



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME İÇİN FİZİKSEL KATMAN
TASARIMI

Ferhat FETTAHOĞLU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. Bahattin KARAKAYA

Temmuz, 2017

İSTANBUL

Bahattin

Bu çalışma 5.07.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliğı Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliğı Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

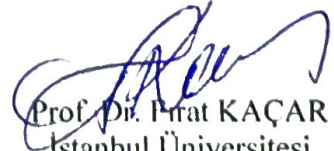
Tez Jürisi



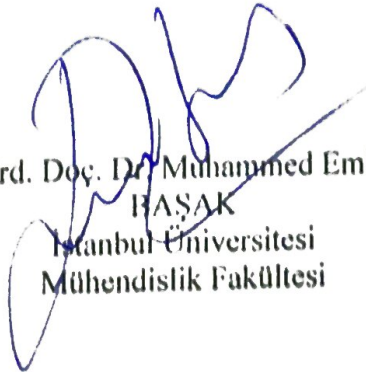
Yrd. Doç. Dr. Bahattin KARAKAYA(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Yrd. Doç. Dr. Aysel Ersoy YILMAZ
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Pirat KAÇAR
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Yrd. Doç. Dr. Muhammed Emin
BAŞAK
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Yrd. Doç. Dr. Ibrahim GÜNEŞ
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 abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın hazırlanmasında sahip olduğu bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan sayın hocalarım Yrd. Doç. Dr. Bahattin KARAKAYA, Hakan DOĞAN ve Niyazi ODABAŞIOĞLU'na teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen arkadaşlarıma sonsuz teşekkürler ederim.

Hayatım boyunca bana verdikleri desteğin karşılığını asla ödeyemeyeceğim sevgili aileme de teşekkürü bir borç bilirim.

Temmuz 2017

Ferhat FETTAHOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
TABLO LİSTESİ	x
SİMGE VE KISALTIMA LİSTESİ	xi
ÖZET.....	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME NEDİR?.....	1
1.2. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞMENİN TARİHİ.....	1
1.3. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞMENİN GÜNÜMÜZDEKİ DURUMU.....	4
2. GENEL KISIMLAR	6
2.1. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN TEMEL ÖZELLİKLERİ.....	6
2.1.1. Kablosuz Optik Haberleşme Sistemlerinin Çalışma Prensipleri.....	6
2.1.2. OWC Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları	8
2.2. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN BİLEŞENLERİ.....	9
2.2.1. OWC Sistemlerin Verici Yapısı.....	10
2.2.1.1. Işık Yayan Diyotlar (Light Emitting Diodes, LED).....	10
2.2.1.2. Lazer.....	11
2.2.1.3. Lazer Diyotlar (LD)	11
2.2.2. OWC Sistemlerin Alıcı Yapısı.....	12
2.2.2.1. Direk Sezim Yapan Alıcılar	13
2.2.2.2. Eş Evreli Sezim Yapan Alıcılar	13
2.3. KANAL	14
2.3.1. Güç Kaybı	15
2.3.1.1. Yol Kaybı.....	15
2.3.1.2. Optik Işının Genişlemesi	17
2.3.2. Atmosferik Türbülans	18

2.3.2.1. Atmosferik Türbülans Kanal	19
2.3.2.2. Log-Normal Türbülans Kanal	21
2.3.2.3. Gamma-Gamma Türbülans Kanal	22
2.3.2.4. Görünür Işık Kanal (Visible Light Channel).....	24
2.4. MODÜLASYON TEKNİKLERİ	25
2.4.1. Aç-Kapa Anahtarlama Modülasyonu.....	26
2.4.2. Darbe Konum Modülasyonu	27
2.4.3. Darbe Genlik Modülasyonu	28
2.5. SAĞLIK VE GÜVENLİK STANDARTLARI	30
3. MALZEME VE YÖNTEM	33
3.1. GİRİŞ	33
3.2. UZAY ZAMAN BLOK KODLAMA (STBC).....	34
3.2.1. Tek Alıcılı Sistem için Sistem Modeli	35
3.2.1.1. Kodlama ve İletim	36
3.2.1.2. Birleşim Algoritması (Toplama).....	36
3.2.1.3. En Büyük Olabilirlikli Karar Devresi	37
3.2.2. Birden Fazla Alıcılı Sistem için Sistem Modeli.....	38
3.3. UZAYSAL MODÜLASYON (SM).....	41
3.3.1. Sistem Modeli	42
3.4. UZAY ZAMAN BLOK KODLAMALI UZAYSAL MODÜLASYON	45
3.4.1. Sistem Modeli	46
3.4.2. Alıcı Tasarımı	50
3.5. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE UZAY-ZAMAN BLOK KODLAMALI UZAYSAL MODÜLASYON	51
3.5.1. Sistem ve Kanal Modeli	52
3.5.2. OWC STBC-SM Tekniğinin Performans Analizi	56
4. BULGULAR	59
4.1. GİRİŞ	59
4.2. GÖRÜNÜR IŞIK KANALLAR İÇİN STBC-SM TEKNİĞİ BAŞARIM SONUÇLARI.....	62
4.2.1. 2-PAM ve 4-PAM için STBC-SM v1 ile SM v1 Başarım Sonuçları	62
4.2.2. 2-PAM ve 4-PAM için STBC-SM v3 ile SM v2 Başarım Sonuçları	63
4.2.3. 2-PAM ve 4-PAM için STBC-SM Başarım Sonuçları	64
4.2.4. 2-PAM ve 4-PAM için SM Başarım Sonuçları	65

4.3. LOG-NORMAL KANAL İÇİN 2-PAM STBC-SM TEKNİĞİ BAŞARIM SONUÇLARI.....	66
4.4. LOG-NORMAL KANAL İÇİN 4-PAM STBC-SM TEKNİĞİ BAŞARIM SONUÇLARI.....	67
4.5. GAMMA-GAMMA KANAL İÇİN 2-PAM STBC-SM TEKNİĞİ BAŞARIM SONUÇLARI.....	68
4.6. GAMMA-GAMMA KANAL İÇİN 4-PAM STBC-SM TEKNİĞİ BAŞARIM SONUÇLARI.....	69
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	70
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ.....	75



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Bir kablosuz optik haberleşme sisteminin şematik görünümü.....	7
Şekil 2.2: Kablosuz optik haberleşme sisteminin blok diyagramı.....	8
Şekil 2.3: Kablosuz optik haberleşme sisteminin verici-alıcı yapıları.	10
Şekil 2.4: Direk sezim yapan alıcılara ait blok diyagram.....	13
Şekil 2.5: Eş evreli sezim yapan alıcılara ait blok diyagram.....	14
Şekil 2.6: Rayleigh saçılmasının dalga boyuna bağlı olarak değişimi.	17
Şekil 2.7: Optik ışının genişleme diyagramı.	18
Şekil 2.8: Aç-kapa anahtarlama modülasyonuna ait dalga biçimleri.	26
Şekil 2.9: 4-PPM modülasyon tekniğine ait darbe konum grafikleri.	27
Şekil 2.10: M-PPM modülasyon tekniğine ait başarımlar grafiği.	28
Şekil 2.11: 4-PAM modülasyonuna ait darbe şekilleri.....	29
Şekil 2.12: PAM modülasyon tekniğinin yıldız diagramı.	29
Şekil 2.13: M-PAM modülasyon tekniğine ait başarımlar grafiği.....	30
Şekil 3.1: İki adet verici kullanan STBC sisteminin blok diagramı.	35
Şekil 3.2: İki vericili ve iki alıcılı STBC sisteminin blok diagramı.	38
Şekil 3.3: STBC tekniğine ait bit hata oranı başarımlar grafiği.....	40
Şekil 3.4: Uzaysal Modülasyon (SM) sistemine ait blok diagram.	42
Şekil 3.5: Uzaysal Modülasyon sistemine ait bit eşleme tekniği.	43
Şekil 3.6: SM tekniğine ait bit hata oranı başarımlar grafiği.	45
Şekil 3.7: STBC-SM vericisine ait blok diagram.	49
Şekil 3.8: STBC-SM tekniğine ait bit hata oranı başarımlar grafiği.	51
Şekil 3.9: STBC-SM FSO tekniğinin 4 x 4 sistem için blok diyagramı.....	54
Şekil 4.1: STBC-SM direkt görüş modeli (STBC-SM v1).....	60
Şekil 4.2: STBC-SM ortalı uzak model (STBC-SM v2).	60
Şekil 4.3: STBC-SM ortalı yakın model (STBC-SM v3).....	61
Şekil 4.4: SM ortalı uzak model (SM v1).....	61
Şekil 4.5: SM ortalı yakın model (SM v2).	61

Şekil 4.6: STBC-SM v1 – SM v1 kanal modellerine ait başarımlar grafiği.	62
Şekil 4.7: STBC-SM v3 – SM v2 kanal modellerine ait başarımlar grafiği.	63
Şekil 4.8: Tüm STBC-SM kanal modellerinin karşılaştırılması.	64
Şekil 4.9: Tüm SM kanal modellerinin karşılaştırılması.	65
Şekil 4.10: Log-normal kanalda 2-PAM STBC-SM tekniği başarımlar grafiği.	66
Şekil 4.11: Log-normal kanalda 4-PAM STBC-SM tekniği başarımlar grafiği.	67
Şekil 4.12: Gamma-gamma kanalda 2-PAM STBC-SM tekniği başarımlar grafiği.	68
Şekil 4.13: Gamma-gamma kanalda 4-PAM STBC-SM tekniği başarımlar grafiği.	69



TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde kullanılan ışık kaynakları.....	12
Tablo 2.2: Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde kullanılan foto dedektörler.....	13
Tablo 2.3: Atmosferi oluşturan moleküller, partiküller ve miktarları.....	14
Tablo 2.4: "q" katsayısına ait Kim ve Krause modelleri.....	16
Tablo 2.5: IEC 60825-1 stardardına göre sınıflandırılmış lazer grupları.....	31
Tablo 2.6: İki farklı dalga boyu için ulaşılabilir emisyon limitleri.....	32
Tablo 3.1: STBC tekniğine ait iletim anlarına göre sembol kodları.....	36
Tablo 3.2: Verici-alıcı arasındaki kanal modelleri.....	38
Tablo 3.3: Alıcı taraftan alınan sinyaller.....	38
Tablo 3.4: BPSK Modülasyonu için STBC kod sözcükleri eşleme tablosu.....	47
Tablo 3.5: STBC-SM sisteminin temel parametreleri.....	49

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A_T	: Verici açıklığının alanı
A_R	: Alıcı açıklığının alanı
$A(m^{-2/3})$: Yeryüzünde “v” nin nominal değeri
a	: Her kod kitabı içindeki kod sözcüğü sayısı
α	: Büyük ölçekli girdaplara ait sabit
$\alpha_m(\lambda)$: Atmosferdeki moleküler bileşenlerin emilim katsayısı
$\alpha_q(\lambda)$: Atmosferdeki partiküllerin emilim katsayısı
β	: Küçük ölçekli girdaplara ait sabit
$\beta_m(\lambda)$: Atmosferdeki moleküler bileşenlerin saçılma katsayısı
$\beta_q(\lambda)$: Atmosferdeki partiküllerin saçılma katsayısı
c	: Toplam kod sözcüğü sayısı
C_n^2	: Kırılma yapı parametre indisi
d	: Alıcı-verici arasındaki mesafe
E_b	: Ortalama bit enerjisi
E_s	: Sinyalin enerjisi
H	: Kanal matrisi
h	: Kanal sönümlenme sabiti
h'	: Yükseklik (m)
I	: Normalize alınan ışınım miktarı
I_x	: Büyük ölçekli girdaplara ait rastgele süreç
I_y	: Küçük ölçekli girdaplara ait rastgele süreç
I_0	: Türbülanssız ortamda alınan ışınım yoğunluğunun ortalaması
$K_v(.)$: v. Mertebeden ikinci tip Bessel fonksiyonu
k	: Optik dalgaların sayısı
L_0	: Atmosferde oluşan girdapların en büyüğü
l_0	: Atmosferde oluşan girdapların en küçüğü

ℓ	: Atmosferdeki ışınımın log-yoğunluğu
M	: Modülasyonun mertebesi
$M_s(t)$: S değişkenine ait moment üreten fonksiyon
μ_ℓ	: Log-yoğunluğunun ortalaması
N_0	: Sıfır ortalamalı beyaz Gauss gürültüsü
N_T, n_T	: Verici anten sayısı
N_R, n_R	: Alıcı anten sayısı
n	: Atmosferin kırılma indisi
n_0	: Türbülanssız durumdaki kırılma indisi
n_1	: Türbülans kaynaklı rastgele dalgalanma indisi
$n_{i,j}$: İkili hata olasılığı
P	: Atmosferik basınç
P_R	: Alınan güç
P_0	: Girdapların tutarlılık yarıçapı
P_t	: Verici gücü
$Q(.)$: Q-fonksiyonu
q	: Görüş mesafesine göre değişen katsayı
r	: Işığın karşılaştığı partiküllerin yarıçapı
S	: Uzay-zaman blok kodu
$s_{0,1}$: İletilen semboller
$s_{0,1}^*$: İletilen sembollerin kompleks eşleniği
T	: Sembol süresi
T_e	: Sıcaklık (K)
t	: Zaman (sn)
τ	: Optik ışımının atmosferdeki iletimi
τ_0	: Atmosferik türbülansın uyum zamanı
V	: Görüş mesafesi
$v(r)$: Rüzgârın ışımaya dik bileşeninin hızı
v	: Rüzgârın hızı (m/sn)
$w[.]$: Hamming ağırlığı
$w(k)$: Toplanabilir beyaz Gauss gürültüsü
X_i	: Kod sözcüğü

x_0	: Saçılma miktarı
x_i	: Kod kitabı
$y(k)$: Alıcıya gelen sinyal
$\Gamma(.)$: Gamma fonksiyonu
σ_{SI}^2	: Parıldama indeksi
θ	: Faz açısı
σ_N^2	: Normalize parıldama indeksi
σ_l^2	: Log-yoğunluğunun varyansı
$\gamma(\lambda)$: Toplam zayıflama katsayısı
λ	: Optik ışının dalga boyu

Kısaltmalar

Açıklama

AWGN	: Toplanabilir Beyaz Gauss Gürültüsü
BER	: Bit-Hata Oranı
BPSK	: İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama
DD	: Direkt Sezim
FSO	: Serbest Uzay Optik
ICI	: Kanallar arası Girişim
IM	: Yoğunluk Modülasyonu
LED	: Işık Yayan Diyot
MIMO	: Çok Girişli Çok Çıkışlı
MRRC	: Maksimum Oranlı Birleştirme
NRZ	: Sıfıra Dönüşsüz
OOK	: Aç-Kapa Anahtarlama
OWC	: Kablosuz Optik Haberleşme
PAM	: Darbe Genlik Modülasyonu
PPM	: Darbe Konum Modülasyonu
PSK	: Faz Kaydırmalı Anahtarlama
QAM	: Dörtlü Genlik Modülasyonu
RF	: Radyo Frekans
RZ	: Sıfıra Dönüştü
SI	: Parıldama İndeksi
SM	: Uzaysal Modülasyon
STBC	: Uzay-Zaman Blok Kodlama
STBC-SM	: Uzay-Zaman Blok Kodlamalı Uzaysal Modülasyon
UVC	: Ultraviyole İletişim
VLC	: Görünür Işıqla İletişim

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME İÇİN FİZİKSEL KATMAN TASARIMI

Ferhat FETTAHOĞLU

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Bahattin KARAKAYA

Kablosuz haberleşme sistemleri için en önemli sorun atmosferik türbülanstır. Temelde radyo frekans haberleşme sistemleri için geliştirilmiş birçok modülasyon ve kodlama tekniği son yıllarda atmosferik türbülansın sönmleme etkisini azaltmak adına kablosuz optik haberleşme sistemlerine uyarlanmaya başlanmıştır. Spektral verimliliği artıran uzaysal modülasyon ve sistem performansını geliştiren uzay-zaman blok kodlama teknikleri yakın zamanda radyo frekans sistemler için birleştirilerek kullanılmıştır.

Bu tezde radyo frekans sistemler için geliştirilmiş uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniği kablosuz optik haberleşmeye uyarlanmıştır. Önerilen tekniğe ait analitik bit-hata oranı ifadesi, log-normal, gamma-gamma dağılımlı ve görünür ışık kanalları için darbe genlik modülasyonu kullanılarak çıkarılmıştır. Analitik ifadenin doğruluğu simülasyonlarla desteklenmiş, sistem sadece uzaysal modülasyon tekniği kullanan bir sistemle bit hata oranı açısından karşılaştırılmış ve uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniğinin bit-hata oranı açısından yalnızca uzaysal modülasyona olan üstünlüğü gösterilmiştir.

Temmuz 2017, 90 sayfa.

Anahtar kelimeler: Modülasyon, STBC, SM, FSO, OWC, VLC

SUMMARY

M.Sc. THESIS

PHYSICAL LAYER DESIGN FOR WIRELESS OPTICAL COMMUNICATION

Ferhat FETTAHOĞLU

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Bahattin KARAKAYA

The major drawback of the optical wireless communication systems is atmospheric turbulence. Various modulation and coding techniques of radio frequency systems are adapted to the optical communication systems for degrading effect of atmospheric turbulence. Spatial modulation and Space-time block coding schemes are two promising techniques for improving spectral efficiency and enhancing the system performance. Recently STBC and SM techniques are combined for RF systems.

In this thesis we propose space-time block coded spatial modulation for optical wireless communication. We derived the analytical bit-error rate expression of the proposed system for log-normal, gamma-gamma atmospheric turbulence and visible light channels where the pulse amplitude modulation is considered. We confirm the accuracy of our analytical expression through computer simulations. Additionally, we compare our proposed optical STBC-SM scheme with the optical SM scheme in terms of BER performance. The results show that STBC-SM technique offers significant improvements compared to SM.

July 2017, 90 pages.

Keywords: Modulation, STBC, SM, FSO, OWC, VLC

1. GİRİŞ

1.1. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME NEDİR?

Kablosuz optik haberleşme (Optical Wireless Communication, OWC); görünür, kızılötesi ve ultraviyole ışınların kablo gibi bir kılavuz kullanılmadan sinyal taşıdığı bir optik haberleşme çeşididir. Geleneksel fiber optik sistemlere benzese de bilgi taşınan ortam, fiber kablo yerine atmosferdir.

Kablosuz optik haberleşme sistemleri kullandıkları optik ışının frekans bandındaki yerine göre birkaç alt başlıkta toplanabilir. Bunlar görünür frekans bandında çalışan görünür ışıkla iletişim sistemleri (Visible Light Communication, VLC) ve kızılötesi frekanslara yakın frekans değerlerinde iletişim yapan serbest uzay optik haberleşme sistemleridir (Free Space Optical Communication, FSO). Ayrıca dış mekânlarda direkt görüş olmadığı durumlar için ultraviyole iletişim (Ultraviolet Communication, UVC) sistemleri de kullanılmaya başlanmıştır.

1.2. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞMENİN TARİHİ

Kablosuz iletişimin ortaya çıkışı teknoloji tarihindeki en çığır açıcı gelişmelerden biridir. Geçtiğimiz 40 yıl boyunca kablosuz iletişim sistemlerine duyulan ihtiyaç hızla artmıştır. Öngörülen gelecekte ise toplumun gelişmesinde oldukça önemli bir rol oynayacağı düşünülmektedir. Kablosuz sistemlerin ve cihazların gelişimindeki anahtar faktör radyo dalgalarının (Radio Frequency, RF) kullanımınıdır. Ancak kablosuz sistemlerin üzerine kurulduğu elektromanyetik spektrum limitli bir kapasiteye sahiptir. İletimi yapılan data miktarının her geçen gün daha da artması ile RF spektrumu yetmemeye başladığından elektromanyetik spektrumun daha üst kademelerinin de kullanılabilmesi için çalışmalar başlamıştır.

Kablosuz optik haberleşme adı; görünür, kızılötesi ve ultraviyole ışık gibi optik taşıyıcılar kullanılarak kılavuzsuz yayılım yapılan iletim şeklinden gelmektedir. Kablosuz optik haberleşmenin tarihteki ilk örnekleri olarak işaret ateşleri, dumanla haberleşme, gemi

bayrakları ve semafor telgraf verilebilir. Çok eski zamanlardan bu yana, güneş ışınları da haberleşmek amacıyla kullanılmıştır. 1810 yılında Carl Friedrich Gauss, pırıldak ya da ayna telgrafı diye isimlendirilen cihazı geliştirdi. Bu cihazla, belli açılarla yerleştirilmiş birkaç aynayı kullanarak güneş ışınlarını kontrollü bir şekilde uzaktaki bir istasyona göndermeyi başardı. Cihaz 19. Yüzyılın sonları ve 20. Yüzyılın başlarında sıklıkla askeri amaçlar için kullanıldı. 1880 yılında Alexander Graham Bell, fotofon adı verilen dünyadaki ilk kablosuz telefon sistemini geliştirdi (Bell, 1880). Bell bu sistemde güneş ışınlarını ses sinyalleri ile modüle etmiş ve yaklaşık 200 metre uzaklıktaki bir alıcıya göndermeyi başarmıştır. Deneyde kullanılan alıcı, odak noktasına selenyum hücre yerleştirilmiş parabolik bir aynadan oluşmaktadır.

Amerikan ve Alman ordu laboratuvarları, 1950'lere kadar yüksek basınçlı ark lambalarını optik iletişim için geliştirmeye devam etmiştir. Modern anlamda OWC, lazer ya da ışık yayan diyotları kaynak olarak kullanır. 1962 yılında MIT Lincoln Laboratuvarı ışık yayan bir Galyum Arsenik (GaAs) diyotu kullanarak deneysel bir OWC linki kurmuş ve televizyon sinyallerini 30 mil uzağa göndermeyi başarmıştır. 1963 yılının Mayıs ayında Amerika'da ses sinyali ile modüle edilmiş olan 6328-A ışını 190 kilometre mesafeye iletilmiştir. İlk defa 1963 yılının Mart ayında Kuzey Amerika'da televizyon sinyalleri lazer kullanılarak iletilmiştir (Goodwin, 1970).

Güvenli bir iletişim sunması sebebiyle, kablosuz optik haberleşme teknolojisi 1970'li yıllardan itibaren çoğunlukla askeri amaçlarla kullanılmıştır. NASA (Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi), ve ESA (Avrupa Uzay Ajansı) kablosuz optik haberleşmenin derin uzay uygulamaları üzerinde araştırmalar yapmıştır (Hemmati, 2007).

Lazerin keşfinden sonra OWC, lazerlerin ana kullanım alanı haline gelmiş, birçok farklı lazer türü ve farklı modülasyon sistemleri ile denenmiştir. Ancak sonuçlar, atmosferik etkiler ve lazer ışınının ıraksama özelliğinden dolayı umut verici olmamıştır. 1970'lerde geliştirilen düşük kayıplı fiber optik sistemler, uzak mesafe optik iletişimde OWC'ye göre pratik hayatta daha fazla tercih edilir hale gelmiştir. Ayrıca kablosuz optik haberleşme sistemlerinin verici ve alıcı kısımlarındaki elektronik elemanların yeterince hızlı ve hassas olmamaları, aynı zamanda atmosfer üzerinden iletişim yapan bir haberleşme sisteminin hava koşullarına çok duyarlı olması bu durumun diğer sebeplerinden bazılarıdır.

Kablosuz optik haberleşmenin yeniden ele alınmasına ve ticari olarak gelişmesine, artan bant genişliği ihtiyacı ve optoelektronik elemanların eski hallerine göre çok daha gelişmiş durumda olması neden olmuştur. Ayrıca fiber optik sistemlerin gerektirdiği yüksek maliyet dolayısıyla kablosuz optik haberleşme sistemleri bir alternatif olarak görülmüştür. Ancak günümüzde RF iletim sistemlerine bir tamamlayıcı durumunda kullanılmaktadır.

RF kablosuz sistemler tek noktadan çoklu noktalara 10 Mbps ve direk noktadan noktaya 100 Mbps hızları sağlarken (Kim ve diğ., 2001) noktadan noktaya aralarında yaklaşık 35 kilometre mesafe bulunan bir kablosuz optik haberleşme sistemi 1.25 Gbps veri hızı sağlayabilmektedir. 2008 yılında 10 Gbps veri hızına sahip kablosuz optik haberleşme sistemi pazara sunulmuştur (Kim, 2009).

Kablosuz optik haberleşme yüksek veri hızlarında çalışabilen, yüksek bant genişliğine sahip olan ve diğer modern sistemler ile entegre olabilen bir sistem olduğunu kanıtlamıştır. Ancak hava koşulları hala daha kablosuz optik haberleşme sistemlerinin en büyük dezavantajları olarak kalmaktadır. Kötü hava koşullarında (sis, duman, türbülans) sinyal alıcıya varana kadar önemli ölçüde zayıflamaktadır (Acampora, 2002).

İletim mesafesine göre kablosuz optik haberleşme aşağıdaki beş kategoride değerlendirilebilir (Uysal ve Nouri, 2014).

- 1. Ultra-kısa mesafe OWC (Ultra-short range):** Yakın şekilde dizilmiş, kümelenmiş çoklu-çip paketlerindeki çipten çipe olan iletişim sistemleri.
- 2. Kısa mesafe OWC (Short range):** IEEE 802.15.7 standardına ait kablosuz vücut alan ağı (WBAN), kablosuz kişisel alan ağı (WPAN). Su altı iletişim sistemleri.
- 3. Orta mesafe OWC (Medium range):** İç mekân kızılötesi ve görünür ışıkla iletişim sistemleri. Araç içi iletişim sistemleri.
- 4. Uzun mesafe OWC (Long range):** Serbest-uzay optik haberleşme sistemleri. Binalar arası iletişim.
- 5. Ultra-uzun mesafe OWC (Ultra-long range):** Uydular arası iletişim sistemleri.

1.3. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞMENİN GÜNÜMÜZDEKİ DURUMU

Kablosuz optik haberleşme sistemleri fiber-optik haberleşme sistemlerinin kullanılmadığı ya da çok maliyetli olduğu yerlerde kullanılır (Gagliardi ve diğ., 1995). Serbest-uzay optik haberleşme sistemleri ise kablosuz optik haberleşme sistemlerinin az maliyetli bir türüdür. Lisans gerektirmemesi, yüksek bant genişliğine sahip olması ve doğasında bulunan iletim güvenliği gibi özellikleri nedeniyle avantajlı haberleşme sistemleridir. Bu avantajlarının yanında, tüm kablosuz optik haberleşme sistemlerinde olduğu gibi serbest-uzay optik haberleşme sistemlerinin de karşılaştığı en büyük problem atmosferik türbülansdır. Atmosferik türbülans, özellikle uzun mesafeli iletim yapan sistemlerde performansı önemli ölçüde etkilemektedir. Atmosferik türbülans kaynaklı sönmüleme etkisi sıcaklığın homojensizliğinden kaynaklanır ve kırılma indisinde dalgalanmalara neden olur. Bu da gönderilen sinyalin genliğinde rastgele değişimler meydana getirir.

Çoğullama teknikleri atmosferik türbülansın oluşturduğu sönmüleme etkisini azaltmak amacıyla geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Alamouti tarafından sunulan uzay-zaman blok kodlama tekniği (Alamouti, 1998) çoğullama kazancı sağlayan iyi bilinen ve kuvvetli tekniklerden biridir. Radyo frekans sistemlerde geniş çapta kullanılmış ve kablosuz optik haberleşme sistemlerine de ilk olarak Simon ve diğ. (2005) tarafından uyarlanmıştır. İç mekan kablosuz optik haberleşme sistemleri için performans analizi Ntogari ve diğ., (2009) tarafından yapılmıştır.

Yüksek band genişliği verimliliğini, kabul edilebilir bir bit hata oranı başarımı ile sunabilen bir başka iletişim tekniği de uzaysal modülasyondur (SM) (Mesleh ve diğ., 2006), (Mesleh ve diğ., 2008). Uzaysal modülasyon iletim için birden fazla verici anten kullanır. Ancak uzaysal modülasyon ve diğer anten çoğullama teknikleri arasındaki en büyük fark, uzaysal modülasyonun bilgiyi aynı zamanda anten indislerini de kullanarak iletebilmesidir. Dolayısı ile uzaysal modülasyon yüksek spektral verimliliğe düşük karmaşıklık ile ulaşabilir. Bu modülasyon tekniği ilk olarak radyo frekans sistemleri için ortaya çıkmış olsa da yakın zamanda kablosuz optik haberleşme sistemleri için de kullanılmıştır (Mesleh ve diğ., 2011a), (Mesleh ve diğ., 2011b), (Özbilgin ve Koca, 2014).

Bu tez kapsamında uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniğinin kablosuz optik haberleşme sistemlerine uyarlanması ve bu sistemlerdeki uygulaması incelenmiştir. Uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon ilk olarak Başar ve diğ. (2011) tarafından, uzaysal modülasyon ve uzay-zaman blok kodlama tekniklerinin bir arada kullanılması ile oluşturulmuş bir radyo frekans tekniğidir. Tekniğin kablosuz optik haberleşme sistemlerine uyarlanması aşamasında ilk olarak kullanılacak olan modülasyon tekniği seçilmiştir. Optik iletişime uygunluğundan dolayı darbe genlik modülasyonu uygun görülmüştür. Daha sonra uzay-zaman blok kod matrisleri yine optik iletişime uygun şekilde yeniden düzenlenmiş ve anten bölgesine genişletilmiştir. Uyarlanan uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniğine ait bit hata oranı başarımını gösteren bir teorik üst sınır ifadesi çıkarılmıştır.

Monte Carlo bilgisayar benzetim metodu kullanılarak aynı sisteme ait simülasyon sonuçları elde edilmiş ve çıkarılan teorik üst sınır desteklenmiştir. Aynı zamanda uyarlanan bu tekniğin başarımını daha iyi görebilmek adına yalnızca uzaysal modülasyon kullanılmış bir kablosuz optik haberleşme tekniğine ait bit-hata oranı grafiği de çıkarılmış ve karşılaştırma için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve çalışmanın geliştirilmesi için ileride yapılacak araştırmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

2. GENEL KISIMLAR

Bu bölümde kablosuz optik haberleşmenin özellikleri daha derin olarak incelenecek ve temelleri belirtilecektir. Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde iletim durumunu değiştiren faktörlerden bahsedilecek (kanal durumu, alıcı-verici yapıları) aynı zamanda kullanılan modülasyon tipleri de anlatılacaktır.

Kablosuz optik haberleşme sistemleri kullandıkları ışığın, frekans spektrumundaki konumuna göre isimlendirilirler. Bu sistemlerin kendilerine özel avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Frekans spektrumunda kızılötesi frekans bölgesinde çalışan kablosuz optik haberleşme sistemleri Serbest Uzay Optik Haberleşme (Free Space Optical, FSO) sistemleri olarak adlandırılırlar. Görünür ışık bölgesinde ışımaya yapan sistemlere ise Görünür Işıklı Haberleşme (Visible Light Communication, VLC) sistemleri denir.

2.1. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN TEMEL ÖZELLİKLERİ

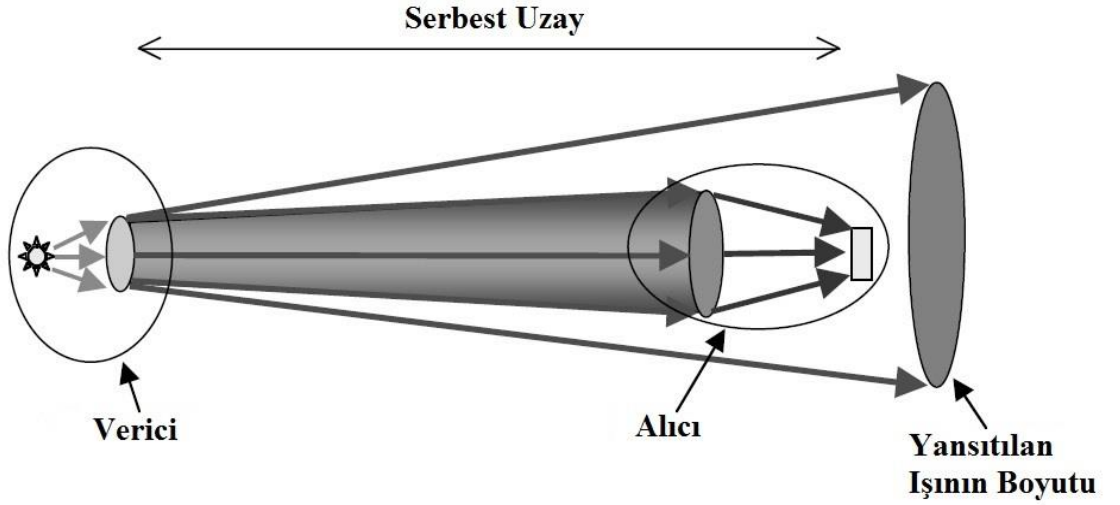
2.1.1. Kablosuz Optik Haberleşme Sistemlerinin Çalışma Prensipleri

Kablosuz optik haberleşme sistemleri, kablo ile iletim yapan fiber optik haberleşme sistemleri ile çok benzer şekilde çalışır. Fiber optik sistemlerden farkı ise iletim ortamının kablo değil atmosfer olmasıdır. Bundan dolayı iletilen sinyaldeki zayıflama miktarı bilinir ve kontrol edilebilir durumda değil aksine sürekli değişken ve tahmin edilemez durumdadır.

FSO haberleşme sistemleri frekans spektrumunun kızılötesi tarafında, VLC haberleşme sistemleri ise spektrumun görünür ışık tayfında çalışmaktadır. Günümüzde kullanılmakta olan OWC sistemlerde, görünür ışık bandına yakın olan 780nm-900nm arasındaki ve 1500nm-1600nm arasındaki dalga boyları kullanılmaktadır. Bu dalga boyları da 200 THz civarındaki frekanslara karşılık gelir. OWC’de kullanılan bu dalga boyu değerleri aynı zamanda fiber optik sistemler tarafından da kullanıldığından, OWC sistemlerin alıcı ve vericilerinde fiber optik sistemlerde kullanılan bileşenler rahatlıkla kullanılabilir.

OWC sistemlerin vericileri bir ışık kaynağı ve monte edilmiş bir teleskoptan oluşur. Kullanılan teleskop lensler veya parabolik aynalar ile tasarlanmış olabilir (Şekil 2.1) (Popoola, 2009). Oluşturulan teleskop ışını daraltma görevini yapar ve alıcıya doğru yansıtır. Pratikte, yansıtılan ışın demetinin ıraksama miktarı birkaç yüz mikro radyan ile birkaç miliradyan arasındadır. Örnek olarak, ışındaki 1 miliradyanlık bir ıraksama miktarı, 1 kilometre uzaklıkta ışının çapının 1 metre büyüklüğünde olması demektir (Willebrand ve Ghuman, 2002).

Bir noktadan-noktaya iletişim sisteminde, sistemin her iki noktasına da bir OWC alıcı-vericisi (tranceiver) yerleştirilir. Kablosuz optik haberleşme sistemlerinin iletim için ışığı kullanması, ışığın duvarlar ve ağaçlar gibi katı maddelerden geçme özelliğinin olmamasından dolayı, iletişim sağlanacak iki nokta arasında direkt görüş (Line of Sight) olmasını gerektirir. (VLC’de direkt görüş olmak zorunda değildir.)

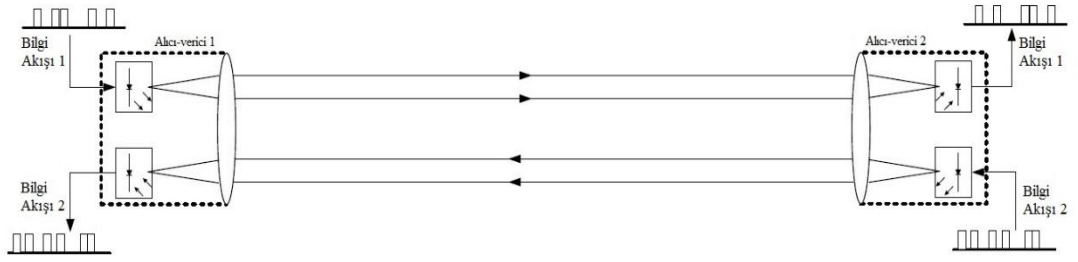


Şekil 2.1: Bir kablosuz optik haberleşme sisteminin şematik görünümü.

Bir lens veya ayna yardımı ile verici taraftan yansıtılan ışın demetleri alıcı tarafta toplanır ve alınan bu ışık bir fotodetektör üzerine odaklandırılır. Pratik sistemlerde alıcıya varan ışının boyutları (çapı) alıcıdaki detektör boyutundan büyük olmaktadır. Bu durum, iletim sonucunda yansıtılan ışının bir kısmının kaybolması anlamına gelmektedir. Işının ıraksama miktarına bağlı olarak, yansıtılmış ışının çapı birkaç metre boyutunda olabilir. Buna karşın tipik bir alıcıdaki teleskopun çapı 8-20 cm arasında değişmektedir. Yansıtılmış ışındaki bu kayba geometrik yol kaybı denir. Bu kaybı azaltmak için iletimde daha dar çapta bir ışın kullanılabilir. Ancak iletimde kullanılan dar çaplı ışınlar ya çok

stabil bir montaj platformu ya da daha gelişmiş bir aktif ışın-takip sistemi gerektirmektedir.

Bir OWC haberleşme sistemi çift yönlü olarak çalışabilir. Bu, noktadan-noktaya iletişim sistemlerinde her iki noktanın da aynı anda hem bilgi iletimi hem de bilgi alımı yapabileceği anlamına gelir. Çift yönlü iletişim yapabilen bir kablosuz optik haberleşme sisteminin blok diyagramı Şekil 2.2’de verilmiştir (Popoola, 2009).



Şekil 2.2: Kablosuz optik haberleşme sisteminin blok diyagramı.

Tipik bir OWC sisteminde iletim şu şekilde yapılır:

- İletilecek bilgi modülasyondan sonra, 1 ve 0'ları temsil edecek şekilde darbelerle dönüştürülür.
- Verici, dönüştürülmüş darbelerle uygun şekilde ışın demetleri oluşturarak kanala gönderir.
- Alıcı taraftaki fotodetektör, lens veya aynaları kullanarak gönderilen ışın demetlerini toplar.
- Odaklanmış ışın demetleri alıcı devre tarafından elektriksel sinyallere çevrilir ve bilgi elde edilir.

2.1.2. OWC Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları

Burada OWC sistemlerin güçlü ve zayıf yanları verilmiştir (Popoola, 2009).

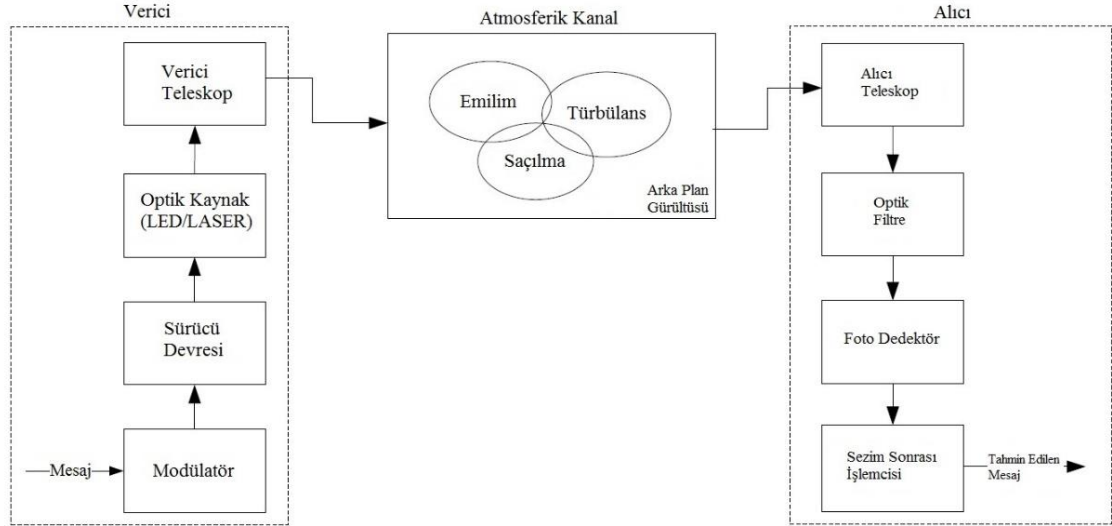
- RF sistemlere göre daha fazla bant genişliğine ve daha yüksek hıza sahiptir.
- Kurulumu hem RF hem de fiber optik haberleşme sistemlerine nazaran daha hızlı ve daha kolaydır.

- c) Kurulum maliyeti RF sistemlere göre çok daha azdır.
- d) İnce ışın demetlerine sahiptir. Işınlardan vericiden 1 kilometre uzaklıkta ancak birkaç metre çapa ulaşabilirler.
- e) Kullanılan ışık frekans spektrumunun kızılötesi frekans bölgesinde bulunduğu için gözle görülemez. Bu da iletişim içinde bulunmak istenmeyen üçüncü şahısların sinyali tespit etmesini zorlaştırır.
- f) Dünya üzerinde 300 GHz'in üzerindeki frekans değerleri için herhangi bir düzenleme bulunmamaktadır. OWC sistemleri 200 THz frekans etrafında çalıştıklarından herhangi bir çalışma lisansına gerek duymazlar.
- g) Güç tüketimi RF sistemlere göre daha düşüktür. Özellikle açık havalarda çok düşük verici gücü ile çalışabilirler.
- h) Elektromanyetik girişimden etkilenmezler.
- i) Aynı anda çift yönlü iletişime olanak verirler.
- j) Fiber optik sistemlerde kullanılan optoelektronik elemanlar OWC sistemlerde de kullanılabilir.
- k) FSO sistemlerin performansı hava koşullarına bağlıdır. Atmosferde meydana gelen özellikle sis, yağmur, kar gibi hava olayları haberleşme sisteminin performansını büyük ölçüde etkilemektedir.
- l) Kullanılan ışın demetlerinin darlığından dolayı direkt görüşe sahip iki nokta arasında kullanılmaları gerekmektedir.
- m) Arka planda bulunabilecek başka bir ışık kaynağı girişime neden olur (Güneş ışınları dahil olmak üzere).

2.2. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN BİLEŞENLERİ

Her haberleşme sisteminde olduğu gibi kablosuz optik haberleşme sistemleri de verici, alıcı ve iletim kanalından meydana gelmektedir. Bu bölümde blok diyagramları şekil

2.3’de (Popoola, 2009) görüldüğü biçimde olan kablosuz optik haberleşme sistemlerinin verici ve alıcı yapılarından bahsedilecektir.



Şekil 2.3: Kablosuz optik haberleşme sisteminin verici-alıcı yapıları.

2.2.1. OWC Sistemlerin Verici Yapısı

Vericinin ana görevi bilgi kaynağından gelen bilgiye göre taşıyıcıyı modüle etmektir. Daha sonra modüle edilmiş durumdaki bilgi atmosfer üzerinden alıcıya gönderilir. Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde en fazla kullanılan modülasyon şekli yoğunluk modülasyonudur (Intensity Modulation, IM). Bu modülasyon tipinde verici, optik ışımının yoğunluğunu modüle etmektedir. Bunu gerçekleştirmek için iletilmek istenen veriye göre optik kaynağın sürücü akımı direkt olarak veya dış bir modülâtör yardımı ile değiştirilir (Popoola, 2009).

Modern kablosuz optik haberleşme sistemlerinde optik bilginin iletimi için çok çeşitli ışık kaynakları kullanılır. Ancak günümüzde ticari sistemlerde aktif olarak kullanılan iletim kaynakları yarı-iletkenlerden oluşan kaynaklardır. Bu kaynaklar arasındaki ana farklar; dalga boyu, güç ve modülasyon hızıdır.

2.2.1.1. Işık Yayan Diyotlar (Light Emitting Diodes, LED)

Işık yayan diyotlar (LED), uygun voltaj altında ışık saçan yarıiletken malzemelerdir. LED’ler tipik olarak 1 MHz ile 100 MHz modülasyon bant genişliğinde çalışır. Daha yüksek modülasyon bant genişliği isteyen uygulamalarda kullanılabilen LED’ler yüksek optik güç veremez. 1 mW’lık bir LED yüksek güç veren LED’ler arasındadır. İletim

güçlerinin düşük olmasından ötürü uzun mesafeli bağlantılarda kullanılamazlar (Willebrand ve Ghuman, 2002). Uzun ömürlü ve düşük maliyetlidirler. Bir LED'in çalışma ömrü 10^5 saat kadardır. Bu da 11 yıla tekabül eder. Bazı LED'ler -65 ile +125 Celcius derece sıcaklık aralıklarında çalışabilirler. Ancak yüksek sıcaklıklarda çıkış gücü düşer. Görünür ışıkla iletişim sistemlerinde sıklıkla kullanılırlar.

2.2.1.2. Lazer

Karakteristik özellikleri olarak LED'lerden farklı olsalar da çalışma şekilleri LED'lere benzerdir. 0.1 – 1 W'lık çıkış gücü ile LED'lerden çok daha yüksek çıkış gücü üretebilirler. Fakat LED'lere göre daha hantal çalışırlar (Gagliardi ve Karp, 1995).

2.2.1.3. Lazer Diyotlar (LD)

Lazerlere benzer şekilde çalışan lazer diyotlar yarıiletken jonksiyonlardan oluşan malzemelerdir. Günümüzdeki neredeyse tüm ticari serbest uzay optik haberleşme endüstrisi, küçük boyutlu, yüksek çıkış gücüne sahip ve uygun fiyatlı olduklarından ışık kaynağı olarak lazer diyotları kullanmaktadır (Willebrand ve Ghuman, 2002). Tablo 2.1'de kablosuz optik haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan ışık kaynakları ve özellikleri verilmiştir (Popoola, 2009).

Tablo 2.1: Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde kullanılan ışık kaynakları.

Dalga boyu (nm)	Tip	Açıklama
~850	Dikey boşluklu yüzey emilimli lazerler	Ucuz ve kolay bulunabilir (CD lazerleri) Aktif bir soğutmaya ihtiyaç yok Güç yoğunluğu düşük ~10 Gbps'a kadar güvenilir iletişim Tipik güç: 6mW
~1300/1550	Fabry-Perot lazerleri Dağılımlı geri beslemeli lazerler	Uzun ömürlü Göz güvenliği kriteri düşük Güç yoğunluğu yüksek (100mW/cm ²) 40 Gbps'a kadar hız sağlayabilir 0.03-0.2 W/A eğim verimine sahiptir Tipik güç: 28mW
~10.000	Kuantum kademeli lazerler	Pahalı ve yeni bir sistem Hızlı ve yüksek hassasiyete sahip Sis durumunda daha iyi iletim karakteristiği gösterir Bileşenleri kolay bulunabilir değildir Camdan geçemez Çıkış gücü: 100mW'a kadar
Kızılötesi bandına yakın	LED	Ucuzdur Düşük güç yoğunluğuna sahip Güvenli Sürücü devresi basit Data hızı yavaş: <200 Mbps Tipik güç: <10 mW

2.2.2. OWC Sistemlerin Alıcı Yapısı

Aynı vericiler gibi alıcılar da kablosuz optik haberleşme sistemlerinin önemli bileşenlerinden biridir. Vericiden yansıtılan optik ışını toplayarak iletilen veriyi elde etme görevini yerine getirir. Alıcı aşağıdaki elemanlardan oluşur.

a) Alıcı teleskop – Vericiden yansıtılan optik radyasyonu toplar ve foto detektör üstüne odaklar. Kullanılan teleskopun açıklığı ne kadar geniş olursa odaklanan sinyal de o kadar doğruya yakın olur. Çünkü geniş bir açıklığa sahip teleskop daha fazla miktarda ışık odaklayabilir. Ancak geniş açıklıklı teleskoplar yüksek arka plan gürültüsü yaratır.

b) Optik bant geçiren süzgeç – Arka plan gürültüsünü azaltmak için kullanılır.

c) Foto detektör – Alınan optik sinyali elektriksel sinyale çevirme işini yapan PIN veya APD diyottan üretilmiş bir malzemedir. Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde en yaygın olarak kullanılan foto detektörler Tablo 2.2'de gösterilmiştir (Popoola, 2009).

d) Karar devresi – Burada, veriyi yüksek doğruluk oranı ile yeniden elde edebilmek amacıyla, kuvvetlendirme, filtreleme ve sinyal işleme teknikleri uygulanır.

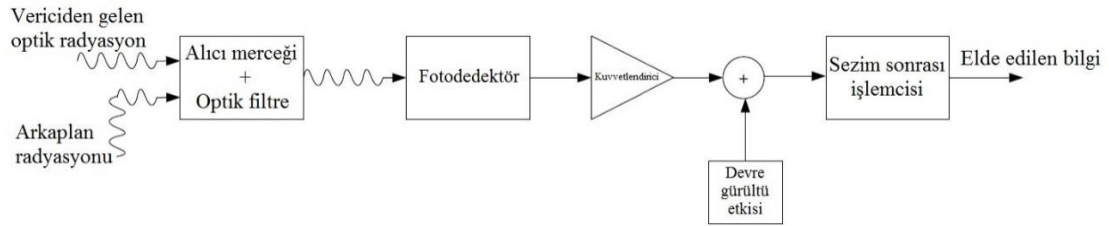
Kablosuz optik haberleşme sistemleri iki farklı tip alıcı kullanır. Bunlar direk sezim yapan (direct detection) alıcılar ve eş evreli sezim yapan (coherent detection) alıcılardır.

Tablo 2.2: Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde kullanılan foto dedektörler.

Malzeme	Dalga boyu (nm)	Tepki	Tipik Duyarlılık	Kazanç
Silikon PIN	300-1100	0.5	155 Mbps'de -34 dBm	1
Silikon PIN ile birlikte trans empedans kuvvetlendirici	300-1100	0.5	1.25 Gbps'de -26 dBm	1
InGaAs PIN	1000-1700	0.9	155 Mbps'de -46 dBm	1
Silikon APD	400-1000	77	155 Mbps'de -52 dBm	150
InGaAs APD	1000-1700	9	1.25 Gbps'de -33 dBm	10

2.2.2.1. Direk Sezim Yapan Alıcılar

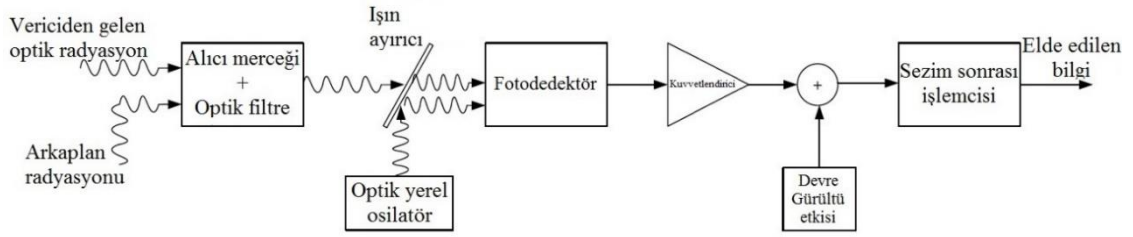
Bu tip alıcılar foto detektöre gelen optik ışımının yoğunluğunu ve gücünü algılar. Dolayısı ile foto detektörün çıkışı optik alanın gücü ile orantılıdır. Uygulaması çok basit ve yoğunluk modülasyonlu optik sistemler için çok uygundur (Gagliardi ve Karp, 1995). Bu tip alıcılara ait blok diyagramı Şekil 2.4'de gösterilmiştir (Popoola, 2009).



Şekil 2.4: Direk sezim yapan alıcılara ait blok diyagramı.

2.2.2.2. Eş Evreli Sezim Yapan Alıcılar

Eş evreli sezim yapan alıcı foto-karma (photo-mixing) işlemini gerçekleştirir. Alıcıya gelen optik alan, foto detektörün yüzeyinde lokal olarak üretilen bir başka optik alan ile karıştırılır. Eş evreli sezim yapan alıcılar homodin (homodyne) ve heterodin (heterodyne) olmak üzere iki farklı alt sisteme ayrılabilir. Homodin alıcılarda lokal optik osilatörün frekansı/dalga boyu gelen ışımının frekansına/dalga boyuna eşittir. Heterodin alıcılarda ise bu değerler birbirinden farklıdır. Eş evreli sezim yapan alıcıya ait blok diyagramı Şekil 2.5'de gösterilmiştir (Popoola, 2009).



Şekil 2.5: Eş evreli sezim yapan alıcılara ait blok diyagram.

2.3. KANAL

Kanal, atmosferi oluşturan gaz moleküllerinden ve atmosferde bulunan küçük partiküllerden (aerosol) oluşmaktadır. Bu nedenle kablosuz optik haberleşme sistemlerinde kanala atmosferik kanal da denir. Atmosferi oluşturan, dolayısı ile iletimi etkileyen moleküller Tablo 2.3’de verilmiştir. Ayrıca atmosferde, hava olayları nedeniyle oluşan sis, yağmur, kar gibi maddeler de mevcut olabilir. Bu partiküller atmosferden iletilen optik ışında emilime ve saçılmaya neden olur.

Güneşten gelen ışınlar yeryüzünün yüzeyi tarafından emilir. Bunun sonucunda yüzeye yakın olan hava kütlelerinin ısısı artar. Böylece ısı olarak farklı durumlarda bulunan hava kütleleri meydana gelir ve atmosferin kırılma indisinde dalgalanmalar oluşturur. Bu dalgalanmalara atmosferik türbülans denir. Atmosferik kanallarda ışıma yapan sinyale zarar veren etmenlerden biri de budur (Popoola, 2009).

Tablo 2.3: Atmosferi oluşturan moleküller, partiküller ve miktarları.

Bileşenler	Hacim Oranı (%)	Milyon başına parça sayısı (ppm)
Azot (N ₂)	78.09	
Oksijen (O ₂)	20.95	
Argon (Ar)	0.93	
Karbondioksit (CO ₂)	0.03	
Su buharı (H ₂ O)		40 – 40,000
Neon (Ne)		20
Helyum (He)		5.2
Metan (CH ₄)		1.5
Kripton (Kr)		1.1
Hidrojen (H ₂)		1
Azot oksit (N ₂ O)		0.6
Karbon monoksit (CO)		0.2
Ozon (O ₃)		0.05
Ksenon (Xe)		0.09

2.3.1. Güç Kaybı

Optik vericiden gönderilen ışın atmosfer üzerinde ilerlerken ışına ait fotonlar atmosferde bulunan su buharı, CO₂, sis, duman gibi maddelerin molekülleri ile çarpışarak bu moleküller tarafından yutulur ve enerjileri ısıya dönüşür (emilim). Bazı fotonların ise yönleri değişir (saçılma). Bu gönderilen ışının güç kaybına uğramasına neden olur.

Optik ışına atmosferde yol alırken genişler. Alıcıya varan ışının boyutu alıcının boyutlarından daha büyük hale gelir. Bu nedenle alıcı kendisine gönderilen ışının tamamını alamaz. Bu durum da alıcı tarafta ışının verici taraftakine göre bir güç kaybına uğramasına neden olur (Hariq, 2013).

2.3.1.1. Yol Kaybı

Atmosferik kanalda yol alan optik alan emilme ve saçılma etkilerinden dolayı zayıflar. Atmosferde bulunan partiküllerin yoğunluğu ve konumu zamanla değişir. Atmosferde yol alan ışığın hem saçılma hem de emilimden dolayı zayıflama durumu, Beer-Lambert kanunu ile açıklanabilir.

Optik ışımının atmosferdeki iletimi, τ , verici ve alıcı arasındaki mesafenin (d) bir fonksiyonu olarak Beer-lambert kanunu ile aşağıdaki gibi verilir (Willebrand ve Ghuman, 2002).

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

Burada $\gamma(\lambda)$ toplam zayıflama katsayısını, P_R alınan gücü, P_T verici gücünü ve λ optik ışının dalga boyunu gösterir. Toplam zayıflama katsayısı atmosferde bulunan moleküllerin ve partiküllerin saçılma ve emilim katsayılarının toplamından oluşur.

$$\gamma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (2.2)$$

Buradaki ilk iki terim moleküler bileşenlerin ve partiküllerin emilim katsayılarını, son iki terim ise saçılma katsayılarını göstermektedir.

Saçılma

Işığın saçılması kablosuz optik haberleşme sistemlerinin performansını büyük ölçüde etkiler. Işığın emilimi dolayısı ile güç kaybı ortaya çıkaran bir olay değildir. Saçılma,

optik radyasyonun atmosferde ilerlerken yön değiştirmesi olayıdır. Bu da alıcıda alınan ışığın şiddetinde önemli ölçüde azalmaya sebep olur. Birkaç farklı saçılma tanımı mevcuttur. Bunlardan bir tanesi; $x_0 = \frac{2\pi r}{\lambda}$ olarak verilir. Burada r , ışığın yolda karşılaştığı partiküllerin yarıçapı, λ ise ışığın dalga boyudur. x_0 'nun 1 değerinden çok küçük olduğu durumlar için saçılma Rayleigh saçılmasıdır. x_0 'ın 1 değerine yaklaşık olduğu durumlar için saçılma Mie saçılmasıdır. x_0 'ın 1 değerinden çok büyük olduğu durumlar için ise saçılma geometrik optikler kullanılarak tanımlanır. Şekil 2.6'da Rayleigh saçılmasının ışığın dalga boyuna bağlı olarak değişimi gösterilmiştir (Willebrand ve Ghuman, 2002).

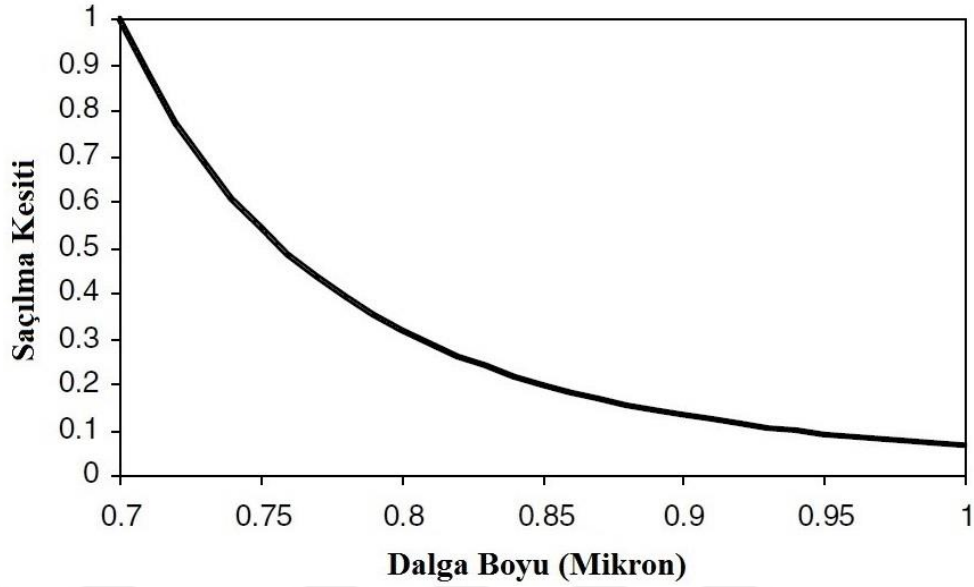
Vericiden gönderilen ışının dalga boyu atmosferdeki sis partiküllerinin boyutları ile yaklaşık olarak aynı olduğundan sis, optik ışının saçılmaya uğramasındaki en büyük etkendir. Bu gibi saçılmalar Mie rejimi ile tanımlanır.

$$\beta_a(\lambda) = \frac{3,91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (2.3)$$

Burada V , görüş mesafesini (km), λ , dalga boyunu (nm), q ise görüş mesafesine bağlı olarak değişen bir katsayıyı göstermektedir. Bu katsayı Kim modeli ve Krause modeli olarak iki farklı model ile tanımlanır. Tablo 2.4'de bu iki modele ait q katsayısının aldığı değerler verilmiştir (Bouchet ve diğ., 2006).

Tablo 2.4: "q" katsayısına ait Kim ve Krause modelleri.

Kim Modeli		Krause Modeli	
q	Görüş Mesafesi	q	Görüş Mesafesi
1.6	$V > 50$ km	1.6	$V > 50$ km
1.3	$6\text{km} < V < 50\text{km}$	1.3	$6\text{km} > V > 50\text{km}$
$0.16V + 0.34$	$1\text{km} < V < 6\text{km}$	$0.585V^{1/3}$	$V < 6\text{km}$
$V - 0.5$	$0.5\text{km} < V < 1\text{km}$		
0	$V < 0.5\text{km}$		



Şekil 2.6: Rayleigh saçılmasının dalga boyuna bağlı olarak değişimi.

Emilme

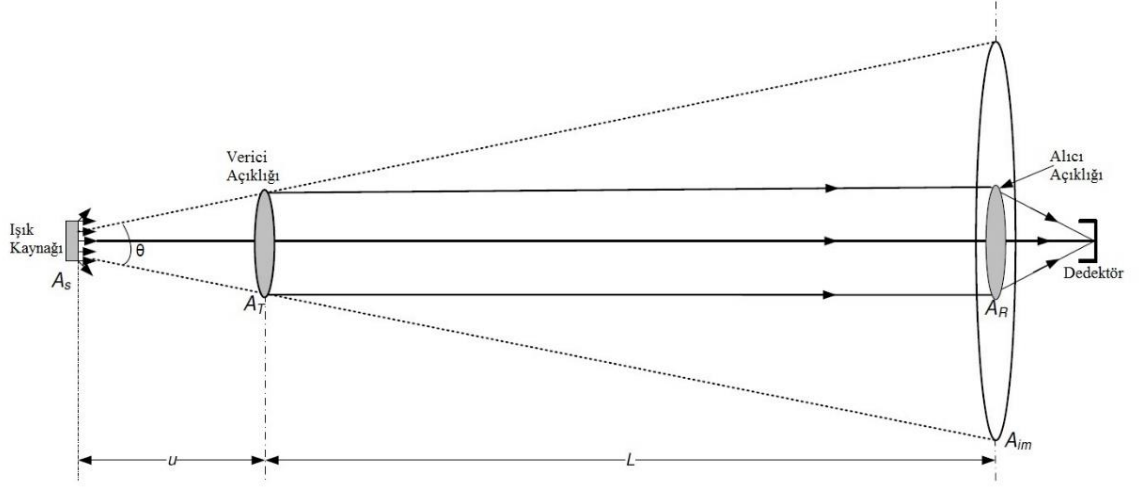
Emilim, vericiden gönderilen ışının fotonlarının atmosferdeki moleküller ile teması sırasında yutulup enerjilerinin ısıya dönüşmesi olayıdır. Emilimin büyüklüğü gaz moleküllerinin türüne ve yoğunluğuna aynı zamanda kullanılan ışının dalga boyuna da bağlıdır (Gagliardi ve Karp, 1995). Dolayısı ile kullanılacak olan ışığın dalga boyu minimum emilim ortaya çıkaracak şekilde seçilir. Bu da zayıflama katsayısı hesabında saçılma katsayısının diğerlerine göre daha etkili olması demektir. Yani zayıflama katsayısı $\gamma(\lambda) \cong \beta_a(\lambda)$ şeklinde yazılabilir (Willebrand ve Ghuman, 2002).

2.3.1.2. Optik Işının Genişlemesi

Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde kullanılan ışının dar olması, sistemi hem daha güvenli hale getirir hem de alıcıda optik alanın daha az kayıpla alınmasını sağlar. Fakat ışının kırınıma uğramasından dolayı alıcıdan yansıtılan ışın gitgide genişler. Bu durumda da alıcı vericiden gelen ışımının ancak belirli bir kısmını alabilir. Böylece optik ışın genişleme kaybı meydana gelir. Buna geometrik kayıp da denilir. Şekil 2.7’de ışının genişlemesi gösterilmiştir. Işının genişlemesi ile meydana gelen kayıp dB cinsinden eşitlik (2.4)’deki gibi verilmiştir (Bouchet ve diğ., 2006).

$$L_{Geom} = -10 \left[\log \left(\frac{A_T A_R}{d^2 \lambda^2} \right) + 2 \log \left(\frac{4}{\pi} \right) \right] \quad (2.4)$$

Burada A_T verici açıklığının alanını, A_R ise alıcı açıklığının alanını göstermektedir.



Şekil 2.7: Optik ışının genişleme diyagramı.

2.3.2. Atmosferik Türbülans

Güneşten Dünya'ya gelen ışınların belirli bir kısmı yüzey tarafından emilir ve yüzeydeki hava kütesini ısıtır. Dolayısı ile atmosferde farklı sıcaklıklara sahip hava kütleleri oluşur. Bu da atmosfer kırılma indisinde değişimlere yol açar. Atmosfer kırılma indisindeki değişimler çapları 0,1cm'den 10m'ye kadar değişen girdaplar ve hava hücreleri meydana getirir. Oluşan bu girdaplar ve hava hücreleri kendilerine ait farklı kırılma indisleri olan prizmalar gibi davranırlar (Killinger, 2002). Vericiden yansıtılan ışın bu girdaplara ve hava hücrelerine çarptığında kırınım katsayılarına göre ya kısmen ya da tamamen yönlerinden saparlar. Böylece bazı ışınlar alıcı tarafından alınamaz. Sonuç olarak atmosferde alıcıya yansıtılan bu ışımının parlaklığında rasgele değişimler olur ve bu durum serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde performansı önemli ölçüde düşürür. Atmosferik türbülans, atmosfer basıncı ve yüksekliğine, rüzgar hızına ve sıcaklığın homojensizliğinden dolayı değişen kırılma indisine bağlıdır. Atmosferik türbülansın bilinen etkileri aşağıda verilmiştir (Hariq, 2013).

- Işın sapması** – ışının, kırılmalar sonucu orijinal rotasından çıkıp alıcıyı ıskalaması durumudur.
- Görüntü dalgalanması** – ışının varış açısının değişmesi sonucu alıcının görüş alanında dalgalanmalar meydana gelir.

- c) **Işın yayılması** – Saçılma dolayısı ile ışının genişlemesi sonucu alınan ışında güç kaybı oluşur.
- d) **Işın parıldaması** – Alıcı taraftaki optik radyasyonda meydana gelen zararlı girişimler nedeniyle optik ışımının uzaysal güç yoğunluğunda değişimler görülmesidir.
- e) **Uzaysal uyumun azalması** – Özellikle eş evreli sezim yapan alıcılarda görülen bu durum optik radyasyonun fazının da atmosferik türbülansın etkilenmesi sonucu oluşur.
- f) **Polarizasyon kararsızlığı** – Türbülanslı ortamdan geçen optik alanın polarizasyonunda meydana gelen değişimlerdir. Ancak atmosferik türbülansın yatay şekilde ilerleyen optik ışımının polarizasyon dalgalanması ihmal edilebilir seviyededir.

2.3.2.1. *Atmosferik Türbülans Kanal*

Atmosfer boyunca ilerleyen bir optik ışımının izlediği yolun kırılma indisindeki rastgele dalgalanmalar atmosferik türbülansı oluşturur. Kırılma indisindeki bu rastgele değişimler atmosferik sıcaklıkların noktadan noktaya rasgele değişmesinin bir sonucudur. Atmosferik sıcaklık değişimleri ise, rüzgar hızı, atmosferik basınç ve yüksekliğin bir fonksiyonudur. Atmosferik türbülans, atmosferde oluşan çok sayıda girdaplara denir. Oluşan bu girdapların en küçüğü, l_0 , en büyüğü ise L_0 , olarak adlandırılır. l_0 , tipik olarak birkaç milimetre boyutlarında iken, L_0 , birkaç metre boyutlarındadır (Popoola, 2009).

Atmosferik türbülans kanallarının modellenmesinde, Taylor hipotezi geniş bir kitle tarafından kabul görmüştür (Karp ve diğ., 1988). Taylor'a göre atmosferik türbülans kanalının istatistikleri zamanla değişime uğramaktadır. Ayrıca atmosferde oluşan girdaplar sabit ve donmuş durumdadırlar ve bu donmuş formlarında yalnızca rüzgarın, enine hareketi ile hareket edebilirler. Bu hipotez, ışının düzenindeki zamansal değişimler veya bu düzendeki istatistiksel özelliklerin rüzgarın atmosferde ilerleyen dalgaya dik olarak hareketinden dolayı değişimini savunmaktadır. Ek olarak, atmosferik türbülansın uyum zamanı (temporal coherence time), τ_0 , milisaniyeler mertebesinde. Bu süre de tipik bir iletim süresinden çok daha uzundur. Dolayısı ile atmosferik türbülans kanal için yavaş sönmülemeli bir kanal denilebilir. Çünkü bir iletim süresi boyunca özellikleri değişmez.

Atmosfer sıcaklığı ve kırılma indisi, n , arasındaki ilişki aşağıdaki gibi verilmiştir (Popoola, 2009).

$$n = 1 + 77.6 \left(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2} \right) \frac{P}{T_e} \times 10^{-6} \quad (2.5)$$

Burada P , milibar cinsinden atmosferik basıncı, T_e , Kelvin cinsinden sıcaklığı ve λ ise mikron cinsinden dalga boyunu göstermektedir. $n(r, t)$, kırılım indisinin pozisyona ve zamana bağlı fonksiyonu olmak üzere:

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

Denkleminde n_0 , türbülanssız durumdaki sabit ve $n_1(r, t)$, türbülans kaynaklı rastgele dalgalanma bileşenidir. Taylor'un hipotezine göre yukarıdaki denkleminde türbülans kaynaklı rastgele dalgalanma biçimi olan $n_1(r, t)$, şu şekilde yazılabilir;

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

Burada $v(r)$, rüzgarın ışımaya dik olan bileşeninin hızıdır. Atmosferik türbülansla, kırılma indisi dalgalanma miktarını veren parametre, kırılma yapı parametre indisi olarak adlandırılan C_n^2 dir. C_n^2 için genellikle kullanılan model aşağıda verilmiş olan Hafnagel-Valley (H-V) modelidir (Popoola, 2009).

$$C_n^2(h') = 0.00594 \times \left(\frac{v}{27} \right)^2 \times (10^{-5} \times h')^{10} \times \exp\left(-\frac{h'}{1000} \right) + 2.7 \times 10^{-16} \times \exp\left(-\frac{h'}{1500} \right) + A \exp\left(-\frac{h'}{100} \right) \quad (2.8)$$

Burada v , m/sn cinsinden rüzgar hızını, h' , metre cinsinden yüksekliği ve $A(m^{-2/3})$, yeryüzünde v 'nin nominal olarak değerini göstermektedir. Atmosferin kırılma yarıçapı parametre indisi yükseklik ile değişir. Ancak yatay bir ışımaya için sabit olarak varsayılır. C_n^2 , tipik olarak yüksek türbülans için $10^{-12} m^{-2/3}$ ile düşük türbülans için $10^{-17} m^{-2/3}$ arasında değişim göstermekle birlikte ortalama olarak $10^{-15} m^{-2/3}$ değerini alır.

Doğası gereği türbülanslı ortamı matematiksel olarak ifade etmek çok zordur. Bunun sebebi sürecin temeli olan izlenebilir parçacıkların lineer olmayan karışımıdır. Atmosferde ilerleyen optik bir ışının PDF ve varyans gibi istatistiksel özelliklerini

çıkartabilmek için şu iki basit ancak geçerli varsayımlar matematiksel işlemleri kabul edilebilir bir seviyeye indirmek amacıyla kullanılmaktadır (Osche, 2002).

1) Atmosfer, ışıma yapan dalga için enerji tüketmeyen bir kanaldır. Bunun sebebi, yayılan dalga veya ışımanın atmosfer tarafından absorbe edilme işlemi gerçekleşirken ortaya çıkan ısının diğer etkenlere göre daha göz ardı edilebilir olmasıdır.

2) Türbülans girdapları tarafından saçılmaya uğrayan ışın enerji kaybetmez. Dolayısı ile türbülansın varlığı sırasındaki ortalama enerji türbülansın bulunmadığı durumlardaki enerji ile eşittir. Bu kabul, düz ve küresel olan yayınımlarda geçerlidir.

2.3.2.2. Log-Normal Türbülans Kanal

Türbülansın zayıf olduğu ve bu türbülansı karakterize eden tek saçılmanın var olduğu durum için atmosferdeki ışınımın log-yoğunluğu (l) normal dağılımlıdır.

$$l \sim N(\mu_l, \sigma_l^2) \quad (2.9)$$

Burada; σ_l^2 , log-yoğunluğunun varyansını ve μ_l , log-yoğunluğunun ortalamasını gösterir. Log-yoğunluğunun varyansı aynı zamanda Rytov varyansı olarak da adlandırılır.

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

Burada $C_n^2 (m^{-2/3})$, atmosferin kırılma yapı parametre indisini, $k = 2\pi/\lambda$ ise optik dalgaların sayısını göstermektedir. Dolayısı ile atmosferdeki ışımanın yoğunluğunun olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibidir (Popoola, 2009).

$$p(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_l^2}} \frac{1}{I} \exp \left\{ -\frac{\left[\ln \left(\frac{I}{I_0} \right) - \mu_l \right]^2}{2\sigma_l^2} \right\} \quad (2.11)$$

$$I = I_0 \exp(l) \quad (2.12)$$

Burada I_0 , atmosferik türbülansın olmadığı koşulda alınan ışıma yoğunluğunun ortalamasıdır. Türbülansın dolaylı saçılmada enerji kaybı yaşanmadığından dolaylı ışıma

yoğunluğunun olasılık yoğunluk fonksiyonu ifadesindeki I 'nin enerjisi normalize edilmelidir. I 'nin normalize olabilmesi için $\mu_l = -\sigma_l^2/2$ şartı sağlanmalıdır. Eşitlik (2.11) ile verilen ifade log-normal dağılıma ait olasılık yoğunluk fonksiyonudur.

Parlaklık dalgalanmalarının olasılık yoğunluk fonksiyonu bulunduğundan sonra şiddetini karakterize eden varyansı da bulunabilir. Parlaklık dalgalanmalarının varyansı eşitlik (2.13)'deki gibidir (Popoola, 2009).

$$\sigma_l^2 = E[I^2] - E[I]^2 = I_0^2 \left\{ E[\exp(2l)] - E[\exp(l)]^2 \right\} = I_0^2 [\exp(\sigma_l^2) - 1] \quad (2.13)$$

Optik yoğunluğun normalize varyansı, parıldama indisi olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi yazılır.

$$S.I. = \sigma_N^2 = \frac{\sigma_l^2}{I_0^2} = \exp(\sigma_l^2) - 1 \quad (2.14)$$

Burada parıldama indisi, S.I. olarak gösterilmiştir. Parıldama indisi türbülans modelinin zayıflık durumunu etkiler.

2.3.2.3. Gamma-Gamma Türbülans Kanal

Andrews ve diğ. (2001) tarafından ortaya atılan bu kanal modeli, atmosferik türbülansla ilerleyen ışık radyasyonu dalgalanmasının, küçük ölçekli saçılma ve büyük ölçekli kırılma etkilerine uğradığı varsayımları üzerinde temellendirilmiştir. Küçük ölçekli saçılma, girdapların ve hücrelerin Fresnel bölgesinden ($R_F = (L/k)^{1/2}$) ya da tutarlılık yarıçapından (p_0), daha küçük olmaları ile oluşur. Diğer yandan büyük ölçekli dalgalanmalar türbülans girdaplarının ilk Fresnel bölgesinden büyük olmaları ile oluşturulur. Büyük ölçekli girdapların, küçük ölçekli olanları modüle ettiği düşünülür. Sonuç olarak normalize alınan ışınım, I , iki istatistiksel bağımsız rastgele sürecin çarpımı olarak verilir. (I_x ve I_y)

$$I = I_x I_y \quad (2.15)$$

I_x ve I_y , sırası ile büyük ölçekli ve küçük ölçekli türbülans girdaplarından gelmekte olup ikisi de gamma dağılımına uymaktadır. Olasılık yoğunluk dağılımları şu şekildedir.

$$p(I_x) = \frac{\alpha(\alpha I_x)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-\alpha I_x); \quad I_x > 0; \alpha > 0 \quad (2.16)$$

$$p(I_y) = \frac{\beta(\beta I_y)^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \exp(-\beta I_y); \quad I_y > 0; \beta > 0 \quad (2.17)$$

I_x 'i sabit tutup değişken değiştirme metodu uygulanırsa, $I_y = I / I_x$ olur. I_y , eşıtlık (2.17)'de yerine konulduğunda eşıtlık aşığıdaki hale gelir.

$$p(I / I_x) = \frac{\beta(\beta I / I_x)^{\beta-1}}{I_x \Gamma(\beta)} \exp(-\beta I / I_x); \quad I > 0 \quad (2.18)$$

Koşulsuz dağılımı elde edebilmek için $p(I / I_x)$ 'in I_x üzerinden ortalaması alınmalıdır.

$$p(I) = \int_0^{\infty} p(I / I_x) p(I_x) dI_x \quad (2.19)$$

$$p(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}); \quad I > 0 \quad (2.20)$$

Burada α ve β sırası ile saçılma işleme ait küçük ölçekli ve büyük ölçekli girdaplardır.

$K_n(\cdot)$, 2. dereceden n. tür Bessel fonksiyonunu, $\Gamma(\cdot)$ ise Gamma fonksiyonunu temsil eder. Eğer alıcı taraftaki optik ışıma düz bir dalga ise α ve β atmosferik şartlara göre aşığıdaki gibi bağlıdır (Popoola, 2009).

$$\alpha = \left[\exp\left(\frac{0.49\sigma_l^2}{(1+1.11\sigma_l^{12/5})^{7/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (2.21)$$

$$\beta = \left[\exp\left(\frac{0.51\sigma_l^2}{(1+0.69\sigma_l^{12/5})^{5/6}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (2.22)$$

Parıldama indexi ise aşığıdaki gibi gösterilir.

$$\sigma_N^2 = \exp \left[\left(\frac{0.49\sigma_i^2}{(1+1.11\sigma_i^{12/5})^{7/6}} \right) + \left(\frac{0.51\sigma_i^2}{(1+0.69\sigma_i^{12/5})^{5/6}} \right) \right] - 1 \quad (2.23)$$

2.3.2.4. Görünür Işık Kanal (Visible Light Channel)

Görünür ışıkla iletişim sistemleri için özel olarak modellenmiş bir atmosferik kanal modeli bulunmamaktadır. Bunun yerine görünür ışıkla iletişim sistemlerinde kanal tasarımı her bir sistem için özel olarak yapılır. Bir görünür ışık sisteminde kanalın DC kazancı eşitlik (2.24)'de verildiği gibi hesaplanır (Komine ve Nakagawa, 2004).

$$H(0) = \frac{(m+1)A}{2\pi D_d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) \cos(\psi) \quad 0 \leq \psi \leq \Psi_c \quad (2.24)$$

Burada A, foto detektörün alıcı alanını, D_d , seçilen iki alıcı-verici çifti arasındaki uzaklığı, ψ , gönderilen ışının alıcının normali ile yaptığı açığı, ϕ , gönderilen ışının vericinin normali ile yaptığı açığı, $T_s(\psi)$, optik filtrenin kazancını, Ψ_c , alıcının görüş alanını, $g(\psi)$ ise optik konsantratörün kazancını göstermektedir. Optik konsantratörün kazancı eşitlik (2.25)'deki gibi hesaplanabilir. m ise Lambertian emisyonunun seviyesidir ve eşitlik (2.26)'daki gibi hesaplanabilir.

$$g(\psi) = \frac{n^2}{\sin^2 \Psi_c} \quad 0 \leq \psi \leq \Psi_c \quad (2.25)$$

Burada n , ışığın kırılma indeksidir.

$$m = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos \Phi_{1/2})} \quad (2.26)$$

Burada $\Phi_{1/2}$, kullanılan ışık kaynağının yarı gücündeki yarı açısıdır (semi-angle at half power).

Bu eşitlikler bir görünür ışık iletişim sisteminde her alıcı-verici çifti arasındaki direkt görüş durumuna ait olan kanal DC kazancı oluşturur. Ancak vericiden gönderilen ışın demeti alıcıya sadece direkt görüş yolu üzerinden gitmez. Dolayısı ile doğru bir kanal

modellemesi yapılması isteniyorsa ışığın alıcıya ulaşırken yapmış olduğu yansımaların da hesaba katılması gerekmektedir. İlk yansıma için kanal DC kazancı eşitlik (2.27)'de verilmiştir (Komine ve Nakagawa, 2004).

$$H(1) = \frac{(m+1)A}{2\pi^2 D_1^2 D_2^2} \rho dA_{\text{wall}} \cos^m(\phi) \cos(\alpha) \cos(\beta) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \quad (2.27)$$

Burada D_1 , seçilen bir verici ile yansıma noktası arasındaki uzaklık, D_2 , seçilen yansıma noktası ile alıcı arasındaki uzaklık, ρ , yansıma katsayısı, dA_{wall} , yansıtan küçük bölgenin alanı, ϕ , vericiden yansıma noktasına giden ışın demetinin vericinin normali ile yaptığı açı, α , yansıma noktasına gelen ışının normalle yaptığı açı, β , yansıma noktasından yansıyan ışının normalle yaptığı açı, ψ , alıcıya gelen ışının normalle yaptığı açıdır.

Alınan optik güç, vericiden gelen optik güç üzerinden eşitlik (2.28)'deki gibi çıkarılabilir.

$$P_r = P_t H(0) + P_t H(1) + P_t H(2) + \dots + P_t H(k) \quad (2.28)$$

Burada P_r , alınan güç, P_t , vericiden gelen güç, $H(0)$, alıcı-verici çifti arasındaki direkt görüşe ait DC kazanç, $H(k)$ ise k. yansıma için DC kazançtır.

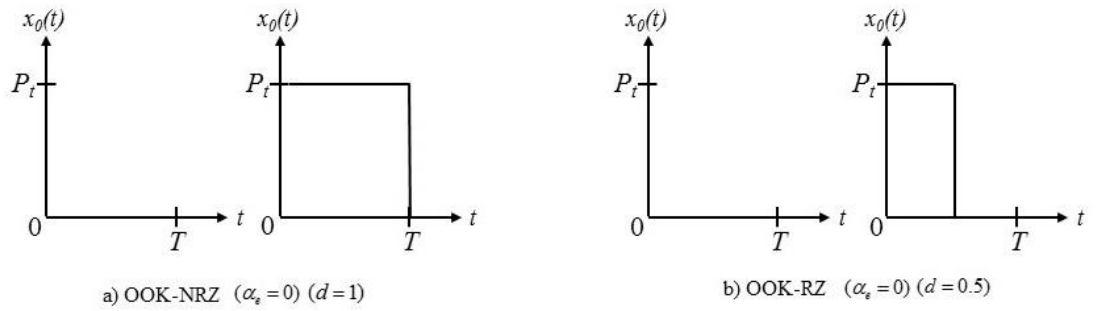
2.4. MODÜLASYON TEKNİKLERİ

Bu bölümde kablosuz optik haberleşme sistemlerinde sıklıkla kullanılan modülasyon çeşitlerinden kısaca bahsedilecek ve AWGN kanallardaki bit-hata oranı performansları verilecektir. Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde en sık kullanılan modülasyon teknikleri, Aç-Kapa Anahtarlama (On-Off Keying, OOK), Darbe Konum Modülasyonu (Pulse Position Modulation, PPM) ve Darbe Yükseklik Modülasyonudur (Pulse Amplitude Modulation, PAM). Tasarlanan bir sistem için uygun modülasyon yöntemi seçilmesinde güç verimliliği ve bant genişliği verimliliği önemli kriterlerdir (Popoola, 2009). Ancak gerçekleştirme basitliği uygun modülasyon türünün seçilmesindeki en önemli parametredir. Güç verimliliği ve bant genişliği verimliliği ne olursa olsun eğer kullanılan modülasyon tekniği karmaşık yapıda ise maliyeti fazla olacağından pratik sistemlerde kullanılması imkânsız hale gelebilir.

Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde en çok kullanılan teknik yoğunluk modülasyonu / direk sezim tekniği (Intensity Modulation / Direct Detection, IM/DD) olduğundan burada anlatılacak olan modülasyon tekniklerinin hepsinde taşıyıcının yoğunluğu bilgi bitleri tarafından modüle edilmekte ve alıcı tarafta direk sezim işlemi ile yeniden elde edilmektedir.

2.4.1. Aç-Kapa Anahtarlama Modülasyonu

Aç-kapa anahtarlama modülasyonu ticari kablosuz optik haberleşme sistemlerinde en sık kullanılan modülasyon çeşididir. Bunun sebebi özellikle tasarımının ve implementasyonunun basit olmasıdır. Sıfıra dönüşlü (Return-zero, RZ) ve sıfıra dönüşsüz (Non-return-zero, NRZ) formatlarında kullanılabilir. Sıfıra dönüşsüz olan formatta maksimum gücü $\alpha_e P_T$ olan ve “0” bitini temsil eden bir optik darbe (pulse) ile maksimum gücü P_T olan ve “1” bitini temsil eden bir optik darbe kullanılır. α_e ’nin değeri $0 \leq \alpha_e < 1$ aralığında değişebilir (Popoola, 2009). Optik darbenin süresi (d) sembolün süresi (T) ile aynıdır. Sıfıra dönüşlü formatta ise optik darbe süresi sembol süresinden daha kısadır. Bu da güç verimliliği konusunda sıfıra dönüşlü sistemlerin sıfıra dönüşsüz sistemlere göre avantajlı olduğu anlamına gelir. Ancak sıfıra dönüşlü format sıfıra dönüşsüz formata göre daha fazla bant genişliğine ihtiyaç duyar. Bu da bant genişliği verimliliği açısından sıfıra dönüşlü formatın dönüşsüz format karşısındaki bir dezavantajıdır.



Şekil 2.8: Aç-kapa anahtarlama modülasyonuna ait dalga biçimleri.

Şekil 2.8’de aç-kapa anahtarlama modülasyonunun her 2 farklı formatı için dalga biçimleri yer almaktadır. Aç-kapa anahtarlama modülasyonunun toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) durumundaki bit başına hata olasılığı aşağıdaki eşitlik ile verilmektedir (Xiong, 2006).

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}}\right) \quad (2.29)$$

Burada E_b değeri ortalama olarak bit enerjisini ve N_0 , ortalaması sıfır olan beyaz Gauss gürültüsünün gücünü göstermektedir. $Q(\cdot)$ ise Q fonksiyonu anlamına gelmektedir.

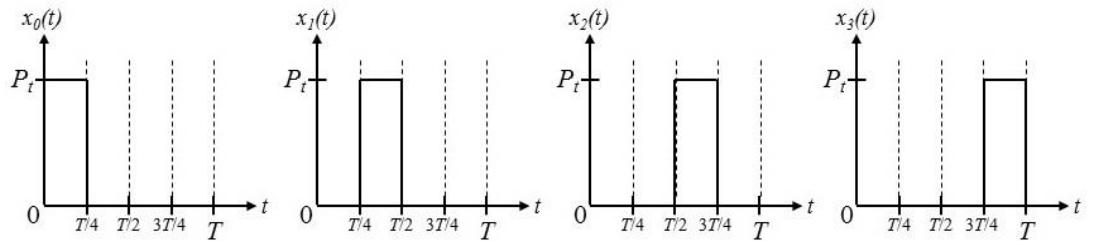
2.4.2. Darbe Konum Modülasyonu

Darbe konum modülasyonu (Pulse Position Modulation, PPM), güç verimliliği konusunda aç-kapa anahtarlamalı modülasyon tekniğine göre daha avantajlıdır. Buna karşın daha fazla bant genişliği istemekte ve daha karmaşık bir yapıda olmaktadır. Darbe konum modülasyonunda, her $\log_2 M$ sayıda bit içeren bilgi biti blokları seçilme ihtimali olan M adet sembole eşlenir. Her sembol süresi M adet slota bölünmüştür ve önceden belirlenmiş sabit güçteki bir darbe ile $M-1$ adet boş slotu içerir. İletilmesi istenen bilgi, sabit güçteki darbenin sembol süresi içindeki konumuna kodlanmış şekilde gönderilir (Popoola, 2009).

Analog sistemlerle kullanılabilen bir teknik değildir. Özellikle dijital sinyalleri iletmek amacıyla kullanmakta olup basit dataları gönderebilir. Büyük dosya iletimlerinde efektif değildir. Çoklu yol girişimine (multipath way interference) karşı oldukça hassastır. Ayrıca düzgün çalışması verici-alıcı arasındaki senkronizasyona bağlıdır.

Örnek olarak uzaktan kumandalı hava, kara ve deniz taşıtlarında verici görevi gören kumandadan gelen yön kontrolü verilerini araca göndermekte kullanılabilir. Her bir darbenin konumu farklı bir yön bildirir.

4-PPM tekniği için darbe konum grafikleri Şekil 2.9'da gösterilmiştir.

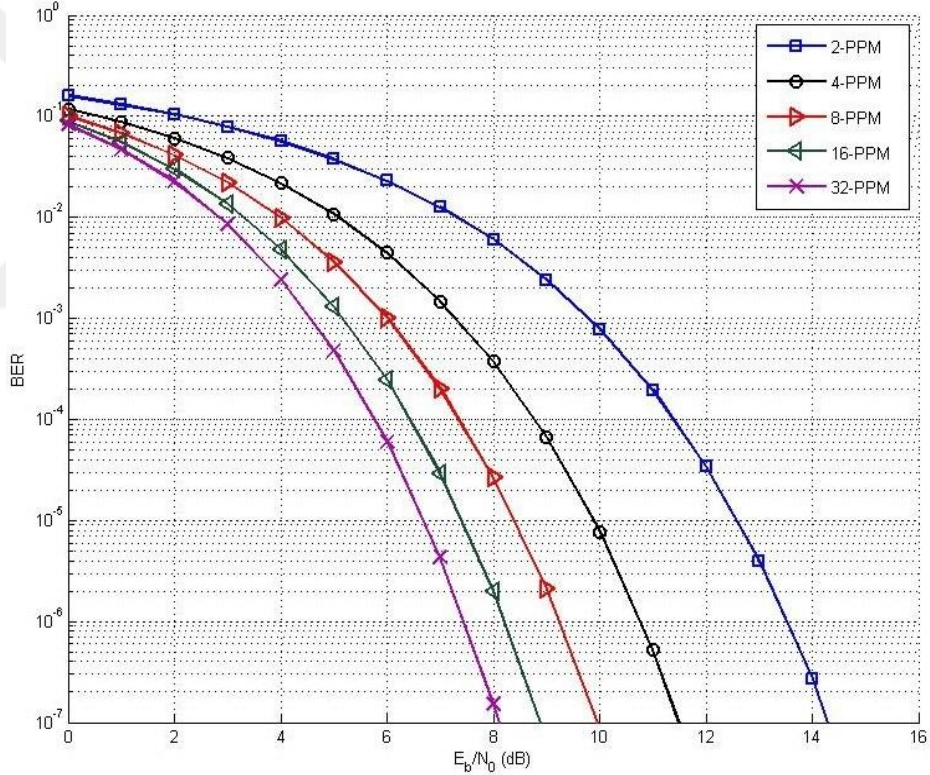


Şekil 2.9: 4-PPM modülasyon tekniğine ait darbe konum grafikleri.

Darbe konum modülasyonunda yıldız diyagramındaki sembollere karşılık gelen her nokta birbirine dik konumludur. Dolayısı ile sinyal uzayının boyutu M olarak verilir. Noktaların birbirlerine dik ve aynı genliklerde olmaları da birbirlerine eşit uzaklıklarda bulunmaları demektir. Bu durum aşağıdaki yaklaşık bit hata olasılığı eşitliği ile verilmiştir (Xiong, 2006).

$$P_b \cong \frac{M}{2} Q \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0} \log_2 M} \right) \quad (2.30)$$

Şekil 2.10'da M-PPM tekniğine ait toplamsal beyaz Gauss gürültülü kanalda (AWGN) bit hata oranı grafiği verilmiştir.

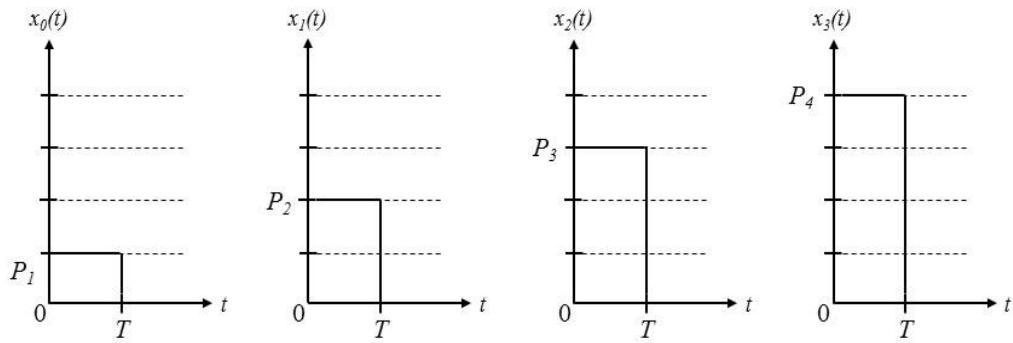


Şekil 2.10: M-PPM modülasyon tekniğine ait başarımlar grafiği.

2.4.3. Darbe Genlik Modülasyonu

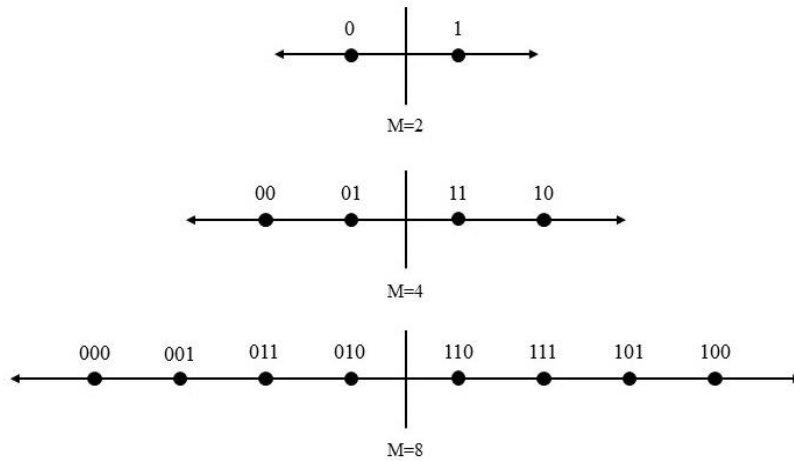
Darbe genlik modülasyonu (Pulse Amplitude Modulation, PAM), bilgi bitlerinin darbelerin genliklerine kodlanarak iletilme işlemidir. Taşıyıcı darbelerin genlikleri bilgi sinyalinin genliklerine bağlı olarak değiştirilir (Barry ve diğ., 2004).

Kullanılan PAM seçilme ihtimali olan M adet sembol ile tanımlanır ve her $\log_2 M$ sayıda bit içeren bilgi biti blokları seçilme ihtimali bulunan M adet PAM sembolüne eşlenir. Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde verici olarak kullanılan LED'lerin parlaklıkları, dolayısı ile yaydıkları ışınların yoğunluğu PAM tekniği ile rahatlıkla kontrol edilebilir. Şekil 2.11'de 4-PAM olarak adlandırılan, $M=4$ olduğu durum için kullanılan sembollerin darbe şekilleri gösterilmiştir.



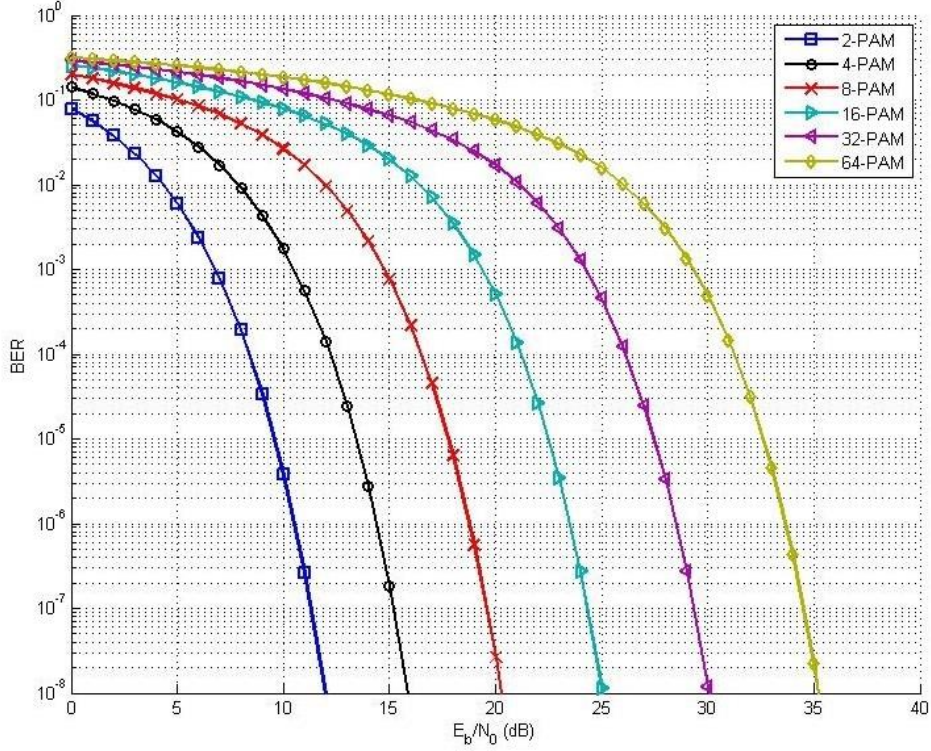
Şekil 2.11: 4-PAM modülasyonuna ait darbe şekilleri.

Yukarıdaki sembollerin her biri $\log_2 4 = 2$ adet bilgi bitine eşlenir. Örnek olarak $x_0(t)$, [00] bit bloğuna, $x_1(t)$, [01] bit bloğuna, $x_2(t)$, [10] bit bloğuna, $x_3(t)$ ise [11] bit bloğuna eşlenir. PAM tekniğine ait yıldız diyagramı M 'in 2, 4 ve 8 olduğu durumlar için Şekil 2.12'deki gibidir.



Şekil 2.12: PAM modülasyon tekniğinin yıldız diyagramı.

PAM tekniğine ait toplamsal beyaz Gauss gürültülü kanalda (AWGN) bit hata oranı grafiği Şekil 2.13’de verilmiştir.



Şekil 2.13: M-PAM modülasyon tekniğine ait başarım grafiği.

2.5. SAĞLIK VE GÜVENLİK STANDARTLARI

Optik sistemlerin tasarımında optik ışının güvenli olması ve kontakta bulunduğu insanlara zararlı halde olmaması için çeşitli çalışmalar yapılması gerekmektedir. Optik ışınlar hem deriye hem de göze karşı çok zararlı olabilirler. Özellikle göze olan zararları, gözün odaklanma ve ışığı yoğunlaştırma kabiliyetinden dolayı çok daha fazladır. Bundan dolayı optik ışınların güvenli olmasını sağlamak amacıyla çok sayıda uluslararası standartlar ve kısıtlamalar kabul edilmiş ve yürürlüğe konulmuştur. Bu standartları oluşturan kuruluşlardan en önemlileri şunlardır (Bloom ve diğ., 2003).

Center for Devices and Radiological Health (CDRH) – Birleşik devletlerde bulunan gıda ve ilaç bakanlığına bağlı bir kuruluştur. Lazerler ve lazer ekipmanları ile ilgili düzenlemeleri yapar. (21 CFR 1040)

International Electrotechnical Commission (IEC) – Lazerler ve lazer ekipmanları da dahil olmak üzere tüm elektronik ekipmanlara ait uluslararası standartlar oluşturan

kuruludur. (IEC 60825-1) IEC tarafından konulmuş olan standartlar bu standardı uygulamak isteyen ülkelerce kabul edilir.

American National Standards Institute (ANSI) – Lazerlerin kullanımı ile ilgili standartları oluşturur. (ANSI Z136.1) Birleşik Devletler iş güvenliği ve sağlığı bakanlığının geçerli standartlarının temellerini oluşturur.

Bu organizasyonların her biri lazerleri sınıflandıran yöntemler geliştirmiştir. IEC'nin oluşturmuş olduğu standartlara göre lazerler genel olarak 4 gruba ayrılabilir. Bunlar güç bakımından Grup 1'den Grup 4'e kadardır. Grup 1 lazerler en az güçlü olanlar olmak üzere Grup 4'deki lazerler en güçlü olanlardır. Her bir grup kendisine ait ulaşılabilir emisyon limiti ile tanımlanır. Ulaşılabilir emisyon limiti, optik kaynağın dalga boyuna, verici geometrisine ve kaynağın yoğunluğuna bağlıdır. Tablo 2.5, IEC 60825-1 standardına göre sınıflandırılmış lazerleri içerir. Grup 2 ve daha üst gruptaki lazerler için üçgen uyarı etiketi kullanılmalıdır (Popoola, 2009).

Tablo 2.5: IEC 60825-1 standardına göre sınıflandırılmış lazer grupları.

Grup	Tanımı
Grup 1	302.5 – 4000 nm bandındaki dalga boylarına sahip olup düşük güç yayılımına sahiptir. Tüm kullanım alanlarında optik görüş cihazları da dahil olmak üzere tehlikesizdir. (Dübbün, mikroskop, teleskop)
Grup 1M	Grup 1 ile aynı özelliklere sahiptir. Ancak optik görüş cihazları ile izlendiğinde tehlike oluşturma ihtimali vardır. Bu gruptaki lazerler büyük çaplı ve ıraksak ışınlar oluşturur.
Grup 2	400 – 700 nm dalga boyu bandında düşük güç yayan lazerlerdir. Doğal bir refleks olan göz kapağının kapatılması göz korumasında yeterli olacak düzeydedir. Optik görüş cihazları ile izlenebilir.
Grup 2M	400 – 700 nm dalga boyu bandında düşük güç yayan lazerlerdir. Doğal bir refleks olan göz kapağının kapatılması göz korumasında yeterli olacak düzeydedir. Ancak optik görüş cihazları ile izlenemez.
Grup 3R	302.5 – 4000 nm dalga boyu bandında ortalama güç yayan lazerlerdir. Direkt görüş potansiyel olarak tehlike arz eder.
Grup 3B	302.5 – 4000 nm dalga boyu bandında ortalama güç yayan lazerler olup direkt görüşe maruz kalınması her durumda tehlike arz eder. Kurulum ve bakım yapılması için özel eğitim gerekir.
Grup 4	Yüksek güç yayan lazerlerdir. Deri ve göz için her durumda çok tehlikelidir. Yangın riski vardır. Güvenli bir şekilde kurulması gerekir. Kurulum ve bakım yapılması için özel eğitim gerektirir.

Grup 1 olarak sınıflandırılmış lazerler, tüm durumlar için yayılımları tehlike arz etmediğinden kablosuz optik haberleşme için kullanıma en uygun lazerlerdir. Herhangi bir uyarı işareti veya güvenlik önlemi kullanılmaksızın uygulanabilirler. Tablo 2.5'de gösterildiği gibi Grup 1 lazerlerin çıkış güçleri sınırlandırılmıştır. Ticari olarak kullanılan

karasal serbest uzay optik sistemler 1.5 Gbps’de çalışırlar ve Grup 1M lazerler kullanırlar. Belirli durumlarda daha üst gruptaki lazerler de kullanılabilir de bu tip sistemler güvenlik nedeniyle genellikle çatılara, uygun etiketler kullanılarak yerleştirilir. Tablo 2.6, 2 farklı dalga boyu için ulaşılabilir emisyon limitlerini göstermektedir.

Tablo 2.6: İki farklı dalga boyu için ulaşılabilir emisyon limitleri.

Grup	Ortalama optik çıkış gücü (mW)	
	$\lambda = 850 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
Grup 1	< 0.22	< 10
Grup 2	Grup 1 ile aynı güç değerlerini kullanır. (400 -700 nm)	
Grup 3R	0.22 – 2.2	10 -50
Grup 3B	2.2 - 500	50 - 500
Grup 4	> 500	> 500

Grup 1’de ve 1550 nm dalga boyunda çalışan bir lazer sistemi kendisi ile aynı verici geometrisine sahip 850 nm dalga boyunda çalışan bir sisteme göre yaklaşık olarak 50 kat daha fazla güç üretebilme imkanına sahiptir. Dalga boyunun lazerin tehlike seviyesi ile ilgisi yoktur. Lazerin bulunduğu tehlike grubunu sadece çıkış gücü belirlemektedir. Bu da istenen herhangi bir dalga boyuna sahip lazer sistemlerinin çıkış güçleri değiştirilerek güvenli hale getirilebileceği anlamına gelir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. GİRİŞ

Kablosuz optik haberleşme sistemlerindeki en büyük dezavantaj, atmosferik türbülans kaynaklı zayıflamadır. Gönderilen ışının genliğinde rastgele değişimlere yol açan bu etki ile baş edebilmek için çeşitleme (diversity) teknikleri sıklıkla kullanılmaktadır. Orijinal olarak Alamouti (1998) tarafından geliştirilmiş bir teknik olan uzay-zaman blok kodlama (Space-Time Block Coding, STBC), çeşitleme kazancı sağlamak için iyi bilinen ve güçlü bir tekniktir. Uzay-zaman blok kodlama, radyo frekans sistemlerde sıklıkla kullanılmış ve günümüzde kablosuz optik haberleşme sistemlerinde de kullanılmaya başlanmış bir tekniktir.

Yüksek bant genişliği verimliliği ve kabul edilebilir bir hata oranı sağlayan bir başka teknik ise uzaysal modülasyondur (Spatial Modulation, SM). Uzaysal modülasyon da diğer anten çeşitlemeli teknikler gibi birden fazla sayıda anten kullanır (Mesleh ve diğ., 2006). Ancak diğer tekniklerden farklı olarak uzaysal modülasyonda data iletimi sadece sinyali modüle ederek değil aynı zamanda sinyalin gönderildiği antenin uzaydaki konum bilgisi kullanılarak da gerçekleştirilir. Önemli olan aynı iletim anında yalnızca bir adet verici antenin aktif (iletim yapar) durumda olmasıdır. Data aynı zamanda anten indislerine de kodlanabildiğinden yüksek spektral verimlilikler düşük karmaşıklıkla elde edilebilir.

Uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon (Space-Time Block Coded Spatial Modulation, STBC-SM), kuvvetli ve bant genişliği verimi yüksek olan bir çok girişli çok çıkışlı iletim tekniğidir (Başar ve diğ., 2011). Uzay-zaman blok kodlama ve uzaysal modülasyon sistemlerinin bir arada kullanılması ile oluşmuştur. STBC-SM tekniği bir iletim anında, aynı anda iki aktif anten kullanır. Bunun sebebi STBC matrisinin sembol çitlerinden oluşmasıdır.

Bu bölümde öncelikle, tez çalışmasında kullanılan teknikler olan uzaysal modülasyon (SM), uzay-zaman blok kodlama (STBC) ve uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal

modülasyon (STBC-SM) sistemleri tanıtılmış ve daha sonra tezin de konusu olan STBC-SM tekniği kablosuz optik haberleşme sistemlerine uyarlanmıştır.

3.2. UZAY ZAMAN BLOK KODLAMA (STBC)

Zamanla değişen çoklu-yol sönümlenmesi (multipath fading) güvenilir kablosuz iletişim sistemlerinin gelişmesinin önündeki en büyük zorluktur. Bu nedenle iletim, kablosuz sistemlerde, fiber-optik, koaksiyel kablolu sistemler ve direkt görüşlü mikrodalga sistemlere nazaran daha zor olmaktadır. Bir, çoklu yol sönümlemeli kanalda iletim kalitesini artırmak ya da efektif hata oranını düşürmek zor bir işlemdir. Toplamsal beyaz Gauss gürültülü kanallarda tipik modülasyon teknikleri ve kodlamalar kullanılarak efektif hata oranının 10^{-2} 'den 10^{-3} 'e düşürülmesi için 1 ya da 2 dB daha yüksek bir sinyal gürültü oranı yeterli olmaktadır. Ancak aynı hata oranını çoklu-yol sönümlemeli kanallarda yakalayabilmek için sinyal gürültü oranının 10 dB'e kadar artırılması gerekebilir.

Çoklu-yol sönümlenmesini azaltmak için en çok kullanılan teknik, vericideki gücü artırmaktır. Verici gücünün kanalın sönümleme miktarına uygun şekilde artırılması kanalın sinyalde oluşturduğu sönümlenmeyi etkisiz hale getirebilir. Ancak bu yöntem iki büyük dezavantaja sahiptir. Kuvvetlendirici boyutlarının ve maliyetinin artması ile haberleşme sistemlerine getirilen güç sınırlamaları bunlardan bir tanesidir. Diğer problem ise vericinin kanal hakkında bilgi sahibi olma gerekliliğidir. Bu da alıcıdan vericiye doğru bir iletimi zorunlu kılar. Dolayısı ile hem verici hem alıcı sistemler karmaşıklaşır (Alamouti, 1998).

Anten çoğullama teknikleri çoğu kanal için pratik, efektif ve dolayısı ile de geniş bir kullanım alanına sahip olan tekniklerdir (Jakes, 1974). Klasik yaklaşım, alıcı tarafta birden fazla sayıda anten kullanmak ve birleştirme veya seçim yapma yöntemleri ile gelen sinyalin kalitesini artırmaktır. Alıcı anten çoğullama yönteminin en büyük dezavantajı maliyetin, boyutların ve alıcı anten güçlerinin artmasıdır.

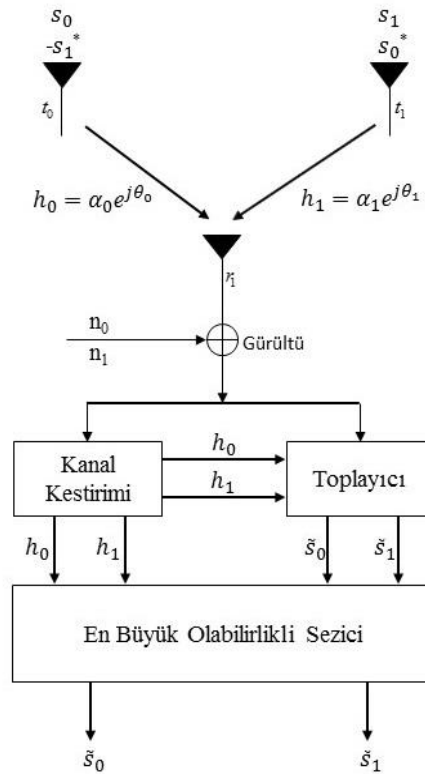
Uzay-zaman blok kodlama tekniği, bir anten çoğullama tekniği olmakla beraber alıcı antenler yerine verici antenlerin çoğullanmasını esas almaktadır. Alıcı taraftaki sinyalin kalitesini sinyali birden fazla verici üzerinden kodlayıp göndererek artırmaktadır. En temel uzay-zaman blok kodlama sistemi 2 adet verici, 1 adet alıcı antenden oluşmaktadır.

Çoğullama mertebesi (diversity order) 2 olan bu sistemde alıcı tarafta M adet anten kullanılarak mertebe $2M$ 'e çıkarılabilir. Ayrıca bu sistem alıcı taraftan verici tarafa bir geri beslemeye ihtiyaç duymadığı gibi işlem yükü de çok azdır. Anten sayısında artırılma gidildiği, zamanda veya frekansta herhangi bir çoğullama yapılmadığı için sistem bant genişliği artımına da ihtiyaç duymaz (Alamouti, 1998).

3.2.1. Tek Alıcılı Sistem için Sistem Modeli

Şekil 3.1'de, 2 vericiden oluşan bir STBC sistemin blok diyagramı görülmektedir (Alamouti, 1998). STBC sistemler aşağıda bahsedilen 3 ana fonksiyon ile tanımlanabilir.

1. Verici taraftaki kodlama ve iletim aşaması
2. Alıcıya, farklı vericilerden gönderilmiş olan sinyallerin ulaşması ve toplanması
3. En büyük olabirlikli sezim tekniği için karar verilme işlemi



Şekil 3.1: İki adet verici kullanan STBC sisteminin blok diyagramı.

3.2.1.1. Kodlama ve İletim

Verilen bir iletim anında, verici tarafta bulunan 2 adet antenden simultane olarak belirli semboller gönderilir. t_0 anteninden gönderilen sembole s_0 , t_1 anteninden gönderilen sembole ise s_1 denir. İkinci iletim anında ise t_0 anteninden $-s_1^*$, t_1 anteninden ise s_0^* gönderilir. Burada “*” işareti kompleks eşleniği ifade etmektedir. Bir bit bloğunun iletimi, 2 iletim anında gerçekleşir. İletim anları ve sembol kodlamaları Tablo 3.1’de verilmiştir (Alamouti, 1998).

Tablo 3.1: STBC tekniğine ait iletim anlarına göre sembol kodları.

	Anten t_0	Anten t_1
t iletim anı	s_0	s_1
$t + T$ iletim anı	$-s_1^*$	s_0^*

Tablo 3.1’deki kodlama uzay-zaman alanında yapılmıştır. t anındaki kanallar, t_0 anteni için $h_0(t)$ ve t_1 anteni için $h_1(t)$ şeklinde iki çarpımsal bozulma ile modellenebilir. İki ardışık sembol iletim anı boyunca kanal sönümlenme parametrelerinin değişmediği varsayılırsa aşağıdaki eşitlikle yazılabilir.

$$\begin{aligned} h_0(t) = h_0(t+T) = h_0 = \alpha_0 e^{j\theta_0} \\ h_1(t) = h_1(t+T) = h_1 = \alpha_1 e^{j\theta_1} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Burada T , sembol süresidir. Gönderilen semboller ve verici-alıcı arasındaki kanal modeli belirlendiğine göre alıcı tarafta alınan sinyaller şu şekilde ifade edilebilir (Alamouti, 1998).

$$\begin{aligned} r_0 = r(t) = h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0 \\ r_1 = r(t+T) = -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + n_1 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Burada r_0 ve r_1 , sırası ile t ve $t+T$ zamanlarında alıcı tarafa ulaşan sinyaller, n_0 ve n_1 ise gürültü ve girişimi sembolize eden karmaşık rastgele değişkenlerdir.

3.2.1.2. Birleşim Algoritması (Toplama)

Şekil 3.1’de gösterilen toplayıcı, en büyük olabilirlikli seziciye gönderilmek üzere aşağıdaki iki kombine sinyali oluşturur.

$$\begin{aligned}\tilde{s}_0 &= h_0^* r_0 + h_1 r_1^* \\ \tilde{s}_1 &= h_1^* r_0 - h_0 r_1^*\end{aligned}\quad (3.3)$$

Eşitlik (3.1) ve (3.2), eşitlik (3.3)'de yerine yazıldığında aşağıdaki eşitlikler ortaya çıkar.

$$\begin{aligned}\tilde{s}_0 &= (\alpha_0^2 + \alpha_1^2) s_0 + h_0^* n_0 + h_1 n_1^* \\ \tilde{s}_1 &= (\alpha_0^2 + \alpha_1^2) s_1 - h_0 n_1^* + h_1^* n_0\end{aligned}\quad (3.4)$$

3.2.1.3. En Büyük Olabilirlikli Karar Devresi

Birleşmiş durumdaki bu sinyaller en büyük olabilirlikli seziciye gönderilir ve s_0 ile s_1 sinyallerinin her biri için aşağıda verilen karar kuralı uygulanır (Alamouti, 1998).

s_i 'i seç eğer

$$\begin{aligned}(\alpha_0^2 + \alpha_1^2) |s_i|^2 - \tilde{s}_0 s_i^* - \tilde{s}_0^* s_i &\leq (\alpha_0^2 + \alpha_1^2) |s_k|^2 - \tilde{s}_0 s_k^* - \tilde{s}_0^* s_k \\ (\alpha_0^2 + \alpha_1^2) |s_i|^2 - \tilde{s}_1 s_i^* - \tilde{s}_1^* s_i &\leq (\alpha_0^2 + \alpha_1^2) |s_k|^2 - \tilde{s}_1 s_k^* - \tilde{s}_1^* s_k\end{aligned}\quad i \neq k \quad (3.5)$$

Eşitsizlik (3.5), aşağıdaki gibi de yazılabilir.

s_i 'i seç eğer

$$\begin{aligned}(\alpha_0^2 + \alpha_1^2 - 1) |s_i|^2 + d^2(\tilde{s}_0, s_i) &\leq (\alpha_0^2 + \alpha_1^2 - 1) |s_k|^2 + d^2(\tilde{s}_0, s_k) \\ (\alpha_0^2 + \alpha_1^2 - 1) |s_i|^2 + d^2(\tilde{s}_1, s_i) &\leq (\alpha_0^2 + \alpha_1^2 - 1) |s_k|^2 + d^2(\tilde{s}_1, s_k)\end{aligned}\quad i \neq k \quad (3.6)$$

Faz kaydırmalı anahtarlama modülasyonu (PSK) kullanan sistemlerde;

$$|s_i|^2 = |s_k|^2 = E_s \quad i \neq k \quad (3.7)$$

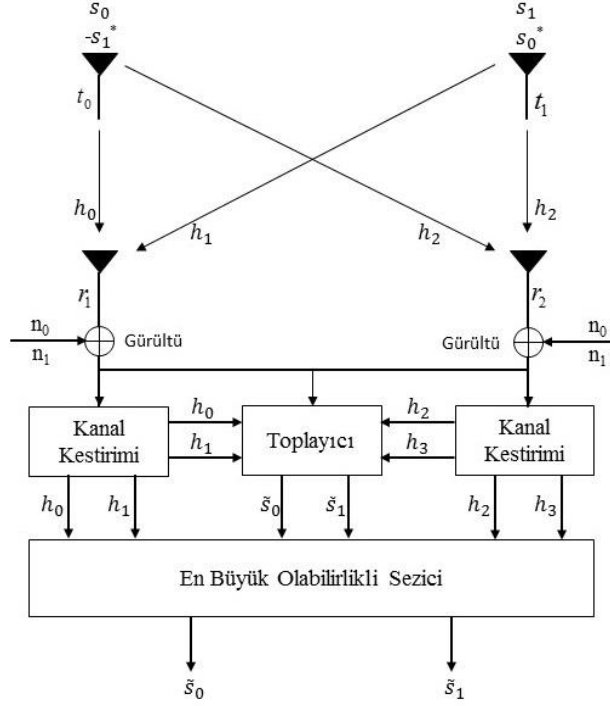
Burada E_s sinyalin enerjisini göstermektedir. Dolayısı ile PSK sinyallerinde karar kuralı aşağıdaki hale dönüşür (Alamouti, 1998).

s_i 'i seç eğer

$$\begin{aligned}d^2(\tilde{s}_0, s_i) &\leq d^2(\tilde{s}_0, s_k) \\ d^2(\tilde{s}_1, s_i) &\leq d^2(\tilde{s}_1, s_k)\end{aligned}\quad i \neq k \quad (3.8)$$

3.2.2. Birden Fazla Alıcılı Sistem için Sistem Modeli

Daha yüksek seviyede çeşitleme kazancının gerektiği ve bunun sağlanması için alıcı sayısının artırılmasının zorunlu olduğu uygulamalarda 2 adet verici, M adet alıcı anten kullanılarak $2M$ 'lik bir çeşitleme kazancı sağlanabilir. Şekil 3.2'de 2 adet verici ve 2 adet alıcıdan oluşan bir STBC sistem modeli görülmektedir (Alamouti, 1998).



Şekil 3.2: İki vericili ve iki alıcılı STBC sisteminin blok diagramı.

Tablo 3.2: Verici-alıcı arasındaki kanal modelleri.

	Anten r_0	Anten r_1
Anten t_0	h_0	h_2
Anten t_1	h_1	h_3

Tablo 3.3: Alıcı taraftan alınan sinyaller.

	Anten r_0	Anten r_1
t iletim anı	r_0	r_2
$t + T$ iletim anı	r_1	r_3

2 verici ve 2 alıcıdan oluşan sistemin kodlama ve iletim yöntemleri Tablo 3.1'deki gibi olup tek alıcılı sistemler ile aynıdır. Tablo 3.2'de ve Tablo 3.3'de sırası ile verici-alıcı arasındaki kanal modelleri ile alıcı tarafa ulaşan sinyaller yer almaktadır. Alınan sinyaller sırası ile aşağıdaki gibidir (Alamouti, 1998).

$$\begin{aligned}
 r_0 &= h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0 \\
 r_1 &= -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + n_1 \\
 r_2 &= h_2 s_0 + h_3 s_1 + n_2 \\
 r_3 &= -h_2 s_1^* + h_3 s_0^* + n_3
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Burada n_0, n_1, n_2 ve n_3 kompleks rastgele değişkenler olup alıcıdaki gürültüyü ve girişimi sembolize etmektedir. Toplayıcı, en büyük olabilirlikli seziciye gönderilmek üzere eşitlik 3.9'daki değerlerden aşağıdaki 2 eşitliği oluşturur.

$$\begin{aligned}
 \tilde{s}_0 &= h_0^* r_0 + h_1 r_1^* + h_2^* r_2 + h_3 r_3^* \\
 \tilde{s}_1 &= h_1^* r_0 - h_0 r_1^* + h_3^* r_2 - h_2 r_3^*
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Uygun eşitliklerle yerine koyma metodu uygulandığında eşitlikler aşağıdaki hale gelir.

$$\begin{aligned}
 \tilde{s}_0 &= (\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2) s_0 + h_0^* n_0 + h_1 n_1^* + h_2^* n_2 + h_3 n_3^* \\
 \tilde{s}_1 &= (\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2) s_1 - h_0 n_1^* + h_1^* n_0 - h_2 n_3^* + h_3^* n_2
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Kombine durumdaki bu sinyaller en büyük olabilirlikli seziciye gönderilir. Sezicide s_0 sinyali için aşağıdaki karar kriteri uygulanır (Alamouti, 1998).

s_i 'i seç eğer

$$(\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 - 1) |s_i|^2 + d^2(\tilde{s}_0, s_i) \leq (\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 - 1) |s_k|^2 + d^2(\tilde{s}_0, s_k) \tag{3.12}$$

s_i 'i seç eğer

$$d^2(\tilde{s}_0, s_i) \leq d^2(\tilde{s}_0, s_k) \quad i \neq k \tag{3.13}$$

Benzer şekilde s_1 için de sezicide aşağıdaki karar işlemi uygulanır.

s_i 'i seç eğer

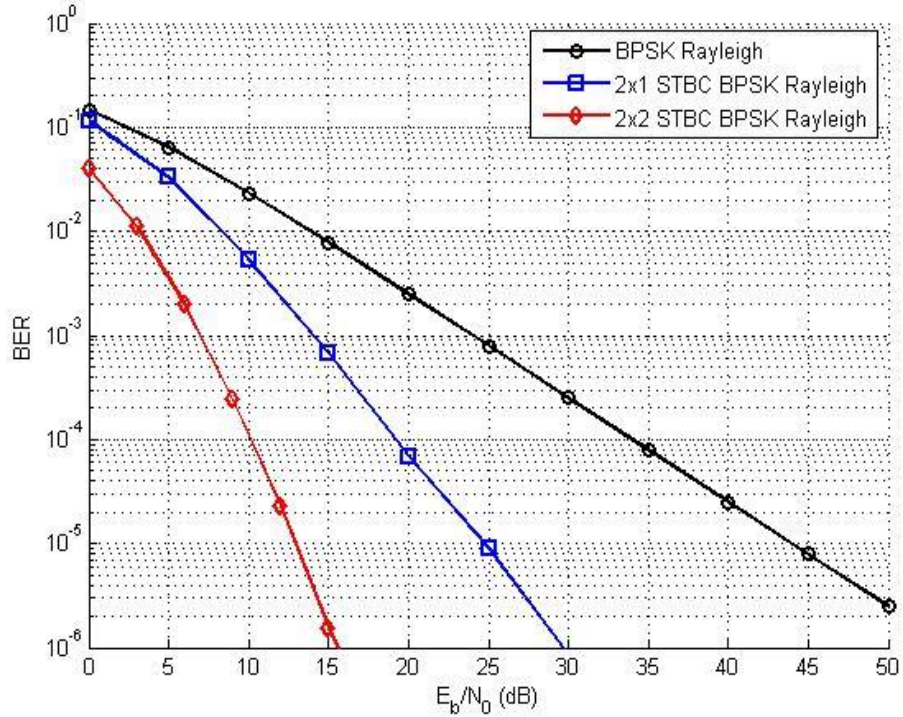
$$(\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 - 1)|s_i|^2 + d^2(\tilde{s}_1, s_i) \leq (\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 - 1)|s_k|^2 + d^2(\tilde{s}_1, s_k) \quad (3.14)$$

s_i 'i seç eğer

$$d^2(\tilde{s}_1, s_i) \leq d^2(\tilde{s}_1, s_k) \quad i \neq k \quad (3.15)$$

Eşitlik 3.11'deki kombine sinyaller 4 alıcılı Maksimum oranlı birleştirme (Maximum Ratio Receiver Combining, MRRC) sistemlerine ait eşitlikler ile aynıdır. Buradan da 2 verici 2 alıcı kullanılarak oluşturulan bu sistemin çeşitleme kazancı bakımından MRRC sistemlere denk olduğu çıkarılabilir. (MRRC sistemler alıcı çeşitleme kazancı sağlayan ve en yaygın olarak kullanılan sistemlerdir.)

2 alıcı antenin kullanıldığı teknikte toplayıcı tarafından oluşturulan kombine sinyaller alıcıya gelen sinyallerin basit toplama işlemine sokulması ile oluşur. Bu durum tek alıcı anten kullanılması durumu ile aynıdır. Dolayısı ile 2 verici ve M alıcı anten kullanıldığında toplayıcı her alıcı anten için kullanılıp alınan sinyaller üst üste eklenirse 2M alıcı kullanan bir MRRC sistemi kadar kazanç sağlanabilir. Şekil 3.3'de STBC tekniğine ait bit hata oranı grafiği görülmektedir.



Şekil 3.3: STBC tekniğine ait bit hata oranı başarıım grafiği.

3.3. UZAYSAL MODÜLASYON (SM)

İletişim sistemlerinin güvenilirliğini ve spektral verimliliğini geliştirebilmek, servis kalitesinin ve data hızlarının artırılmasından geçmektedir. Yeni nesil hücreli iletişim için yüksek data hızları ve iyileştirilmiş spektral verimlilik çok önemlidir. Çok girişli çok çıkışlı (Multiple Input Multiple Output, MIMO) haberleşme sistemleri bu gereksinimleri çok sayıda antenden çok sayıda data gönderimi yaparak bir noktaya kadar karşılayabilmektedir (Telatar, 1999). Ancak çoklu anten iletişim tekniklerinin çoğullama kazançları, alıcı ve verici antenlerin yerleşimlerine, anten senkronizasyonuna ve alıcıdaki kanallar arası girişim (Inten Channel Interference, ICI) miktarını önlemek adına kullanılan algoritmaya bağlıdır.

Dikey-Bell Laboratuvarı Katmanlı Uzay-Zaman mimarisi (Vertical-Bell Labs Layered Space-Time, V-BLAST) gibi uzaysal çoğullamalı sistemlerde gelen bilgi bitleri tüm verici antenlere dağıtılarak oldukça yüksek bant verimliliklerine ulaşılabilmektedir (Wolniansky ve diğ., 1998). Ancak bu gibi sistemlerin alıcıları, tüm antenlerin aynı anda iletim yapmaları sonucu kanallar arası girişimi engelleyebilmek için, oldukça karmaşık tasarımlara sahiptir.

Uzaysal modülasyon, MIMO sistemler için literatürde var olan yöntemlere bir alternatif olarak üretilmiştir. Uzaysal modülasyonun temel ilkesi, iletilecek bilgi bitlerinin iki boyutlu geleneksel faz kaydırmalı anahtarlama (Phase Shift Keying, PSK) ya da dik genlik modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) işaret kümelerinin elemanlarına eşlendiği gibi kullanılan verici antenlerin indislerine de eşlenmesidir. Bundan dolayı iletilen bilgi yalnızca taşıyıcının genlik ve faz değerleri ile değil aynı zamanda anten indisleri ile de taşınmaktadır. Aynı zamanda belirli bir iletim anında yalnızca tek bir verici anten iletim yapabilir durumdadır. İletim yapan anten dışındaki verici antenlere güç verilmez. Alıcı kısımda ise optimum alıcı bu sistem için hem kullanılan işaret kümesini hem de kullanılması olası antenleri göz önünde bulundurarak ortak bir karar vermektedir. Uzaysal modülasyon tekniğinin geleneksel MIMO iletim sistemlerine göre üstünlükleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Başar ve diğ., 2011b).

1. Uzaysal modülasyonda kanallar arası girişim, belirli bir iletim anında yalnızca tek bir verici antenin iletim durumunda olmasından dolayı tamamen ortadan kalkmış

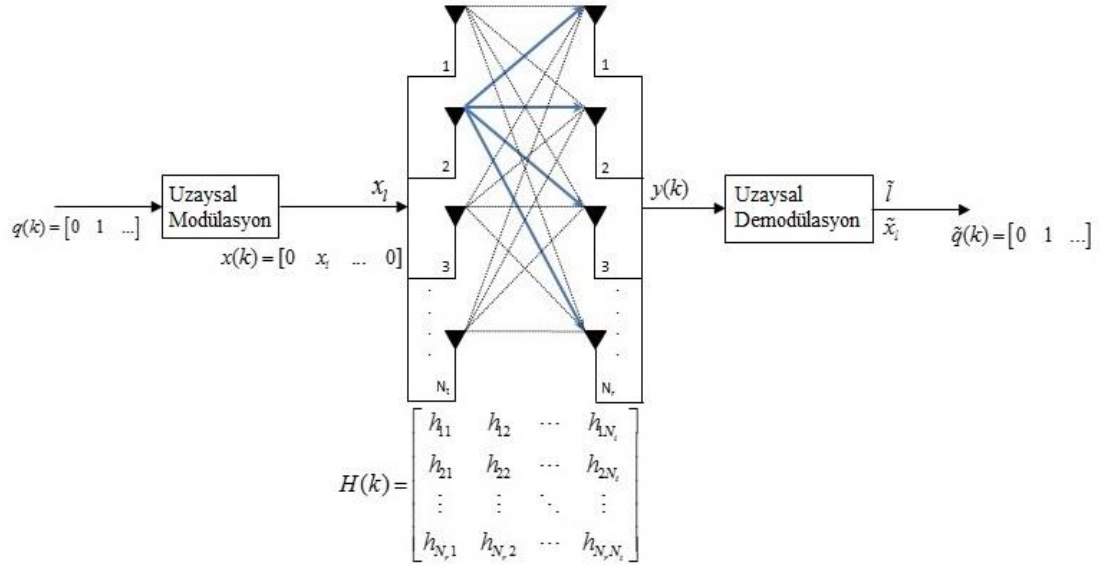
durumdadır. Dolayısı ile de bu tip sistemlerin alıcı tasarımları, karmaşık yapıda olan girişim yok edici algoritmalara gereksinim duymadıklarından V-BLAST sistemlerinin alıcı tasarımlarına nazaran çok daha basittir.

2. Uzaysal modülasyon sistemleri için alıcı anten sayısında herhangi bir alt sınır bulunmamaktadır.

3. Uzaysal modülasyon sistemlerinde bilgi bitleri aynı zamanda anten indisleri ile de iletildiği için, artan verici anten sayısı ile birlikte sistemin bant verimliliği logaritmik olarak artmaktadır.

3.3.1. Sistem Modeli

Şekil 3.4’de uzaysal modülasyon sistemine ait blok diyagram yer almaktadır (Mesleh ve diğ., 2006). Burada $q(k)$, iletimi yapılacak n , adet bilgi bitinin oluşturduğu vektördür.



Şekil 3.4: Uzaysal Modülasyon (SM) sistemine ait blok diagram.

Bu vektör, $x(k)$ adında N_t boyutunda başka bir vektöre eşlenir. $x(k)$ vektörü, bir elemanı hariç bütün elemanları sıfır olan bir vektördür. $x(k)$ vektöründe “ l ” sembol numarasına sahip olan sıfırdan farklı bir x_l elemanı, o iletim anında “ l ” indisli verici antenin aktif durumda olacağını sembolize eder. Ardından “ l ” indisi ile belirlenmiş anten x_l sembolünü $H(k)$, MIMO kanalından alıcı tarafa iletir. $H(k)$, bir vektör setidir. Bu

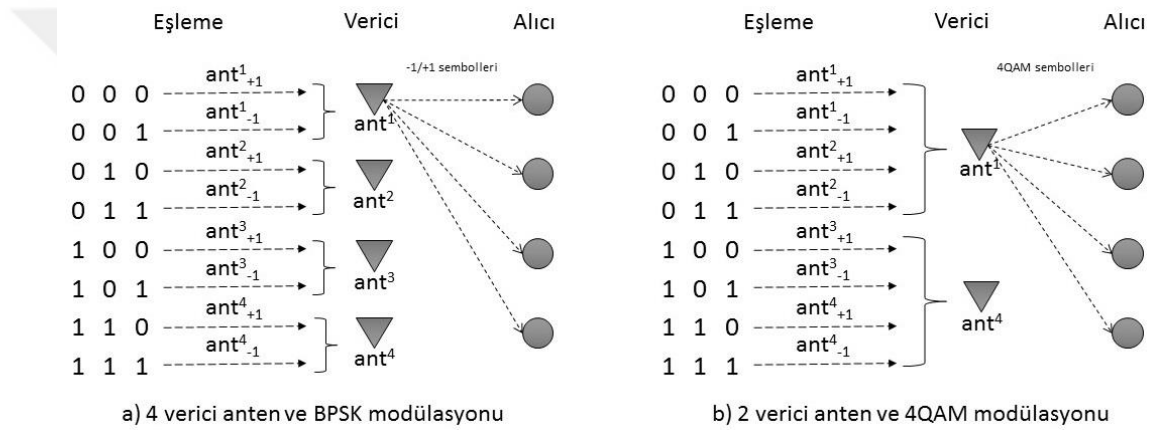
vektör seti iletim anteni v ile alıcı antenler arasındaki yol kazançlarından oluşan vektörleri barındırır.

$$H = [h_1 \quad h_2 \quad \dots \quad h_{N_t}] \quad (3.16)$$

Burada;

$$h_v = [h_{1,v} \quad h_{2,v} \quad \dots \quad h_{N_t,v}]^T \quad (3.17)$$

olmaktadır.



Şekil 3.5: Uzaysal Modülasyon sistemine ait bit eşleme tekniği.

$w(k)$, toplanabilir beyaz Gauss gürültüsü olmak üzere, alıcı tarafa ulaşan sinyal aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$y(k) = h_{(v=l)}x_l + w(k) \quad (3.18)$$

Şekil 3.5’de verildiği gibi iletilen bilgi bitlerinin sayısı “n”, kullanılan sinyal modülasyon tipi ya da kullanılan verici anten sayısı değiştirilerek birbirinden bağımsız olarak iki farklı şekilde ayarlanabilir (Mesleh ve diğ., 2006). Örneğin sembol başına 3 bit gönderilmek isteniyorsa, 4 adet verici anten ve BPSK modülasyonu kullanılabilir. Buna alternatif olarak 2 verici anten ile birlikte 4QAM modülasyon tipi kullanıldığında yine sembol başına 3 bit gönderme oranına ulaşılabilir. Benzer şekilde sembol başına 4 bit gönderilmek istendiğinde BPSK modülasyonu ile birlikte 8 anten ya da 4QAM modülasyonu ile birlikte 4 anten kullanılabilir. 8QAM ve 2 anten kullanıldığında da diğer

alternatifler ile eşit derecede spektral verimlilik elde edilir. Genel olarak uzaysal modülasyon ile ulaşılabilecek sembol başına bit sayısı aşağıdaki eşitlik ile verilir.

$$n = \log_2(N_t) + \log_2(M) \quad (3.19)$$

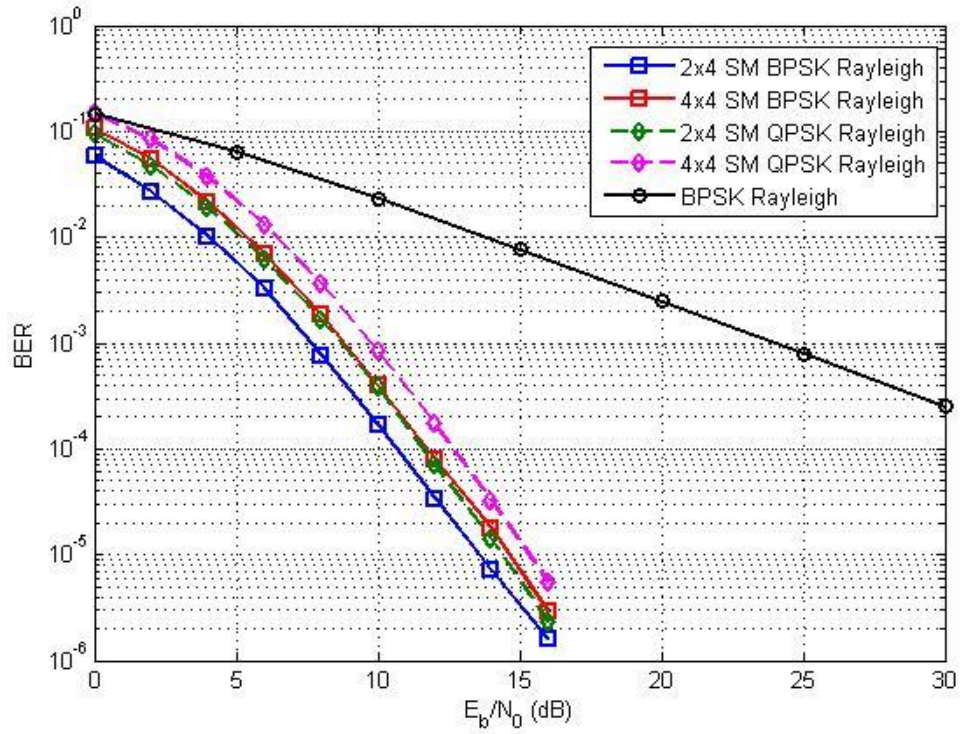
Burada N_t , verici anten sayısını, M ise kullanılan modülasyonun mertebesini belirtir.

Alıcı tarafta kestirim işlemi optimum alıcı kullanılarak yapılabilir. Optimum alıcı, gelen sinyal $y(k)$ 'yi aşağıdaki eşitliği kullanarak gönderilme ihtimali olan olası tüm x_t sinyalleri ile karşılaştırır.

$$\hat{x}_t = \arg \min_{x_t} \|y(k) - h_{(v=t)}x_t\|^2 \quad (3.20)$$

Alıcı tarafta yapılacak karşılaştırma sayısı m , sistemde kullanılan verici anten sayısı ve modülasyon tipi ile $m = N_t M$ eşitliğine göre değişir. Örnek olarak 2 verici anten ve 4QAM modülasyonu kullanan bir sistemin alıcısı kestirim yapabilmek için 8 tane deneme yapmalıdır. Aynı şekilde 4 anten ve 16QAM kullanan, sembol başına 6 bit iletebilen bir sistemin alıcısı ise kestirim yapabilmek için 64 adet deneme yapmalıdır.

Şekil 3.6'da uzaysal modülasyona ait, Rayleigh kanalda bit hata oranlarının yer aldığı grafikler verilmiştir.



Şekil 3.6: SM tekniğine ait bit hata oranı başarıım grafiği.

3.4. UZAY ZAMAN BLOK KODLAMALI UZAYSAL MODÜLASYON

Alıcı ve verici tarafında çok sayıda anten kullanılan haberleşme sistemleri, tek alıcı ve vericiden oluşan kablosuz haberleşme sistemlerine göre kapasite ve güvenilirlik açısından daha başarılı durumdadır (Telatar, 1999). Dolayısı ile çok girişli çok çıkışlı (MIMO) iletim sistemleri kapsamlı olarak incelenmiş ve uzay-zaman blok kodlama ile uzaysal modülasyon adında iki ana MIMO tekniği ortaya çıkmıştır.

Uzay-zaman blok kodlama tekniği uygulama kolaylığı sunması yanında düşük karmaşıklıkta çözümlene devrelerine de sahiptir. Ancak çözümlene devrelerinin karmaşıklığı kodlama seviyesinin artışı ile birlikte üssel olarak arttığından yüksek mertebeli kodlamalarda oldukça karmaşık çözümlene devreleri gerektirmektedir. Bu da bu tekniği ileri seviye kablosuz iletişim sistemleri için uygulanması zor bir teknik haline getirmektedir (Başar ve diğ., 2011a).

Uzaysal modülasyon sistemleri, seçilen bir iletim anında yalnızca tek bir verici antenin aktif olması durumundan dolayı kanallar arası girişimi tamamen ortadan kaldırmakta olan bir tekniktir (Mesleh ve diğ., 2006). Ancak bu sistemlerde çoklu verici antenler sadece

bilgi iletmek amacı ile kullanılmış, çok girişli çok çıkışlı iletim sistemlerinin veri iletmeye potansiyelleri düşünülmemiştir.

Hem uzaysal modülasyon hem de uzay-zaman blok kodlama sistemlerinin avantajlarından aynı anda faydalanabilmek adına uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniği geliştirilmiştir (Başar ve diğ., 2011a). Bu tekniğin yapısında hem uzay-zaman blok kodlama tekniğine ait iletim matrisi içinde bulunan modülasyonlu semboller hem de uzaysal modülasyonda olduğu gibi bu sembollerin iletiminde aktif durumda olan verici antenler bilgi taşımaktadır. Uzay-zaman blok kod olarak Alamouti'nin sunduğu kod çekirdek kod olarak tercih edilir.

3.4.1. Sistem Modeli

Alamouti'nin (1998) sunmuş olduğu uzay-zaman blok kodu şu şekildedir.

$$S = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

Burada sütunlar verici antenleri, satırlar ise iletim zamanlarını göstermektedir. x_1 ve x_2 , iletilecek bilgi sembolleri olmak üzere (3.21)'de verilmiş olan uzay-zaman blok kodu, uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon sistemi için anten bölgesine genişletilmiştir. Örnek olarak modülasyon tipi BPSK olan ve 4 adet verici anten kullanan bir uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon sisteminin iletim matrisi gelen bilgi bitlerine göre aşağıdaki 4 kod sözcüğünden biri olabilir (Başar ve diğ., 2011a).

$$\begin{aligned} \chi_1 = \{X_{11}, X_{12}\} &= \left\{ \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & 0 & 0 \\ -x_2^* & x_1^* & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & x_1 & x_2 \\ 0 & 0 & -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix} \right\} \\ \chi_2 = \{X_{21}, X_{22}\} &= \left\{ \begin{pmatrix} 0 & x_1 & x_2 & 0 \\ 0 & -x_2^* & x_1^* & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_2 & 0 & 0 & x_1 \\ x_1^* & 0 & 0 & -x_2^* \end{pmatrix} \right\} e^{j\theta} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Burada $\chi_i, (i=1,2)$ STBC-SM kod kitapları olmakta olup ikişer adet STBC-SM kod sözcüğü $X_{ij}, (j=1,2)$ içermektedirler. Aynı kod kitabında bulunan kod sözcükleri birbirleri ile örtüşmeyen sütunlara sahip olmalıdır. Dolayısı ile bir STBC-SM kod kitabının kod sözcükleri aşağıdaki eşitliği sağlamalıdır.

$$X_{ij}X_{ik}^H = 0_{2 \times 2}, j, k = 1, 2, \dots, a, j \neq k \quad (3.23)$$

θ ise verilen bir işaret kümesi adına maksimum çoğullama ve kodlama kazançları elde etmek için optimize edilmesi gerekli olan bir faz açısıdır.

(u_1, u_2, u_3, u_4) ile gösterilen dört adet bilgi bitinin iki ardışık zaman aralığında STBC-SM tekniği ile iletildiğini varsayalım. 2 bit/sn/Hz iletim hızı için eşleme kuralı eşitlik (3.22)'deki kod sözcükleri ve BPSK modülasyonu için Tablo 3.4'deki gibi verilmiştir (Başar ve diğ., 2011a). Burada ilk iki veri biti (u_1, u_2) , anten çifti konumu olan ℓ 'yi belirlerken, son iki veri biti (u_3, u_4) ise BPSK sembollerini belirlemektedir.

Tablo 3.4: BPSK Modülasyonu için STBC kod sözcükleri eşleme tablosu.

		Input Bits	Transmission Matrices			Input Bits	Transmission Matrices
χ_1	$\ell = 0$	0000	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	χ_2	$\ell = 2$	1000	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
		0001	$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$			1001	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
		0010	$\begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$			1010	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
		0011	$\begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$			1011	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
	$\ell = 1$	0100	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$		$\ell = 3$	1100	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
		0101	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$			1101	$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
		0110	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \end{pmatrix}$			1110	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
		0111	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$			1111	$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} e^{j\theta}$

Klasik uzaysal modülasyonda olanın aksine STBC-SM sisteminde verici antenlerin sayısının 2'nin tam katı olma zorunluluğu yoktur. Bunun nedeni bulunan n_T adet verici antenin değişik kombinasyonlarının kullanılmasıdır. Bir STBC-SM sistemi tasarlamak için kullanılacak algoritma şu şekildedir (Başar ve diğ., 2011a).

1. Verilen bir verici anten sayısı n_T için, p pozitif bir tamsayı olmak üzere $c = \left\lfloor \binom{n_T}{2} \right\rfloor_{2P}$ ile Alamouti kodunun iletimi için mümkün olan anten kombinasyonlarının (kod sözcüklerinin) toplam sayıları hesaplanır.

2. Her bir kod $\chi_i, i = 1, 2, \dots, n-1$ içerisindeki kod sözcüğü sayısı $a = \lfloor n_T/2 \rfloor$ ve toplam kod kitabı sayısı $n = \lceil c/a \rceil$ ile hesaplanır. Son kod kitabı χ_n , a adet kod sözcüğü içermeyebilir. Bu kod kitabına ait eleman sayısı $a' = c - a(n-1)$ eşitliği ile hesaplanabilir.

3. Birbirleri ile örtüşmeyen a adet kod sözcüğü içeren χ_1 kod kitabı oluşturulur. Buradaki X , eşitlik (3.22)'de tanımlanmıştır.

$$\chi_1 = \left\{ \begin{pmatrix} X & 0_{2 \times (n_T-2)} \\ 0_{2 \times 2} & X & 0_{2 \times (n_T-4)} \\ 0_{2 \times 4} & X & 0_{2 \times (n_T-6)} \\ \vdots & & \\ 0_{2 \times 2(a-1)} & X & 0_{2 \times (n_T-2a)} \end{pmatrix} \right\}. \quad (3.24)$$

4. Aynı teknik uygulanarak diğer kodlar da $\chi_i, 2 \leq i \leq n$, aşağıdaki iki önemli nokta göz önüne alınarak oluşturulur.

a. Her kod, n_T verici antenin kombinasyonlarından seçilen birbirleriyle örtüşmeyen kod sözcükleri içermelidir.

b. Bir kodda kullanılmış olan bir anten kombinasyonu diğer kodlarda kullanılmamalıdır.

STBC-SM sisteminin temel parametreleri (c, a, n) Tablo 3.5'de n_T 'nin alabileceği birkaç farklı değer için verilmiştir.

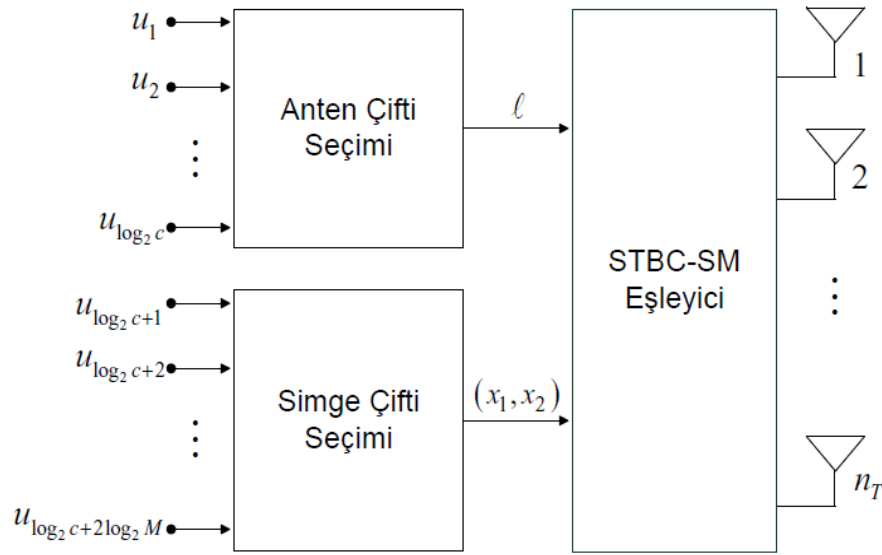
Tablo 3.5: STBC-SM sisteminin temel parametreleri.

n_T	c	a	n	$\delta_{\min}(\chi)$		
				$M=2$	$M=4$	$M=16$
3	2	1	2	12	11.45	9.05
4	4	2	2	12	11.45	9.05
5	8	2	4	4.69	4.87	4.87
6	8	3	3	8.00	8.57	8.31
7	16	3	6	2.14	2.18	2.18
8	16	4	4	4.69	4.87	4.87

Bu algoritma ile tasarlanan STBC-SM kod sözcükleri farklı kombinasyonlarla oluşmuş olsa bile başarımlı açısından farklı olmayacaklardır. c , adet anten kombinasyonu yani kod sözcüğü olduğundan STBC-SM sisteminin bant verimliliği

$$\eta = \frac{1}{2} \log_2 c + \log_2 M \quad [\text{bit/sn/Hz}] \quad (3.25)$$

şekilde hesaplanır.

**Şekil 3.7:** STBC-SM vericisine ait blok diagram.

STBC-SM vericisinin blok şeması Şekil 3.7’de verilmiştir (Başar ve diğ. 2011a). Her iki ardışık iletim zamanı aralığında 2η adet bit STBC-SM vericisine gelmektedir. Gelen bitlerden ilk $\log_2 c$ adet bit anten çifti konumunu belirlemekte, son $2\log_2 M$ bit ise

kullanılan modülasyon tipine göre uygun yıldız diyagramından seçilecek sembol çiftini belirlemektedir.

3.4.2. Alıcı Tasarımı

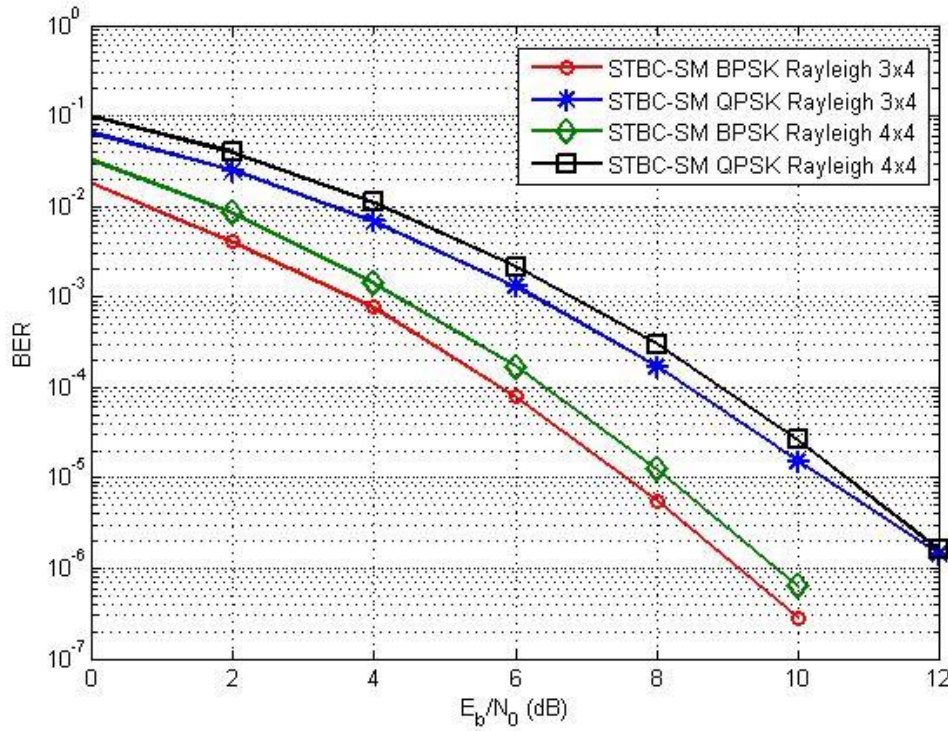
Bu bölümde STBC-SM sistemi için en büyük olabirlikli kod çözme yöntemi (Maximum Likelihood, ML) verilmiştir. Bir MIMO kanal için $2 \times n_R$ boyutlarında alınan işaret matrisi olan Y eşitlik (3.26)'daki gibi verilebilir.

$$Y = X_{\chi}H + N \quad (3.26)$$

Burada $X_{\chi} \in \chi$, iki ardışık zamanda iletilen $2 \times n_T$ iletim matrisi, H ve N ise sırasıyla elemanları $N(0,1)$ ve $N(0, N_0)$ dağılımlı bağımsız ve eş aralıklı rastgele değişkenler olan $n_T \times n_R$ kanal matrisi ve $2 \times n_R$ gürültü matrisidir. Kanalin bir kod sözcüğünün iletimi boyunca sabit kaldığı, her bir kod çözücü için farklı değerler aldığı ve alıcı tarafından bilindiği varsayılmıştır. n_T adet verici anten kullanılan ve c adet kod sözcüğüne sahip olan bir STBC-SM sisteminde, M , kullanılan modülasyon tekniğinin mertebesini belirtmek üzere, cM^2 adet farklı iletim matrisi kullanılabilir. Dolayısı ile en büyük olabirlikli seçim yöntemini kullanan bir kod çözücü gönderilme ihtimali bulunan cM^2 adet iletim matrisi üzerinden bir arama yapmalı ve aşağıdaki metriği minimize eden matrise karar vermelidir (Başar ve diğ. 2011a).

$$X_{\chi} = \arg \min_{X_{\chi} \in \chi} \|Y - X_{\chi}H\|^2 \quad (3.27)$$

Şekil 3.8'de uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyona ait bit hata oranlarının bulunduğu grafikler verilmiştir.



Şekil 3.8: STBC-SM tekniğine ait bit hata oranı başarımları grafiği.

3.5. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE UZAY-ZAMAN BLOK KODLAMALI UZAYSAL MODÜLASYON

Kablosuz optik haberleşme sistemleri uygun maliyetli kablosuz haberleşme sistemleridir (Gagliardi ve Karp, 1995). Bu teknik özellikle fiber-optik sistemlerin kurulmalarının mümkün olmadığı ya da kurulum maliyetlerinin çok pahalı olmaları durumunda tercih edilen ve çekici bir çözümdür. Kullanılması için lisans alınması gerekmemesi, yüksek bant genişliği kapasitesine sahip olması, doğası gereği güvenli bir iletişim kurması gibi birçok avantajlı özellikleri sayesinde son yıllarda dikkat çekmektedir. Tüm bu avantajlarının yanında kablosuz optik haberleşme sistemlerinin en büyük dezavantajı, atmosferin homojensizliğinden doğan kırılma indisindeki dalgalanmalar sonucu oluşan atmosferik türbülans kaynaklı sönümlenmedir. Sönümleme etkisini mümkün olduğunca azaltmak adına çoğullama teknikleri kullanılmaktadır. Orijinal olarak Alamouti (1998) tarafından ortaya çıkarılmış olan uzay-zaman blok kodlama (STBC), çoğullama kazancı sağlaması açısından çok kullanılan ve dayanıklı bir tekniktir. STBC, radyo frekans sistemlerde detaylı olarak incelenmiş ve kablosuz optik haberleşme sistemlerine de ilk olarak Simon ve Vlnrotter (2005) tarafından uyarlanmıştır.

Kabul edilebilir bit hata oranı değerleri ile birlikte yüksek bir bant genişliği verimi sağlayabilen uzaysal modülasyon tekniği de kablosuz haberleşme için bir başka umut verici tekniktir. Uzaysal modülasyon, kablosuz sistemlerdeki yüksek kanal girişimi ve güç dengesizliklerine karşı kuvvetlidir. Başlangıçta radyo frekans sistemleri için ortaya çıkarılmış olsa da uzaysal modüleli kablosuz optik haberleşme sistemleri yakın zamanda incelenmeye başlanmıştır (Mesleh ve diğ., 2006).

E. Başar ve diğ. (2011) tarafından uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon (STBC-SM), bant genişliği verimliliği yüksek ve dayanıklı bir radyo frekans modülasyonu tekniği olarak ortaya çıkarılmıştır. STBC-SM tekniği STBC ve SM tekniklerinin birleştirilmesi ile oluşmuştur.

Bu tez kapsamında uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon (STBC-SM) tekniği hem uzaysal modülasyonun hem de uzay-zaman blok kodlama tekniğinin avantajlarını bir arada kullanabilmek adına kablosuz optik haberleşme sistemlerine uyarlanmıştır. Öncelikle herhangi bir negatif ve imajiner değer içermemesi gereken STBC matrisi optik alana uyarlanmıştır. Ardından STBC-SM tekniği kablosuz optik haberleşme sistemleri için yeniden tanımlanmış ve bit hata oranı için bir teorik üst sınır elde edilmiştir. Elde edilen bu üst sınırı onaylayabilmek adına sistemin simülasyonu “MATLAB” programı ile Monte Carlo simülasyon tekniği kullanılarak oluşturulmuştur. Modülasyon tekniği olarak darbe konum modülasyonu (PPM), yan etki olarak düşük spektral verimlilik getirdiğinden dolayı darbe genlik modülasyonu (PAM) kullanılmıştır. Simülasyonlar hem Log-Normal hem de Gamma-Gamma kanallarda 2-PAM ve 4-PAM modülasyon teknikleri kullanılarak dört vericili dört alıcılı STBC-SM sistemi üzerinden yapılmıştır.

3.5.1. Sistem ve Kanal Modeli

Ele alınan kablosuz optik haberleşme sistemi yoğunluk modülasyonu ve direkt sezim (IM/DD) yöntemi ile çalışan, modülasyon tipi olarak darbe genlik modülasyonu kullanan ve atmosferik türbülans kanal üzerinden iletim yapan bir sistemdir. Atmosferik kanal modelleri olarak log-normal ve gamma-gamma dağılımlı sönmlemeli kanallar ile görünür ışık kanalları kullanılmaktadır. Log-normal kanala ait olasılık yoğunluk dağılımı eşitlik 3.28'deki gibidir.

$$f_H(h) = \frac{1}{h\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\log h - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.28)$$

Burada h , türbülans tarafından indüklenmiş kanal sönümlenme sabitidir. μ ve σ parametreleri ise σ_{SI}^2 , parıldama indeksi olmak üzere eşitlik (3.29) ve (3.30)'da tanımlanmaktadır. Parıldama indeksi, oluşturulacak olan kanalın (log-normal veya gamma-gamma) varyans değerini belirler. Log-normal kanallarda parıldama indeksi seçilirken kanalın varyans değerinin 1'den düşük olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir.

$$\mu = -\log(1 + \sigma_{SI}^2) \quad (3.29)$$

$$\sigma^2 = \log(1 + \sigma_{SI}^2) \quad (3.30)$$

Gamma-gamma kanala ait olasılık yoğunluk dağılımı ise eşitlik (3.31)'deki gibidir.

$$f_H^{GG}(h) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h}) \quad (3.31)$$

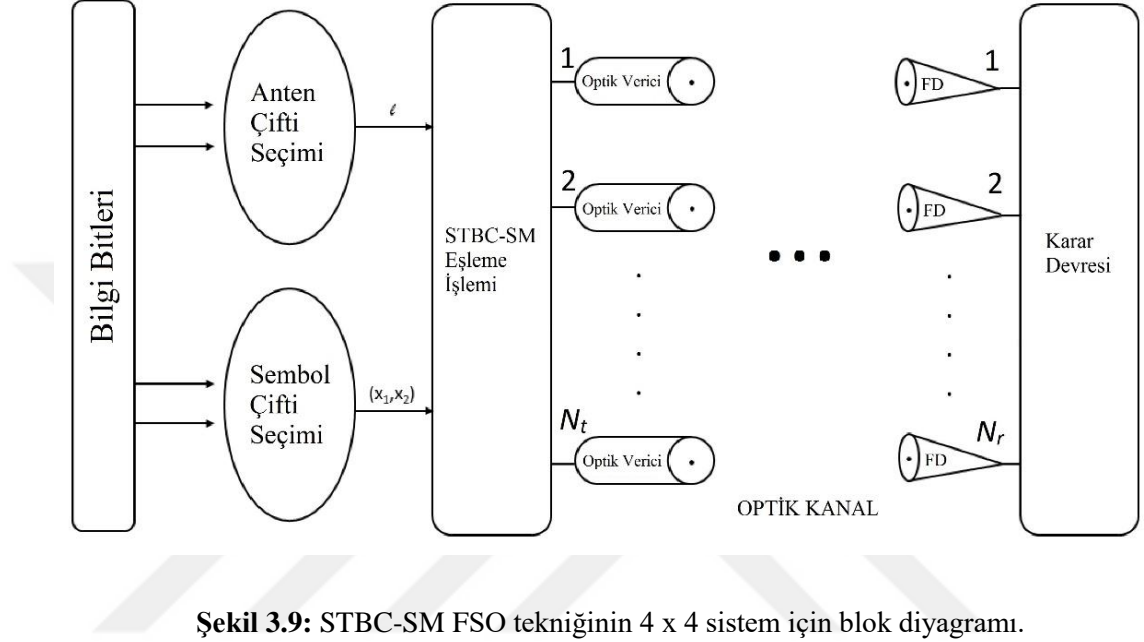
Burada $\Gamma(\cdot)$ ve $K_\nu(\cdot)$ parametreleri sırası ile gamma fonksiyonunu ve ν . mertebeden ikinci tip Bessel fonksiyonunu göstermektedir. Eşitlikteki α ve β değerleri parıldama indeksine eşitlik (3.32) ile bağlıdır.

$$\sigma_I^2 = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha\beta} \quad (3.32)$$

Kanala ait matrisin boyutu N_t verici taraftaki anten, N_r alıcı taraftaki fotodetektör sayılarını göstermek üzere; $N_t \times N_r$ şeklindedir. İletim ortamındaki diğer ışınların sebep oldukları gürültü, diğer gürültü bileşenlerine nazaran daha güçlü olduğu kabul edilmiş ve alıcıdaki gürültü toplamsal beyaz Gauss gürültüsü şeklinde $N(0, N_0/2)$ değerleri ile modellenmiştir.

Ele alınan STBC-SM tekniğine ait dört optik verici ve dört fotodetektörden oluşan sistemin blok diyagramı Şekil 3.9'da verilmiştir. Radyo frekans iletişim sistemlerinden farklı olarak optik iletişim sistemlerinde iletilen semboller gerçel ve pozitif değerli olmak

zorundadır. Bu da klasik M'li PSK veya M'li QAM tipi modülasyon çeşitlerinin direkt sezimli kablosuz optik haberleşme sistemlerinde kullanılmayacağı anlamına gelir. Bu nedenle tüm sembolleri gerçel ve pozitif değerli olan darbe genlik modülasyonu bu tez kapsamındaki modülasyon tipi olarak seçilmiştir.



Şekil 3.9: STBC-SM FSO tekniğinin 4 x 4 sistem için blok diyagramı.

Klasik Alamouti tipi uzay-zaman blok kod matrisi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$S = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

Burada x_1 ve x_2 , iki peş peşe gelen iletim anında gönderilecek sembol çiftleri olup x_i^* , x_i 'nin konjügesidir. Matrisin sütunları optik vericileri, satırları ise iletim anlarını sembolize etmektedir. STBC-SM tekniğinde bu matris radyo frekans (RF) sistemleri için anten bölgesine aşağıdaki gibi yayılmıştır.

$$\begin{aligned} \chi_1 = \{X_{11}, X_{12}\} &= \left\{ \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & 0 & 0 \\ -x_2^* & x_1^* & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & x_1 & x_2 \\ 0 & 0 & -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix} \right\} \\ \chi_2 = \{X_{21}, X_{22}\} &= \left\{ \begin{pmatrix} 0 & x_1 & x_2 & 0 \\ 0 & -x_2^* & x_1^* & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_2 & 0 & 0 & x_1 \\ x_1^* & 0 & 0 & -x_2^* \end{pmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Burada X_{ij} 'ler ($i, j = 1, 2$) tanımlanmış STBC-SM kod sözcükleridir. Belirli bir X_{ij} için uzay-zaman blok kodlama tekniğinde olduğu gibi X_{ij} 'nin sütunları optik verici sayısını, satırları ise iletim zamanlarını göstermektedir. Gelen bilgi bitlerine göre iletilecek sembol çiftlerini seçen devre, ilgili iletim anında hangi kod sözcüğünün iletileceğine karar verir. Dolayısı ile STBC-SM tekniğinde hem optik verici indisleri hem de çekirdek STBC sembolleri simultane olarak bilgi taşır. Eşitlik (3.34)'de verilen matrisler iletilecek sembollerin negatif ve konjuge versiyonlarını da barındırmaktadır. Ancak optik iletişimde darbe genlik modülasyonu, darbe konum modülasyonu ve aç/kapa anahtarlamalı modülasyon gibi “unipolar” modülasyon tekniklerinin kullanılması gerektiğinden eşitlik (3.34)'deki matrisler kullanılarak iletim yapılamaz. Bu problemin üstesinden gelebilmek için STBC tekniğini optik iletişimde kullanılabilir hale getiren, modüleli sinyallerin negatif ve konjugelerinin kullanılmadığı “değiştirilmiş” bir STBC tekniği kullanılmalıdır (Simon ve Vlnrotter, 2005). Bu teknikte STBC kod matrisini oluşturmak için sembollerin komplementleri tanımlanmış ve kullanılmıştır. Bu tanıma göre, bir sembol olan x_i 'nin komplementi \bar{x}_i olarak belirlenmiştir. 2-PAM modülasyon tekniği için (s_1, s_2) $x_i = s_1$ olduğu varsayılırsa, bu sembole ait komplement $\bar{x}_i = s_2 = -s_1 + A$ olarak belirlenir. Bu durumda $x_i = s_2$ olduğunda $\bar{x}_i = s_1 = -s_2 + A$ olur. ($A = s_1 + s_2$) M=2 olan 2-PAM durumunda A parametresi 3 değerini almaktadır. Bu tanımdan da çıkarımının yapılabildiği üzere 2-PAM durumu için bir sembolün komplementi o sembolün (s_1 veya s_2) tersidir.

M-PAM durumu için bu prosedür genelleştirilebilir. s_i ve s_j iki farklı M-PAM modüleli semboller olsun. Bu sembollere ait komplementler aşağıdaki eşitlikler ile bulunabilir.

$$\bar{s}_i = -s_j + A \quad (3.35)$$

$$\bar{s}_j = -s_i + A \quad (3.36)$$

A parametresi $i + j = M + 1$ olduğu PAM mertebelerinde $M + 1$ 'e eşittir. PAM sembollerinin komplimentleri tanımlandıktan sonra eşler seçilir ve eşitlik (3.34) aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\begin{aligned} \mathcal{X}_1 = \{X_{11}, X_{12}\} &= \left\{ \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & 0 & 0 \\ \bar{x}_2 & x_1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & x_1 & x_2 \\ 0 & 0 & \bar{x}_2 & x_1 \end{pmatrix} \right\} \\ \mathcal{X}_2 = \{X_{21}, X_{22}\} &= \left\{ \begin{pmatrix} 0 & x_1 & x_2 & 0 \\ 0 & \bar{x}_2 & x_1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_2 & 0 & 0 & x_1 \\ x_1 & 0 & 0 & \bar{x}_2 \end{pmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (3.37)$$

Alıcıda elde edilen sinyal aşağıdaki gibi olur,

$$Y = X_\chi H + N \quad (3.38)$$

Burada H, log-normal ya da gamma-gamma dağılımına sahip kanal matrisi olup N ise toplamsal beyaz Gauss gürültü matrisidir. Alıcı tarafta, en büyük olabilirlikli sezim kuralına dayalı olan optimum sezim yöntemi kullanılır. Bu yöntem aşağıdaki eşitlik ile özetlenebilir.

$$\hat{X}_\chi = \arg \min_{X_\chi \in \mathcal{X}} \|Y - X_\chi H\|^2 \quad (3.39)$$

Bir iletişim sisteminin karmaşıklığı, alıcı tarafta hesaplanması gereken eşitlik sayısı ile belirlenir. STBC-SM tekniği için $N_t M^2$ adet eşitlik hesaplaması yapılmalıdır. STBC-SM tekniğinin spektral verimliliği m , aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$m = \frac{1}{2} \log_2 N_t + \log_2 M \quad (\text{bits/sn/Hz}) \quad (3.40)$$

3.5.2. OWC STBC-SM Tekniğinin Performans Analizi

$2m$ bilgi bitini artarda gelen iki iletim anında vericiden alıcıya iletmekte kullanılabilecek 2^{2m} adet STBC-SM matrisi mevcuttur. “Union Bound” eşitliği ile STBC-SM’e ait bit hata olasılığının bir üst sınırı bulunabilir.

$$P_b \leq \frac{1}{2^{2m}} \sum_{i=1}^{2^{2m}} \sum_{j=1}^{2^{2m}} \frac{P(X_i \rightarrow X_j) n_{i,j}}{2m} \quad (3.41)$$

Burada $P(X_i \rightarrow X_j)$, X_i STBC-SM matrisinin iletildiği ve alıcıda X_j matrisine karar verildiği durum için oluşan ikili hata olasılığı, $n_{i,j}$ ise X_i ile X_j matrisleri arasındaki farklı bitlerin sayısıdır ve $n_{i,j}$, $n_{i,j} = w[(j-i)_2]$, olarak direkt hesaplanabilir. Burada $w[x]$ ve $(x)_2$ sırası ile x 'in Hamming ağırlığı ve ikili sayı gösterimidir. STBC-SM sisteminin koşullu ikili hata olasılığı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$P(X_i \rightarrow X_j | H) = Q\left(\sqrt{\frac{p}{2}} \|(X_j - X_i)H\|\right) \quad (3.42)$$

Sistemin eşitlik (3.42)'de verilen koşulsuz ikili hata olasılığını bulabilmek için eşitlik (3.42)'deki koşul parametresinin ortadan kaldırılması gerekmektedir.

$$P(X_i \rightarrow X_j) = E\left[Q\left(\frac{\sqrt{pS}}{2}\right)\right] \quad (3.43)$$

$$S = \|(X_j - X_i)H\|^2 \quad (3.44)$$

Dolayısı ile log-normal dağılıma ve gamma-gamma dağılımına ait moment üreten fonksiyon (MGF) yaklaşımı kullanılmalıdır. Q-fonksiyonu için (3.43)'de verilen Craig formülasyonu kullanıldığında (Craig, 1991),

$$Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sin^2 \theta}\right) d\theta \quad (3.45)$$

eşitlik (3.43)'deki ikili hata olasılığı tek tanımlı bir integrale dönüşür.

$$P(X_j \rightarrow X_i) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} M_s\left(-\frac{p}{8\sin^2 \theta}\right) d\theta \quad (3.46)$$

Bir S , rastgele değişkenine ait moment üreten fonksiyon eşitlik (3.47)'de verilmiştir.

$$M_s(t) = \int_0^{\infty} f_s(\Gamma) e^{\Gamma t} d\Gamma \quad (3.47)$$

Log-normal dağılımlı rastgele değişkenlerin moment üreten fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$M_s(t) = \int_0^{\infty} e^{ts} \frac{1}{s\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\log s - \mu s)^2}{2\sigma^2}} ds \quad (3.48)$$

Gamma-gamma dağılımlı rastgele değişkenlerde ise moment üreten fonksiyon aşağıdaki şekildedir.

$$M_s(t) = \int_0^{\infty} s^{st} \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} s^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} k_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}s) ds \quad (3.49)$$

Log-normal ve gamma-gamma dağılımlarına ait kapalı formda bir ifade bulunmasa da bit hata oranı için numerik olarak bir üst sınır (Özbilgin ve Koca, 2015)'deki gibi çıkarılabilir. Bunun için kanala göre eşitlik (3.48) veya (3.49), eşitlik (3.46)'da yerine yazılarak eşitlik (3.43) hesaplanır. Daha sonra eşitlik (3.43), eşitlik (3.41)'de yerine yazılır.

4. BULGULAR

4.1. GİRİŞ

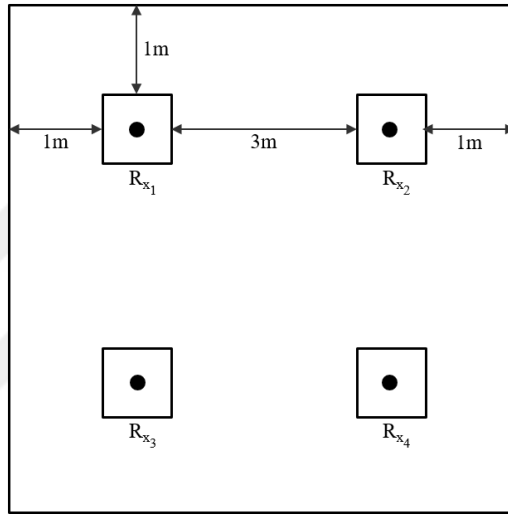
Bu bölümde uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniğinin kablosuz optik haberleşme sistemlerine bir önceki bölümde anlatıldığı şekilde uygulanması sonucunda elde edilen teorik çıkarımlara ve Monte Carlo simülasyonlarına ait bit hata oranı başarımları sonuçları verilmiştir. Monte Carlo benzetim tekniği “MATLAB” bilgisayar programı yardımı ile kullanılmıştır. Karşılaştırma yapılabilmesi için ek olarak yalnızca uzaysal modülasyon tekniği kullanılarak oluşturulmuş sistemlerin de başarımları sonuçları verilmiştir.

Hem log-normal hem de gamma-gamma kanallar için parıldama indexleri 2 olarak alınmış ve bu kanallar MATLAB kodları yardımı ile oluşturulmuştur (“*lognrnd*” ve “*gamrnd*”). Gamma-gamma kanalı için $\alpha = 1$ ve $\beta = 2$ olarak alınmıştır. Seçilen parıldama indexine göre log-normal ve gamma-gamma kanallara ait varyans değerleri sırası ile 0.67 ve 2 olarak belirlenmiştir. Tüm başarımları analizleri için eşit seviyede bir karşılaştırma olması amacıyla, 2-PAM modüleli sistemlerde spektral verimlilik 2 bit/sn/Hz olarak, 4-PAM modüleli sistemlerde ise spektral verimlilik 3 bit/sn/Hz olarak alınmıştır. Bu spektral verimlilik değerlerini elde edebilmek için 4 verici 4 alıcılı 2-PAM sistemleri ve 2 verici 4 alıcılı 4-PAM sistemleri kullanılmıştır. Gürültü bileşeni Toplanabilir Beyaz Gauss Gürültüsü olarak modellenmiştir (AWGN). Sinyal gürültü oranı gönderilen bit enerjisinin gürültü gücüne oranı olarak belirlenmiştir (E_b/N_0). Bütün sistemler optimum alıcı kullanmaktadır. Sistemler yaklaşık olarak 10^{-5} hata oranına ulaştıkları dB değerleri üzerinden karşılaştırılmıştır.

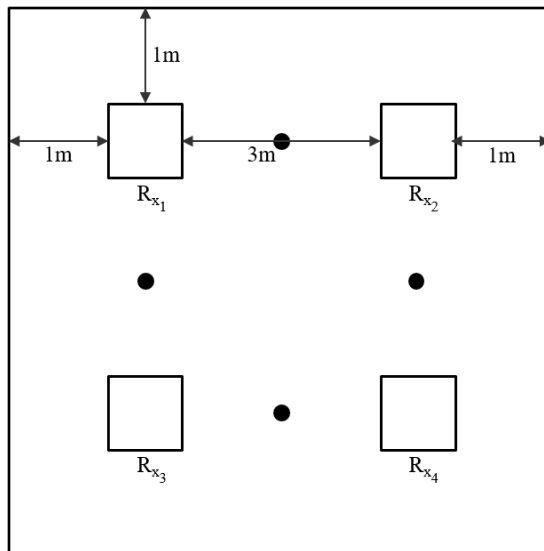
Görünür ışık kanalları için ise beş farklı şekilde modellenmiş olan oda yapıları kullanılmıştır. Oda boyutları her model için aynı olup 5m x 5m x 3m olarak belirlenmiştir. Alıcılar (fotodetektörler) her model için 0.8m yükseklikte bulunmakta olup oda içindeki konumları aynıdır. Foto detektör alanı 1cm^2 , optik filtrenin ve konsantratörün kazançları sırası ile 1 ve 0.646 olarak belirlenmiştir. Alıcının görüş alanı 60° , yarı güçteki yarı açısı 70° ve kırılma indisi 1,5 olarak alınmıştır. Kanallardaki farklılığı kullanılan

ışık kaynaklarının oda içindeki farklı konumları oluşturmaktadır. STBC-SM tekniğine ait üç adet, yalnızca SM tekniğine ait iki adet oda modeli oluşturulmuştur.

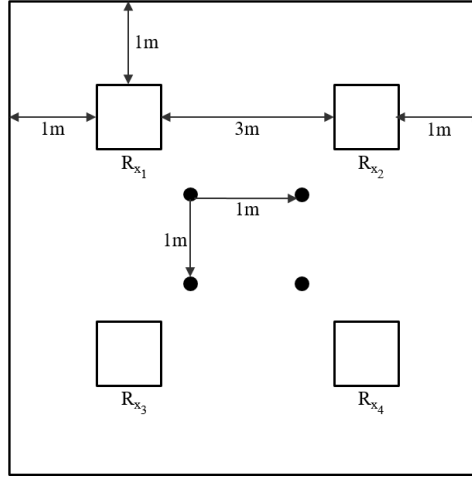
Sistem parametrelerinin geri kalanları log-normal ve gamma-gamma kanallar için alınmış parametrelerle aynıdır. Yani görünür ışık sistemlerinde de modülasyon tekniği 2-PAM ve 4-PAM olarak seçilmiş, spektral verimlilikler 2-PAM için 2, 4-PAM için 3 olarak belirlenmiştir. Bu spektral verimliliklere ulaşabilmek adına STBC-SM sistemler 4x4 olarak, SM sistemler ise 2x4 olarak oluşturulmuştur.



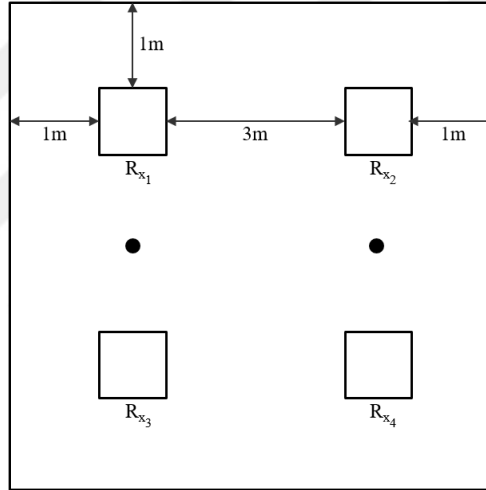
Şekil 4.1: STBC-SM direkt görüş modeli (STBC-SM v1).



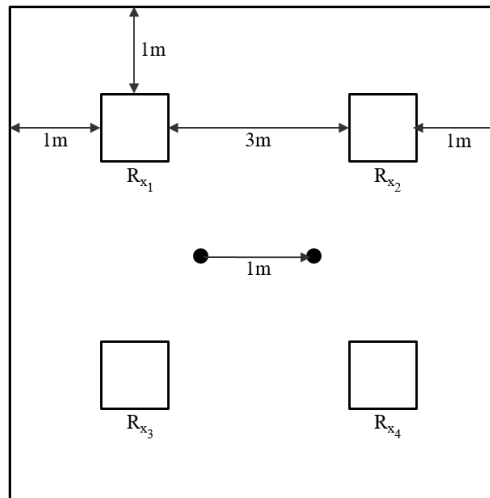
Şekil 4.2: STBC-SM ortalı uzak model (STBC-SM v2).



Şekil 4.3: STBC-SM ortalı yakın model (STBC-SM v3).



Şekil 4.4: SM ortalı uzak model (SM v1).



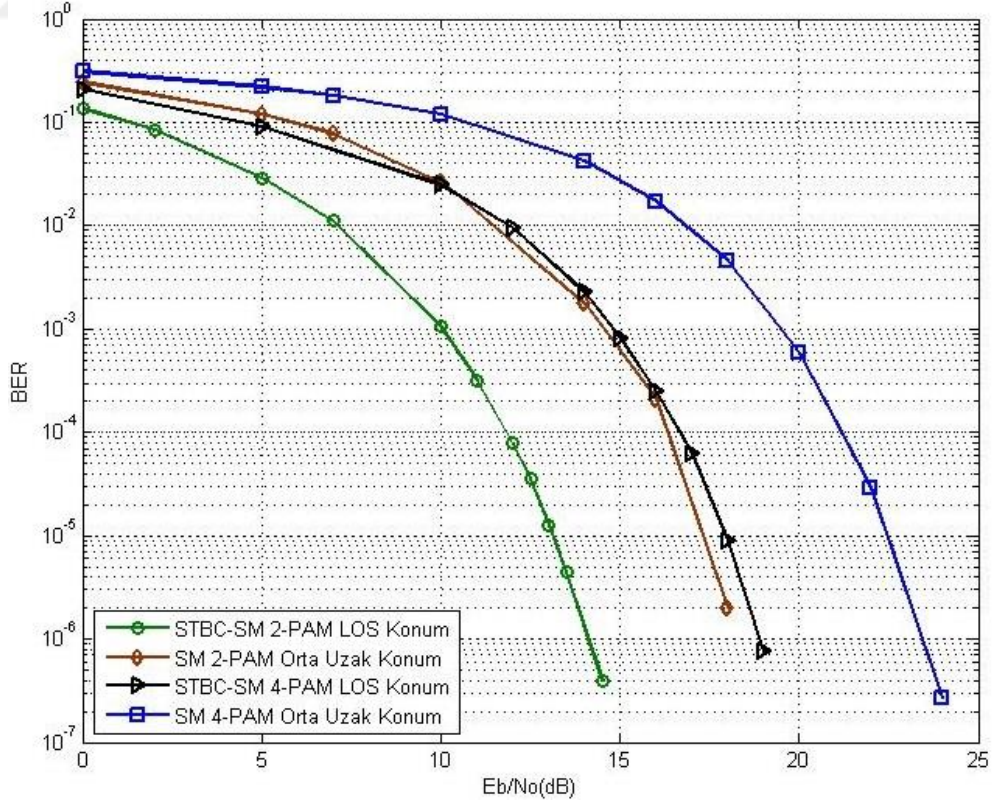
Şekil 4.5: SM ortalı yakın model (SM v2).

4.2. GÖRÜNÜR IŞIK KANALLAR İÇİN STBC-SM TEKNİĞİ BAŞARIM SONUÇLARI

4.2.1. 2-PAM ve 4-PAM için STBC-SM v1 ile SM v1 Başarım Sonuçları

Şekil 4.6’da 2-PAM ve 4-PAM modüleri bir görünür ışıkla iletişim sistemi için önerilen uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniğine ait başarım sonuçları verilmiştir. Şekilde sinyal gürültü oranına karşı sistemin bit hata oranı görülmektedir. Performans karşılaştırması yapılabilmesi için yalnızca uzaysal modülasyon tekniğinin kullanıldığı bir VLC sistemine ait bit hata oranı grafiği de eklenmiştir. Burada karşılaştırması yapılan modeller “STBC-SM v1” ile “SM v1” dir.

Şekil 4.6’den da görülebileceği gibi uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniği kullanılan sistem, 2-PAM modülasyonu ile birlikte kullanıldığında seçilen VLC kanalda uzaysal modülasyonlu sisteme göre yaklaşık olarak 10^{-6} bit hata oranı seviyesinde 4 dB’lik bir kazanç sağlamaktadır. Aynı sistem 4-PAM modülasyonu ile birlikte kullanıldığında ise seçilen VLC kanalda uzaysal modülasyonlu sisteme göre 4.5 dB’lik bir kazanç sağlamaktadır.

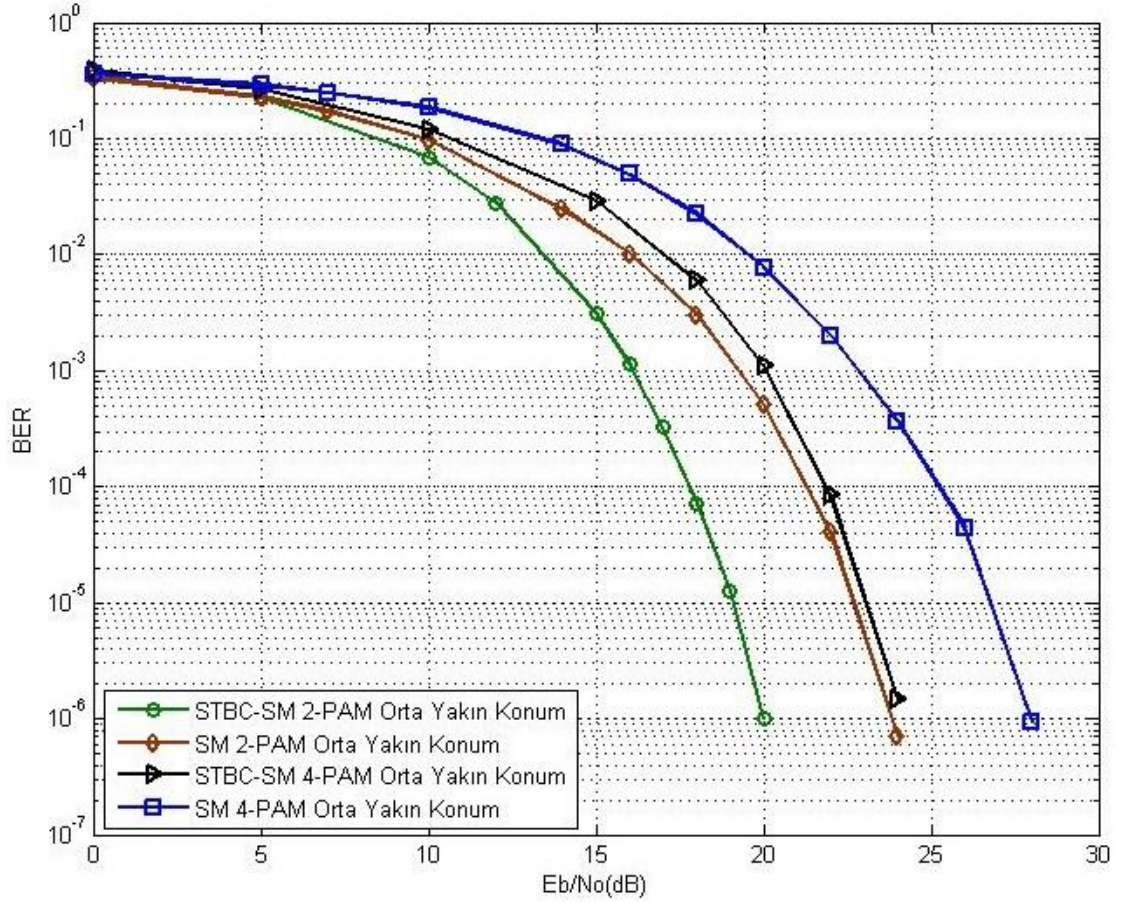


Şekil 4.6: STBC-SM v1 – SM v1 kanal modellerine ait başarım grafiği.

4.2.2. 2-PAM ve 4-PAM için STBC-SM v3 ile SM v2 Başarım Sonuçları

Şekil 4.7’de 2-PAM ve 4-PAM modüleri bir görünür ışıkla iletişim sistemi için önerilen uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniğine ait başarımları verilmiştir. Şekilde sinyal gürültü oranına karşı sistemin bit hata oranı görülmektedir. Performans karşılaştırması yapılabilmesi için yalnızca uzaysal modülasyon tekniğinin kullanıldığı bir VLC sistemine ait bit hata oranı grafiği de eklenmiştir. Burada karşılaştırması yapılan modeller “STBC-SM v3” ile “SM v2”dir.

Şekil 4.7’den de görülebileceği gibi uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniği kullanılan sistem, 2-PAM modülasyonu ile birlikte kullanıldığında seçilen VLC kanalda uzaysal modülasyonlu sisteme göre yaklaşık olarak 10^{-6} bit hata oranı seviyesinde 4 dB’lik bir kazanç sağlamaktadır. Aynı sistem 4-PAM modülasyonu ile birlikte kullanıldığında ise seçilen VLC kanalda uzaysal modülasyonlu sisteme göre 3.5 dB’lik bir kazanç sağlamaktadır.

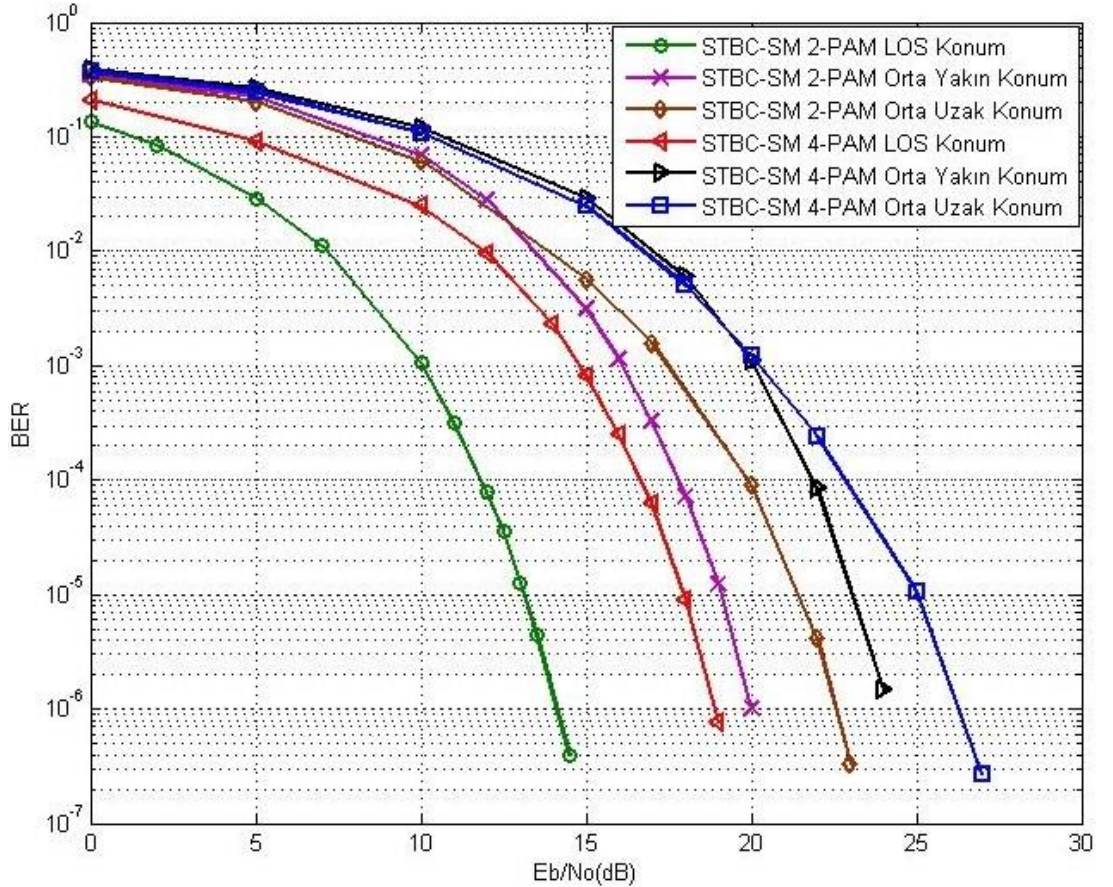


Şekil 4.7: STBC-SM v3 – SM v2 kanal modellerine ait başarımları grafiği.

4.2.3. 2-PAM ve 4-PAM için STBC-SM Başarım Sonuçları

Şekil 4.8’de 2-PAM ve 4-PAM modüleri bir görünür ışıkla iletişim sistemi için önerilen uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniğine ait başarımları verilmiştir. Şekilde sinyal gürültü oranına karşı sistemin bit hata oranı görülmektedir. Burada tüm STBC-SM modelleri, hangi kanal modelinin en iyi performansı verdiğini bulmak amacıyla birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.8’den de görülebileceği gibi STBC-SM v1 kanal modeli, oluşturulan diğer kanal modellerinden daha iyi performans vermektedir. 2-PAM modülasyonu kullanıldığında yaklaşık olarak 10^{-6} bit hata oranı seviyesinde STBC-SM v1, diğer kanal modellerine kıyasla 6 dB’lik bir kazanç sağlamaktadır. 4-PAM modülasyonu kullanıldığında ise STBC-SM v1 modeli diğer kanal modellerine kıyasla 5 dB’lik bir kazanç sağlamaktadır.

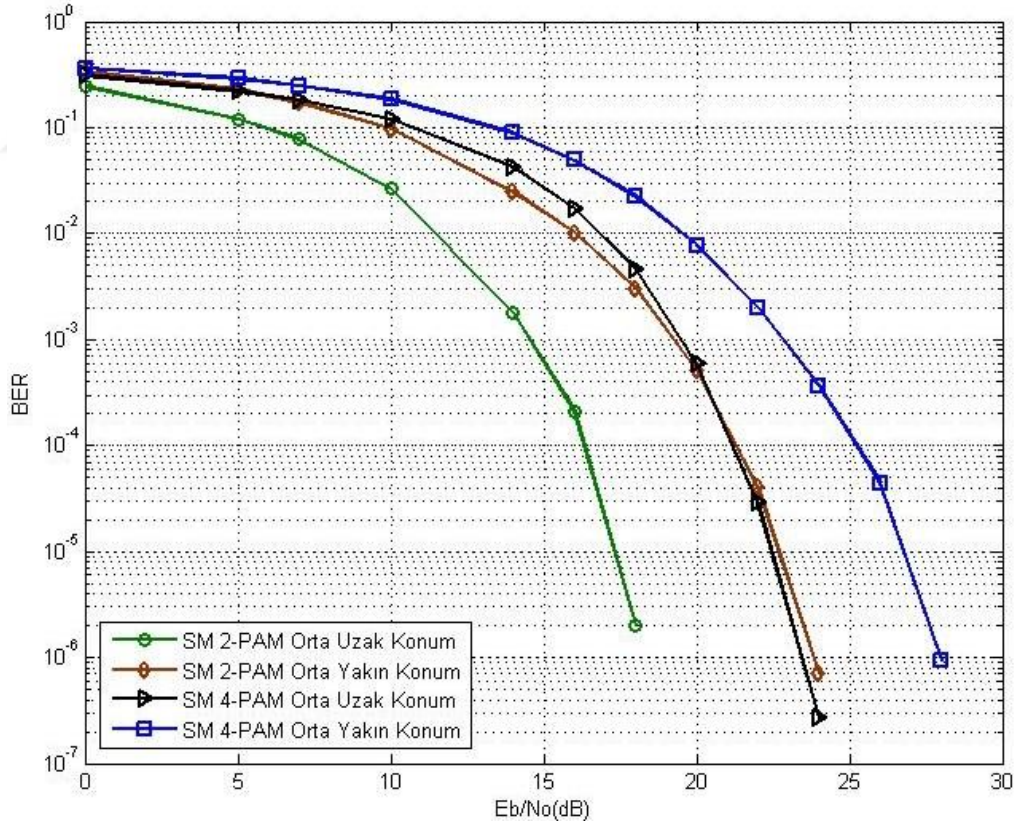


Şekil 4.8: Tüm STBC-SM kanal modellerinin karşılaştırılması.

4.2.4. 2-PAM ve 4-PAM için SM Başarım Sonuçları

Şekil 4.9’da 2-PAM ve 4-PAM modüleri bir görünür ışıkla iletişim sistemi için yalnızca uzaysal modülasyon tekniğine ait başarımlar verilmiştir. Şekilde sinyal gürültü oranına karşı sistemin bit hata oranı görülmektedir. Burada tüm SM modelleri, hangi kanal modelinin en iyi performansı verdiğini bulmak amacıyla birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.9’dan da görülebileceği gibi SM v1 kanal modeli, oluşturulan diğer kanal modellerinden daha iyi performans vermektedir. 2-PAM modülasyonu kullanıldığında yaklaşık olarak 10^{-6} bit hata oranı seviyesinde SM v1, diğer kanal modellerine kıyasla 5 dB’lik bir kazanç sağlamaktadır. 4-PAM modülasyonu kullanıldığında ise SM v1 modeli diğer kanal modellerine kıyasla 4.5 dB’lik bir kazanç sağlamaktadır.

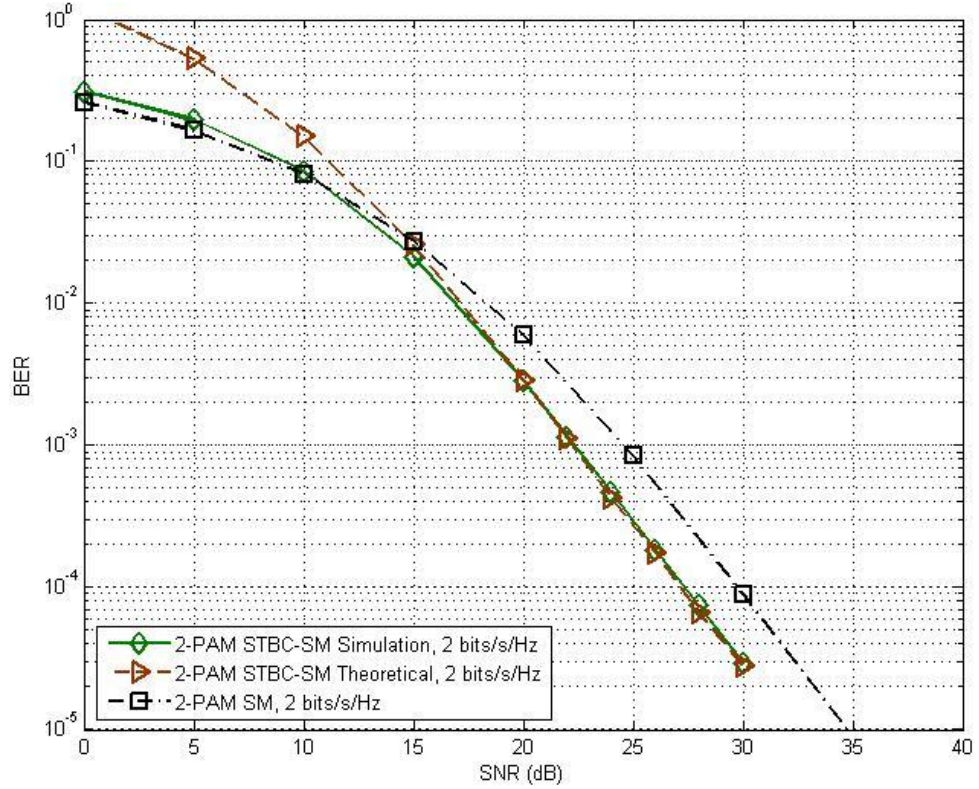


Şekil 4.9: Tüm SM kanal modellerinin karşılaştırılması.

4.3. LOG-NORMAL KANAL İÇİN 2-PAM STBC-SM TEKNİĞİ BAŞARIM SONUÇLARI

Şekil 4.10’da 2-PAM modüleli bir serbest uzay optik haberleşme sistemi için log-normal kanalda önerilen uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniğine ait başarımlar verilmiştir. Şekilde sinyal gürültü oranına karşı sistemin bit hata oranı görülmektedir. Bulunan teorik üst sınırın doğruluğunu onaylamak adına MATLAB programı ile oluşturulan Monte Carlo simülasyonları çizilmiştir. Aynı zamanda performans karşılaştırması yapılabilmesi için yalnızca uzaysal modülasyon tekniğinin kullanıldığı bir 2-PAM FSO sistemine ait bit hata oranı grafiği de eklenmiştir.

Şekil 4.10’den de görülebileceği gibi uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniği kullanılan sistem yaklaşık 3×10^{-5} bit hata oranına 30dB’de ulaşırken, yalnızca uzaysal modülasyon kullanılan sistem aynı hata oranına 32.5dB’de ulaşmaktadır. Yani uzay-zaman blok kodlamalı sistem 2-PAM modülasyonu ile birlikte kullanıldığında log-normal kanalda uzaysal modülasyonlu sisteme göre 2.5dB’lik bir kazanç sağlamaktadır.

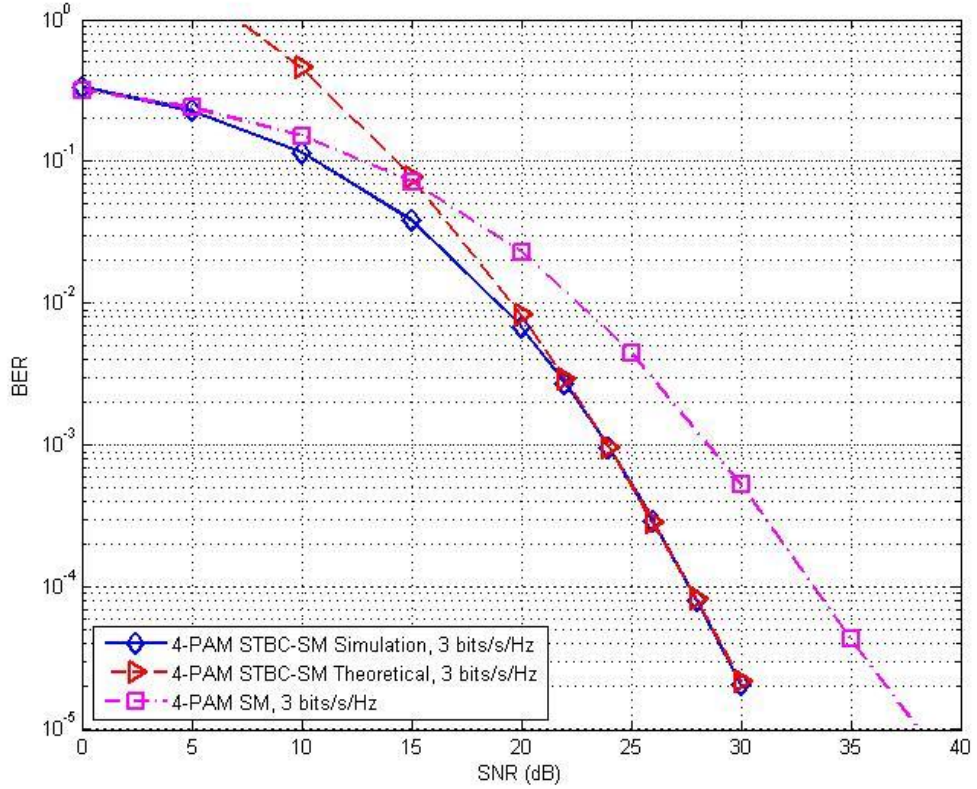


Şekil 4.10: Log-normal kanalda 2-PAM STBC-SM tekniği başarımlar grafiği.

4.4. LOG-NORMAL KANAL İÇİN 4-PAM STBC-SM TEKNİĞİ BAŞARIM SONUÇLARI

Şekil 4.11’de 4-PAM modüleli bir serbest uzay optik haberleşme sistemi için log-normal kanalda önerilen uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniğine ait başarımlar sunulmuştur. Şekilde sinyal gürültü oranına karşı sistemin bit hata oranı görülmektedir. Bulunan teorik üst sınırın doğruluğunu onaylamak adına MATLAB programı ile oluşturulan Monte Carlo simülasyonları çizilmiştir. Aynı zamanda performans karşılaştırması yapılabilmesi için yalnızca uzaysal modülasyon tekniğinin kullanıldığı bir 4-PAM FSO sistemine ait bit hata oranı grafiği de eklenmiştir.

Şekil 4.11’den de görülebileceği gibi uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniği kullanılan sistem yaklaşık 2×10^{-5} bit hata oranına 30dB’de ulaşırken, yalnızca uzaysal modülasyon kullanılan sistem aynı hata oranına 36.5dB’de ulaşmaktadır. Yani uzay-zaman blok kodlamalı sistem 4-PAM modülasyonu ile birlikte kullanıldığında log-normal kanalda uzaysal modülasyonlu sisteme göre 6.5dB’lik bir kazanç sağlamaktadır.

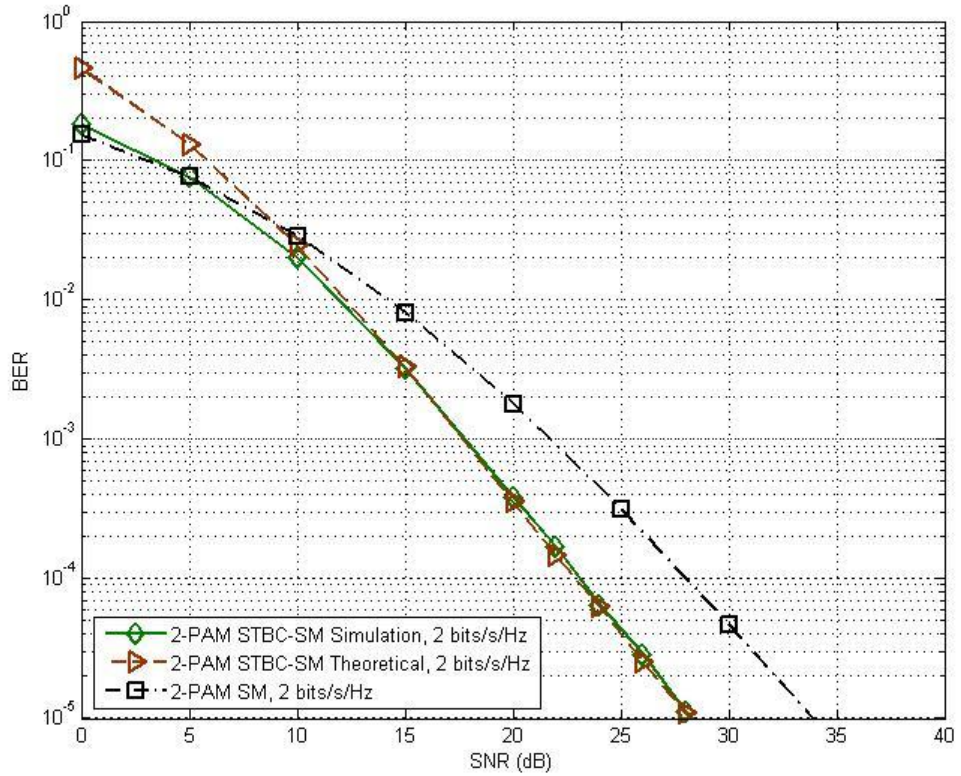


Şekil 4.11: Log-normal kanalda 4-PAM STBC-SM tekniği başarımlar grafiği.

4.5. GAMMA-GAMMA KANAL İÇİN 2-PAM STBC-SM TEKNİĞİ BAŞARIM SONUÇLARI

Şekil 4.12’de 2-PAM modüleli bir serbest uzay optik haberleşme sistemi için gamma-gamma kanalda önerilen uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniğine ait başarımları verilmiştir. Şekilde sinyal gürültü oranına karşı sistemin bit hata oranı görülmektedir. Bulunan teorik üst sınırın doğruluğunu onaylamak adına MATLAB programı ile oluşturulan Monte Carlo simülasyonları çizilmiştir. Aynı zamanda performans karşılaştırması yapılabilmesi için yalnızca uzaysal modülasyon tekniğinin kullanıldığı bir 2-PAM FSO sistemine ait bit hata oranı grafiği de eklenmiştir.

Şekil 4.12’den de görülebileceği gibi uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniği kullanılan sistem yaklaşık 10^{-5} bit hata oranına 28.2 dB’de ulaşırken, yalnızca uzaysal modülasyon kullanılan sistem aynı hata oranına 33.8 dB’de ulaşmaktadır. Yani uzay-zaman blok kodlamalı sistem 2-PAM modülasyonu ile birlikte kullanıldığında gamma-gamma kanalda uzaysal modülasyonlu sisteme göre 5.6 dB’lik bir kazanç sağlamaktadır.

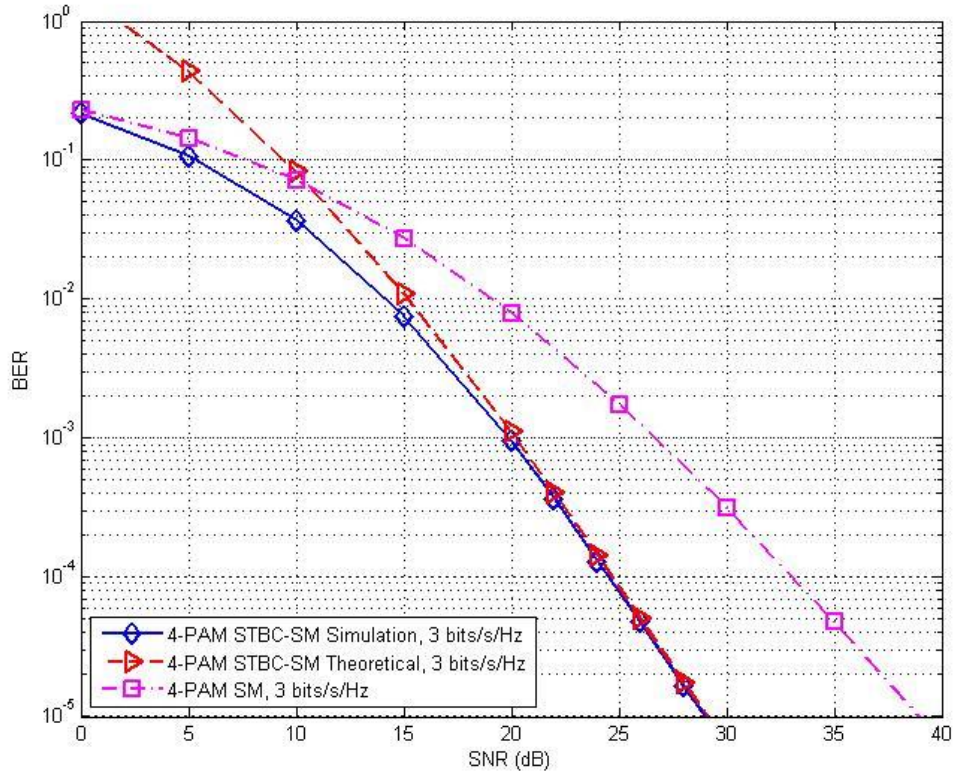


Şekil 4.12: Gamma-gamma kanalda 2-PAM STBC-SM tekniği başarımları grafiği.

4.6. GAMMA-GAMMA KANAL İÇİN 4-PAM STBC-SM TEKNİĞİ BAŞARIM SONUÇLARI

Şekil 4.13’de 4-PAM modüleli bir serbest uzay optik haberleşme sistemi için gamma-gamma kanalda önerilen uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniğine ait başarımları verilmiştir. Şekilde sinyal gürültü oranına karşı sistemin bit hata oranı görülmektedir. Bulunan teorik üst sınırın doğruluğunu onaylamak adına MATLAB programı ile oluşturulan Monte Carlo simülasyonları çizilmiştir. Aynı zamanda performans karşılaştırması yapılabilmesi için yalnızca uzaysal modülasyon tekniğinin kullanıldığı bir 4-PAM FSO sistemine ait bit hata oranı grafiği de eklenmiştir.

Şekil 4.13’den de görülebileceği gibi uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniği kullanılan sistem yaklaşık 10^{-5} bit hata oranına 29 dB’de ulaşırken, yalnızca uzaysal modülasyon kullanılan sistem aynı hata oranına 39 dB’de ulaşmaktadır. Yani uzay-zaman blok kodlamalı sistem 4-PAM modülasyonu ile birlikte kullanıldığında gamma-gamma kanalda uzaysal modülasyonlu sisteme göre 10 dB’lik bir kazanç sağlamaktadır.



Şekil 4.13: Gamma-gamma kanalda 4-PAM STBC-SM tekniği başarımları grafiği.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Kablosuz optik haberleşme sistemlerinin en büyük problemi, uzun mesafelerde daha çok ortaya çıkan ve atmosferin düzensiz sıcaklık ve basınç değişimleri nedeniyle oluşan atmosferik türbülansdır. Atmosferik türbülans, alınan optik sinyalin gücünde dalgalanmalar oluşturarak sistemin bit hata oranının artmasına neden olmaktadır. Son yıllarda kablosuz optik haberleşme sistemlerinin performansını artırmak için kanalın sönmüleme etkisini indirgeyen birçok teknik geliştirilmiştir. Bu yeni tekniklerin dışında radyo frekans sistemlerde kullanılan birçok modülasyon ve kodlama tekniği kablosuz sistemlere adapte edilmektedir.

Bu çalışmada kablosuz optik haberleşme sistemleri için log-normal, gamma-gamma dağılımlı atmosferik türbülans kanallarda ve görünür ışıkla iletişim kanallarında uzay-zaman blok kodlu uzaysal modülasyon tekniği önerilmiştir. Log-normal ve gamma-gamma kanallar için bit hata oranı üzerinden bir teorik üst-sınır grafiği çıkartılmış ve bu grafiğin doğruluğunu kontrol edebilmek adına MATLAB programı kullanılarak Monte Carlo bit-hata oranı simülasyonları yapılmıştır. Simülasyon sonrası çıkarılan grafiklerin teorik üst-sınır grafikleri ile eşleşmesi sonuçların doğruluğunu göstermektedir. Görünür ışıkla haberleşme sistemlerinde ise yalnızca simülasyon sonuçları verilmiştir.

Bulgular göstermektedir ki uzay-zaman blok kodlu uzaysal modülasyon tekniği, yalnızca uzaysal modülasyon tekniğinin kullanıldığı sistemlere göre daha iyi bit hata oranı vermektedir. Ayrıca log-normal ve gamma-gamma kanallar için 4-PAM modülasyonlu sistemlerdeki kazanç miktarı 2-PAM modülasyonlu sistemlerdeki kazanç miktarına oranla daha fazla olmakta ve yüksek sinyal gürültü oranı değerlerine doğru gidildikçe kazanç artmaktadır. Aynı şekilde gamma-gamma dağılımlı türbülans kanaldaki kazanç miktarı log-normal dağılımlı türbülans kanaldaki kazanç miktarına oranla daha fazladır.

Görünür ışık kanal modellerinde ise görülmüştür ki, alıcı ve verici arasındaki mesafe ve ışının geliş-gidiş açısı arttıkça bit hata oranı da artmaktadır. En iyi bit hata oranı sonucunu vericilerin, alıcıların tam üzerinde konumlandığı model vermektedir.

İleriki çalışmalarda uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon tekniği ultraviyole haberleşme (UVC) sistemlerine de uygulanacak, böylece bu tekniğin tüm kablosuz optik haberleşme sistemlerine uyarlanmış olması sağlanacaktır.



KAYNAKLAR

- Acampora, A., 2002, Last mile by laser, *Scientific American*, 17 June.
- Alamouti, S. M., 1998, A simple transmit diversity technique for wireless communications, *IEEE J. Sel. Areas Commun.* vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458.
- Alexander, S. B., 1997, *Optical Communication receiver design*. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press.
- Andrews, L. C., Phillips, R. L., Hopen, C. Y., 2001, *Laser beam scintillation with applications*, Bellingham: SPIE.
- Barry, J. R., Lee, E. A., Messerschmitt, D. G., 2004, *Digital communication*, Kluwer Academic Publishers, ISBN: 978-1-4613-4975-4.
- Başar, E., Aygözü, Ü., Panayırıcı, E., Poor, H. V., 2011a, Space-time block coded spatial modulation, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 3, pp. 823-832.
- Başar, E., Aygözü, Ü., Panayırıcı, E., Poor, H. V., 2011b, Advanced spatial modulation techniques for MIMO systems., *EMO Bilimsel Dergi*, Cilt 1, Sayı 1, Syf. 15-25.
- Bell, A. G., 1880, On the production and reproduction of sound by light, *American Journal of Sciences*, Oct., Volume 3, pp. 305-324.
- Bloom, S., Korevaar, E., Schuster, J., Willebrand, H., 2003, Understanding the performance of free-space optics, *Journal of optical networking*, vol 2, pp. 178-200.
- Bouchet, O., Sizun, H., Boisrobert, C., Fornel, F., Favennec, P., 2006, *Free-space optics: propagation and communication*. 1st ed. London: ISTE Ltd.
- Craig, J. W., 1991, A new, simple and exact result for calculating the probability of error for two-dimensional signal constellations, *Proc. IEEE Military Commun. Conf.* pp. 571-575.
- Gagliardi, R. M., Karp, S., 1995, *Optical communications* , 2nd ed., John Wiley.
- Goodwin, F. E., 1970, A review of operational laser communication systems, *Proceedings of IEEE*, Oct., Volume 58, pp. 1746-1752.
- Hariq, S. H., 2013, *Kablosuz optik haberleşme için uyarlanabilir modülasyon ve kodlama*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hemmati, H., 2007, Interplanetary laser communications, *Optics and Photonics News*, Nov., Volume 18, pp. 22-27.

- Jakes, W. C., 1974, *Microwave mobile communications*, New York: Wiley.
- Karp, S., Gagliardi, R. M., Moran, S. E., Stotts, L. B., 1988, *Optical channels: fibers, clouds, water and the atmosphere*, New York: Plenum Press.
- Killinger, D., 2002, Free space optics for laser communication through the air, *Optics & Photonics News*, Oct., Volume 13, pp. 35-42.
- Kim, I., McArthur, B., Korevaar, E. J., 2001, Comparison of laser beam propagation at 785nm and 1550nm in fog and haze for optical wireless communications, *SPIE preceeding: Optical wireless communications III*, Volume 4214, pp. 26-37.
- Kim, I., 2009, 10G FSO systems position technology for the future, *Lightwave online*, July, pp. 10-21.
- Komine, T., Nakagawa, M., 2004, Performance evaluation on visible light wireless Communication system using White LED lightnings, *Proceedings of ninth IEEE symposium on computers and communications*, vol. 1, pp. 258-263.
- Mesleh, R., Haas, H., Ahn, C. W., Yun, S., 2006, Spatial modulation: a new low complexity spectral efficiency enchancing technique, *Proc conf. commun. netw. china*, Beijing, China, pp. 1-5.
- Mesleh, R., Haas, H., Sinanovic, S., Ahn, C. W., Yun, S., 2008, Spatial modulation, *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, vol. 57, no. 4, pp. 2228-2241.
- Mesleh, R., Elgala, H., Haas, H., 2011a, Optical spatial modulation, *Journal of optical communications and networking*, vol. 3, no. 3, pp. 234-244.
- Mesleh, R., Elgala, H., Mehmood, R., Haas, H., 2011b, Performance of optical spatial modulation with transmitters-receivers alingment, *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 1, pp. 79-81.
- Ntogari, G., Kamalakis, T., Sphicopoulos. T., 2009, Performance analysis of space time block coding techniques for indoor optical wireless systems, *IEEE Journal on select. Areas in commun.*, vol. 27, no. 9, pp. 1545-1552.
- Osche, G. R., 2002, *Optical detection theory for laser applications*, New Jersey: Wiley.
- Özbilgin, T., Koca, M., 2014, Opical spatial pulse position amplitude modulation over atmospheric turbulence channels, *IEEE Int. Conf. on Commun. ICC 2014*, pp. 3412-3417.
- Özbilgin, T., Koca, M., 2015, Optical spatial modulation over athmospheric turbulence channels, *Journal of lightwave technology*, vol. 33, no. 11, pp. 2313-2323.
- Popoola, W. O., 2009, *Subcarrier intensity modulated free-space optical Communication systems*. Thesis (PhD), Northumbria University.

- Simon, M. K., Alouini, M. S., 2000, *Digital communication over fading channels: a unified approach to performance analysis*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Simon, M. K., Vilenrotter, V. A., 2005, Alamouti-type spacetime coding for free space optical communication with direct detection, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 4, no. 1, pp. 35-39.
- Telatar, E., 1999, Capacity of multi-antenna Gaussian channels, *European Transection Telecommunication*, vol 10, no 6, pp. 558-595.
- Uysal, M., Nouri, H., 2014, Optical wireless communications – an emerging technology, *ICTON 2014*.
- Willebrand, H., Ghuman, B. S., 2002, *Free-space optics: enabling optical connectivity in today's network*. Indianapolis: Sams.
- Wolniansky, P. W., Foschini, G. J., Golden, G. D., Valenzuela, R. A., 1998, V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Signals Systems and Electronics (ISSSE)*, no 2, pp. 295-300.
- Xiong, F., 2006, *Digital modulation techniques*, 2nd ed. Boston: Artech House.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Ferhat FETTAHOĞLU
Doğum Yeri	Kastamonu
Doğum Tarihi	01.01.1991
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	+905364787972
E-Posta Adresi	ferhat.fettahoglu@ogr.iu.edu.tr
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2013

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı
Mezuniyet Tarihi	2017

Makale ve Bildiriler	
Fettahoğlu, F., Odabaşoğlu, N., Space Time Block Coded Spatial Modulation for Free Space Optical Communication, <i>International Black Sea Conference on Communications and Networking</i> , June 2017.	