



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME İÇİN SİNYAL İŞLEME
TEKNİKLERİ**

**Elektrik Elektronik Müh. Yasin ÇELİK
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman
Yard. Doç. Dr. Niyazi ODABAŞIOĞLU**

Nisan, 2011

İSTANBUL



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME İÇİN SİNYAL İŞLEME
TEKNİKLERİ**

**Elektrik Elektronik Müh. Yasin ÇELİK
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**


**Danışman
Yard. Doç. Dr. Niyazi ODABAŞIOĞLU**

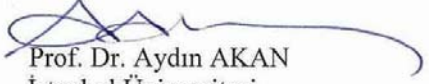
Nisan, 2011


İSTANBUL


Bu çalışma 26 / 05 / 2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliğı Anabilim Dalı Elektrik-Elektronik Mühendisliğı programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.


Tez Jürisi


Yard. Doç. Dr. Niyazi ODABAŞIOĞLU
İstanbul Üniversitesi
(Danışman)


Prof. Dr. Aydın AKAN
İstanbul Üniversitesi


Prof. Dr. Osman N. UÇAN
İstanbul Aydın Üniversitesi


Prof. Dr. İlhan KOCAARSLAN
İstanbul Üniversitesi


Yard. Doç. Dr. Hakan DOĞAN
İstanbul Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında sahip olduğu bilgi birikimiyle, bilimsel eleştiri ve yönlendirmeleriyle en büyük katkıyı sağlayan değerli hocam Sayın Yard.Doç.Dr. Niyazi ODABAŞIOĞLU'na en içten dileklerle teőekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını esirgemeyen aileme ve çalışma arkadaşlarıma teőekkürü bir borç bilirim.

Nisan, 2011

Yasin ÇELİK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ	v
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
1. GİRİŞ	1
1.1 KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞMENİN TARİHSEL GELİŞİMİ	1
1.2 KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞMENİN GEREKLİLİĞİ	3
1.3 TEZİN KATKILARI.....	4
2. GENEL KISIMLAR	6
2.1 KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞMEYE GENEL BAKIŞ.....	6
2.2 KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞMENİN ÖZELLİKLERİ.....	7
2.2.1 Kablosuz Optik Haberleşmenin Kullanım Alanları	9
2.3 KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME BLOK DİYAGRAMI.....	11
2.3.1 Verici Yapısı.....	11
2.3.2 İletim Kanalı.....	13
2.3.3 Alıcı Yapısı.....	17
2.4 ATMOSFER TÜRBÜLANS MODELLERİ.....	18
2.5 TÜRBÜLANS ATMOSFER KANALI.....	19
2.5.1 Log-normal Türbülans Modeli.....	22
2.5.2 Gamma-Gamma Türbülans Modeli.....	27

2.5.3 Negatif Eksponansiyel Türbülans Modeli.....	30
2.6 GÖZ GÜVENLİĞİ VE STANDARTLARI.....	32
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	35
3.1 GİRİŞ.....	35
3.2 İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME İLETİM TEKNİKLERİ.....	35
3.2.1 Kuvvetlendir ve Aktar İletim Tekniği.....	36
3.2.2 Kodlamalı İşbirliği İletim Tekniği.....	36
3.2.3 Çöz ve Aktar İletim Tekniği.....	36
3.3 SİSTEM MODELLERİ.....	37
3.3.1 Seri İletim Modeli.....	37
3.3.2 Paralel İşbirlikli İletim Modeli.....	39
3.3.3 Kanal Modeli.....	41
3.3.4 Servis Dışı Kalma Olasılığı (<i>Outage Probability</i>) Analizi.....	43
3.3.5 Kablosuz Optik Haberleşmede Röle Seçimi.....	47
4. BULGULAR.....	50
4.1 GİRİŞ.....	50
4.2 SERİ İLETİM BAŞARIM SONUÇLARI.....	51
4.3 PARALEL İŞBİRLİKLİ İLETİM BAŞARIM SONUÇLARI.....	52
4.4 KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞMEDE RÖLE SEÇİMİ.....	53
4.4.1 Kablosuz Optik Haberleşmede Röle Seçimi İçin Analitik Yaklaşım..	53
4.4.2 Kablosuz Optik Haberleşme Röle Seçimi Başarım Sonuçları.....	55
4.4.3 Uçtan Uca SGO'nına Göre Röle Seçim Başarım Sonuçları.....	56
4.5 İKİLİ RÖLE SEÇİMİ BAŞARIM SONUÇLARI.....	57
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	59
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	64

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	: Geleneksel kablosuz optik haberleşme diyagramı.....	7
Şekil 2.2	: Modüle yansıtıcı tabanlı kablosuz optik haberleşme diyagram.....	7
Şekil 2.3	: Kablosuz optik haberleşme blok diyagramı.....	11
Şekil 2.4	: 'Rayleigh' saçılmasının ışının dalga boyuna olan bağımlılığı	14
Şekil 2.5	: Türbülans etkileri	15
Şekil 2.6	: Atmosferdeki moleküllerin dalga boyuna göre iletim pencereleri.....	16
Şekil 2.7	: Türbülans hücreli atmosfer kanalı	19
Şekil 2.8	: Düzlemsel dalga için log-genlikli dalgalanmanın standart sapması	24
Şekil 2.9	: Normalize parlaklığa göre log-normal pdf değişimi	25
Şekil 2.10	: Gamma-gamma olasılık yoğunluk fonksiyonu	29
Şekil 2.11	: Log-yoğunluk varyansına göre S.I.'nın değişimi.....	30
Şekil 2.12	: Negatif eksponansiyel türbülans modeli pdf fonksiyonu	31
Şekil 2.13	: İnsan gözünün çeşitli dalga boylarında cevap/emilim grafiği.....	32
Şekil 3.1	: Kablosuz optik haberleşmede seri röle konfigürasyonu.....	37
Şekil 3.2	: Kablosuz optik haberleşmede paralel röle konfigürasyonu	40
Şekil 3.3	: Boşlukta ışın yayılım diyagramı.....	41
Şekil 3.4	: Işının atmosferde yol alırken ıraksaması.....	48
Şekil 3.5	: Röle seçimi sistem modeli.....	49
Şekil 4.1	: Kablosuz optik haberleşmede direk ve seri iletim servis dışı kalma analizi	51
Şekil 4.2	: Kablosuz optik haberleşmede direk ve paralel işbirlikli iletim servis dışı kalma analizi	52
Şekil 4.3	: Kablosuz optik haberleşmede tek röle seçimi servis dışı kalma analizi	55
Şekil 4.4	: Kablosuz optik haberleşmede uçtan uca SGO'nına göre tek röle seçimi servis dışı kalma analizi	56
Şekil 4.5	: Kablosuz optik haberleşmede ikili röle seçimi servis dışı kalma analizi	58

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	: Optik kaynaklar	12
Tablo 2.2	: Dalga boylarına göre erişilebilir yayınım limitleri.....	34

ÖZET

KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME İÇİN SİNYAL İŞLEME TEKNİKLERİ

Bu tezde, kablosuz optik haberleşme tekniği işbirlikli iletim modelleriyle incelenmiştir. İlk olarak kablosuz optik haberleşme ve işbirlikli çeşitleme çöz ve aktar modeli tanıtılmıştır. Ardından, kablosuz optik haberleşmede direk iletim, seri iletim ve paralel iletim modelleri ve başarımları incelenmiştir. Her üç iletimin kuramsal servis dışı kalma olasılıkları ve çeşitleme düzeyleri gözden geçirilmiş, bilgisayar benzetimiyle hata başarımları elde edilmiştir. Seri ve paralel iletim modelleri, işbirlikli iletim teknikleri altında kablosuz optik haberleşmede uygulandıklarında direk iletme göre önemli avantajlar sağlanmaktadır. Bu modeller ile alıcı ve verici arasındaki mesafe, hedef düğümler kullanılarak kısaltılmıştır. Kablosuz optik haberleşmede, iletim kanalı olan atmosferdeki bozucu etkiler iletim mesafesine yüksek oranda bağımlı olduğu için, uygulanan yöntemler ile yüksek SGO kazancı sağlandığı gösterilmiştir.

Mevcut çalışmalara ek olarak, kablosuz optik haberleşme sistemlerinde işbirlikli seçim “*selection cooperation*” röle seçimi tekniği önerilmiştir. Bu yöntem için hata başarımının matematiksel ifadeleri türetilmiş ve bu ifadeler bilgisayar benzetim yöntemi ile doğrulanmıştır. Sonuç olarak paralel iletim çöz ve aktar modeli üzerinden yapılan hata başarımının röle seçimi uygulanarak iyileştirildiği gösterilmiştir.

SUMMARY

SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES FOR WIRELESS OPTICAL COMMUNICATION

In this thesis, optical wireless communication with serial and parallel relay assisted decode and forward systems are investigated. Firstly optical wireless communication is presented. Then, the differences between direct transmission, serial and parallel relay assisted decode and forward systems in optical wireless communication are compared. For three of them theoretical outage probability analysis are calculated and the performance results are compared by computer simulations. Serial and parallel relay assisted transmission models have more advantages compared to direct transmission. The distance between source and destination will become shorter by using relays. Because of the distance dependency of log amplitude variance in optical wireless communication, high SNR gain is provided by using relay assisted system model.

In addition to all studies in literature, relay selection method is suggested for optical wireless communication. For this method, analytical expressions of outage probability is derived and that are verified by computer simulations. As a result, in optical wireless communication some of SNR gain is provided by implemented relay selection method to parallel relaying decode and forward transmission model.

1. GİRİŞ

1.1 KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞMENİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Kablosuz optik haberleşme, direk görüşe sahip iki nokta arasında optik yayılım ile atmosfer üzerinden bilgi taşınmasını sağlayan teknolojidir. M. Ö. 800 yıllarında Eski Yunanlılar ve Romalılar ateşi haberleşmek için kullanmaktaydılar. M. Ö. 150 yıllarında Kızılderiiler dumanı haberleşme aracı olarak kullandılar. İlk olarak optik haberleşme, 1880 yılında Alexander Graham Bell tarafından fotofon deneyi ile yapılmıştır [1]. Bu deneyde Bell ses sinyalini, lensler ile verici üzerine odakladığı güneş ışını ile modüle etmiş ve atmosfer üzerinden 213 metre mesafeye iletmiştir. Alıcıda, ses sinyali taşıyan modüleli ışın, odak noktasında selenyum hücre bulunan parabolik bir ayna üzerine düşürülmüştür ve selenyumun özelliklerinden faydalanılarak ses sinyali tekrar elde edilmiştir. Cihazların yeterince hassas olmaması ve güneş ışınının kesikli yapısı nedeniyle, fotofon ticari bir ürün haline gelmemiştir. Fakat, kablosuz optik iletişimin potansiyelini başarılı bir şekilde ortaya koymuştur.

1960'lardan önce güneş ışını yansıtılarak iletişim sağlanmaya çalışılmaktaydı daha sonra, lazerin keşif edilmesiyle optik haberleşmede yeni bir dönem başlamış, bu alanda yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Özellikle 1962'den 1965'e kadar olan süreçte deneysel çalışmalar hızlanmıştır. 1970 yılına kadar yapılan bazı çalışmalar şöyledir; MIT Lincolns Laboratuvarında 1962 yılının başlarında yapılan araştırmada Galyum-arsenit ışık yayan diyot kullanılarak televizyon sinyallerinin iletimi 48 kilometre mesafede gerçekleştirilmiştir [3]. Bu deney, kablosuz optik haberleşmenin ilk önemli gösterimlerinden olmuştur. Mayıs 1963'te Amerika Birleşik Devletlerinde, Panamint Tepesi ve San Gabriel Dağı arasında He-Ne lazere modüle edilen ses sinyalinin 190

kilometre mesafede iletimi sağlanmıştır [3]. 1965 sonrasında güvenilir lazer kaynakları üretilmeye başlanmıştır. Bu tarihten sonra, daha güvenli kablosuz optik haberleşme sistemleri kurulmuş ve geliştirilmiştir. 1970 yılında Nippon Elektrik Şirketi (NEC) Japonya da ticari trafik taşımak için ilk lazer bağlantıyı gerçekleştirmişlerdir. Bu bağlantı Yokohama ve Tamagawa arasında, 14 kilometre mesafede, tam dubleks 0.6328 µm He-Ne lazer kullanılarak sağlanmıştır [3].

1970 sonrasında, kablosuz optik haberleşme daha çok askeri amaçlı olarak araştırılmaya devam edildi. Askeri amaçlı araştırılmasının en büyük nedeni güvenli iletişim özelliğine sahip olmasıydı. İletişim sistemine yapılacak herhangi bir sızma alıcı tarafında direk algılanabiliyordu. Özellikle , Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA), Yarı İletken Lazer Uydular Arası Bağlantı Deneyi (SILEX) [3] programları ile derin uzay uygulamaları için, kablosuz optik haberleşme üzerinde araştırmalarını sürdürmüştür.

Kablosuz optik sistemlerin son yıllardaki ticari genişlemesinin temel nedeni bu sistemleri destekleyen cihazlardaki gelişmeler ve yerel ağlardaki artan bantgenişliği ihtiyacı olmuştur. Buna karşılık fiber optik sistemlerin kurulumunun daha maliyetli olması kablosuz optik haberleşmeyi bir alternatif haline getirmiştir [2]. Askeri uygulamalardaki başarı ile erişim ağı içindeki sivil uygulamalarda, yeni bir ilgi odağı haline gelmiştir. Bu gelişmeler ışığında, son yıllarda araştırmacılar ilgilerini kablosuz optik haberleşme üzerine çevirmiştir.

Kablosuz optik haberleşme, küçük dalga boylarına sahip radyo frekansı (RF) sistemleri ile karşılaştırıldığında ticari olarak tutarlı, tamamlayıcı bir teknoloji olarak doğmaktadır. Yüksek veri hızı sunan bu tip küçük dalga boyuna sahip RF sistemleri, tek noktadan çoklu noktaya (point-to-multipoint) 10 Mbps, noktadan noktaya (point-to-point) 100 Mbps veri hızlarına ulaşabilmektedirler [4]. Ancak, bu sistemler spektrum yoğunluğu, lisanslama ve lisansız bantlardan gelen sinyal girişimleri gibi nedenlerden dolayı, bazı sınırlamalara sahiptirler. Gelecekte lisansız bantların oluşturulacağı söylenmektedir, fakat kablosuz optik haberleşme ile karşılaştırıldığında, hala bazı bant genişliği ve erişim mesafesi sınırlamalarına sahiptirler. Kablosuz optik haberleşme bağlantıları, kısa mesafede fiber optik veya genişbant erişim ağının evlere ve ofislere yüksek bant

genişliği ile ulaşması için alternatif bir bağlantı olarak kullanılmaktadır [4]. Kablosuz optik haberleşme sistemi, iki sabit nokta arasında bütün hava koşulları göz önüne alındığında 3.5 km iletim mesafesinde çift yönlü olarak 1.25 Gbps veri hızına ulaşabilmektedir [8]. 2008 yılında, 10 Gbps veri hızında kablosuz optik haberleşme sistemi en hızlı ticari kullanılabilir kablosuz teknoloji olarak pazara sunulmuştur [8]. Kapasiteyi daha da artırmak için dalgaboyu bölmeli kablosuz optik haberleşme sistemleri üzerinde deneysel olarak çalışılmaktadır. RF üzerinde uygulanan farklı modülasyon teknikleri kablosuz optik haberleşmeye adapte edilmek istenmektedir [8].

Kablosuz optik haberleşme, modern iletişim sistemleri ile entegre olabilen, özellikle son kullanıcıların bant genişliği ve yüksek veri hızı gereksinimlerini karşılayabilen, tamamlayıcı bir teknoloji olduğunu kanıtlamıştır. Saydam trafik iletimi ve veri protokolleri ile mevcut erişim ağına hızlı bir şekilde adaptasyon sağlamaktadır [8]. Atmosfer kanalının kalın sis, duman ve türbülans gibi etkileri nedeniyle uzun mesafe erişimlerde çeşitli sorunlar ile karşılaşılması, kablosuz optik haberleşmenin en büyük dezavantajlarındanır.

1.2 KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞMENİN GEREKLİLİğİ

Haberleşme sistemlerinde son kullanıcıların sürekli artan bant genişliği ihtiyaı, optik haberleşme sistemlerinin (fiber optik ve kablosuz optik) araştırılmasındaki en büyük itici güçtür. Optik haberleşme, çok küçük dalga boyları ile iletişim sağladığı için, büyük bir bant genişliğine ve buna bağlı olarak çok yüksek veri hızına sahiptir. Fiber optik ağlar sundukları büyük bant genişliği sebebiyle, modern iletişim sistemlerinde omurga ağlarda kullanılmıştır. Fakat bu yapı erişim ağı içerisinde, kurulum maliyeti ve bazı fiziksel engeller sebebi ile son kullanıcılar tarafından kullanılamamaktadır. Son kullanıcıların ana omurga bağlantıları bir çok ülkede, bakır kablo tabanlı teknolojiler tarafından yapılmaktadır. Bu son kullanıcı için, veri hızında sınırlayıcı bir limit oluşturmaktadır. Bu problem '*erişim ağı darboğazı (access network bottleneck)*' olarak adlandırılmaktadır. Bu problemin çözümünde günümüzde gelişen bazı teknolojiler

şöyledir; Her Eve Fiber, “*Fibre to the home (FTTH)*”, Sayısal Abone Hattı, “*Digital Subscriber Line (DSL)*”, ‘ Geniş Bant teknolojileri, “*Ultra-Wide Bant technologies (UWB)*”, Kablosuz Optik Haberleşme, “*Optical Wireless Communication (OWC)*” [8].

FTTH, erişim ağı darboğazı probleminde en yüksek bant genişliğini sunan çözümdür. FTTH teknolojisi, 10 Gbps ve üzeri veri hızını son kullanıcıya sunmaktadır, dalga boyu bölmeli çoğullama yöntemi ile 10 Tbps ve üzeri veri hızlarına ulaşmak mümkündür [7]. FTTH teknolojisinin yayılmasını engelleyen en büyük engel maliyetinin çok yüksek olmasıdır. DSL teknolojisi ise en yaygın kullanılan teknolojidir fakat son kullanıcının gün geçtikçe artan bant genişliği ihtiyacını karşılayamaz duruma gelmiştir. Bakır kablo tabanlı bir teknoloji olduğu için yüksek veri hızlarına çıkamamaktadır.

UWB, kablosuz optik haberleşmede olduğu gibi, lisanssız banda sahip bir diğer kablosuz radyo frekansı teknolojisidir. Federal İletişim Komisyonu (FCC) 2002 yılında, 3.1 - 10.6 GHz bandını lisanssız olarak onaylamıştır [7]. UWB kısa mesafeler için bir kaç Mbps hızlara ulaşabilmektedir. Bakır kablo tabanlı teknolojilere göre daha cazip görünmektedir, fakat ana omurgadaki Gbps seviyelerindeki hızlara ulaşmakta yetersizdir. Üstelik geniş bant teknolojisi aynı frekansta yayın yapan diğer sistemlerle ciddi oranda girişim yapma endişesi içindedir.

Kablosuz optik haberleşme kapasite olarak fiber optik teknolojisi ile karşılaştırılabilecek seviyededir. Kurulumu fiber optik iletişime göre çok daha basittir, bu nedenle kablosuz optik haberleşme sistemleri çok düşük maliyetler ile uygulanabilmektedir. Kablosuz optik haberleşme trafik tipi ve protokol bakımından şeffaf bir teknolojidir, bundan dolayı erişim ağına entegrasyonu bağımsız düğümler ile sağlanabilmektedir.

1.3 TEZİN KATKILARI

Bu tez çalışması sırasında, kablosuz optik haberleşmedeki türbülans etkileri azaltmak için işbirlikli haberleşme incelenmiştir. İşbirlikli haberleşme modelleri, kaynak ve hedef arasına seri veya paralel röleler yerleştirilerek uygulanmıştır. Her iki iletim modelinde de önemli kazançlar sağlanmıştır. Bu kazançların elde edilmesinde en önemli faktör,

kablosuz optik haberleşme fiziksel kanalının varyansının iletim mesafesine olan bağımlılığıdır. Seri işbirlikli haberleşme modelinde, sistem kazancının artmasında en önemli etken, kaynak ve hedef arasına yerleştirilen röleler ile iletim mesafesinin kısaltılması olmuştur. Paralel işbirlikli haberleşme modelinde ise kaynak ve hedef arasına yerleştirilen paralel röleler ile iletim mesafesi yarıya düşürülerek hem varyans iyileştirilmiş aynı zamanda da çeşitleme kazancı sağlanmıştır.

Paralel işbirlikli haberleşme modeli için röle-hedef fiziksel kanal kazancını göz önüne alarak röle seçim methodu önerilmiştir. İşbirlikli seçim “*selection cooperation*” röle seçim metodu için kapalı form matematiksel ifadeler türetilmiş ve elde edilen performans eğrisi “*Monte-Carlo*” bilgisayar benzetim methodu ile doğrulanmıştır. 3 ve 6 rölenin kullanıldığı senaryolar için performans eğrileri çizdirilmiştir. Aynı zamanda uçtan-uca kanal kazancının göz önünde bulundurulduğu ve 2 röle seçiminin yapıldığı farklı senaryolar kurgulanarak “*Monte-Carlo*” bilgisayar benzetim methodu ile performans değerlendirmeleri yapılmıştır.

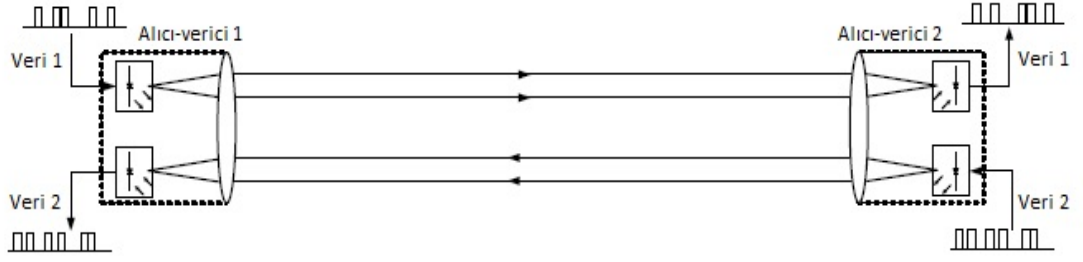
2. GENEL KISIMLAR

Bu bölümde, kablosuz optik haberleşmeyi etkileyen şartlar ve uygulama alanları üzerinde durulacaktır ve alıcı-verici yapıları incelenecektir. Ayrıca optik radyasyonun etkileri, göz ve deri güvenliği için uyulması gereken standartlara değinilecektir.

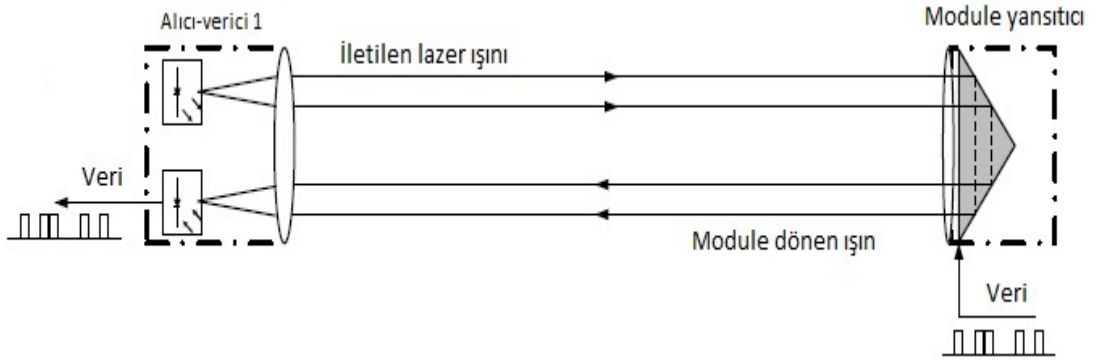
2.1 KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞMEYE GENEL BAKIŞ

Kablosuz optik haberleşme, optik radyasyonun taşıyıcı sinyal olarak kullanıldığı atmosfer kanalında iki nokta arasında veri iletimini içerir. Veri, optik taşıyıcının yoğunluğuna, fazına veya frekansına modüle edilerek taşınır. Kablosuz optik bağlantı mutlaka *direk görüş (line-of-sight LOS)* özelliğine sahip olmalıdır. Bu özellik, alıcı ve vericinin aralarında hiç bir engel olmaksızın birbirlerini direk görmesi esasına dayanır. Optik ışın atmosferde doğrusal bir yol izler ve bundan dolayı, başarılı bir haberleşmenin yapılması için alıcı-verici arasında direk görüşün olması şarttır.

Kablosuz optik haberleşme sistemi iki farklı modelde uygulanmaktadır. Geleneksel kablosuz optik haberleşme, şekil 2.1 gösterilen, her bağlantının sonunda iki benzer alıcı verici bulunur ve noktadan noktaya haberleşme sağlanır. Bu kurulum tam-dubleks iletişime izin vermektedir. Her iki yönde bilginin aynı anda iletimi sağlanmaktadır. İkinci model modüle yansıtıcı (MRR) lazer kullanılarak yapılmaktadır. Lazer haberleşme bağlantıları MMR ile iki farklı terminal oluşturur ve bu yüzden bağlantılar asimetriktir. Bu model de haberleşme tek yönlü olarak gerçekleşir. MRR terminale fotodetektör eklenerek yarı-dubleks iletişim sağlanabilmektedir [8].



Şekil 2.1 Geleneksel kablosuz optik haberleşme diyagramı.



Şekil 2.2 Modüle yansıtıcı tabanlı kablosuz optik haberleşme diyagramı.

2.2 KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞMENİN ÖZELLİKLERİ

Kablosuz optik haberleşme ışık hızında iletim ve kablodan bağımsız kullanım özelliklerine sahiptir. Bazı özellikleri aşağıdaki gibidir:

Bant Genişliği

Shannon kapasite formülünde belirtildiği gibi, herhangi bir iletişim sisteminde iletilen veri miktarı modüle taşıyıcının bant genişliği ile doğrudan ilgilidir. Kabul edilebilir veri bant genişliği, taşıyıcı frekansın % 18'si oranında olmaktadır. Optik taşıyıcı 10^{12} - 10^{16} Hz aralığında değişen frekansa sahiptir, bu oran 2000 THz veri bant genişliğine izin vermektedir. Bu kapasite, RF iletişim sistemleri ile karşılaştırıldığında çok büyük bir

artış olduğunu göstermektedir. Bunun sebebi optik taşıyıcı frekansının elektromanyetik spektrumunu olan Kızılötesi, görünür ışık ve ultraviyole frekansların radyo frekansına göre 10^5 kat daha yüksek olmasıdır [8].

Lisansız Spektrum

Spektrum frekans aralığının dar olmasından dolayı, komşu taşıyıcılar tarafından gerçekleşen girişimler RF iletişim için en büyük problemi oluşturmaktadır. Bu girişimleri minimize etmek için uluslararası komiteler bölgelere göre frekansları düzenleyerek lisanslama yapmaktadırlar. Optik frekanslarda böyle bir düzenleme yoktur. Lisanslama ücretinin ve bürokratik işlemlerden dolayı süre kaybının olmaması, kablosuz optik teknolojiye olan ilgiyi artırmış ve yapılan yatırımları hızlandırmıştır [8].

Kurulum Kolaylığı

Kablosuz optik haberleşme sisteminde alıcı verici arasındaki bağlantının kuruluma başlamasıyla veri alış-verişi yapılması arasındaki geçen süre sadece 4 saattir. Temel gereklilik alıcı verici arasında direk görüşün kurulmasıdır. Sistemin sökülmesi ve başka bir bölgeye kurulması da bir o kadar kolaydır [8].

İnce Işın Demeti

Optik radyasyon son derece ince bir ışın demetine sahiptir, tipik bir lazer ışınının kırılma limitli ıraksaması 0.01 – 0.1 mrad aralığındadır [1]. Bu iletim gücünün sadece çok ince bir alanda yoğunlaştığı anlamına gelmektedir. Böylece potansiyel girişim sağlayabilecek ışın demetlerinden yeterli uzaysal izolasyon sağlanmış olur. Uzaysal olarak girişim endişesi olmadığı için frekans kullanımında bir sınırlama olmamaktadır. Bu aynı zamanda istenmeyen kullanıcılar tarafından yapılan bağlantı kesilmesi olayını zorlaştırmaktadır [8].

Ucuzluk

Kablosuz optik haberleşme sisteminin kurulum maliyeti, veri hızları karşılaştırıldığında RF'e göre daha düşüktür. Fiber optik ile aynı bant genişliğine sahip olmasına karşın, kablolama maliyetlerinin olmaması daha avantajlı hale getirmektedir. Kanada'da kurulmuş kablosuz optik haberleşme firması 'fSONA'nın' bulgularına göre kablosuz optik haberleşme'nin 1 Mbps nin maliyeti RF sistemlerin yaklaşık yarısı kadardır [8].

Hava Şartlarına Bağımlılık

Atmosferdeki olaylar kablosuz optik haberleşme sisteminin performansını büyük ölçüde etkilemektedir. Atmosfer kanalının sabit özelliklere sahip olmaması, hiç kuşkusuz en büyük dezavatajdır [8].

Yukardaki noktalara ek olarak kablosuz optik haberleşmenin ikincil özellikleri aşağıdaki gibidir :

- Fiber optik haberleşmede kullanılan optoelektronikler kablosuz optik haberleşmede de kullanılmaktadır.
- Elektromanyetik girişimden bağımsızdır ve sebebiyet vermez.
- Kablolular sistemlerden farklı olarak sabit yatırım gerektirmez.
- Optik radyasyon gücü gerekli güvenlik limitini geçmemelidir.
- Işık özelliklerinde ve çok yoğundur.
- Az güç gerektirir.
- Direk görüş gerektirir.

2.2.1 Kablosuz Optik Haberleşmenin Kullanım Alanları

Kablosuz optik haberleşmenin karasal uygulamaları kısa ve uzun mesafe olarak sınıflandırılabilir. Uzay uygulamaları ile yeryüzü ve uydular arasında iletişim sağlanmaya çalışılmaktadır. Kablosuz optik haberleşme daha önce belirtilen özellikleri nedeniyle, metro ve geniş alan ağlarında çeşitli uygulamalarda çok cazip hale gelmektedir. Kablolular ve kablosuz radyo frekansı haberleşme sistemleri ve fiber bağlantılı teknolojiler ile tamamlayıcı teknoloji olarak entegre bir şekilde kullanılmaktadır. Ana omurgada fiber optik ile sağlanan büyük bant genişliğinin son kullanıcılara sunmak için bu teknolojiden faydalanılmaktadır. Ana omurgaya 1,5 km veya daha yakın son kullanıcılar için, ana omurga ile veri köprüsü olması açısından çok cazip bir teknolojidir. Kurulum yapılan bölgedeki ortalama hava koşulları göz önüne alınarak sistem optimize edildiğinde, güvenilir bir iletişim sağlanabilmektedir. Kullanımının uygun olduğu bazı alanlar aşağıdaki gibidir;

Son Mil Erişimi

Kablosuz optik haberleşme, ana omurga ile son kullanıcı arasındaki bant genişliği boşluğunu köprülemek için kullanılmaktadır. Bağlantılar 1 kilometreden, maksimum 3.5 km mesafeye, veri hızı 10 Mbps'den 10 Gbps'e kadar ulaşabilmektedir [19]. Özellikle kurulum maliyetinin düşük olması bu alanda kullanılmasını hızlandırmaktadır.

Fiber Optik Yedek Bağlantısı

Ana fiber optik bağlantının zarar görmesi ve kullanılamaz durumda olması halinde, iletişimin kesilmesini önlemek amacı ile yedekleme sağlamak için kullanılmaktadır [20].

Hücresel İletişim Omurgası

3'üncü veya 4'üncü nesil hücresel iletişim sistemlerinde baz istasyonlarından gelen veri trafiğinin anahtarlama merkezlerine taşınmasında kullanılmaktadır [10].

Afet Kurtarma / Geçici Bağlantı

Herhangi bir afet halinde var olan iletişim ağı çökmüş ise geçici bir bağlantının kurulması için kullanılabilir [11]. Çok kısa sürede geçici bağlantılar kurulabilmektedir. 11 Eylül saldırısında, Amerika Birleşik Devletlerinde Dünya Ticaret Merkezi binalarının çökmesi ile zarar gören fiber ana omurga bağlantısı yerine kurulan kablosuz optik haberleşme bağlantısı en güzel örneğidir.

Kurulum Zor Olduğu Durumlar

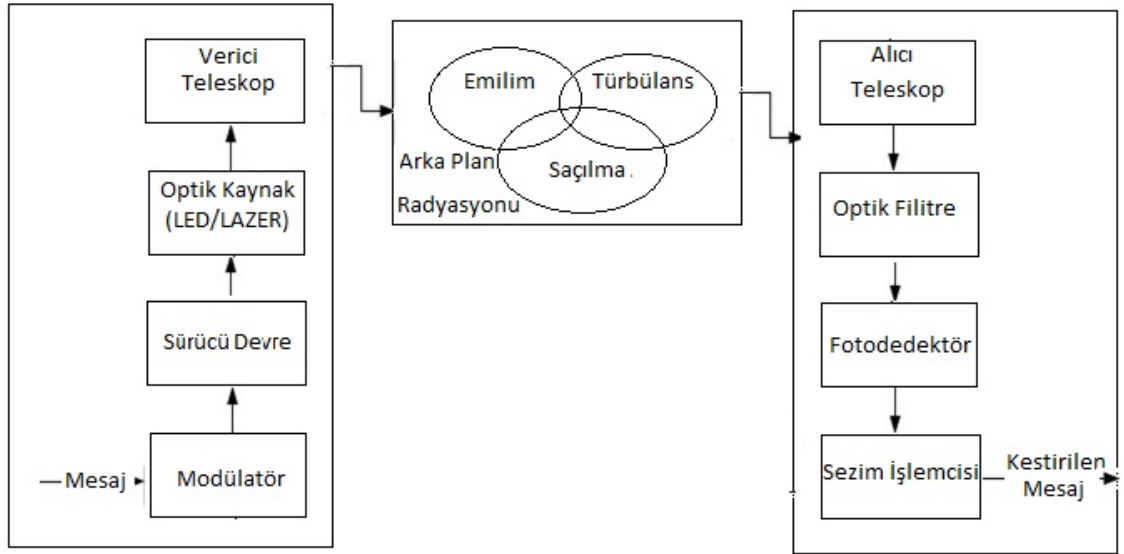
Bazı durumlarda kablolu yapı yapmak çok pahalıdır veya imkansızdır. Bu özelliğe sahip alanlarda kablosuz optik haberleşme en basit çözümü sunabilmektedir [8].

Yüksek Çözünürlüklü Televizyon

Yüksek çözünürlüğe sahip televizyon sinyalleri yüksek bant genişliğine ihtiyaç duyarlar. Özellikle canlı yayınların uzak mesafedeki sinyalleri merkez ofise aktarılma işleminde kablosuz optik haberleşme kullanılmaktadır [8].

2.3 KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME BLOK DİYAGRAMI

Kablosuz optik haberleşmenin blok diyagramı şekil 2.3'te verilmiştir. Diğer teknolojilerde olduğu gibi kablosuz optik haberleşmede iletişim sistemi üç bölümden oluşur. Bunlar; verici, kanal ve alıcıdır.



Şekil 2.3 Kablosuz optik haberleşme blok diyagramı

2.3.1 Verici Yapısı

Verici ilk olarak kaynak veriyi optik taşıyıcıya modüle eder ve atmosfer üzerinden alıcıya yayın yapar. Lazerde üretilen ışın mercekle sisteminden geçerek paralel hale getirilir. Bu işlem RF sistemlerde anten kazancı oluşturan sistemler ile benzerdir. Çoğunlukla kullanılan modülasyon şekli, yoğunluk modülasyonu 'intensity modulation' (IM) dir. Işının yoğunluğu birim zamanda birim alanda geçen enerji miktarı ile ölçülür, birimi W/m^2 'dir. IM'de kaynak veri optik ışının parlaklığına göre modüle edilir. Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde genelde kullanılan kaynaklar, Tablo 2.1'de gösterilmiştir [8].

Tablo 2.1 Optik Kaynaklar

Dalga boyu	Tip	Açıklama
~850	Dikey kaviteli yüzey emilimli lazer	Düşük güç yoğunluğu. Ucuz ve kolay kullanılabilir. Soğutma ihtiyacı yok. 10 Gbps ve üzeri güvenilir iletim. Tipik güç 6 mW
~1300/~1550	Fabry-Perot Lazer Dağılımlı geri beslemeli lazer	Uzun ömürlüdür. Düşük göz koruma kriterine sahip Yüksek güç yoğunluğu (100 mW/cm ²) Tipik güç: 28 mW 40 Gbps ve üzeri hızlara sahip. Rampa verimi 0.03-0.2 W/A Tipik güç 1-2 W
~10.000	Kuantum kademeli lazer	Pahalıdır. Çok hızlı ve yüksek hassasiyete sahip İnce sis iletim karakteri iyi Birleşenleri hazırda mevcut değil 100 mW çıkış gücü Cama nüfuz edememektedir.
Kızılötesine yakın	LED	Ucuz Uyumlu değil Güç yoğunluğu düşük, güvenli Sürücü devresi basit Veri hızı düşük < 200 Mbps Tipik gücü < 10 mW

Optik kaynağın, gönderilen veriye uygun olarak sürücü akımdaki yaptığı direk değişimler veya harici bir modülatör kullanılarak yapılan değişimler ile gönderilen sinyal oluşturulur. Harici bir modülatör her zaman için direk modülasyona göre daha yüksek veri hızı sağlar. Yayılan optik alanın faz, frekans, kutuplaşma gibi özellikleri harici modülatör kullanarak, kaynak veri modüle edilebilir. 700 – 10.000 nm dalga boyu bandında bulunan iletim pencereleri 0.2 dB/km'den küçük bir sönümlenme ile iletim yapmaktadır. Bir çok kablosuz optik haberleşme sistemi 780 – 850 nm ve 1520 – 1600 nm spektral pencerelerini kullanmaktadır. 780 – 850 nm aralığı daha çok kullanılmaktadır, çünkü bu frekans bandında cihaz maliyeti daha ucuz ve temini daha kolay olmaktadır [8]. 1550 nm bandı aşağıdaki özelliklere sahiptir;

- i) 3. Pencere dalga boyu bölmeli çoğullamalı ağlar ile uyumluluk.
- ii) Göz güvenliği.
- iii) Azaltılmış arkaplan gürültüsü ve sisin sebep olduğu saçılmanın azalması.

1550 nm sis tarafından oluşan sönümlemenin üstesinden gelebilmek için daha az bir güç iletimi gerektirmektedir [8].

2.3.2 İletim Kanalı

Atmosferde açık bir havada oksijen ve nitrojen molekülleri ağırlıklı olmak üzere bir çok partikül bulunmaktadır. Bu partiküller ışın atmosferde yayılım yaparken emilimine ve/veya saçılmasına neden olmaktadır. Işın atmosferde yol alırken karşılaştığı bu bozucu etkiler modellenerek optik haberleşme iletim kanalı oluşturulmuştur [20]. Optik haberleşme kanalında iletilen sinyal $x(t)$, genlik yerine güç ile ifade edilir. Bu durum iletilen sinyal $x(t)$ 'nin negatif olamayacağını göstermektedir. Aynı zamanda ortalama gücü belirli bir maksimum değeri aşamaz. Geleneksel kanalların aksine optik sistemlerde sinyal gürültü oranı (SGO) güce bağlı değildir. Alınan elektriksel güç ve anlık gürültünün varyansı, alıcının gelen ışını topladığı alanın karesi ile doğru orantılıdır. Bu belli bir iletim gücünde, sezim alanının (Ad) artması SGO'nun artacağı anlamına gelmektedir. Ancak, Ad artması alıcının bant genişliğini sınırlayan kapasitansın artmasına sebep olmaktadır.

Optik radyasyon atmosferde ilerlerken, bazı fotonların molekül parçaları (su buharı, CO₂, sis, ozon gibi) tarafından emilimi sonucu enerjileri ısıya çevrilir, diğerlerinin enerjisinde bir kayıp söz konusu değildir fakat yayınım yönleri değişmektedir. Işının yayınım sırasında yayınım alanı genişlediği için alıcının sezim alanından daha büyük hale gelebilir.

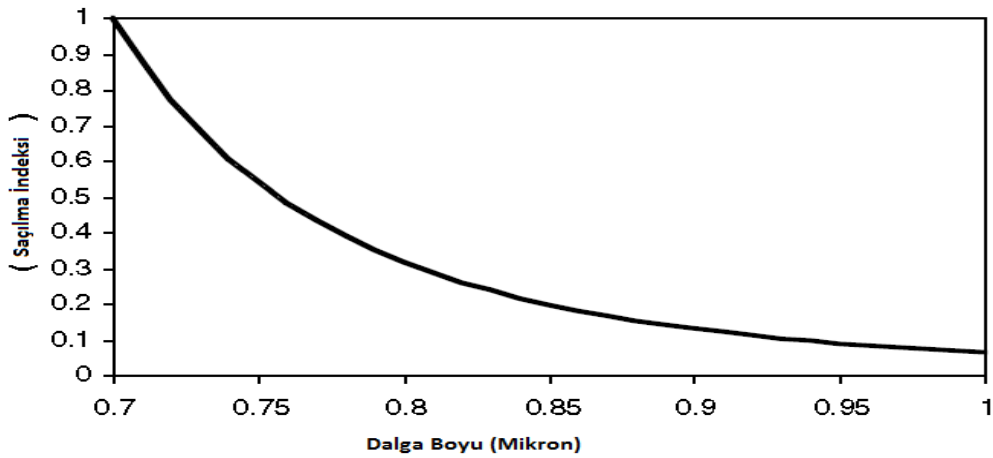
Beer – Lambert Kuralı

Optik alanın atmosferde yayınımı Beer – Lambert kuralı tarafından tanımlanmaktadır [20].

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

$\gamma_T(\lambda)$ λ dalga boyunda toplam sönümlenme katsayısını (m^{-1}) göstermektedir. Bu katsayı çeşitli saçılma ve emilim süreçleri etkisinin toplamsal olarak bir araya gelmesinden oluşmaktadır [20]. $\tau(\lambda, L)$ atmosferin transmittansını belirtmektedir. P_T , iletilen toplam güç ve P_R , L kadar mesafede alınan optik güçtür.

Zayıflama sadece moleküllerin atmosferde emilimi değildir, aynı zamanda sera gazları, toz parçaları, sis ve bulutların sebep olduğu saçılmalarda optik ışının zayıflamasına sebep olan etkenlerdir. Işının dalga boyundan daha küçük moleküller tarafından meydana gelen saçılmalar daha çok 'Rayleigh' saçılması olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.4'te 'Rayleigh' saçılmasının ışının dalga boyuna olan bağımlılığı gösterilmiştir.



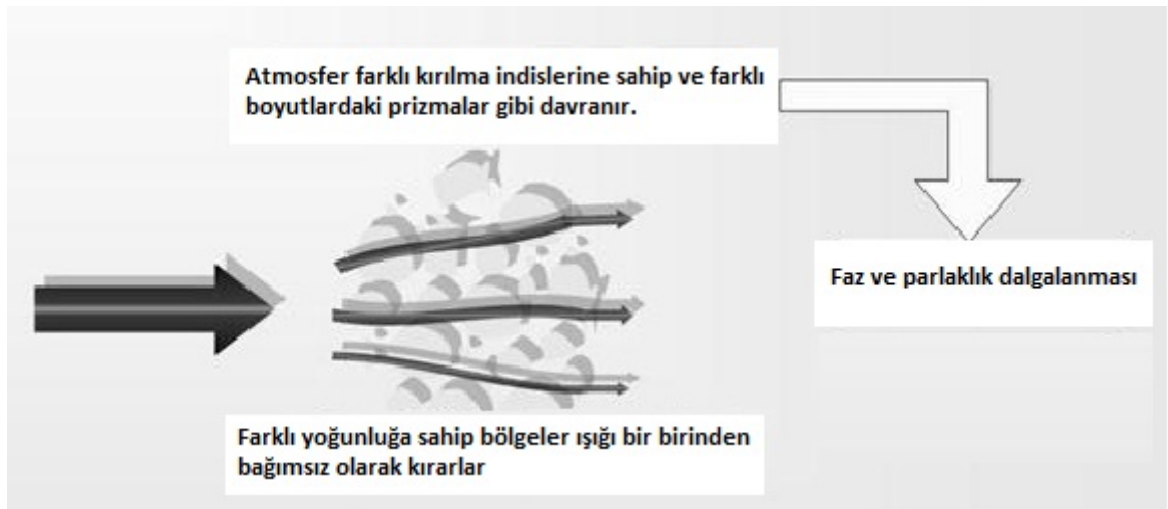
Şekil 2.4 'Rayleigh' saçılmasının ışının dalga boyuna olan bağımlılığı

Işının dalga boyundan daha büyük moleküller tarafından meydana gelen saçılmalar 'Mie' saçılması olarak adlandırılır ve modellenmesi daha zordur. Daha çok deneysel olarak modellenmektedir [2].

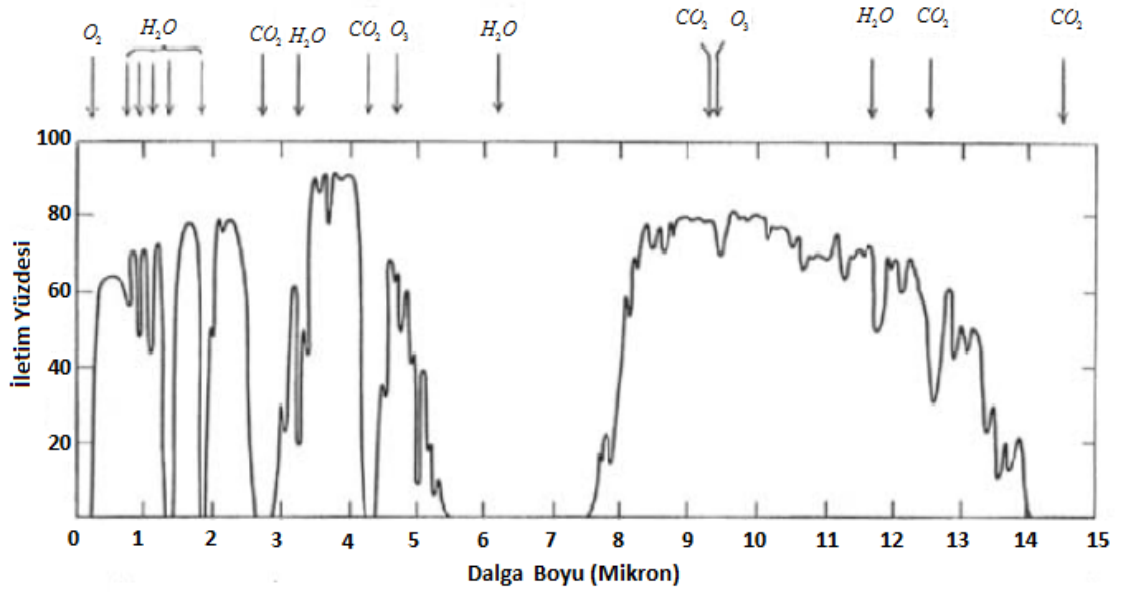
Türbülans, iletim kanalının diğer bir özelliğidir. Radyasyon güneşten yayılıp dünya yüzeyine çarptığında bir kısmı emilime uğrar ve yüzeydeki hava kütesini ısıtır. Bu ısınan kütleler türbülanslı olarak aralarında soğuk hava kütleleriyle birlikte yükselirler. Atmosfede hava kütleleri arasında 0.01 dereceden 0.1 dereceye kadar sıcaklık dalgalanmaları ortaya çıkar [2]. Atmosferdeki sıcaklığın homojensizliği havanın kırılma indeksinde dalgalanmalara sebep olmaktadır. Bu durum çapları 0.1 cm ile 10 m arasında değişen küçük küresel hücrelerin oluşmasını sağlar. Bu hücreler kırılma indisleri değişen prizma gibi davranmaya başlarlar. Optik radyasyonun yayılımı, ışının boyutu ve yayılım yolundaki sıcaklık değişmelerine bağlı olarak değişime uğrar. Bu nedenle optik radyasyon iletimi sırasında fazında ve parlaklığında değişimler meydana gelmektedir. Bu değişimlerin yoğunluğuna göre atmosfer iletim kanalı farklı modeller ile temsil edilmektedir.

Türbülansın bağlı olduğu büyüklükler aşağıdaki gibidir;

- Atmosfer basıncı ve yükseklik.
- Rüzgar hızı.
- Sıcaklık değişimlerine bağlı kırılma indisindeki değişimler.



Şekil 2.5 Türbülans etkileri



Şekil 2.6 Atmosferdeki moleküllerin dalga boyuna göre iletim pencereleri

Türbülansın bilinen etkileri ise şöyledir [8];

- a) *Işın Sapması* – Işının direk görüş alanındaki açısal değişim, onun alıcı sezim alanın dışında bir bölgeye yönelmesine sebep olmaktadır.
- b) *Görüntü Dalgalanması* – Işının geliş açısındaki değişimlerden dolayı odağının görüntü alanındaki hareketliliğidir.
- c) *Işının Yayılması* – Saçılmadan dolayı ışının ıraksaması artar. Bu alınan gücün yoğunluğunun azalmasına sebep olur.
- d) *Işının Pırıldaması* – Alıcı alanındaki güç yoğunluğunun değişimi, optik ışıdaki küçük ölçekli bozucu girişimler tarafından olmaktadır.
- e) *Uzaysal Uyumun Kötüleşmesi* – Türbülans ışının faz uyumunda kayıplara sebep olmaktadır. Bu bilhassa evreyumlu alıcılarda (coherent receiver) kötüleşmeye sebep olmaktadır.
- f) *Polarizasyon Dalgalanması* – Bu durum, türbülanslı bir ortamdan geçerek gelen optik alandaki, polarizasyon değişimlerinden kaynaklanır. Ancak, optik radyasyonun yatay iletimi sırasında polarizasyon dalgalanmaları ihmal edilebilir.

Kablosuz optik haberleşme fiziksel kanalının genel özelliklerine bu bölümde değinilmiştir. Türbülans atmosfer kanalının detaylı olarak incelenmesi ve kanal modellerinin tanıtılması bölüm 2.4'te yapılacaktır.

2.3.3 Alıcı Yapısı

Optik alıcı, optik ışına modüle edilmiş verinin algılanması ve elde edilmesi işlevini yerine getirir. Temelde iki tip alıcı yapısı vardır; eşvreli (coherent) alıcı ve eşvreli olmayan (non-coherent) alıcı. Eşvreli olmayan alıcılar, alıcının optik alanına gelen anlık optik gücü akıma çevirirler, ışının diğer özellikleri, fazını veya frekansını değerlendirmezler. Direk sezim (direct detection) alıcılar olarak adlandırılırlar. Eşvreli alıcılar daha çok optik iletişimde faz modülasyonu veya frekans modülasyonu uygulamak için kullanılır [4].

- a) *Alıcı Teleskop* – Gelen optik radyasyonu toplar ve fotodedektör üzerine odaklar. Büyük bir alıcı alanına sahip olmak, bir çok ilintisiz radyasyonu toplaması ve ortalamalarını fotodedektöre odaklaması açısından istenen bir durumdur fakat bu daha fazla arkaplan gürültüsünün toplanması anlamına gelmektedir.
- b) *Optik Band Geçiren Filtre* – Arka plan radyasyonu azaltmak için kullanılır.
- c) *Fotodedektör* – p-i-n diyot (PIN) veya (APD) anlık optik alanı elektriksel sinyale çevirmek için kullanılmaktadır. Genellikle lazer iletişim sistemlerinde kullanılan fotodedektörler tablo 2.2'de özetlenmiştir [15].
- d) *Karar Devresi* – Kuvvetlendirme, filitreleme ve sinyal işleme işlemlerinin yapıldığı bileşendir.

Dedektör kapasite etkisinden dolayı, yüksek hızlı dedektörler doğal olarak küçük boyutludur (sırası ile 70 μm ve 30 μm için 2.5 Gbps ve 10 Gbps) ve sınırlı bir görüş alanına (FOV) sahiptir. FOV alıcının sezim alanının odak uzaklığına oranıdır. $FOV=d/f$, d sezim alanı çapı, f etkin odak uzaklığıdır.

Alıcının sezim işlemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

Direk Sezim Yapan Alıcılar : Bu tip alıcılar optik radyasyonun fotodedektöre çarpan anlık yoğunluğunu veya gücünü sezerler. Fotodedektör çıkışı, alana etkiyen anlık güç

ile doğru orantılıdır. Uygulaması kolay ve yoğunluk modüleli optik sistemlerde daha uygundur.

Eşevreli Sezim Yapan Alıcılar : Eşevreli alıcılar foto-karıştırma olgusu üzerinde çalışırlar. Alınan optik alan, yerel olarak üretilen diğer bir optik alan ile karıştırılarak sezim gerçekleşir. Eşevreli alıcılar hemojen ve heterojen alıcılar olarak ayrılırlar. Hemojen alıcılarda yerel osilatörün frekans/dalgaboyu gelen radyasyon ile aynı seçilir [11]. Heterojen sezimde gelen radyasyon ve yerel osilatörün frekansları farklıdır [12]. Eşevreli RF sezimden farklı olarak yerel osilatör çıkışı gelen sinyal ile aynı fazda olmak zorunda değildir. Temel avantajları; ara bir frekans değerinde bağımlı kuvvetlendirmeyi kolaylaştırır ve yerel osilatörün gücü artırılarak sinyal gürültü oranı artırılabilir.

2.4 ATMOSFER TÜRBÜLANS MODELLERİ

Türbülans atmosfer kanalının bir özelliğidir. Radyasyon güneşten yayılıp dünya yüzeyine çarptığında bir kısmı emilime uğrar ve yüzeydeki hava kütesini ısıtır. Bu ısınan kütleler türbülanslı olarak aralarında soğuk hava kütleleriyle birlikte yükselirler. Atmosfede uzaysal olarak değişken 0.01 dereceden 0.1 dereceye kadar sıcaklık dalgalanmaları ortaya çıkar [2]. Atmosferdeki sıcaklığın homojensizliği kırılma indeksinde dalgalanmalara sebep olmaktadır. Bu durum çapları 0.1 cm ile 10 m arasında değişen küçük küresel hücrelerin oluşmasını sağlar. Bunlar kırılma indisleri değişen prizma gibi davranmaya başlarlar. Optik radyasyonun yayılımı, ışının boyutu ve yayılım yolundaki sıcaklık değişmelerine bağlı olarak değişime uğrar. Bu nedenle optik radyasyon iletimi sırasında fazında ve parlaklığında değişimler meydana gelmektedir.

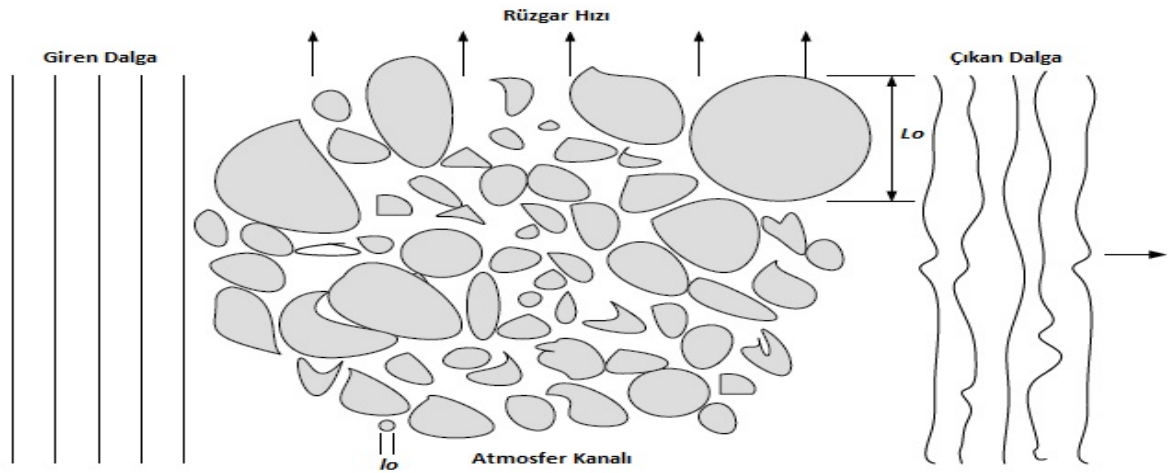
Türbülansın etkilerine daha önce değinmiştik, bu bölümde türbülans modelleri üzerinde duracağız. Yoğunluk modüleli direk sezim (IM/DD) yapan sistemler üzerinde duracağımız için alınan güç/parlaklık oranı bizim için önemli olacak. Türbülans genelde rejimler ile katagorize edilirken kırılma indeksindeki değişimleri ve homojenliği değerlendirilir. Bu rejimler optik radyasyonun atmosferdeki ilerlemesinin, yola bağlı bir fonksiyonudur. Zayıf, orta kuvvetli, güçlü ve doyum olarak katagorize edilirler.

Modeller tanımlanırken parlaklık dalgalanmalarının olasılık yoğunluk istatistiklerine göre tanımlanırlar. Malesef tüm rejimler için geçerli evrensel bir model yoktur. Literatürde tanımlanan modellerden en çok kabul görenler log-normal, gamma-gamma ve negatif eksponansiyel modelleridir [19, 20]. Sırası ile geçerli olduğu rejimler zayıf, zayıf-güçlü ve doyum rejimleridir.

2.5 TÜRBUİANS ATMOSFER KANALI

Optik radyasyonun ilerlediği yol üzerinde, atmosferin kırılma indisindeki rastgele dalgalanmalar türbülansı oluşturmaktadır. Bu kırılma indisi dalgalanmaları noktadan noktaya sıcaklıktaki rastgele değişimler ile gerçekleşmektedir [8]. Bu değişimler atmosfer basıncı, genliği ve rüzgar hızındaki değişimlerin bir fonksiyonudur. En küçük ve en büyük türbülans hücreleri iç ölçekli, l_0 ve dış ölçekli L_0 türbülans hücreleri olarak ifade edilmektedir. l_0 tipik olarak bir kaç milimetre çapında iken, L_0 bir kaç metre çapında olabilmektedir. Bu zayıf lens özelliğine sahip hücreler şekil 2.7 ile grafiksel olarak gösterilmiştir.

Türbülans atmosfer kanalı modellenmeye çalışılırken, ‘Taylor Hipotezi’ büyük ölçüde kabul görmüştür. Bu hipoteze göre türbülans hücreleri sabittir veya donmuş halde kendi buldukları formda yerel hareket ederler. Bu hipotez ışın modelinin veya istatistiksel özelliklerinin değişimine, ışının yayılım yönündeki yerel rüzgar bileşenlerinin sebep olduğunu savunmaktadır [8].



Şekil 2.7 Türbülans hücreli atmosfer kanalı

Taylor Hipotezinden yola çıkarak atmosferin geçici uyum zamanı τ_0 milisaniyeler ile ifade edilmektedir [17]. Sonuç olarak, atmosfer kanalının değişim hızı veri sembollerinin iletim süreleri göz önüne alındığında çok büyüktür. Bu nedenle atmosfer kanalı yavaş sönümlenmeli kanal olarak tanımlanmaktadır.

Atmosfer sıcaklığı ve kırılma indisi arasındaki ilişki denklem (2.2) ile verilmektedir [21]. Bir çok uygulamada bu denklem (2.3) deki gibi uygulanmaktadır.

$$n = 1 + 77.6 \times (1 + 7.52 \times 10^{-3} \times \lambda^{-2}) \times \frac{P}{T_e} \times 10^{-6} \quad (2.2)$$

$$-d_n / dT_e = 7.8 \times 10^{-5} \times P / T_e^2 \quad (2.3)$$

P : atmosfer basıncı (milibar)

T_e : sıcaklık (K)

λ : dalga boyu (mikron)

Deniz seviyesinde $-d_n / dT \cong 10^{-6} K^{-1}$ şeklinde hesaplanmaktadır [22]. Kırılma indisi dalgalanmasına nemin etkisi denklem (2.3)'te hesaplanmamıştır, çünkü optik dalga boyları için ihmal edilebilir.

Türbülans modellerinde kırılma indisini dalgalanmasını karakterize etmek için bir diğer önemli parametre kırılma yapı parametre indisidir. C_n^2 ile gösterilmektedir ve Kolmogorov tarafından sunulmuştur [23]. C_n^2 'nin değeri yüksekliğe bağlı değişmektedir ve genel kabul görmüş model olan Hufnagel-Valley (H-V) modeli aşağıdaki gibidir[19].

$$C_n^2(h) = 0.00594 \times (v/27)^2 \times (10^{-5} \times h)^{10} \times \exp(-h/1000) + 2.7 \\ \times 10^{-16} \times \exp(-h/1500) + A \times (-h/100) \quad (2.4)$$

A : $C_n^2(0)$ nominal değeri yeryüzündeki birimi ise $m^{-2/3}$ 'dür.

h : yükseklik (m)

C_n^2 yüksekliğe bağlı olarak değişen bir büyüklüktür, yeryüzüne yatay olarak yapılan yayılım alanlarında sabit olarak kabul edilmektedir. C_n^2 'nin güçlü türbülans altındaki değeri $10^{-12} m^{-2/3}$ iken zayıf türbülans için değeri $10^{-17} m^{-2/3}$ olduğu düşünülmektedir. Tipik ortalama değeri $10^{-15} m^{-2/3}$ olarak kabul edilmektedir [8].

Sıcaklık değişimleri için benzer bir parametre sıcaklık yapı parametresidir. C_n^2 ile ilişkisi aşağıdaki gibidir;

$$C_n^2 = \left(\frac{d_n}{dT_e} \right)^2 \times C_T^2 \quad (2.5)$$

Spektrum alanında kırılma indisi dalgalanmasının güç spektrum yoğunluğu ile C_n^2 'nin ilişkisi aşağıdaki gibidir;

$$\phi_n(K) = 0.033 \times C_n^2 \times K^{-11/3}; \quad (2.6)$$

$$K = 2 \pi / \lambda \quad (2.7)$$

K : uzaysal dalga sayısı.

Doğası gereği, türbülans ortamını matematiksel olarak tanımlamak çok zordur, [17] nolu referansa göre işlemlerin temelinde doğrusal olmayan gözlemlerin yer alması zorluğun öncelikli sebebidir. İstatiksel ifadeler olan güç yoğunluk fonksiyonu (pdf) ve varyans türetilirken bazı genellemelerin göz önünde tutulması gerekmektedir. Bunlar aşağıdaki gibidir;

- 1) Atmosfer yayılan dalga için güçlü bir kanaldır. Bu varsayım şöyle açıklanır, atmosfer tarafından emilen radyasyon ile oluşan ısı, günlük katkı (yansıma) ile karşılaştırıldığında önemsizdir [8].
- 2) Türbülans hücreleri tarafından gerçekleşen saçılma işlemi sırasında ışının enerjisinden kayıp olmamaktadır. Türbülans önceki ve sonraki enerjilerin eşit olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayım düzlemsel ve küresel dalgaların her ikisi içinde geçerlidir [8].

2.5.1 Log-Normal Türbülans Modeli

Türbülanslı bir atmosferde parlaklık dalgalanmasının olasılık yoğunluk fonksiyonu (pdf) tanımlanırken, ışın ilk olarak yapı taşı olan elektrik alan (\vec{E}) ile gösterilir. Uzaysal değişen bir yalıtkan olan atmosfer üzerinde Maxwell'in elektromanyetik denklemleri uygulandığında, aşağıdaki ifade türetilir [45].

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 n^2 \vec{E} + 2\nabla[\vec{E} \cdot \vec{\nabla} \ln(n)] = 0 \quad (2.8)$$

Denklemde, dalga sayısı k ve gradyan vektör operatörü $\vec{\nabla}$ aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$k = 2\pi / \lambda$$

$$\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}\right)i + \left(\frac{\partial}{\partial y}\right)j + \left(\frac{\partial}{\partial z}\right)k$$

i , j ve k sırasıyla x , y ve z eksenlerinde birim vektörlerdir. (2.8) denkleminde eşitliğin solundaki son terim dalganın depolarizasyonunu ifade etmektedir. Zayıf türbülanslarda tek tip saçılma olayı olduğu için depolarizasyon ihmal edilebilir [22]. Depolarizasyonun güçlü türbülansda dahi önemsiz olduğu teorik ve deneysel olarak [24] ve [25] nolu referanslarda gösterilmiştir. Bu durumda denklem (2.9) şöyle düzenlenmektedir;

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 n^2 \vec{E} = 0 \quad (2.9)$$

Pozisyon vektörü olarak r kullanırsak \vec{E} ifadesi uygunluk için, $E(r)$ şeklinde gösterilebilir. Son denklemin çözümünde, yayılım alanını $E(r)$ doğal logaritması olan Gauss kompleks değişkeni $\psi(r)$ tanımlanmıştır. Rytov dönüşümü olarak tanımlanan ifade şöyledir;

$$\psi(r) = \ln[E(r)] \quad (2.10)$$

Rytov yaklaşımı, türbülansın zayıf olması ve saçılma olayının tek tip olması varsayımları üzerine tanımlanmıştır.

$$\psi_1(r) = X + iS \quad (2.11)$$

$\psi_1(r)$ türbülans etkisi ile oluşan Rytov değişkenidir. X genlik S ise fazdır. Rytov değişkeni Gauss dağılımına sahip olduğu için X değişkenide Gauss dağılımına sahiptir. X 'in pdf fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$p(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left\{-\frac{(X - E[X])^2}{2\sigma_x^2}\right\} \quad (2.12)$$

$E[X]$: X 'in ortalaması

σ_x^2 : log-genlik varyansı

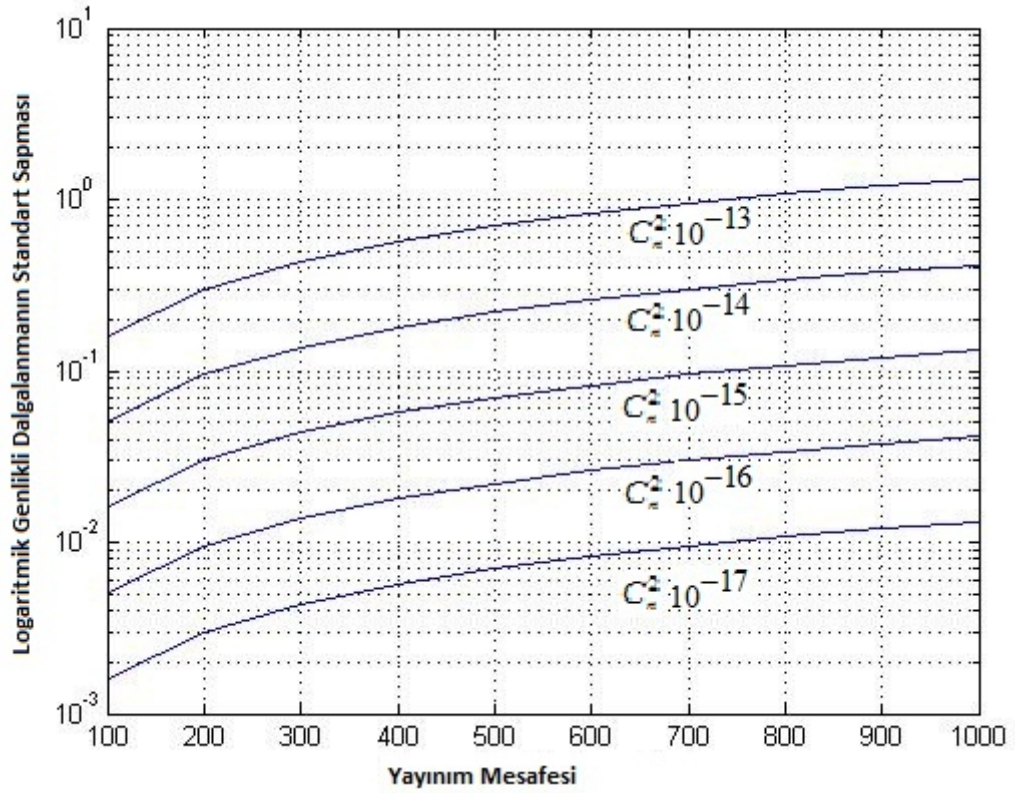
[22] nolu referansa göre yayılım alanının genlik dalgalanmasının boyutunu karakterize eden σ_x^2 atmosferik türbülantta kırılma yapı parametresi (C_n^2), yatay olarak alınan mesafe (L) ve dalga sayısı (k) ile orantılıdır [26].

$$\sigma_x^2 = 0.56k^{7/6} \int_0^L C_n^2(x)(L-x)^{5/6} dx \quad \text{düzlemsel dalga için} \quad (2.13a)$$

$$\sigma_x^2 = 0.563k^{7/6} \int_0^L C_n^2(x)(x/L)^{5/6}(L-x)^{5/6} dx \quad \text{küresel dalga için} \quad (2.13b)$$

Yayılım alanı türbülans ortamında yatay olarak ilerliyor ise kırılma yapı parametresi C_n^2 sabit kabul edilir ve log-parlaklık varyansı düzlemsel dalga için aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\sigma_l^2 = 1.23C_n^2k^{7/6}L^{11/6} \quad (2.14)$$



Şekil 2.8 Düzlemsel dalga için yayınım mesafesine ve kırılma yapı parametresine göre log-genlikli dalganın standart sapması σ_x

Türbülans ortamındaki parlaklık alanını (yoğunluk) $I = |A(r)|^2$ ve boşluktaki (türbülanssız) parlaklık alanı (yoğunluk) $I_0 = |A_0(r)|^2$ ifadeleri ile verilmektedir. Log-yoğunluk ise aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$l = \log_e \left| \frac{A(r)}{A_0(r)} \right|^2 = 2X \quad (2.15)$$

$$I = I_0 \exp(l) \quad (2.15a)$$

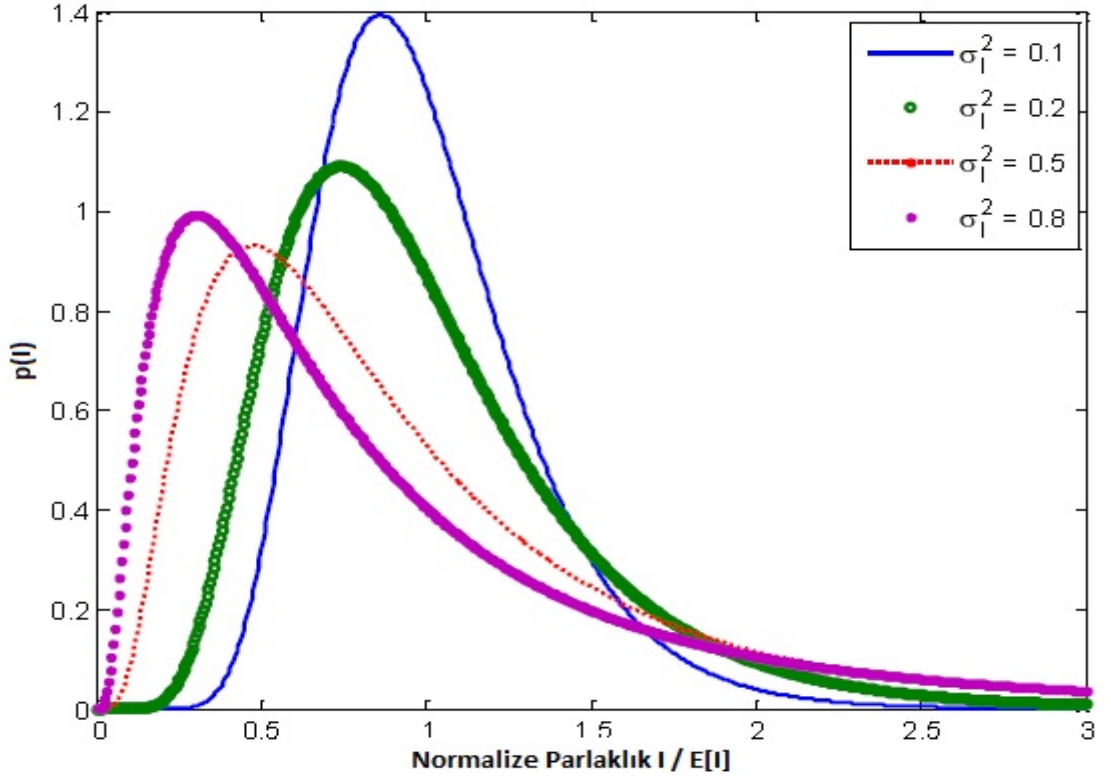
$p(I) = p(X) \left| \frac{dX}{dl} \right|$ denkleminde hareketle $p(X)$ ifadesinden türetilen log-normal dağılım fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$p(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_I^2}} \frac{1}{I} \exp\left\{-\frac{(\ln(I/I_0) - E[I])^2}{2\sigma_I^2}\right\} \quad I \geq 0 \quad (2.16)$$

Zayıf türbülansın olduğu bölgelerde, parlaklık dalgalanmaları log-normal dağılımı izlemektedir. Log-yoğunluk varyansı, $\sigma_I^2 = 4\sigma_x^2$ ve log-yoğunluk ortalaması, $E[I] = 2E[X]$ denkliği mevcuttur. Bölüm (2.5)'deki ikinci varsayımdan hareketle saçılma işlemi sırasında enerji kaybı gerçekleşmediği için $E[I] = I_0$ olması gerekmektedir. Aynı varsayımdan hareket ile log-yoğunluk varyansı ve ortalaması arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir;

$$E[I] = -\sigma_I^2 / 2 \quad (2.17)$$

Şekil 2.9'da log-normal pdf fonksiyonun σ_I^2 ile değişimi gösterilmiştir. σ_I^2 arttığında dağılımın yayıldığı ve sonsuza doğru uzayan kuyruğun oluştuğu görülmektedir. Bunun anlamı kanalın homojenliği azaldığında parlaklık dalgalanmalarının boyutunun artmasıdır.



Şekil 2.9 σ_I^2 ve normalize parlaklığa göre log-normal pdf değişimi [8]

Zayıf türbülans etkisinde uzaysal uyum

Optik radyasyon atmosfer gibi türbülanslı bir ortamda yayılım yaptığı zaman uzaysal uyumunda azalma meydana gelir. Uyum bozulmasının boyutları atmosferik türbülansın ve yayılım mesafesinin birer fonksiyonudur. Türbülanslı kanal uyumlu radyasyonu çeşitli parçalara böler ve bu parçaların çapları uzaysal uyum mesafesini belirler. Rytov yaklaşımını takiben, atmosferde ilerleyen radyoaktif bir alanın uzaysal uyumu aşağıdaki gibi türetilir [22].

$$\Gamma_x(\rho) = A^2 \exp[-(\rho / \rho_0)^{5/3}] \quad (2.18)$$

ρ_0 : yayılan radyasyon uyum alanı e^{-1} 'e indirildiğinde elde edilen yatay uyum mesafesidir. Uyum mesafesi ise aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\rho_0 = \left[1.45k^2 \int_0^L C_n^2(x) dx \right]^{-3/5} \quad \text{düzlemsel dalga için} \quad (2.19a)$$

$$\rho_0 = \left[1.45k^2 \int_0^L C_n^2(x)(x/L)^{5/3} dx \right]^{-3/5} \quad \text{küresel dalga için} \quad (2.19b)$$

Uyum mesafesi, alıcının sezim alanın ayarlanmasında ve çoklu alıcı sistemi kullanıldığında alıcıların bir birlerinden ne kadar ayırık olması gerektiğine karar vermekte kullanılmaktadır. Alıcıların çoklu bir alıcı sisteminde birbirinden bağımsız sinyalleri sezmeleri için en az ρ_0 mesafesi kadar aralık ile dizilmeleri gerekmektedir. Uzaysal uyum mesafesi, dalga boyu arttıkça artmaktadır fakat yayılım mesafesi ve türbülans arttıkça azalmaktadır.

Log-normal türbülans modelinin limiti

Şimdiye kadar, Rytov yaklaşımı ile atmosfer türbülans modeli ve log-normal türbülans modeli incelenmiştir. Rytov yaklaşımı, Rytov parametresi artışına yayılım yolunun uzunluğunun veya kırılma yapı parametresinin büyüklüğünün sınır getirmediğini

öngörmektedir. Ancak deneysel sonuçlara bakıldığında bu öngörünün sadece zayıf türbülans rejiminde $\sigma_x^2 \leq 0.3$ geçerli olduğu görülmektedir. Türbülans artığında çoklu saçılmalar meydana gelmektedir, bu da Rytov yaklaşımında hesaba katılmamıştır.

2.5.2 Gamma-Gamma Türbülans Modeli

Andrews ve diğerleri [19] tarafından önerilen bu model ışının türbülanslı ortamda yol alırken küçük ölçekli (saçılma) ve büyük ölçekli (kırılma) etkileri altında kalacağını varsaymaktadır. Küçük ölçekli etki, türbülansdaki hücrelerin ‘Fresnel’ alanı $R_F = (L/k)^{1/2}$ veya uyum mesafesi ρ_0 , daha küçük olanlar tarafından gerçekleştirilir. Büyük ölçekli etki ise türbülansdaki hücrelerin ‘Fresnel’ alanı $R_F = (L/k)^{1/2}$ veya saçılma diski $L/k\rho_0$, daha büyük olan tarafından gerçekleştirilir. Küçük ölçekli hücrelerin büyük ölçekliler tarafından modüle edildiği varsayılmaktadır. Bundan dolayı, normalize alınan parlaklık I istatistiksel bağımsız rastgele süreç I_x ve I_y ’nin çarpımı şeklinde tanımlanır.

$$I = I_x I_y \quad (2.20)$$

I_x ve I_y sırası ile büyük ölçekli ve küçük ölçekli türbülans hücrelerinden kaynaklanmaktadır ve gamma dağılımına sahip oldukları önerilmektedir [19, 20]. Pdf’leri aşağıdaki gibidir [8];

$$p(I_x) = \frac{\alpha(\alpha I_x)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-\alpha I_x) \quad I_x > 0; \quad \alpha > 0; \quad (3.20a)$$

$$p(I_y) = \frac{\beta(\beta I_y)^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \exp(-\beta I_y) \quad I_y > 0; \quad \beta > 0; \quad (3.20b)$$

$I_y = I / I_x$ eşitliğinden yola çıkarsak, I_x bağımlı koşullu olasılık fonksiyonu aşağıdaki gibi türetilir;

$$p(I / I_x) = \frac{\beta(\beta I / I_x)^{\beta-1}}{I_x \Gamma(\beta)} \exp(-\beta I / I_x) \quad I > 0 \quad (2.21)$$

Koşulsuz parlaklık dağılımını, $p(I)$ elde etmek için koşullu olasılığın, $p(I / I_x)$ I_x istatistiksel dağılımı üzerinden ortalaması alınır. Sonuçta gamma-gamma parlaklık dağılım fonksiyonu elde edilir [8].

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

$$p(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\beta)\Gamma(\alpha)} I^{(\frac{\alpha+\beta}{2})-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}) \quad I > 0 \quad (2.22)$$

α : büyük ölçekli saçılma işleminin efektif sayısı

β : küçük ölçekli saçılma işleminin efektif sayısı

$K_n(\cdot)$: 2. çeşit n. derece Bessel fonksiyonu

$\Gamma(\cdot)$: gamma fonksiyonu

Gamma-gamma pdf fonksiyonu ‘ K ’ dağılımının genelleştirilmiş hali olarak yorumlanabilir. Bunu görebilmek için α ve β parametreleri birim değerlerde seçmek yeterlidir [19].

Eğer alıcıdaki optik radyasyonun düzlemsel bir dalga olduğunu varsayarsak α ve β parametreleri aşağıdaki gibi çıkarılmaktadır.

$$\alpha = \left[\exp\left(\frac{0.49\sigma_I^2}{(1+1.11\sigma_I^{12/5})^{7/6}}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (2.23a)$$

$$\beta = \left[\exp\left(\frac{0.51\sigma_I^2}{(1+0.69\sigma_I^{12/5})^{5/6}}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (2.23b)$$

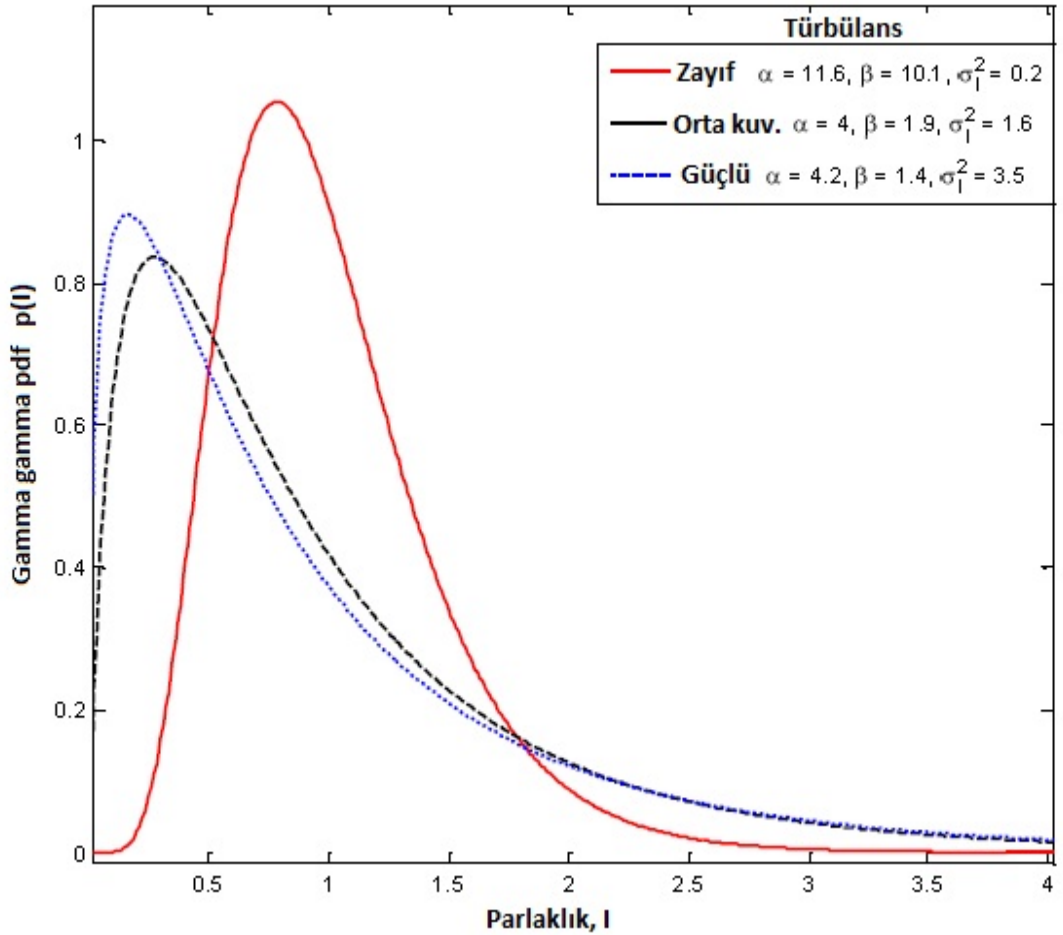
Pırıldama indeksi $S.I.$ ise aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\sigma_N^2 = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha\beta} \quad (2.24a)$$

$$\sigma_N^2 = \exp\left[\frac{0.49\sigma_I^2}{(1+1.11\sigma_I^{12/5})^{7/6}} + \frac{0.51\sigma_I^2}{(1+0.69\sigma_I^{12/5})^{5/6}}\right] - 1 \quad (2.24b)$$

Gamma-gamma türbülans modelinin kanalı en iyi modellediği türbülans rejimi orta kuvvetli rejimdir. Log-normal ve Negatif Ekponansiyel modelleri arasında bir geçiş modelidir. Pratik uygulamalar göz önüne alındığında türbülans rejim skalasında en geniş modelleme ölçeği Gamma-gamma türbülans modeli ile yapılmaktadır.

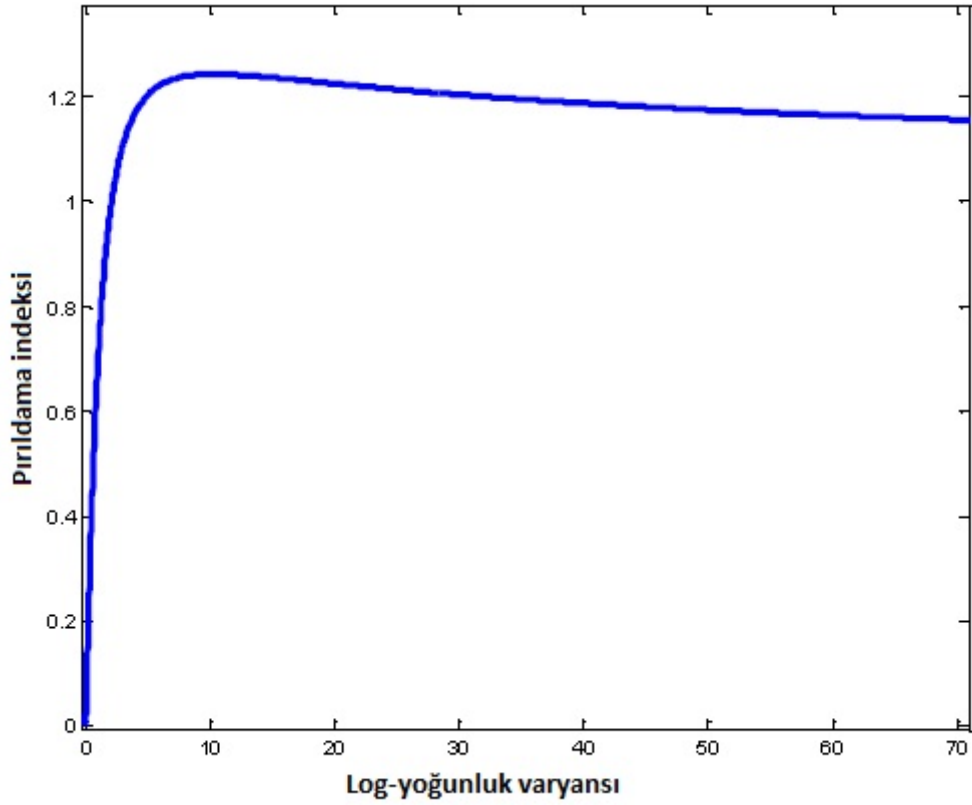
Farklı türbülans rejimleri altında Gamma-gamma dağılımının α ve β parametreleri ve σ_l^2 değerlerine göre değişimi şekil 2.10'da verilmiştir. Zayıf, orta kuvvetli ve güçlü olmak üzere 3 çeşit türbülans rejimi altında Gamma-gamma dağılımının karakteristiği çıkarılmıştır [8].



Şekil 2.10 Farklı türbülans rejimleri altında gamma-gamma olasılık yoğunluk fonksiyonu [8]

Şekil 2.11 *S.I.* deki değişimleri Rytov parametresinin bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi Rytov parametresi artırıldığında *S.I.* bir değerinden büyük bir değerde maksimuma ulaşıyor ve tekrar bir değerine yaklaşarak sabit kalıyor.

Zayıf türbülans altında α ve β , 1 den çok büyük değere sahipler. Bunun anlamı şudur; küçük ölçekli ve büyük ölçekli etkilerin efektif değerleri çok büyüktür. Fakat parlaklık dalgalanması arttığında rejim güçlü hale gelir ve α ve β katsayıları küçülmektedir. Doyum rejimine gelindiğinde β katsayısı 1'e eşit olmaktadır. Küçük ölçekli etkiler optik dalganın uzaysal uyum çapına göre azalmaktadır. α ise türbülans ile birlikte tekrar artmaya başlar. Bu koşullar altında Gamma-gamma dağılımı Negatif Ekspansiyel dağılıma dönüşür.



Şekil 2.11 $C_n^2 = 10^{-15} m^{-2/3}$, $\lambda = 850 nm$ için σ_l^2 'ye göre *S.I.*'nin değişimi [8]

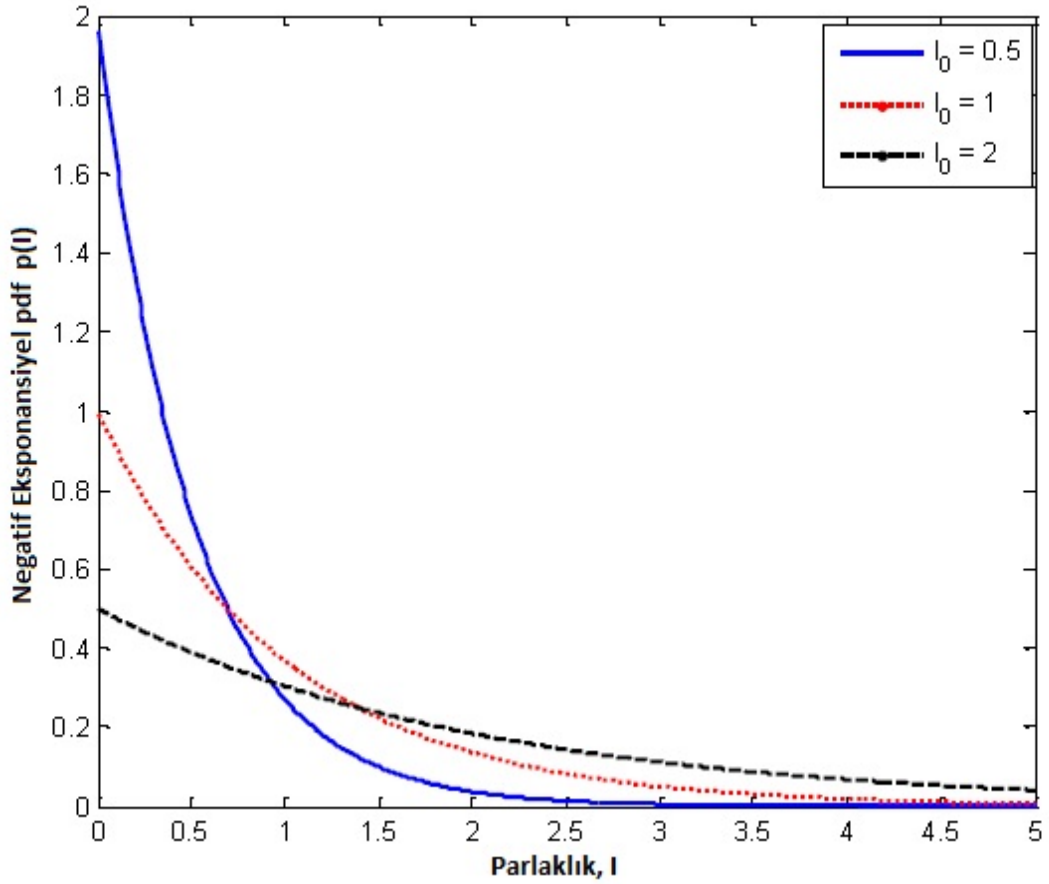
2.5.3 Negatif Eksponansiyel Türlülans Modeli

Parlaklık dalgalanmaları güçlendikçe, bağımsız saçılmaların sayısı artmaya başlar. Doyum rejimi gerçekleşir. Türlülanslı ortamdan geçen alanın genlik dalgalanmaları bu durumda parlaklık için Negatif Eksponansiyel istatistikleri sağlayan 'Rayleigh' dağılımına uymaya başlar.

$$p(I) = \frac{1}{I_0} \exp\left(-\frac{I}{I_0}\right) \quad I_0 > 0 \quad (2.25)$$

$E[I] = I_0$ alınan ortalama parlaklık. Doyum rejimi boyunca pırıldama indeksi değeri S.I.=1.

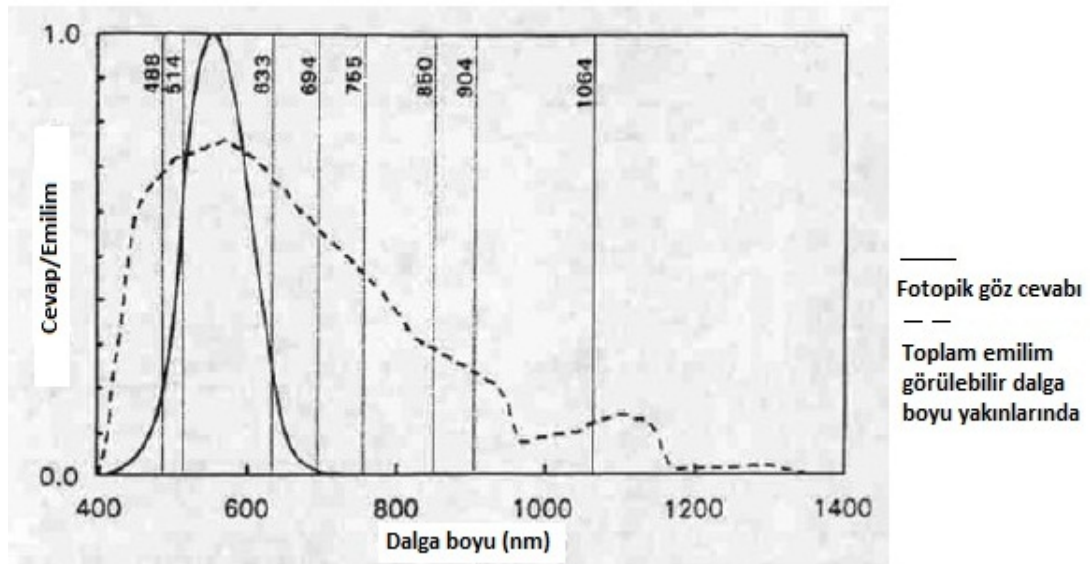
Negatif Eksponansiyel türlülans modelinin pdf'ini şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Negatif eksponansiyel türlülans modeli pdf fonksiyonu [8]

2.6 GÖZ GÜVENLİĞİ VE STANDARTLARI

Optik haberleşme sistemleri tasarlanırken, insanlar optik radyasyona temas ettiklerinde kesinlikle hiç bir zararlı etki yaratmayacak şekilde düzenlenmektedir. Optik ışınların insan derisi ve gözü üzerinde zararlı etkileri vardır. Ancak gözde oluşturduğu hasar çok daha önemlidir, çünkü göz optik enerjiyi odaklar ve yoğunlaştırır. Gözün retina üzerine odakladığı ışığın dalgaboyu aralığı 0.4 ile 1.4 μm aralığındadır. Diğer dalga boyuna sahip ışınlar kornea tabakası tarafından emilmektedir. Şekil 2.13'te ışığın farklı dalga boylarına göre gözün davranışı gösterilmektedir.



Şekil 2.13 İnsan gözünün çeşitli dalga boylarında tepki grafiği

Optik ışınların güvenlik yönetmeliğini düzenleyen uluslararası bazı kurumlar şöyledir;

Rayolojik Sağlık ve Cihazlar Merkezi (CDRH) – Amerika Birleşik Devletlerinde yiyecek ve ilaç yönetimi ajansı (FDA). Lazer ve lazer cihazları için kanunla belirlenen standartların düzenlemesini onaylamaktadır.

International Electrotechnical Commission (IEC) – Bütün elektriksel cihazların uluslararası standartlarını yayımlar, bu lazer ve lazer bileşenlerini de içerir (IEC608251).

Bu standartlar kanunlarla direk olarak düzenlenmiş değildir. Ülkeler ulusal olarak buna katılma veya katılmama kararı alırlar.

Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (ANSI)- Lazer kullanımı ile ilgili (*ANSI Z136.1*) yayınlamıştır. ABD'de endüstriyel standartları hazırlayan ve yayınlayan bir özel şirkettir. ABD federal devletinin standart enstitüsü ise NIST'dir. ANSI, ISO ve IEC üyelerindedir.

Avrupa Elektroteknik Standartlaşma Komitesi (CENELEC) – 19 tane Avrupa ulusal üyesinden oluşan ve öneriler üzerine elektroteknik standartlar onaylayan organizasyondur.

Bu organizasyonlardan her biri lazerleri sınıflandırmak için çeşitli yollar geliştirmişlerdir. IEC sınıflandırmalarına değinecek olursak, 4 grup halinde sınıflandırmışlardır. Sınıf 1'den sınıf 4'e kadar, sınıf 1 az güce sahip cihazları sınıf 4 en güçlü cihazları içermektedir. Her sınıf ulaşılabilir yayım limiti '*accessible emission limits*' (AEL) metriğine göre tanımlanır. AEL optik kaynağın dalga boyuna, vericinin geometrisine ve kaynağın yoğunluğuna bağlıdır [16].

Yenilenen IEC 60825-1 standardına göre optik sistem sınıflandırmadaki gereklilikleri ve önemli karakteristikleri aşağıdaki gibidir;

- a) *Sınıf 1*: 302.5 – 4000 nm dalga boyuna sahip bantda düşük güçte radyasyon yaymaktadır. Cihazlar teknik dizaynları gereği doğal olarak tehlike oluşturmamaktadır.
- b) *Sınıf 1M* : Sınıf 1 ile aynıdır fakat teleskop gibi optik cihazlar ile bakıldığında tehlike oluşturabilir. Sınıf 1M lazerler büyük çaplarda ışın üretirler.
- c) *Sınıf 2* : 400 – 700 nm bandında düşük güçte görülebilir radyasyon yayan cihazlardır. Göz koruması göz kırpması refleksi ile sağlanır.
- d) *Sınıf 2M* : Sınıf 2 ile aynıdır fakat teleskop gibi optik cihazların kullanımı tehlike oluşturabilmektedir.
- e) *Sınıf 3R* : Ortalama güç ile 302.5 – 4000 nm bandında çalışan cihazlardır. Direk görüş potansiyel olarak tehlikelidir.
- f) *Sınıf 3B* : Ortalama güç ile 302.5 – 4000 nm bandında çalışan cihazlardır. Direk görüş her zaman için tehlikelidir. Kurulum veya bakım esnasında medikal kontrol ve özel denemeler yapılmalıdır.

g) *Sınıf 4* : Yüksek güç ile çalışan cihazlardır. Her zaman için göz ve deri sağlığında tehlike oluşturmaktadır. Güvenlik kilidi ve anahtar donanımları mutlaka bulunmalıdır. Kurulum veya bakım esnasında medikal kontrol ve özel denemeler yapılmalıdır.

Kablosuz optik haberleşmede sıklık ile kullanılan iki dalga boyu için AEL değerleri Tablo 2.2’de verilmiştir. Sınıf 1 içerisinde yer alan lazerler kablosuz optik haberleşme sistemlerinde çok tercih edilmektedir. Bunun başlıca sebebi bütün durum ve şartlarda radyasyon değerlerinin güvenli olmasından kaynaklanmaktadır. Sınıf 1 lazerler uyarı tabelasına ihtiyaç duymaz ve hiç bir güvenlik önlemi olmadan kullanılabilirler. Tablo 2.2’de gösterildiği gibi sınıf 1 de kullanılan güç sınırlanmıştır. Bir çok ticari kablosuz optik haberleşme bağlantısı 1.5 Gbps ve üzeri veri iletimi için sınıf 1M lazerler kullanılmaktadır. Daha yüksek sınıfa ait lazerler uyarı tabelası ile bina çatılarında veya kulelerde kullanılmaktadır [8].

Tablo 2.2 ‘850’ ve ‘1550’ nm Dalga Boylarında Erişilebilir Yayımlım Limitleri [17].

Sınıf	Ortalama Optik Çıkış Gücü (mW)	Ortalama Optik Çıkış Gücü (mW)
	$\lambda = 850 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
1	< 0.22	< 10
2	400-700 nm aralığını kapsar AEL'si sınıf 1 ile aynıdır.	400-700 nm aralığını kapsar AEL'si sınıf 1 ile aynıdır.
3R	0.22 -- 2.2	10 -- 50
3B	2.2 -- 500	50 -- 500
4	> 500	> 500

Tablo 2.2’den görüldüğü gibi Sınıf 1 lazer sisteminde aynı iletim alanına sahip olduklarında 850 nm dalga boyuna göre, 1550 nm dalga boyunda 50 kat daha fazla güç harcamasına izin verilmektedir. Bu kablosuz optik haberleşme sisteminde 1550 nm dalga boyunun avantajıdır [8].

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 GİRİŞ

Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde RF sistemlerden farklı olarak kanal varyansı yüksek derece iletim mesafesine bağlıdır. Bundaki temel neden atmosfer türbülansının optik radyasyonun iletim mesafesi boyunca bozucu etki oluşturmasıdır. Bu etkiyi en aza indirebilmek için kaynak ve hedef arasında röleler kullanarak yayınım mesafesi kısaltılmaktadır. Kablosuz optik haberleşmede röle kullanımında, işbirlikli haberleşme modellerinden yararlanılmaktadır. İşbirlikli haberleşme modellerinde kaynak ve hedef arasında paralel röleler kullanılarak, çeşitleme kazancı sağlanmaya çalışılmaktadır. Bu modeller kablosuz optik haberleşmede kullanıldığında sisteme çeşitleme kazancı sağladığı gibi aynı zamanda iletim mesafesi kısaltığı için kanal varyansının iyileşmesinden doğan kazanç sağlanır. Paralel iletim modelinde röle seçimi yöntemi uygulanarak çeşitleme kazancı artırılabilir. Diğer bir iletim modeli çoklu atmalı (multihop) model olarakta bilinen seri iletim modelidir. Seri iletim modelinde röleler kaynak ve hedef arasına seri olarak yerleştirilerek iletim mesafesi kısaltılmaktadır. Bu modelde, sadece iletim mesafesinin kısaltılmasından kaynaklanan kanal varyansının iyileşmesi ile kazanç elde edilmektedir. Bu modeller ile sistemin servis dışı kalma olasılığı (outage probability) azaltılmaya çalışılmaktadır.

3.2 İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME İLETİM TEKNİKLERİ

İşbirlikli haberleşme iletim teknikleri arasında en yaygın olan 3 teknik aşağıdaki gibidir; ‘*kuvvetlendir ve aktar*’ iletim tekniği, ‘*kodlamalı işbirliği*’ iletim tekniği ve ‘*çöz ve aktar*’ iletim tekniğidir.

3.2.1 Kuvvetlendir ve Aktar İletim Tekniği

Kuvvetlendir ve aktar (amplify and forward) iletim tekniğinde her bir röle kaynaktan gelen gürültülü haldeki işareti alır ve kuvvetlendirerek hedefe iletir. Hedef, rölelerden ve kaynaktan gelen bağımsız işaretleri birleştirerek alınan işarete karar verir. Aktarım sırasında rölenin kullandığı güç, kaynak ve hedef arasındaki kanalın sönümlenme katsayısına ve toplamsal beyaz Gauss gürültüsüne bağlı olarak optimize edilir. Bunun temel nedeni işaret kuvvetlendirilirken gürültüde kuvvetlendirileceği için optimizasyon gereklidir. Bu teknikte gürültünün kuvvetlendirilmesi söz konusu olsa bile sistem basitliği açısından avantajlı bir tekniktir [27].

3.2.2 Kodlamalı İşbirliği İletim Tekniği

Kodlamalı işbirliği (coded cooperation) çeşitlemesi işbirlikli haberleşmeyi kanal kodlamasıyla birleştiren bir yöntemdir. Bu çeşitleme türü iki bağımsız sönümlenme yolundan değişik kod sözcüklerinin gönderilmesi ilkesine dayanır. Her bir röle artan bir bit miktarı ile iletim yapar. İşbirliği mümkün olmadığı takdirde röleler otomatik olarak işbirliksiz duruma geçerler. Röleler kaynak veri bitlerini bloklara bölerler. Bu blokların boyutları verilerin hatalı olup olmadığını anlamamıza yardım eden bir yöntem olan Döngüsel Artıklık Denetimi (CRC) kodu şeklinde arttırılır.

Kodlamalı işbirliği çeşitleme yönteminde değişik kanal kodlama türleri kullanılabilir. Örneğin, bütün kod, blok veya katlamalı kod olabilir veya her ikisinin bir karışımı olabilir [27].

3.2.3 Çöz ve Aktar İletim Tekniği

Çöz ve aktar (decode and forward) iletim tekniğinde kaynak kullanıcının gönderdiği işareti röle alır ve belli bir kod çözme algoritmasına göre çözer. Bundan sonra tekrar kodlayarak hedefe gönderir. Hedef, rölelerden ve kaynaktan gelen bağımsız işaretleri birleştirerek alınan işarete karar verir. Kod çözme ve tekrar kodlama işlemleri alıcı gürültüsünü azaltmaya yönelik bir avantaja sahiptir. Bu avantaja rağmen sönümlenme yüzünden başarımları sınırlanmaktadır. Bu yöntemde gürültü kuvvetlendirmesi olmadığı için kazanç biraz artmaktadır fakat rölede uygulanan kod çözme işlemleri sistem karmaşıklığını artırmaktadır [27].

3.3 SİSTEM MODELLERİ

Kablosuz optik haberleşmede, seri iletim ve paralel işbirlikli iletim tekniği modelleri kullanılmaktadır. Bu modeller bu bölümde açıklanmıştır.

3.3.1 Seri İletim Modeli

Seri iletim sistem modeline göre kaynağın gönderdiği bilgi N adet röleden aktarıldıktan sonra hedefe ulaşmaktadır. N adet röle kaynak ve hedef arasında eşit mesafelerde yerleştirilip, N+1 adet kısa mesafeli kanal oluşturulmaktadır. Bütün vericiler eşit güç ile iletim yapmaktadır. Modülasyon tipi olarak yoğunluk modülasyonlu direk sezim (IM/DD) tekniği ikili darbe pozisyon modülasyonu (BPPM) ile uygulanmaktadır. Bu sistemde, optik verici bit süresinin ilk yarısında optik sinyal gönderirken (*on*) ikinci yarısında göndermemektedir (*off*). Alıcıda elde edilen elektriksel sinyal vektörü aşağıdaki gibidir [26].

$$r = \begin{bmatrix} r^s \\ r^n \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} RT_b(P_s + P_b) + n^s \\ RT_bP_b + n^n \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

r^s : sinyal gönderilen aralıkta alınan elektriksel sinyal.

r^n : sinyal gönderilmeyen aralıkta alınan elektriksel sinyal.

P_s : optik sinyal gücü.

P_b : arka plan gürültüsünün gücü.

T_b : sinyal gönderilen ve gönderilmeyen süreler.

$R = \eta q / hf$: fotodetektörün cevap verebilme yeteneği.

Şekil 3.1'de kablosuz optik haberleşme için seri röle konfigürasyonu verilmiştir.



Şekil 3.1 Kablosuz optik haberleşmede seri röle konfigürasyonu

Seri röleli haberleşmede kaynak yoğunluk modüleli sinyali röleye gönderir. Çöz ve aktar modeli altında röle direk sezim işleminden sonra aldığı sinyali çözer ve tekrar modüle ederek bir sonraki röleye aktarır. Bu işlem sinyal hedefe varıncaya kadar tekrarlanır.

Seri Röleli Çöz ve Aktar İletim

Sistem modelimizde iletim yapılan bütün mesafeler eşit seçilmektedir. İletim kanalında yol kaybı ve sönümlenme birlikte değerlendirilmektedir. İletim gücü (P) kaynak ve bütün rölelerde eşit seçilmektedir. i. düğümde alınan sinyal aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [26];

$$r_i = \begin{bmatrix} r_i^S \\ r_i^N \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} RT_b (Pg_{i-1,i} + P_b) + n_i^S \\ RT_b P_b + n_i^N \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

r_i^S ve r_i^N : sinyal gönderilen ve sinyal gönderilmeyen aralıktaki alınan sinyaller.

$g_{i-1,i}$: (i-1). ve i. düğümler arasındaki bağlantının kanal kazancı.

P : ortalama iletim gücü, toplam iletim gücü P_t 'nin N röle ve 1 kaynak tarafından eşit harcanması sonucu $P_t / (N + 1)$ 'e eşittir.

$Pg_{i-1,i}$: fotodedektör üzerine düşen optik sinyal gücü.

Atmosfer kanal kazancı ve yol kaybı i. ve j. düğümler arasındaki bağlantı için aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

$$L_{i,j} = l(d_{i,j}) / l(d_{0,N+1}) \quad (3.3)$$

$l(d_{i,j})$: i. ve j. düğümler arasındaki yol kaybı

$l(d_{0,N+1})$: kaynak ve hedef arasındaki yol kaybı

$$g_{i,j} = \alpha_{i,j}^2 * L_{i,j} \quad (3.4)$$

$\alpha_{i,j}$: türbülans kaynaklı sönümlenme genliği.

$L_{i,j}$: i. ve j. düğümler arasındaki yol kaybının kaynak ve hedef arasındaki yol kaybına göre normalize edilmiş değeri.

3.3.2 Paralel İşbirlikli İletim Modeli

Paralel işbirlikli iletim sistem modeline göre kaynağın gönderdiği bilgi paralel yerleştirilmiş N adet röleden aktarıldıktan sonra hedefe ulaşmaktadır. N adet röle kaynak ve hedef arasında eşit mesafelerde yerleştirilerek, 2N adet kaynak ve hedef arasındaki kanalın yarı mesafesinde, kanal oluşturmaktadır. Bütün vericiler eşit güç ile iletim yapmaktadır. Modülasyon tipi olarak yoğunluk modülasyonlu direk sezim (IM/DD) tekniği ikili darbe pozisyon modülasyonu (BPPM) ile uygulanmaktadır. Bu sistemde, optik verici bit süresinin ilk yarısında optik sinyal gönderirken (*on*) ikinci yarısında göndermemektedir (*off*). Alıcıda elde edilen elektriksel sinyal vektörü aşağıdaki gibidir [26].

$$r = \begin{bmatrix} r^s \\ r^n \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} RT_b(P_s + P_b) + n^s \\ RT_b P_b + n^n \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

r^s : sinyal gönderilen aralıkta alınan elektriksel sinyal.

r^n : sinyal gönderilmeyen aralıkta alınan elektriksel sinyal.

P_s : optik sinyal gücü.

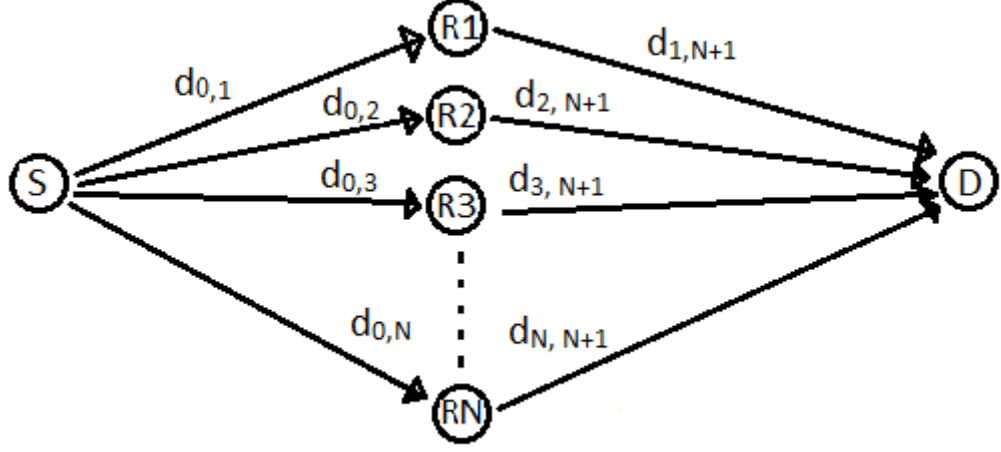
P_b : arka plan gürültüsünün gücü.

T_b : sinyal gönderilen ve gönderilmeyen süreler.

$R = \eta q / hf$: fotodetektörün cevap verebilme yeteneği.

Paralel işbirlikli iletim modelinde kaynak yoğunluk modüleri sinyali röleye gönderir. Çöz ve aktar modeli altında röle direk sezim işleminden sonra aldığı sinyali çözer ve tekrar modüle ederek hedefe aktarır.

Şekil 3.2’de Kablosuz optik haberleşme için paralel röle konfigürasyonu verilmiştir.



Şekil 3.2 Kablosuz optik haberleşmede paralel röle konfigürasyonu

Paralel Röleli Çöz ve Aktar İletim

Sistem modelimizde iletim yapılan bütün mesafeler eşit seçilmektedir. İletim kanalında yol kaybı ve sönümlenme birlikte değerlendirilmektedir. İletim gücü (P) kaynak ve bütün rölelerde eşit seçilmektedir. i . düğümde alınan sinyal aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [26];

$$r_i = \begin{bmatrix} r_i^s \\ r_i^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RT_b (Pg_{0,i} + P_b) + n_i^s \\ RT_b P_b + n_i^n \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

r_i^s ve r_i^n : sinyal gönderilen ve sinyal gönderilmeyen aralıktaki alınan sinyaller.

$g_{0,i}$: 0. ve i . düğümler arasındaki bağlantının kanal kazancı.

P : ortalama iletim gücü, toplam iletim gücü P_t 'nin $2N$ kanal oluşturan $2N$ verici tarafından eşit harcanması sonucu $P_t / (2N)$ 'e eşittir.

$Pg_{0,i}$: fotodetektör üzerine düşen optik sinyal gücü.

3.3.3 Kanal Modeli

Kötü hava koşulları altında atmosferdeki zerrecikler ve moleküller emilim ve saçılmaya neden olurlar. Bu nedenle ışın atmosferde ilerken gücünde azalma meydana gelir. Buna ek olarak uzaysal ve zamansal olarak atmosferdeki ısı değişimleri kırılma indisini etkiler kablosuz optik haberleşmenin performansını azaltır. Bu tezde, zayıf türbülans etkisinde IM/DD kablosuz optik haberleşme kanal modeli üzerinde çalışılmıştır ve karakteristik özellikleri aşağıda anlatılmaktadır;

Türbülansın zayıf olduğu rejimlerde optik alan üzerindeki kutuplaşma etkileri ihmal edilebilir. Bundan dolayı iletilen optik alan $z=0$ düzleminde uzay ve zamanın skalar fonksiyonu olarak ifade edilir [28].

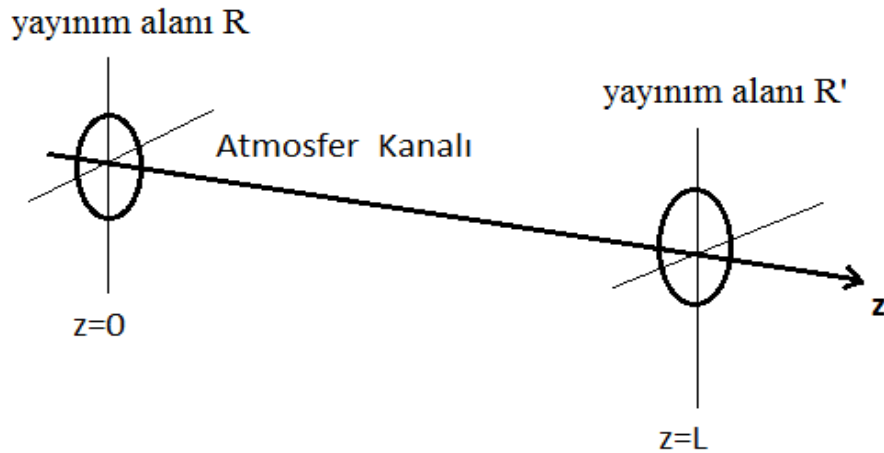
$$f(t, \vec{\rho}) = \text{Re}\{[\xi(\vec{\rho})x(t)]e^{-j2\pi f_c t}\} \quad (3.7)$$

$x(t)$: module sinyal

$\xi(\vec{\rho})$: uzaysal ışın yayılım alanı

f_c : taşıyıcı frekansı

$z=0$ düzleminde dairesel R alanından yayılan ışının, $z=L$ düzleminde yayılım alanı R' 'Huygens-Fresnel' prensibine göre yayılım modeli aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.



Şekil 3.3 Boşlukta ışın yayılım diyagramı

Bağıntı 3.7'den hareketle şekil 3.3'teki model göz önüne alındığında kırılma, saçılma ve yansımının neden olduğu atmosfer zayıflaması (yol kaybı) d uzaklığı için aşağıdaki formülden hesaplanabilir [26];

$$l = \frac{A_{TX} A_{RX}}{(\lambda d)^2} e^{-\sigma d} \quad (3.8)$$

σ : atmosferdeki görüş alanına bağlı zayıflama katsayısı

A_{TX} : vericinin yayın yaptığı mercek alanı

A_{RX} : alıcının sezim yaptığı mercek alanı

λ : yayın yapılan dalga boyu

d : yayın yapılan mesafe

Optik ışın atmosferde yol alırken türbülansın kaynaklanan farklı faz ve genlik dalgalanmaları (*scintillation*) ile karşılaşır. Türbülans, atmosferdeki sıcaklık dalgalanmalarının oluşturduğu kaotik bir durumdur. Atmosfer türbülans ortamı değişken çaplara sahip bir çok küresel böge ve farklı kırılma indislerine sahip bir çok girdap içerir. Bu yapı optik ışının uzaysal ve zamansal olarak dalgalanmasına sebep olur. Zayıf türbülans etkisinde atmosfer kanalı log-normal dağılımının istatistiksel özelliklerine benzer şekilde davranır. $\alpha = \exp(X)$. Olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibidir [26];

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \frac{1}{\alpha} \exp\left(-\frac{(\ln(\alpha) - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (3.9)$$

Logaritmik genlikli X değişkeni Gauss dağılımına sahip μ_x ortalamalı ve σ_x^2 varyanslı bir değişkendir. $E[\alpha^2] = 1$ alındığında türbülansın kaynaklanan sönümlenmenin ortalama gücü kuvvetlendirmedeği veya zayıflatmadığı düşünülmektedir. Bu noktadan hareketle $\mu_x = -\sigma_x^2$ şeklinde seçilmesi gerekmektedir. σ_x^2 daha önce 2.5.1 bölümünde belirtildiği gibi $\sigma_x^2(d) = 0.124k^{7/6} C_n^2 d^{11/6}$ formülünden elde edilmektedir. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi türbülansın kaynaklanan sönümlenmenin mesafeye

bağımlılığı $\sigma_x^2(d) = 0.124k^{7/6}C_n^2d^{11/6}$ formülünden açık bir şekilde görülmektedir. Bu kablosuz optik haberleşme sistemlerinin performansını etkileyen en önemli unsurdur. Yaptığımız performans analizlerinden ve literatürdeki kapalı form ifadelerden, çoklu-atlamalı röle tekniğinin türbülanslı kaynaklı sönümlemeyi azaltarak çok önemli performans artışı sağladığı görülmektedir.

3.3.4 Servis Dışı Kalma Olasılığı (*Outage Probability*) Analizi

Atmosferin türbülanslı kablosuz optik haberleşme sistemlerinde kanal uyum zamanı bit süreleri göz önünde bulundurulduğunda, çok büyük bir değere sahip olduğu için yavaş sönümlemeye sebep olmaktadır. Kanal uyum zamanı yaklaşık 1-10 ms'dir. Kanalın zamanla değişmediği varsayılır. Servis dışı kalma olasılığı sistem performansının değerlendirilmesi açısından kararlı bir ölçütdür. Kanalın anlık kapasitesi $C(\alpha)$ anlık elektriksel sinyal gürültü oranı (SGO) γ 'nın, bir fonksiyonudur. Gauss kanalı için alınan anlık elektriksel SGO aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\gamma = \frac{(m^s - m^n)^2}{\sigma_n^2} \quad (3.10)$$

R_0 iletim hızında servis dışı kalma olasılığı aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$P_{out}(R_0) = \Pr(C(\gamma) < R_0) \quad (3.11)$$

$C(\cdot)$ γ 'ya göre monoton artan bir fonksiyon olduğu için P_{out} aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$P_{out}(R_0) = \Pr(\gamma < \gamma_{th}) \quad (3.12)$$

$$\gamma_{th} = C^{-1}(R_0) : \text{sınır SGO}$$

Eğer hedefte kanalın anlık SGO değeri γ_{th} değerini aşarsa servis dışı kalma olayı gerçekleşmez. γ_{th} aynı zamanda rölelerde alınan sinyalin çözülmesinde kullanılan sınır değere eşittir.

Sistemin servis dışı kalma olasılığı hesaplanırken, ilk olarak tek-giriş tek-çıkış ‘*single-input single-output*’ (SISO) bağlantının servis dışı kalma olasılığını hesapladıktan sonra bundan faydalanarak kaynaktan hedefe servis dışı kalma olasılığı türetilir.

Tek bir SISO bağlantı için SGO değerini hesaplayacak olursak;

$$\gamma = \frac{R^2 T_b^2 P^2 g_{i,j}^2}{N_0} \quad (3.13)$$

SISO bağlantının servis dışı kalma olasılığı ise aşağıdaki gibidir;

$$P_{out,SISO} = \Pr \left(g_{i,j} < \sqrt{\frac{\gamma_{th} N_0}{R^2 T_b^2 P^2}} \right) \quad (3.14)$$

$g_{i,j} = \alpha_{i,j}^2 L_{i,j}$ eşitliğini yerine koyarsak;

$$P_{out,SISO}(d_{i,j}) = \Pr \left(\alpha_{i,j}^2 < \frac{1}{L_{i,j}} \frac{N+1}{P_M} \right) \quad (3.15)$$

$$P_M = P_t / P_{th} \quad (3.15a)$$

$$P_M = \sqrt{\frac{P_t^2 R^2 T_b^2}{N_0 \gamma_{th}}} \quad (3.15b)$$

P_{th} : Sönümlenme olmadığı durumda servis dışı kalma olasılığını sıfır yapan güç sınır değeri.

$\alpha_{i,j}^2$, $2\mu_x(d_{i,j})$ ortalamalı ve $4\sigma_x^2(d_{i,j})$ varyansa sahip log-normal rastgele değişkendir. Kümülatif dağılım fonksiyonu kullanılarak servis dışı kalma olasılığı aşağıdaki gibi yazılmaktadır [26];

$$P_{out,SISO}(d_{i,j}) = Q \left(\frac{\ln(L_{i,j} P_M) + 2\mu_x(d_{i,j})}{2\sigma_x(d_{i,j})} \right) \quad (3.16)$$

Q fonksiyonu $Q(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-u^2/2) du$ şeklinde tanımlıdır.

Seri İletim Modeli için Performans Analizi

Elde edilen SISO bağlantısı için servis dışı kalma olasılığı seri iletim sistem modeline uygulandığında, N röleli sistem için aşağıdaki şekilde yazılmaktadır;

$$P_{out} = \Pr \left\{ \bigcup_{i=0}^N \{ \gamma_i < \gamma_{th} \} \right\} \quad (3.17)$$

γ_i : i. kanalın anlık SGO'nı

Seri iletim modeline göre aktarıcı röleler arasındaki bağlantılardan herhangi birinde meydana gelen servis dışı kalma, o iletimin başarısız olduğunu ifade edecektir. Dolayısı ile uçtan uca servis dışı kalma olasılığını hesaplarken sistemin servis dışı kalmama olasılığı hesaplanıp birden çıkartılarak sonuca ulaşılabılır.

$$P_{out} = 1 - \Pr \left\{ \bigcap_{i=0}^N \{ \gamma_i > \gamma_{th} \} \right\} \quad (3.18)$$

$$P_{out} = 1 - \prod_{i=0}^N \left(1 - P_{out, siso}(d_{i,i+1}) \right) \quad (3.19)$$

(3.18)'deki ifadede (3.16) da elde ettiğimiz denklemi yerine koyarsak;

$$P_{out} = 1 - \prod_{i=0}^N \left(1 - Q \left(\frac{\ln \left(\frac{L_{i,i+1} P_M e^{2\mu_x(d_{i,i+1})}}{N+1} \right)}{2\sigma_x(d_{i,i+1})} \right) \right) \quad (3.20)$$

Paralel İşbirlikli İletim Modeli için Performans Analizi

Paralel işbirlikli iletim modelinde kaynak-röle arasındaki bağlantılar servis dışı olma durumlarına göre çözülmüş sinyal kümesini (decode set) 'D' oluşturur. Servis dışı kalma durumu D'nin boş küme olması veya röle-hedef iletimi sırasında servis dışı olma

durumu gerçekleşmesi halinde oluşur. Hedefte alınan sinyal için SGO ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\gamma = \frac{R^2 T_b^2 P^2 \left(\sum_{i \in D} g_{i,N+1} \right)^2}{N_0} \quad (3.21)$$

Bu ifadeden hareketle hedefte sınır SGO'na bağlı olarak elde edilen servis dışı kalma olasılığı ifadesi aşağıdaki gibidir;

$$P_{out,MISO} = \Pr \left\{ \sum_{i \in D} g_{i,N+1} < \sqrt{\frac{\gamma_{th} N_0}{R^2 T_b^2 P^2}} \right\} \quad (3.22)$$

$$= \Pr \left\{ \sum_{i \in D} l_{i,N+1} \alpha_{i,N+1} < \frac{2N}{P_M} \right\} \quad (3.23)$$

Bu modelde, D kümesindeki rölelerin gönderdiği sinyaller hedefte toplamsal olarak bir araya gelmektedir. $g_{i,K+1}$ Log-normal dağılıma sahip sinyallerin toplamıdır. Bunu istatistiksel olarak ifade etmek istediğimizde ‘*moment matching*’ metodu kullanılarak $\beta = \exp(\xi) \approx \sum_{i \in D} l_{i,N+1} \alpha_{i,N+1}$ şeklinde ifade ettiğimizde log-genlik çarpanı ξ , μ_ξ ortalamalı ve σ_ξ varyanslı normal dağılıma sahip değişken olarak tanımlanır. toplamsal olarak elde edilen sinyalin ortalama ve varyans μ_ξ ve σ_ξ değerleri μ_x ve σ_x değerlerinden faydalanarak aşağıdaki gibi ifade edilir [26];

$$\mu_\xi = \ln \sum_{i \in D} l_{i,N+1} - \sigma_\xi^2 / 2 \quad (3.24)$$

$$\sigma_\xi^2 = \ln \left(1 + \sum_{i \in D} l_{i,N+1}^2 \left(\exp(4\sigma_x^2) - 1 \right) / \left(\sum_{i \in D} l_{i,N+1} \right)^2 \right) \quad (3.25)$$

Log-normal dağılımın kümülatif dağılım fonksiyonundan faydalanarak (3.23) ifadesi aşağıdaki gibi düzenlenerek röle ve hedef arasındaki kanal için servis dışı kalma olasılığı hesaplanır [26];

$$P_{out,MISO} \approx \Pr \left\{ \beta < \frac{2N}{P_M} \right\} = Q \left(\frac{\ln(P_M / 2N) + \mu_\xi}{\sigma_\xi} \right) \quad (3.26)$$

Paralel işbirlikli iletişim sistem modelinde N tane röle olduğu durum için çözülmüş sinyal kümesi D, (*decode set*) 2^N tane olasılık içerir. S(i)'nin i. olası kümeyi ve Pr{S(i)}'nin {D=S(i)} olma olasılığını ifade ettiğini düşünürsek, paralel işbirlikli iletim için uçtan uca servis dışı kalma olasılığı aşağıdaki gibi ifade edilebilir [26];

$$P_{out} = \sum_{i=1}^{2^N} P_{out,MISO}(S(i)) \Pr\{S(i)\} \quad (3.27)$$

$$P_{out} = \sum_{i=1}^{2^N} \left(\prod_{j \in S(i)} (1 - P_{out,SISO}(L_{0,j})) \prod_{j \notin S(i)} P_{out,SISO}(L_{0,j}) \right) P_{out,MISO}(S(i)) \quad (3.28)$$

$$P_{out} = \sum_{i=1}^{2^N} \left(\prod_{j \in S(i)} \left(1 - Q \left(\frac{\ln(l_{0,j} P_M) + 2\mu_x(d_{0,j})}{2\sigma_x(d_{0,j})} \right) \right) \times \prod_{j \notin S(i)} Q \left(\frac{\ln(l_{0,j} P_M) + 2\mu_x(d_{0,j})}{2\sigma_x(d_{0,j})} \right) \right) \cdot Q \left(\frac{\ln(P_M / 2N) + \mu_\xi}{\sigma_\xi} \right) \quad (3.29)$$

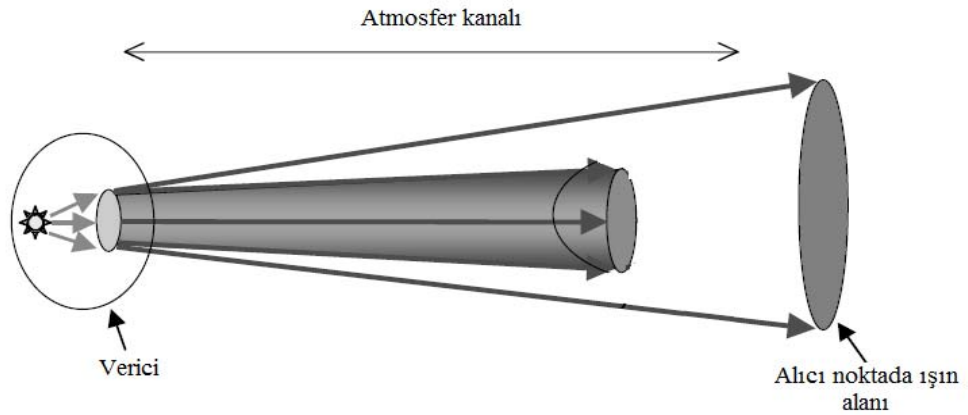
3.3.5 Kablosuz Optik Haberleşmede Röle Seçimi

Kablosuz optik haberleşmenin en önemli özelliklerinden birisi fiziksel kanalın varyansının mesafeye olan bağımlılığıdır. Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi varyansın mesafeye olan bağımlılığından dolayı kaynak ve hedef arasına röle ekleyerek iletim mesafesini kısaltmak sistem performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Sistemin toplam gücü sabit olmak koşulu ile seri veya paralel röle kullanarak yapılan haberleşmede, her iki sistem modelinde de önemli kazançlar elde edilmiştir. Bu

noktadan yola çıkarak paralel iletim sistem modelinde, kazancı artırmanın bir diğer yolu röle seçimi metodu uygulamaktır. Röle seçimi uygularken sistemin belirli değerlerine göre seçim kriterleri oluşturulabilir. Bunlardan birisi sistemdeki paralel kanalların anlık SGO'ları gözönünde bulundurularak fiziksel katmanda kazancı en yüksek kanalı seçerek iletişimin sağlanmasıdır. Kablosuz optik haberleşme sistemi Log-normal kanal modelinde yavaş sönümlenme özelliğine sahip olduğu için kanal belirli bit sürelerinde sabit kabul edilmektedir. Bu süre boyunca fiziksel katmanda kazancı en yüksek kanalı seçerek yapılan iletişim belirli bir kazançta sahip olmaktadır. Bu süre sonunda anlık SGO'ları tekrar gözönüne alınarak röle seçimi yapılır ve iletişim sürdürülür.

Kablosuz Optik Haberleşmede Röle Seçimi Sistem Modeli

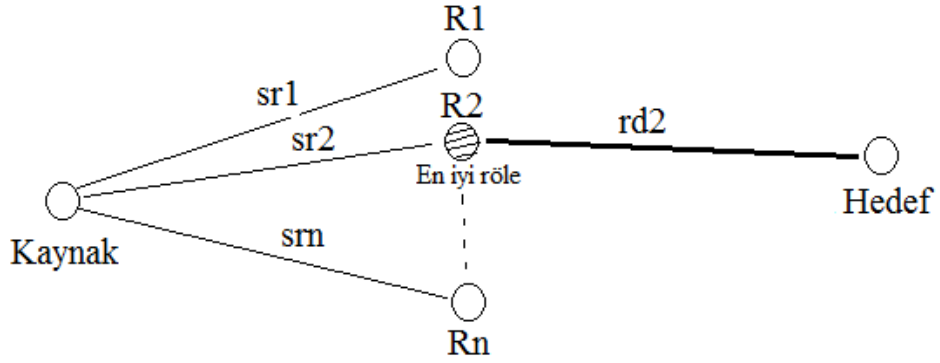
Röle seçim sistem modeline göre paralel yerleştirilmiş röleler, hedef ve kaynak ile direkt görüş içerisinde. Röleler ve hedef arasındaki iletişim çift yönlü olarak gerçekleşmektedir. Kablosuz optik haberleşmede bir kaynaktan yayılım yapan ışın atmosferde yol alırken ıraksar (beam divergence). Şekil 3.5'te bu olay gösterilmektedir. Işının atmosferdeki ıraksama özelliğinden faydalanılarak kaynak ve hedeften yapılan yayınımlarda bütün rölelerin her iki taraf içinde alıcı noktadaki ışın alanı içerisinde bulunduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.4 Işının atmosferde yol alırken ıraksaması

Kaynaktan gönderilen sinyal bütün rölelerde algılanarak çözülmektedir. İletim yapacak rölenin belirlenmesi için röleler ve hedef arasında kontrol bitleri ile iletişim yapılarak seçim kriteri olan röle-hedef kanalları veya uçtan uca kanal çiftleri içerisinde en yüksek SGO'na sahip kanal veya kanal çifti belirlenir. Seçilen kanala ait röle, kaynaktan gelen

sinyali hedefe aktarır. Bu işlem kanalın sabit kabul edildiği bit süresi sonunda tekrarlanır.



Şekil 3.5 Röle seçimi sistem modeli

Fırsatçı röle seçimi (opportunistic relaying) olarak bilinen bu yöntem ile önemli kazançlar sağlanmaktadır [30]. Bu modelde uçtan uca kanalların SGO'ları göz önüne alınarak yapılan röle seçimlerinde kazanç daha fazla artmaktadır. Uçtan uca SGO'larının göz önüne alınması daha verimli bir seçim kriteri olarak görülmektedir.

4. BULGULAR

4.1 GİRİŞ

Bu bölümde kablosuz optik haberleşmede seri iletim, paralel işbirlikli iletim ve röle seçimi sistem modelleri uygulandığında ulaşılan başarımların sonuçları açıklanmıştır. ‘*Monte Carlo*’ bilgisayar benzetim metodu kullanılarak oluşturulan sonuçlar ile bir önceki bölümde verilen teorik ifadelerden elde edilen sonuçların, ‘*MATLAB*’ bilgisayar programı yardımı ile aynı başarımların sonuçlarına ulaşıldığı gösterilmiştir. Röle seçim metodunda röle-hedef kanalı SGO’nu gözönünde bulundurularak, türetilen kapalı form matematiksel ifadeler verilmiştir. Bu ifadeninde bilgisayar benzetim metodu ile aynı başarımların sonuçlarına ulaşıldığı gösterilmiştir.

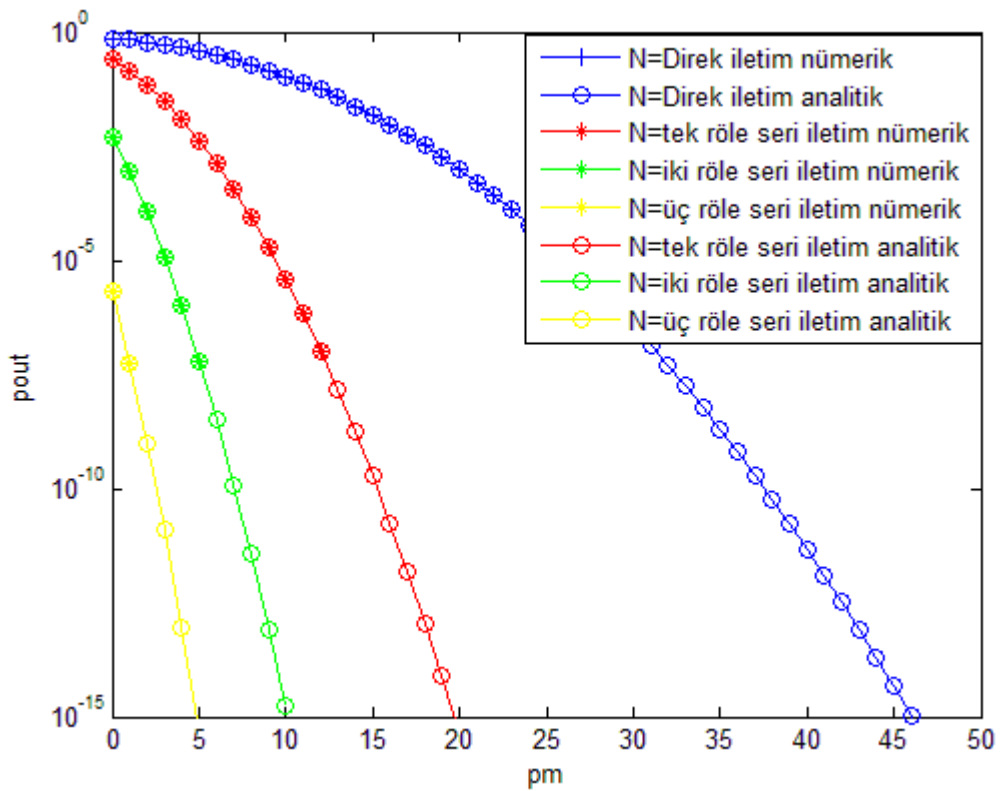
Kablosuz optik haberleşme üzerinde yaptığımız bütün çalışmalar, literatürdeki analitik yaklaşımların bir kısmından faydalanılarak 5 farklı grafik üzerinde değerlendirilmiştir. Benzer sistem modelleri üzerinde farklı senaryolar uygulanarak kablosuz optik haberleşmede sistem performansını artıracak yöntemler bulunmuş ve başarımların sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar literatürdeki sonuçlar ile aynı grafikler üzerinde verilerek avantajları gösterilmiştir.

Bulduğumuz sonuçları grafiksel olarak değerlendirirken, hesaplamalar için gerekli parametreleri şöyle kabul edelim; optik radyasyonun yayın yaptığı dalga boyu $\lambda = 1550nm$, hava açık olup görüş alanının 10 km ve atmosfer zayıflaması 0.43 dB/km ($\sigma \approx 0.1$). Atmosfer kırılma yapı parametresi $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} m^{-2/3}$. Kaynak ve hedef

arasındaki mesafe 5 km ve röleler eşit aralıklar ile yerleştirilmiştir. Paralel işbirlikli iletişimde röleler orta noktaya yerleştirilmiştir.

4.2 SERİ İLETİM BAŞARIM SONUÇLARI

Seri iletimde röleler kaynak ve hedef arasında seri bir şekilde eşit uzaklıklar ile yerleştirilmiş ve 'MATLAB' kullanılarak yapılan çalışmalarda şekil 4.1'deki başarımlar elde edilmiştir.



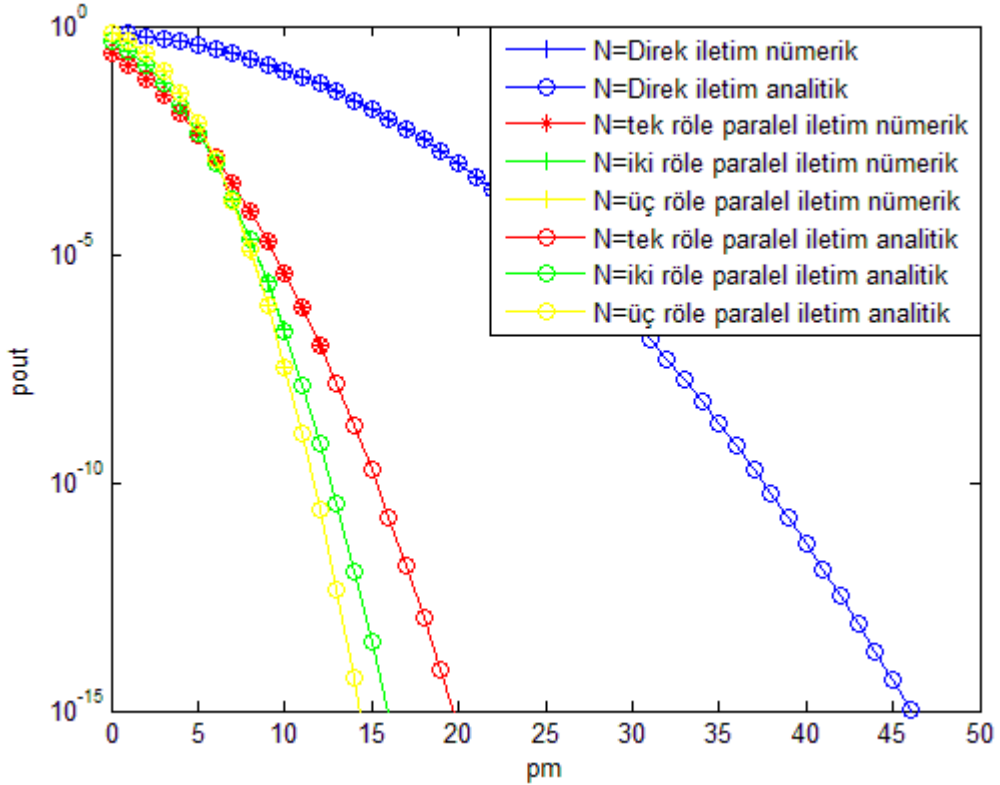
Şekil 4.1 Kablosuz optik haberleşmede direk ve seri iletim servis dışı kalma analizi

Şekil 4.1'de seri röleli iletim çöz ve aktar modeli için uçtan uca servis dışı kalma olasılığı gösterilmiştir. N=1,2,3 röle için servis dışı kalma olasılığı analitik sonuçlar sunulmuştur. Aynı zamanda 'Monte Carlo' simulasyon yöntemi kullanılarak N=1,2,3 röle için nümerik sonuçlar çizdirilmiş ve analitik sonuçları doğruladığı görülmüştür. Bir kıyaslama yapılabilmesi için direk iletim analitik ve nümerik sonuçları aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Seri röleli iletim çöz ve aktar modeli için uçtan uca servis dışı kalma olasılığı, direk iletime göre önemli derecede azalmıştır. Özellikle, hedef servis

dışı kalma olasılığı 10^{-6} için gözlemlenen kazançların direk iletme göre, bir röle kullanıldığında 18.5 dB, iki röle kullanıldığında 25.4 dB ve üç röle kullanıldığında 29.2 dB olduğu görülmüştür. Bu kazançların ortaya çıkmasının en önemli sebebi log-genlik varyansının mesafeye bağımlı olmasıdır. Toplam iletim mesafesi sabit kabul edildiğinde araya eklenen her röle, iki röle arası mesafeyi kısaltarak kazancın sağlanmasını sağlamaktadır. Çeşitleme kazancı direk iletim servis dışı kalma eğrisi eğimi ile seri röleli iletim servis dışı kalma eğrilerinin eğimi karşılaştırılarak elde edilebilir. Servis dışı kalma olasılığı eğrilerinin eğimi arttıkça, çeşitleme kazancı artmaktadır.

4.3 PARALEL İŞBİRLİKLİ İLETİM BAŞARIM SONUÇLARI

Paralel işbirlikli iletimde röleler kaynak ve hedefin tam orta noktasına eşit uzaklıklar ile yerleştirilmiş ve 'MATLAB' kullanılarak yapılan çalışmalarda şekil 4.2'deki başarımlar elde edilmiştir



Şekil 4.2 Kablosuz optik haberleşmede direk ve paralel işbirlikli iletim servis dışı kalma analizi

Şekil 4.2’de paralel işbirlikli iletim çöz ve aktar modeli için seri iletimde yaptığımız gibi, uçtan uca servis dışı kalma olasılığı gösterilmiştir. $N=1,2,3$ röle için servis dışı kalma olasılığı analitik sonuçlar sunulmuştur. Aynı zamanda ‘*Monte Carlo*’ simülasyon yöntemi kullanılarak $N=1,2,3$ röle için nümerik sonuçlar çizdirilmiş ve analitik sonuçları doğruladığı görülmüştür. 1 röle kullanılması durumunda paralel ve seri iletim modellerinde aynı eğriye ulaşılmıştır. Bu tek röle kullanılması halinde her iki durum için aynı uzaysal modelin oluşmasının doğal sebebidir. Bir kıyaslama yapılabilmesi için direk iletim analitik ve nümerik sonuçları aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Paralel işbirlikli iletim çöz ve aktar modeli için uçtan uca servis dışı kalma olasılığı, direk iletme göre önemli derecede azalmıştır. Özellikle, hedef servis dışı kalma olasılığı 10^{-6} için gözlemlenen kazançların direk iletme göre, bir röle kullanıldığında 18.5 dB, iki röle kullanıldığında 20.3 dB ve üç röle kullanıldığında 20.7 dB olduğu görülmüştür. Seri iletimde olduğu gibi, çeşitleme kazancı direk iletim servis dışı kalma eğrisinin eğimi ile paralel işbirlikli iletim eğrilerinin eğimi karşılaştırılarak görülebilir. Röle sayısı arttıkça servis dışı kalma eğrilerinin eğimi artmaktadır. Bu durum eklenen her rölenin çeşitleme kazancı sağladığını göstermektedir. Seri iletim sistem performansı $N=2,3$ durumu için paralel işbirlikli iletme göre daha yüksektir. Bunun temel nedeni seri iletimde log-genlik varyansının mesafesinin kısalması ile sağladığı kazanç, paralel işbirlikli iletimdeki çeşitleme kazancından daha fazla olmasıdır.

4.4 KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞMEDE RÖLE SEÇİMİ

Kablosuz optik haberleşmede paralel işbirlikli iletimin kazancını artırmanın bir diğer yolu röle seçimi uygulamaktır. İletim kanalları sabit bir kazanç değerine sahip değildir. Zaman içerisinde istatistiksel olarak belirli bir değişim içindedirler. Bu bölümde paralel işbirlikli iletimde röle seçimi uygularken röle-hedef kanalları arasında fiziksel katmanda en iyi SGO’na sahip kanalı bularak sadece o kanala ait röle ile kaynaktan gelen sinyali hedefe aktardık [30]. Bu seçim kriterini gözönüne alarak analitik yaklaşım geliştirdik ve bu analitik yaklaşımın bilgisayar benzetim yöntemi yardımı ile doğruluğunu kanıtladık.

4.4.1 Kablosuz Optik Haberleşmede Röle Seçimi İçin Analitik Yaklaşım

Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde paralel işbirlikli iletim modelinde uçtan uca servis dışı kalma olasılığı hesaplanırken, kaynaktan gönderilen sinyaller rölelerde kod

çözümü (decode) yapılırken servis dışı olmayanlar çözülmüş küme (decode set) D'yi oluşturur. D'yi oluşturan röleler kaynaktan gelen sinyali tekrar kodlayarak hedefe gönderir. Hedef gelen sinyalleri toplamsal olarak birleştirir ve kaynağın gönderdiği sinyale karar verir. Bölüm 3'te verilen kapalı form servis dışı kalma olasılığını tekrar yazacak olursak;

$$P_{out} = \sum_{i=1}^{2^N} \left(\prod_{j \in S(i)} \left(1 - Q \left(\frac{\ln(l_{0,j} P_M) + 2\mu_x(d_{0,j})}{2\sigma_x(d_{0,j})} \right) \right) \times \prod_{j \notin S(i)} Q \left(\frac{\ln(l_{0,j} P_M) + 2\mu_x(d_{0,j})}{2\sigma_x(d_{0,j})} \right) \right) Q \left(\frac{\ln(P_M / 2N) + \mu_\xi}{\sigma_\xi} \right)$$

Paralel işbirlikli model üzerine röle seçimi uyguladığımızda, röle-hedef kanalları arasından en iyi fiziksel katman SGO'na ait rölenin kaynak ile arasındaki kanalın SGO'nunu σ_{SRi} ve röle-hedef kanalları arasından en iyi fiziksel katman SGO'na sahip rölenin hedef ile arasındaki kanalın SGO'nunu σ_{RiD} olarak tanımlayalım. Benzer şekilde, paralel işbirlikli model üzerinde D kümesi oluşma ihtimalini $\Pr(C)$ ve D kümesi içerisinde röle-hedef kanalları arasından en iyi fiziksel katman SGO'na sahip kanala ait rölenin hedefe gönderdiği sinyalin servis dışı kalma olasılığını $\Pr(O|C)$ olarak tanımlayalım [29]. Bu durumda uçtan uca servis dışı kalma olasılığı, $\Pr(O)$ aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\Pr(O) = \Pr(C) * \Pr(O|C). \quad (4.1)$$

$$\Pr(C) = \sum_{|C|=1}^N \sum_{k=1}^{|C|} \binom{|C|}{k} \left[1 - Q \left(\frac{\ln(L.Pm/2) - 2\sigma_{SRi}}{2\sigma_{SRi}} \right) \right]^k \left[Q \left(\frac{\ln(L.Pm/2) - 2\sigma_{SRi}}{2\sigma_{SRi}} \right) \right]^{|C|-k} \quad (4.2)$$

$$\Pr(O|C) = \sum_{n=1}^{\binom{|C|}{k}} \prod_{j=1}^k Q \left(\frac{\ln(L.Pm/2) - 2\sigma_{knj}}{2\sigma_{knj}} \right) \quad (4.3)$$

N : röle sayısı, k,n,j sayaç

|C| : D kümesinin eleman sayısı

L : yol kaybı etkisi

P_m : servis dışı olma olasılığı için eşik güç değeri

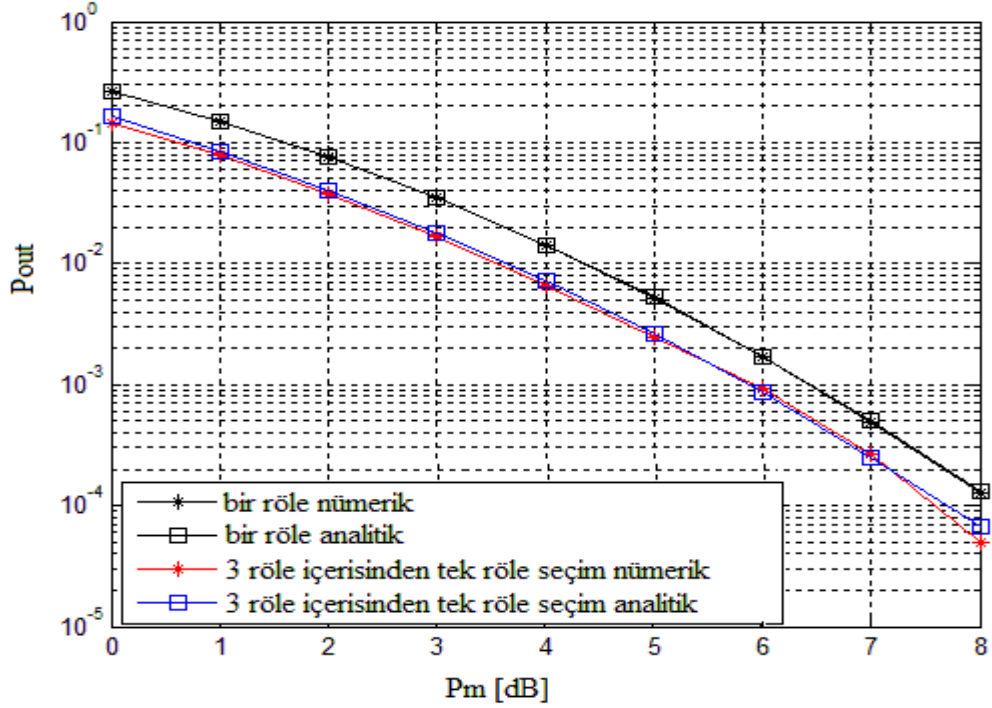
σ_{knj} : RiD kanalı için SGO'nı σ_{RiD} 'nin i birden N 'e kadar, D kümesi içinde olabileceği tüm kombinasyonları ifade etmektedir.

İfade (4.2) ve (4.3)'te verilen (4.1)'de yerine konulduğunda paralel işbirlikli model üzerinde röle seçimi için uçtan uca servis dışı kalma olasılığı, $\Pr(O)$ aşağıdaki gibidir;

$$\Pr(O) = \sum_{|C|=1}^N \sum_{k=1}^{|C|} \binom{|C|}{k} \sum_{n=1}^{\binom{|C|}{k}} \prod_{j=1}^k \left[1 - Q \left(\frac{\ln(L.P_m / 2) - 2\sigma_{SRi}}{2\sigma_{SRi}} \right) \right]^k \left[Q \left(\frac{\ln(L.P_m / 2) - 2\sigma_{SRi}}{2\sigma_{SRi}} \right) \right]^{|C|-k} Q \left(\frac{\ln(L.P_m / 2) - 2\sigma_{knj}}{2\sigma_{knj}} \right) \quad (4.4)$$

4.4.2 Kablosuz Optik Haberleşmede Röle Seçimi Başarım Sonuçları

Kablosuz optik haberleşme sisteminde paralel işbirlikli iletim modelinde röle seçimi uygularken, röle sayısı kadar Log-normal dağılıma sahip bağımsız ve özdeş dağılımlı,

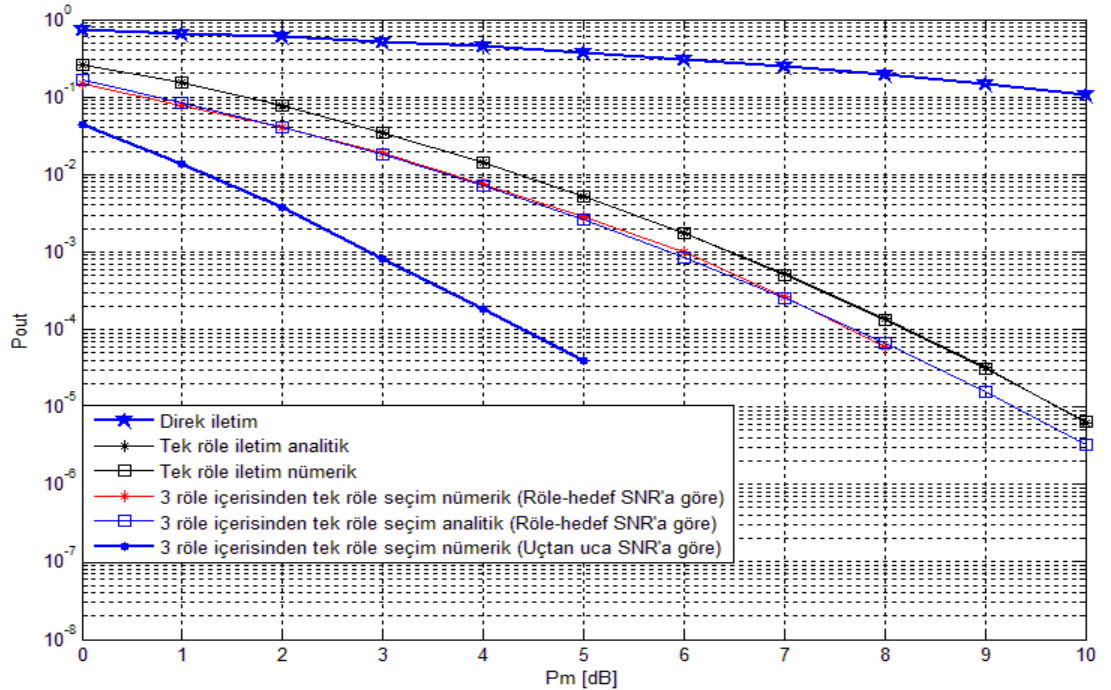


Şekil 4.3 Kablosuz optik haberleşmede tek röle seçimi servis dışı kalma analizi

ikili kanal çifti oluşturulur. Bu kanal çiftleri içerisinde röle-hedef fiziksel katman sinyal gürültü oranı en yüksek olan seçilir ve sadece o kanal çifti üzerinden iletim gerçekleştirilir. Bu iletim, kablosuz optik haberleşme kanalının sabit kabul edildiği 130 sembol boyunca devam eder. Her 130 sembolde bir röle seçim işlemi tekrarlanır.

Paralel işbirlikli iletim modelinde, tek röle ile iletim ve üç röle içerisinde yapılan röle seçimi servis dışı kalma eğrileri değerlendirildiğinde belirli bir kazanç sağlandığı görülmektedir. Fakat, bu seçim kriteri ile bir çeşitleme kazancı elde edilememiştir. Şekil 4.3'teki eğriler değerlendirildiğinde iki eğri arasında bir kayma olduğu ve eğrilerin eğimlerinin eşit olduğu açıkça görülmektedir. Bunun temel nedeni seçim kriteri olarak kabul edilen röle-hedef SGO'nı optimum bir kriter değildir. Kaynak-röle arasındaki kazançlarda uçtan uca servis dışı kalma olasılığını etkilemektedir. Bu noktadan yola çıkarak bir sonraki bölümde anlatılan, uçtan uca SGO'nı göz önünde bulundurarak yapılan röle seçim işlemi daha iyi bir performans sergilemekle birlikte aynı zamanda çeşitleme kazancıda sağlamaktadır.

4.4.3 Uçtan Uca SGO'nına Göre Röle Seçim Başarım Sonuçları



Şekil 4.4 Kablosuz optik haberleşmede uçtan uca SGO'nına göre tek röle seçimi servis dışı kalma analizi

Uçtan uca SGO'nu göz önünde bulundurarak yapılan röle seçim işlemi daha iyi bir performans sergilemekle birlikte, aynı zamanda çeşitleme kazancıda sağlamaktadır. Şekil 4.4'ten de açıkça görüldüğü gibi uçtan uca SGO'nu göz önüne alınarak elde edilmiş servis dışı kalma eğrisinin eğimi, diğer röle seçim ve tek röleli iletim servis dışı kalma eğrilerinin eğiminden fazladır. 10^{-3} servis dışı kalma olasılığını baz aldığımızda uçtan uca SGO'nu ile yapılan seçimin, röle-hedef SGO'nu ile yapılan seçime göre 3 dB kazanç sağladığı görülmektedir. Bu verilerden yola çıkarak, uçtan uca SGO'nu daha verimli bir röle seçim kriteri olarak göze çarpmaktadır. Uçtan uca SGO'nu röle seçim kriteri olarak uygulanırken aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır.

$$\sigma_i = \frac{\sigma_{SRi} * \sigma_{RID}}{1 + \sigma_{SRi} + \sigma_{RID}} \quad (4.5)$$

σ_i : uçtan uca SGO

σ_{SRi} : kaynak-röle kanalı SGO

σ_{RID} : röle-hedef kanalı SGO

Şekil 4.4'te direk iletim servis dışı kalma eğriside kıyaslama yapabilmek için çizdirilmiştir. Diğer eğrilerin bu eğriye göre eğimlerinin arttığı ve çeşitleme kazancı sağladıkları açıkça görülmektedir.

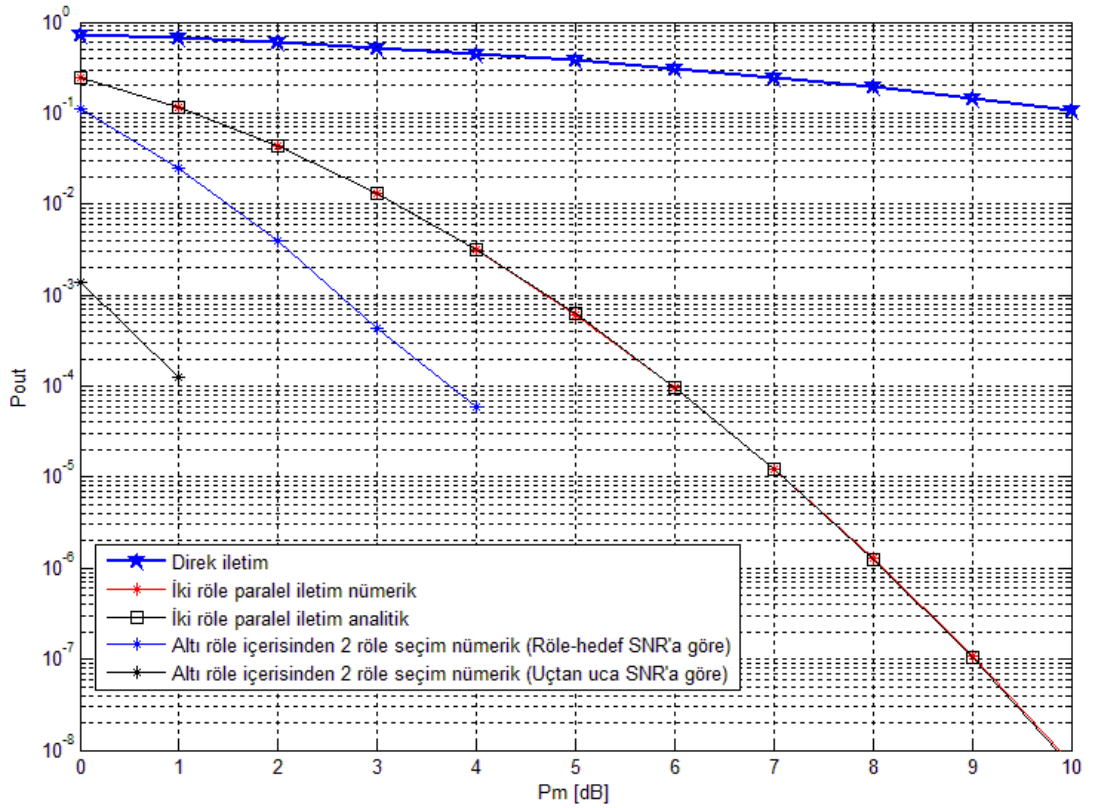
4.5 İKİLİ RÖLE SEÇİMİ BAŞARIM SONUÇLARI

Bu bölümde, paralel işbirlikli iletim modelinde, iki röle ile iletim ve altı röle içerisinde yapılan ikili röle seçimi servis dışı kalma olasılıkları bilgisayar benzetim metodu ile oluşturulmuştur. İki farklı seçim kriteri uygulanarak elde edilen servis dışı kalma eğrileri değerlendirildiğinde belirli kazançlar sağlandığı görülmektedir. Tek röle seçiminin yapıldığı durumdan farklı olarak ikili röle seçiminde röle-hedef kanalı fiziksel katman SGO'nu seçim kriteri olarak kullanıldığında belli bir çeşitleme kazancı elde edilmiştir. Şekil 4.5'teki eğriler değerlendirildiğinde altı röle içerisinde ikili röle seçim eğrisinin eğiminin, iki röle ile paralel iletim eğrisi eğimine göre arttığı görülmektedir. Bu noktada tek röle seçimi için optimum bir kriter olarak gözükmeyen röle-hedef kanalı

SGO'nı, seçilen röle sayısı artıkça çeşitleme kazancı sağlayarak daha verimli bir kriter haline gelmektedir.

Başarım sonuçlarını değerlendirecek olursak, servis dışı kalma olasılığı 10^{-3} düzeyi baz alındığında altı röle içerisinde röle-hedef kanalı SGO'nı kriteri ile ikili röle seçim eğrisinin, iki röle ile paralel iletim eğrisine göre 2 dB kazanç sağladığı görülmektedir.

Seçim kriteri değiştirilerek uçtan uca SGO'na göre yapılan altı röle içerisinde ikili röle seçiminde bu kazanç 5 dB değerine yükselmektedir.



Şekil 4.5 Kablosuz optik haberleşmede ikili röle seçimi servis dışı kalma analizi

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tezde ilk olarak, kablosuz optik haberleşme sisteminde seri röleli iletim ve paralel işbirlikli iletim modelleri incelenmiştir. Kablosuz optik haberleşmede Log-genlik varyansının mesafeye bağımlılığından kaynaklanan kazanç çok önemli bir yer tutmaktadır. Seri röleli iletim ve paralel işbirlikli iletim eğrileri karşılaştırıldığında bu kazancın önemi görmek mümkündür. Seri röleli iletim, eklenen her rölenin iletim mesafesini kısaltmasından dolayı, daha avantajlı görülmektedir. Paralel işbirlikli iletimde eklenen her röle kaynaktan hedefe bağımsız bir kanal oluşturmaktadır. Çeşitleme kazancı açısından bakıldığında, paralel işbirlikli iletimin, seri iletime göre daha fazla çeşitleme kazancı sağladığı görülmektedir.

Bu çalışmaları geliştirmek için röle seçim metodları önerilmiştir. Önerilen röle seçim metodlarının analitik yaklaşım ve bilgisayar benzetim metodu kullanılarak başarımları değerlendirildiğinde, kullanılan seçim kriterinin kazançları önemli derece etkilediği görülmüştür. Bütün önerilen seçim metodlarında paralel işbirlikli iletimin başarımlarının artırıldığı görülmüştür. Başarımlar çeşitleme kazancı açısından değerlendirildiğinde sadece röle-hedef kanalı SGO'na göre tek röle seçim iletim modelinde çeşitleme kazancı elde edilememiştir. Aynı modelde ikili röle seçimi uygulandığında çeşitleme kazancı sağlanmıştır.

Elde edilen başarımlarından, uçtan uca kaynak-röle ve röle-hedef kanalları boyunca SGO'nı en yüksek kanal çifti seçim kriteri olarak kullanıldığında röle-hedef kanalı SGO'nına göre yapılan seçimden daha iyi sonuçlar verdiği, açıkça görülmektedir. Bu performans iyileşmesi sistemin karmaşıklığını artıracak aynı zamanda kaynak, röleler ve hedef için sistemin genel kanal bilgisi gereksinimini doğuracaktır. Çünkü seçim kriteri sadece röle-hedef kanal bilgisi ile değil kaynak-röle ve röle-hedef kanal bilgilerini birlikte gerektirmektedir.

Röle seçim işlemi sistem karmaşıklığını artıran bir işlem olmasına karşın, elde edilen kazançlar gözönüne alındığında kablosuz optik haberleşme sistemlerinde kullanılabilir özelliğe sahiptir. Gerçek senaryolar göz önünde bulundurulduğunda, atmosferdeki hava olayları ve insanlardan kaynaklanan ısı değişimleri, (örneğin; bacalardan kaynaklanan yerel ısı değişimleri) sürekli değişen kanal yapılarını meydana getirir. Bu durumda röle seçim modeli önemli avantajlara sahip olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Bell A. G., 1880, "On the production and reproduction of sound by light," *American Journal of Sciences*, vol. Series 3, pp. 305 - 324.
- [2] Killinger D., 2002, "Free space optics for laser communication through the air," *Optics & Photonics News*, vol. 13, pp. 36 - 42.
- [3] Goodwin F. E., 1970, "A review of operational laser communication systems," *Proceedings of IEEE*, vol. 58, pp. 1746-1752.
- [4] Hemmati H., 2007, "Interplanetary laser communications," *Optics and Photonics News*, vol. 18, pp. 22-27.
- [5] Zoran S., Bernhard F., ve Hanspeter L., 2006, "Free-space laser communication activities in Europe: SILEX and beyond," *IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS) 19th Annual Meeting* pp. 78-79.
- [6] Kazaura K., Omae K., Suzuki T., Matsumoto M., Mutafungwa E., Murakami T., Takahashi K., Matsumoto H., Wakamori K., ve Arimoto Y., 2007, "Performance evaluation of next generation free-space optical communication system," *IEICE Transaction of Electronics*, vol. E90-C, pp. 381-388.
- [7] Bettayeb M. ve Shah S. F. A., 2003, "State of the art ultra-wideband technology for communication systems: a review," *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, (ICECS)*, vol. 3, pp. 1276 -1279.
- [8] Popoola W. O., 2009, "Subcarrier intensity modulated free-space optical communication systems," Thesis (PhD), Notrumbria University.
- [9] Kim I., 2009, "10 G FSO systems position technology for the future," *Lightwaveonline* pp. 19-21.
- [10] Willebrand H. ve Ghuman B. S., 2002, *Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in today's network*. Indianapolis: SAMS publishing, 0-672-32248.
- [11] Majumdar A. K. ve Ricklin J. C., 2008, *Free-Space Laser Communications: Principles and Advances*. New York: Springer, 978-0387286525.

- [12] Bouchet O., Sizun H., Boisrobert C., De Fornel F., ve Favennec P., 2006, *Free-Space Optics: Propagation and Communication*, London: ISTE, 978-1-905209-02-6.
- [13] Pratt W. K., 1969, *Laser Communication Systems*, 1st ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 978-0471696506.
- [14] Betti S., De marchis G., ve Iannone E., 1995, *Coherent Optical Communication Systems*, 1st ed. Canada: John Wiley and Sons Inc., 978-0471575122.
- [15] Bloom S., Korevaar E., Schuster J., and Willebrand H., 2003, "Understanding the performance of free-space optics," *Journal of Optical Networking*, vol. 2, pp. 178-200.
- [16] Hranilovic S., 2005, *Wireless Optical Communication Systems* vol. 1st. Boston: Springer, 0387227856.
- [17] Osche G. R., *Optical Detection Theory for Laser Applications*, 2002, New Jersey: Wiley, 978-0-471-22411-2.
- [18] Goodman J. W., *Statistical Optics*, 1985, New York: John Wiley, 0471399167.
- [19] Andrews L. C., Phillips R. L., ve Hopen C. Y., 2001, *Laser beam scintillation with applications*. Bellingham: SPIE, 978-0819441034.
- [20] Andrews L. C. ve Phillips R. L., 2005, *Laser beam propagation through random media*, second ed. Washington: SPIE Press, 978-0819459480.
- [21] Clifford S. F., Strohbehn J. W., 1978, *Laser Beam Propagation in the Atmosphere*, Springer-Verlag, 978-0819404879.
- [22] Karp S., Gagliardi R. M., Moran S. E., and Stotts L. B., 1988, *Optical Channels: fibers, clouds, water and the atmosphere*. New York: Plenum Press, 9780306426544.
- [23] A. Kolmogorov, S. K. Friedlander and L. Topper, 1961, "Turbulence," in *Classic Papers on Statistical Theory*, New York: Wiley-Interscience.
- [24] Strohbehn J. W. ve Clifford S. F., 1967, "Polarisation and angle of arrival fluctuations for a plane wave propagated through turbulent medium," *IEEE Transaction on Antennas Propagation*, vol. AP-15, p. 416.
- [25] Höhn D. H., 1969, "Depolarisation of laser beam at 6328 Angstrom due to atmospheric transmission," *Applied Optics*, vol. 8, p. 367.
- [26] Safari M. ve Uysal M., 2008, "Relay asissted Free Space Optical Communication", *IEEE Transaction on Wireless Communication*, vol. 7, no. 12, p. 5441-5449.

- [27] Laneman J. N., Tse D. N. C. ve Wornell G. W, 2004, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior", *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. 50, no. 12, p. 3062-3080.
- [28] Shapiro J. H., Strohbehn J. W., 1978, *Imaging and Optical Communication with Through Atmospheric Turbulence*, Berlin, Germany: Springer-Verlag, Volume 25, 171-222, doi: 10.1007/3540088121_20.
- [29] Michalopoulos D. S., ve Karagiannidis G. K., 2008, "Performance Analysis of Single Relay Selection in Rayleigh Fading", *IEEE Transaction on Wireless Communication*, vol. 7, no. 10, p. 3718-3724.
- [30] Bletsas A. ve Win M. Z., 2007, "Cooperative Communications with Outage-Optimal Opportunistic Relaying" *IEEE Transaction on Wireless Communication*, vol. 6, no. 9, p. 3450-3460.

ÖZGEÇMİŞ

Yasin Çelik 1985'te Ankara'da doğdu. İlkokulu Atatürk İlköğretim Okulun'da, orta okul ve liseyi Polatlı Anadolu Lisesi'nde okudu. 2002'de İstanbul Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde başladığı lisans öğrenimini 2006 yılında tamamladı. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine 2008 yılında başladı. Ağ teknolojileri ve telekomünikasyon alanlarında çeşitli firmalarda saha mühendisi olarak çalışmalarda bulundu. Halen, İstanbul Aydın Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi'nde uzman olarak görevini sürdürmektedir.