\{-\frac{[\ln(h_a)+\sigma_1^2]^2}{2\sigma_1^2}\right\} dh_a$$

$$\frac{[\ln(h_a)+\sigma_1^2]}{\sigma_1} = u$$

$$= \int_{-\infty}^{(\ln(\sqrt{\frac{\beta}{L_{(i,i+1)}}})+\sigma_1^2)/\sigma_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[u]^2}{2}\right\} du$$

$$P_{SDKO,(i,i+1)} = Q\left(\frac{\ln\left(\sqrt{\frac{L_{i,i+1}}{\beta}}\right)}{\sigma_1} - \sigma_1\right)$$

$$\beta = L_{i,i+1} \exp(-2\sigma_1 Q^{-1}(P_{kesinti,(i,i+1)}) - 2\sigma_1^2)$$

Kanalın i . ve $(i+1)$. kaynak ve hedef arasındaki kanalın SDKO hedeflenen SDKO türünden ve belirlenen β kanal kazancı türünden ifade edersek aşağıdaki eşitliği ifade ederiz.

$$\beta = L_{i,i+1} \exp(-2\sigma_1 Q^{-1}(P_{kesinti,(i,i+1)}) - 2\sigma_1^2) \quad (3.15)$$

Lazer ve göz güvenliği için uluslararası standart tepe güç değeri koşulunu da göz önünde bulundurulduğunda eşitlik 3.14' ten elde edilen β değeri, aşağıdaki eşitsizliği sağlamak zorundadır.

$$\frac{\sqrt{Y_{adaptive,(i,i+1)}}\sigma_n}{\rho P_{std}} \leq \beta \quad (3.16)$$

$Y_{adaptive,(i,i+1)}$, eşitlik 3.10' dan da görülebileceği üzere M' nin azalan bir fonksiyonudur. M' ye karşılık gelen SGO, eşitlik 3.15' i sağladığı takdirde kendisinden büyük M değerlerini de sağlar. Dolayısı ile M kümesini oluşturan minimum değer eşitlik 3.15' i sağlar ise kümede olan ve minimum değerden büyük tüm modülasyon boyutları da eşitliği sağlar. M kümesini

oluşturan ve eşitlik 3.15' i sağlayan minimum değer maksimum Y_{max} değeri olacaktır. Dolayısı ile ilk olarak SDKO için β değeri elde edilir. Elde edilen β değerinin $\frac{\sqrt{Y_{max}} \sigma_n}{P_{std} \rho} < \beta$ şartını sağlayıp sağlamadığına bakılır. Eğer sağlıyor ise, M kümesinden karşılık gelen SGO değeri için aşağıdaki şartı sağlayan minimum M değeri seçilir.

$$\frac{\sqrt{Y_{adaptive,(i,i+1)}} \sigma_n}{\rho L_{i,i+1}} \int_{\sqrt{\frac{\beta}{L_{i,i+1}}}}^{\infty} \left(\frac{1}{h_{a,(i,i+1)}^2} \right) dh_a \leq P_{std} \quad (3.17)$$

Seri sıralı röle destekli uyarlanabilir modülasyon sisteminde, sistemimizde var olan röleler için i . ve $(i+1)$. kaynak ve hedef arasındaki kanalın SDKO ve bit hata olasılığının hesaplanması eşitlik 3.16' yı hesaplayabilmek için gerekmektedir.

Seri sıralı röle ve ÇA yöntemi için SDKO aşağıdaki gibi hesaplanır [26].

$$P_{SDKO, hedeflenen} = 1 - \prod_{i=0}^N (1 - P_{SDKO,(i,i+1)}) \quad (3.18)$$

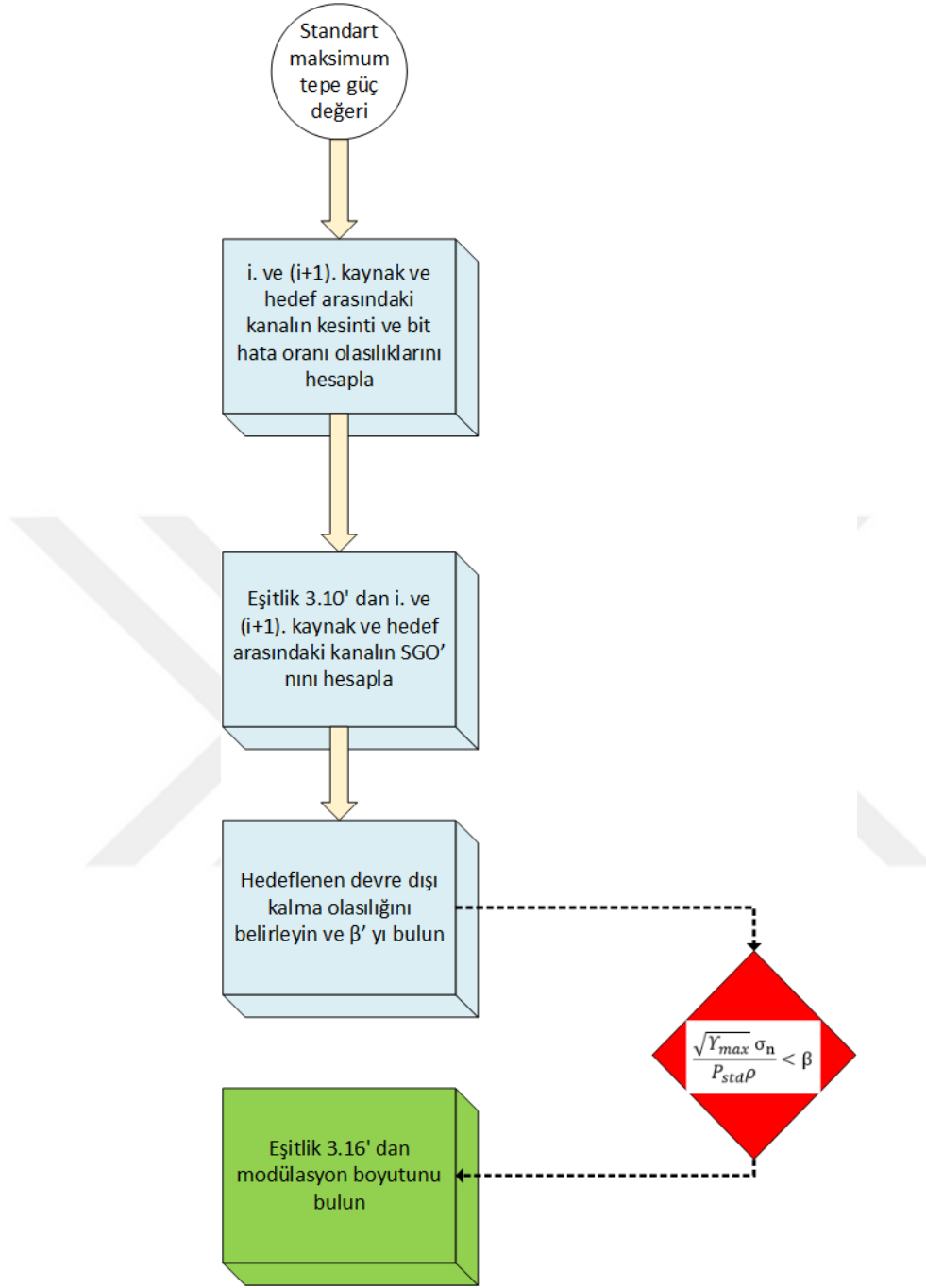
i . ve $(i+1)$. kaynak ve hedef arasındaki kanalın bit hata olasılığı aşağıdaki eşitlikten hesaplanır [27].

$$P_{b, hedeflenen} = \frac{1}{2} \left(1 - (1 - P_{b,(i,i+1)})^{N+1} \right) \quad (3.19)$$

Bulunan M değerine karşılık gelen BGV aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$B = \frac{\log_2 M}{M} \quad (3.20)$$

Röle destekli uyarlanabilir modülasyon sistemi algoritma akış diyagramı aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.3: Röle destekli uyarlanabilir modülasyon sistemi algoritma akış diyagramı.

4. BULGULAR

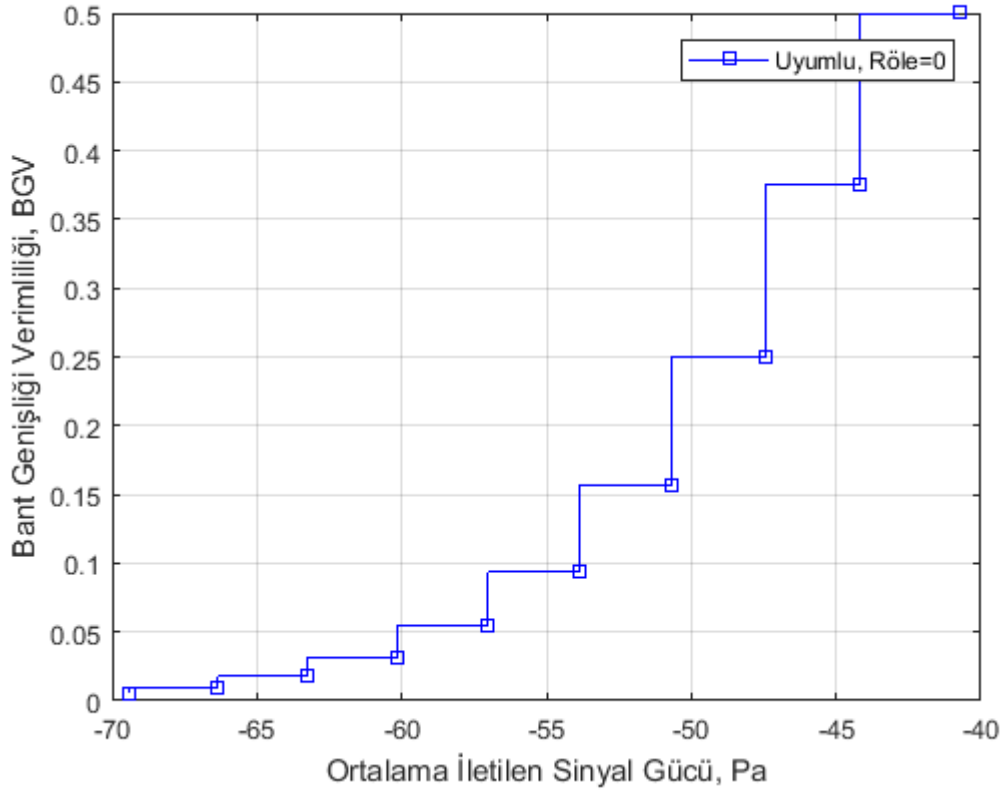
4.1. GİRİŞ

Bu bölümde önceki bölümlerde geliştirilen seri röle destekli KOH sistemleri ve röle desteksiz KOH sistemleri için uyarlanabilir modülasyon tekniğinin “MATLAB” bilgisayar programı kullanılarak “Monte Carlo” bilgisayar benzetim yöntemi başarımları sonuçları gösterilmiştir.

Başarımları sonuçlarının elde edilmesi için gerekli parametreler şu şekilde kabul edilmiştir: verici (transmitter) ve alıcı (receiver) arasındaki mesafe $d(0, N) = 2$ kilometre, optik radyasyonun yayın yaptığı dalga boyu $\lambda = 1550 \text{ nm}$, atmosfer kırılma yapı parametresi $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$, havanın açık görüş mesafesi $V = 10$ kilometre, toplamsal beyaz Gauss gürültüsü standart sapması $\sigma_n = 10^{-4}$, standart maksimum tepe güç değeri $P_{std} = 0.5 \text{ Watt}$, rytov varyans katsayısı $\sigma_R^2 = 0.07$, röle destekli ve desteksiz KOH sistemleri için uyarlanabilir modülasyon tekniğinde maksimum modülasyon boyutu $M = 2^{10}$, dedektör tepkisi $\rho = 0.5$, hedeflenen servis dışı (devre dışı) kalma olasılığı $P_{SDKO, hedeflenen} = 10^{-6}$ ve hedeflenen bit hata olasılığı $P_{b, hedeflenen} = 10^{-12}$.

4.2. RÖLE DESTEKSİZ KOH SİSTEMLERİ İÇİN UYARLANABİLİR MODÜLASYON BAŞARIM SONUÇLARI

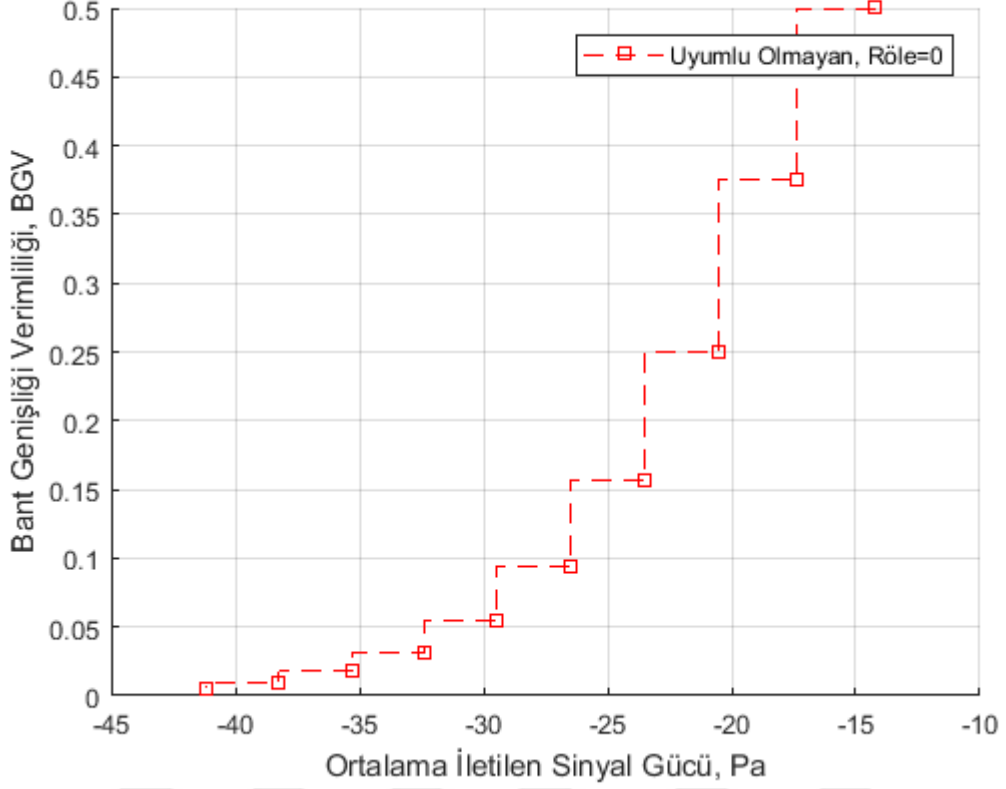
Şekil 4.1’ de gösterildiği üzere röle desteksiz uyumlu modülasyonun başarımları sonuçları verilmiştir. Burada BGV’ nin iletilen ortalama güce göre grafiği çizilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere görüş açısının 10 km olduğunu düşündüğümüz sistemde BGV’ nin 0.5 olduğu sistemde -40.72 dB ortalama verici gücünde (P_a) ulaşılmıştır. Başarımları grafiğinde uyarlanabilir sistemin BGV’ nin 0.25 eşit olduğu duruma -47.44 dB ortalama iletilen güçte (P_a) ulaşılır.



Şekil 4.1: Rôle desteksiz uyumlu modülasyon başarımları grafiği ($V = 10 \text{ km}$, $C_n^2 = 10^{-15}$).

Şekil 4.2' de gösterilen grafikte rôle desteksiz uyumlu olmayan sistemin başarımları grafiği verilmiştir. Şekil 4.1 ile karşılaştırıldığı zaman rôle desteksiz uyumlu olmayan sistemin performansına göre başarılı sonuçlar elde edilmiştir. BGV' nin 0.5 olduğu durumda ortalama iletilen gücün (P_a) -14.20 dB' de elde edilmiştir. Aynı BGV için uyumlu sistemde -40.72 dB' de elde edilmiştir. Rôle desteksiz uyumlu olmayan sistemin BGV' nin 0.25 olduğu durumda iletilen ortalama gücün (P_a) -20.50 dB' de elde edilmiştir. Aynı BGV için uyumlu sistemde -47.44 dB' de elde edilmiştir.

Sonuçlardan da görülebileceği üzere uyumlu modülasyon yaklaşık 26 dB' lik kazanç sağlamaktadır.



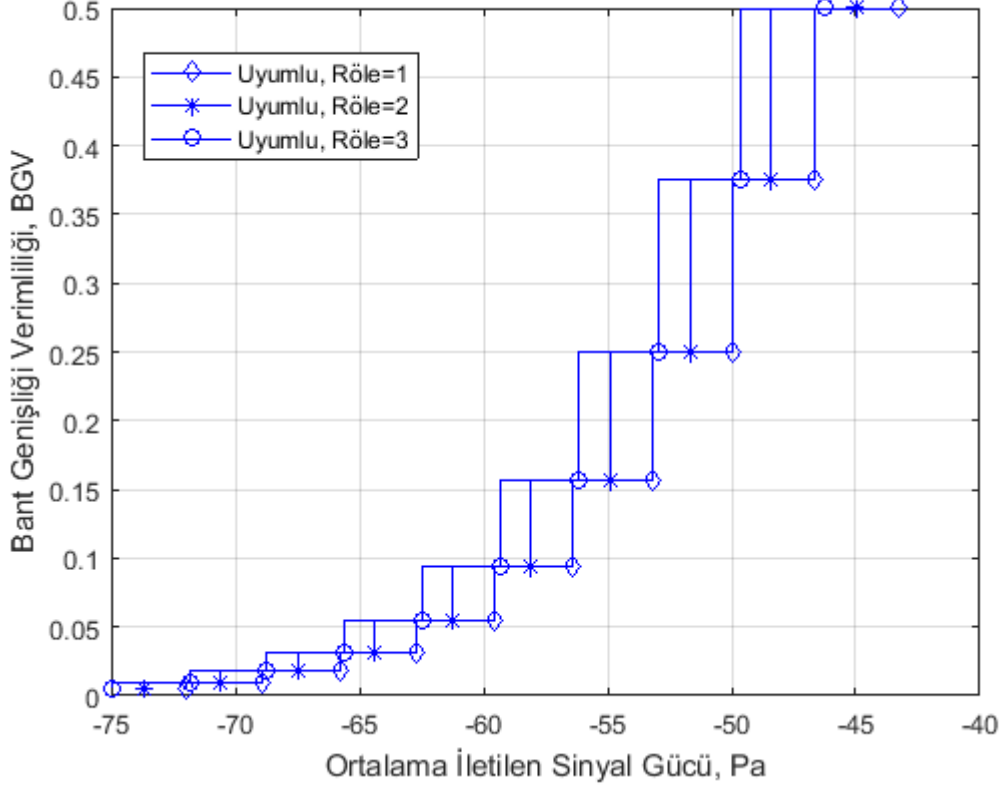
Şekil 4.2: Röle desteksiz uyumlu olmayan sistemin başarımlarını gösteren grafik ($V = 10 \text{ km}$, $C_n^2 = 10^{-15}$).

4.3. RÖLE DESTEKLİ KOH SİSTEMLERİ İÇİN UYARLANABİLİR MODÜLASYON BAŞARIM SONUÇLARI

Önceki bölümlerde röle desteksiz KOH sistemleri için uyarlanabilir ve uyarlanabilir olmayan sistemin başarımlarını verilmiştir. Röle desteksiz her iki sistemde, uyarlanabilir sistemin uyarlanabilir olmayan sisteme göre yaklaşık 26 dB'lik bir kazanç sağlanmaktadır. Fakat röle desteği ile beraber şekil 4.3 ve şekil 4.4'te de gösterildiği üzere her iki önceki sistemlere nazaran kayda değer başarımlar elde edilmiştir. Röle desteği ile beraber hem iletilen ortalama optik güç azaltılmakta hem de her iki önceki sistemlere nazaran aynı iletilen ortalama optik güçte daha fazla BGV elde edilmektedir.

Şekil 4.3'te gösterildiği üzere röle desteği ile beraber uyumlu modülasyonda başarımlarında ciddi bir kazanç sağlanmaktadır. Bir röle desteği ile beraber 0.5 BGV uyumlu modülasyonda -43.25 dB'de elde edilir. 0.25 BGV -49.97 dB'de elde edilir. İki röle desteği ile, 0.5 BGV uyumlu modülasyonda -44.96 dB'de elde edilir. 0.25 BGV -51.68 dB'de elde edilir.

edilir. Üç röle desteği ile beraber 0.5 BGV uyumlu modülasyonda -46.20 dB' de elde edilir. 0.25 BGV -52.92 dB' de elde edilir.

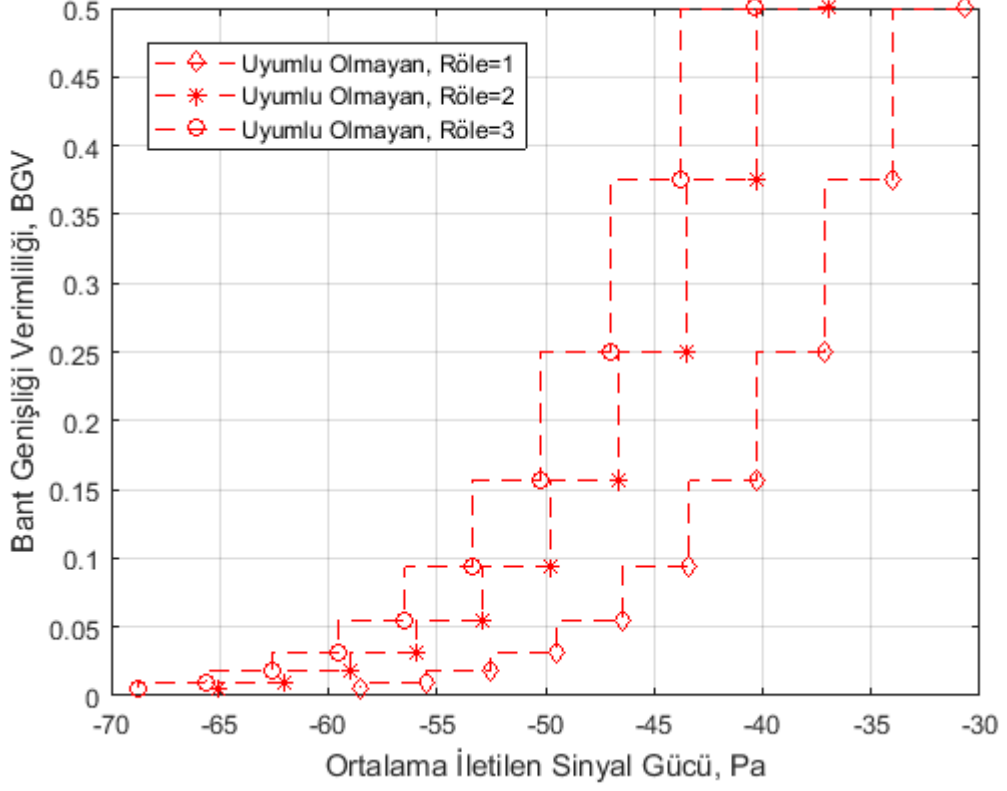


Şekil 4.3: Röle destekli uyumlu modülasyon başarımları grafiği ($V = 10 \text{ km}$, $C_n^2 = 10^{-15}$).

Şekil 4.3, şekil 4.4 ile karşılaştırıldığında röle desteği ile beraber ciddi bir kazanım elde edilmiştir. İletilen ortalama gücün aynı olduğu her iki sistem için, röle destekli uyarlanabilir sistem için daha iyi BGV elde edilmiştir. Röle desteğinin aynı zamanda uyarlanabilir sistemden bağımsız olarak iletilen ortalama gücü de azalttığı görülmektedir.

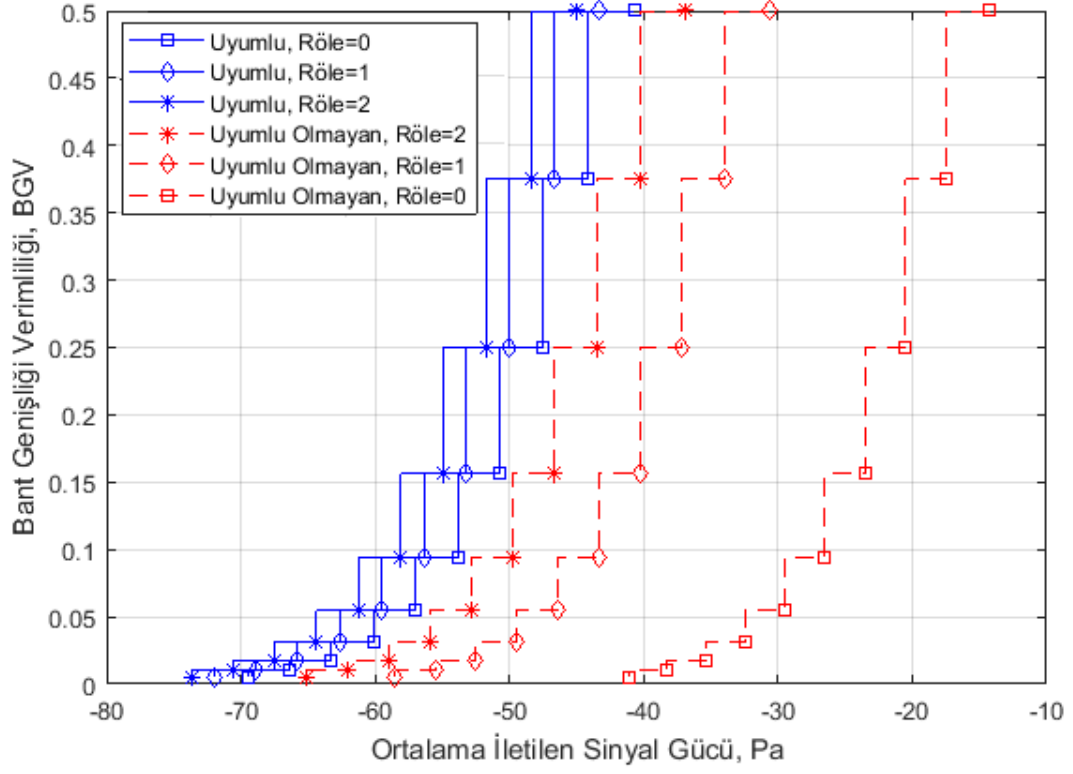
Şekil 4.4' te bir röle desteği ile beraber uyarlanabilir olmayan sistemin 0.5 BGV' de iletilen ortalama gücün -30.66 dB olduğu görülür. 0.25 BGV için iletilen ortalama gücün -37.18 olduğu gözlenmiştir. İki röle desteği ile beraber uyarlanabilir olmayan sistem için, BGV' nin 0.5 olduğu durumda iletilen ortalama gücün -36.92 dB olduğu gözlenir. 0.25 BGV' nin olduğu durumda iletilen ortalama güç -43.50 dB' dir. Aynı şekilde üç röle desteği ile beraber uyarlanabilir olmayan sistem için, BGV' nin 0.5 olduğu durumda iletilen ortalama gücün -40.41 dB olduğu gözlenir. 0.25 BGV' nin olduğu durumda iletilen ortalama güç -47.03 dB' dir.

Her iki grafik karşılaştırıldığında röle desteğinin uyarlanabilir sisteme, uyarlanabilir olmayan sisteme göre 6 dB ile 13 dB arasında değişen oranlarda kazanç sağlamaktadır.



Şekil 4.4: Röle destekli uyumlu olmayan sistemin başarımları ($V = 10 \text{ km}$, $C_n^2 = 10^{-15}$).

Şekil 4.5 ise her iki sistem için, röle destekli ve röle desteksiz aynı zamanda uyarlanabilir veya uyarlanabilir olmayan durumun başarımları verilmiştir.



Şekil 4.5: Rôle destekli ve desteksiz aynı zamanda uyarlanabilir ve uyarlanabilir olmayan sistemin başarıım grafiği ($V = 10 \text{ km}$, $C_n^2 = 10^{-15}$).

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

KOH sistemlerinin önemli sorunları arasında atmosferik ortamda basınç, sıcaklığa bağı olarak sönümlenme ve parıldama olarak etki eden sinyalin gücündeki dalgalanmadır. Zaman içerisinde türbülansın bozucu etkisini azaltmak için çeşitli teknikler kullanılmıştır. Tüm bu tekniklerde, vericinin kanal durum bilgisine sahip olmadığı, alıcının kanal durum bilgisine sahip olduğu varsayılar çeşitli teknikler uygulanmıştır. Fakat yavaş değişen kanallarda ise kanal durum bilgisini anlık olarak alıcıdan vericiye iletilebilir. Bu şekilde kanal uyarlanabilir duruma getirilebilir. Bu yöntem uyarlanabilir modülasyon denir.

Tezde, kanalın log-normal olduğunu varsayarak, alıcı ve verici arasına röle yerleştirdikten sonra uyarlanabilir modülasyonla bant genişliği performansı incelenmiştir. Uyarlanabilir modülasyonun tepe güç sınırı, belli bir hata oranı ve kanalın servis dışı kalma durumu altında maksimize edildi. Benzetim başarımları, uyarlanabilir olmayan sistemlere göre bant verimliliği açısından daha iyi olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. Bell, A. G., 1880, ART. XXXIV.--On the Production and Reproduction of Sound by Light, *American Journal of Science* (1880-1910), 20(118), 305.
- [2]. Kahn, J. M., & Barry, J. R., 1997, Wireless infrared communications, *Proceedings of the IEEE*, 85(2), 265-298.
- [3]. Popoola, W. O., 2009, *Subcarrier intensity modulated free-space optical communication systems*, Doctoral dissertation, Northumbria University.
- [4]. Willebrand, H., & Ghuman, B. S., 2002, *Free space optics: enabling optical connectivity in today's networks*, SAMS publishing.
- [5]. Pratt, W. K., 1969, *Laser Communication Systems*.
- [6]. Rockwell, D. A., & Mecherle, G. S., 2007, *Optical wireless: low-cost, broadband, optical access*, SONA Communications Corporation.
- [7]. Kim, I., 2009, G FSO systems position technology for the future, *Lightwave online*, 19-21.
- [8]. Gagliardi, R. M., & Karp, S., 1976, *Optical communications*, New York, Wiley-Interscience, 1976. 445 p.
- [9]. Karp, S., Gagliardi, R. M., Moran, S. E., & Stotts, L. B. (Eds.), 2013, *Optical channels: fibers, clouds, water, and the atmosphere*, Springer Science & Business Media.
- [10]. Osche, G. R., 2002, *Optical Detection Theory for Laser Applications*, Wiley-VCH, July 2002, 424, ISBN 0-471-22411-1.
- [11]. Clifford, S. F., 1978, *The classical theory of wave propagation in a turbulent medium*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [12]. Bouchet, O., Sizun, H., Boisrobert, C., & De Fornel, F., 2010, *Free-space optics: propagation and communication* (Vol. 91) John ,Wiley & Sons.
- [13]. Goodman, J. W., 1985, *Statistical Optics*, New York: J. Wiley & Sons.
- [14]. Kolmogorov, A. N., Friedlander, S. K., & Topper, L., 1961, *Turbulence, classic papers on statistical theory*, Friedlander, SK, Topper, L. eds.
- [15]. Kolmogorov, A. N., 1991, The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers, *Proceedings: Mathematical and Physical Sciences*, 434(1890), 9-13.

- [16]. HRANILOVIC, S., 2005, *Wireless optical communication systems*, Boston: Springer.
- [17]. Xiong, F., Xiong, F., & Xiong, F., 2000, *Digital modulation techniques*, Boston: Artech House.
- [18]. Majumdar, A. K., 2014, *Advanced Free Space Optics (KOH): A Systems Approach*, Springer.
- [19]. Bloom, S., Korevaar, E., Schuster, J., & Willebrand, H., 2003, Understanding the performance of free-space optics, *Journal of optical Networking*, 2(6), 178-200.
- [20]. Goldsmith, A., 2005, *Wireless communications*, Cambridge university press.
- [21]. Karimi, M., & Uysal, M., 2012, Novel adaptive transmission algorithms for free-space optical links, *IEEE transactions on communications*, 60(12), 3808-3815.
- [22]. Hariq, S. H., Odabasioglu, N., & Uysal, M., 2014, An adaptive modulation scheme for coded free-space optical systems, *In Networks and Optical Commun.-(NOC)*, 2014 19th European Conference on (pp. 132-135). IEEE.
- [23]. Djordjevic, I. B., 2010, Adaptive modulation and coding for free-space optical channels, *Journal of Optical Commun. and Networking*, 2(5), 221-229.
- [24]. Andrews, L. C., & Phillips, R. L., 2005, *Laser beam propagation through random media*, Bellingham, WA: SPIE press.
- [25]. Safari, M., 2011, *Relay-Assisted Free-Space Optical Communications*, Doctoral dissertation, UWSpace.
- [26]. Safari, M., & Uysal, M., 2008, Relay-assisted free-space optical communication, *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 7(12), 5441-5449.
- [27]. Morgado, E., Mora-Jiménez, I., Vinagre, J. J., Ramos, J., & Caamaño, A. J., 2010, End-to-end average BER in multihop wireless networks over fading channels, *IEEE trans. on wireless commun.*, 9(8), 2478-2487.
- [28]. Weisstein, Eric W., 2017, Hermite-Gauss Quadrature, From MathWorld--A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/Hermite-GaussQuadrature.html>, [Ziyaret tarihi: 12 Kasım 2017].
- [29]. Barsimantov, O., & Nikulin, V. V., 2011, Adaptive optimization of a free space laser communication system under dynamic link attenuation, *Journal of Optical Communications and networking*, 3(3), 215-222.

- [30]. Nouri, H., & Uysal, M., 2016, Adaptive free space optical communication system with multiple apertures, *In Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)*, 2016 24th (pp. 937-940). IEEE.
- [31]. Rakia, T., Yang, H. C., Alouini, M. S., & Gebali, F., 2015, Outage analysis of practical FSO/RF hybrid system with adaptive combining, *IEEE Communications Letters*, 19(8), 1366-1369.
- [32]. Zhou, H., Mao, S., & Agrawal, P., 2015, Optical power allocation for adaptive transmissions in wavelength-division multiplexing free space optical networks, *Digital Communications and Networks*, 1(3), 171-180.
- [33]. Tang, Y., Brandt-Pearce, M., & Wilson, S. G., 2009, Adaptive coding and modulation for hybrid FSO/RF systems, *In Signals, Systems and Computers*, 2009 Conference Record of the Forty-Third Asilomar Conference on (pp. 1644-1649). IEEE.
- [34]. Chatzidiamantis, N. D., Michalopoulos, D. S., Kriezis, E. E., Karagiannidis, G. K., & Schober, R., 2011, Relay selection in relay-assisted free space optical systems, *In Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, 2011 IEEE (pp. 1-6). IEEE.
- [35]. Abou-Rjeily, C., 2013, Performance analysis of selective relaying in cooperative free-space optical systems, *Journal of Lightwave Technology*, 31(18), 2965-2973.
- [36]. Churnside, J. H., & Hill, R. J., 1987, Probability density of irradiance scintillations for strong path-integrated refractive turbulence, *JOSA A*, 4(4), 727-733.

EKLER

EK 1. Uyarlanabilir olmayan sistemler için SDK olasılığı hesabı

Uyarlanabilir sistemler, verici tarafından iletilen sinyalin gücünü, modülasyon boyutunu, spektral verimliliğini alıcı da elde edilen kanal durum bilgisinin vericiye geri besleme ile iletilmesi sonucu değiştirebilme imkânını her bir iletim çerçevesi boyunca olanak sağlar. Fakat uyarlanabilir olmayan sistemler kanal durum bilgisine verici tarafında sahip olmadığından dolayı kanal boyunca iletim parametreleri aynı kalacağı için sistem parametreleri aynı olacaktır: Modülasyon boyutu, iletilen güç vb.

Uyarlanabilir modülasyon kanal durum bilgisine sahip olduğundan bit hata olasılığı hesabı eşitlik 2.22’de verilmiştir. Eşitlik 2.22’den hedeflenen bit hata olasılığı için SGO hesaplanmıştır. Başka bir ifade ile kanal Gauss koşullu kanala indirgenmektedir. Uyarlanabilir olmayan sistemler de kanal durum bilgisine sahip olmadığımız için bit hata olasılığı hesabını sönümlemeli türbülanslı kanal için hesaplamamız gerekmektedir [17].

$$P_b(\text{Y uyumlu olmayan}) = \int_0^\infty P_{b,gauss} p_Y(Y) dY \quad (7.1)$$

$$\int_0^\infty \frac{M}{2} Q(Y\sqrt{\log_2 M}) \left(\frac{1}{4Y\sqrt{2\pi}\sigma_I}\right) \exp\left(-\frac{\left(\ln\left(\frac{Y\sigma_n^2}{\rho^2 L_{i,i+1}^2 P^2}\right) + 4\sigma_I^2\right)^2}{32\sigma_I^2}\right) dY$$

Eşitlik 7.1’i Gauss-Hermite Quadrature fonksiyon yardımı ile çözebiliriz [28].

$$\begin{aligned} P_b(\text{Y uyumlu olmayan}) &= \quad (7.2) \\ &= \int_0^\infty \frac{M}{2} Q\left(\left(\frac{\rho^2 L_{i,i+1}^2 P^2}{\sigma_n^2}\right) \exp(4\sqrt{2}\sigma_I u - 4\sigma_I^2) \sqrt{\log_2 M}\right) \exp(-u^2) du \\ &= \left(\frac{M}{2\sqrt{\pi}}\right) \sum_{k=1}^n w_k Q\left(\left(\rho^2 L_{i,i+1}^2 P^2 / \sigma_n^2\right) \exp(4\sqrt{2}\sigma_I u_k - 4\sigma_I^2) \sqrt{\log_2 M}\right) \end{aligned}$$

Eşitlik 7.2 için ‘n’ noktada tanımlı bit hata olasılığının log-normal sönümlemeli kanal için hesabı Gauss-Hermite Quadrature fonksiyon için yapılmıştır. Burada ‘n’ parametresi ne kadar

büyük seçilirse o derecede sonuç ideale yaklaşır. Burada ‘n’ değerini 50 seçilmiştir. Eşitlik 7.2’yi aşağıda gösterildiği üzere tekrar yazabiliriz.

$$P_{b,(i,i+1)}(Y_{\text{uyumlu olmayan}}) = \quad (7.3)$$

$$\left(\frac{M}{2\sqrt{\pi}}\right) \sum_{k=1}^{n=50} w_k Q\left((\rho^2 L_{i,i+1}^2 P^2 / \sigma_n^2) \exp(4\sqrt{2}\sigma_l u_k - 4\sigma_l^2) \sqrt{\log_2 M}\right)$$

Hedeflenen bir baştan bir sona bit hata olasılığından (eşitlik 3.19) $P_{b,(i,i+1)}$ hesaplanır ve eşitlik 7.3 için hedeflenen değer elde edilir. Daha sonra $Y_{\text{uyumlu olmayan}}$ hesaplanır.

SDK olasılığı ise uyumlu olmayan sistemler için verilen hedeflenen bir baştan bir sona SDK olasılığı üzerinden eşitlik 3.18’den $P_{SDK \text{ uyumlu olmayan},(i,i+1)}$ hesaplanır. Bulunan $P_{SDK \text{ uyumlu olmayan},(i,i+1)}$ değerini aşağıda gösterildiği üzere olasılık hesabına eşitleriz.

$$P_{SDK \text{ uyumlu olmayan},(i,i+1)} = P \left\{ g_{(i,i+1)} < \frac{\sqrt{Y_{\text{uyumlu olmayan}} \sigma_n}}{\rho P} \right\} \quad (7.4)$$

$$= P \left\{ h_{a,(i,i+1)}^2 < \frac{\sqrt{Y_{\text{uyumlu olmayan}} \sigma_n}}{\rho L_{i,i+1} P_{a,transmitted} M(N+1)} \right\}$$

$$= P \left\{ h_{a,(i,i+1)} < \left(\frac{\sqrt{Y_{\text{uyumlu olmayan}} \sigma_n}}{\rho L_{i,i+1} P_{a,transmitted} M(N+1)} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}$$

Eşitlik 7.4’ te üst sınıra Ω indeksi olarak varsaydığımızda $(\Omega = \left(\frac{\sqrt{Y_{\text{uyumlu olmayan}} \sigma_n}}{\rho L_{i,i+1} P_{a,transmitted} M(N+1)} \right)^{\frac{1}{2}})$

olasılık hesabı ($P_{SDK \text{ uyumlu olmayan},(i,i+1)}$);

$$P_{SDK \text{ uyumlu olmayan},(i,i+1)} = \int_0^{\Omega} p(I) dI \quad (7.5)$$

$$= \int_0^{\Omega} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_l^2} \frac{1}{I} \exp\left\{-\frac{[\ln(I)+\sigma_l^2]^2}{2\sigma_l^2}\right\} dI$$

$$= Q\left(\ln\left(\frac{1}{\Omega^2}\right) - 2\sigma_l^2\right) / 2\sigma_l$$

Eşitlik 7.5' ten $Y_{uyumlu olmayan}$ değeri ile $Y_{adaptive}$, $Y_{adaptive} < Y_{uyumlu olmayan}$ koşulunu sağlayacak şekilde minimum modülasyon boyutu seçilir.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Fethullah SİPAHİOĞLU
Doğum Yeri	Kdz. Ereğli/Zonguldak
Doğum Tarihi	22.07.1990
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	537 512 35 23
E-Posta Adresi	fethullah.sipahioglu@gmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	26.06.2012

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimler
Anabilim Dalı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği A.B.D.
Programı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı
Mezuniyet Tarihi	06.07.2018