

767886

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK ANABİLİM DALI

ATMOSFERİN KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNE ETKİLERİ VE
ALINABİLECEK ÖNLEMLER



Sezai Alper TEKİN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Yusuf Erkan YENİCE

Temmuz 2005

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne:

Bu çalışma jürimiz tarafından ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Yahya BAYKAL (Çankaya Üniversitesi)

Üye : Yrd.Doç. Dr. Yusuf Erkan YENİCE (Niğde Üniversitesi, Danışman)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Halis ALTUN (Niğde Üniversitesi)

ONAY:

Bu tez 07 / 07 / 2005 tarihinde, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş
olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun
17.11/2005 tarih ve/15-26 sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

01.11/2005
Doç. Dr. Meysun İBRAHİM
Enstitü Müdürü

ÖZET

ATMOSFERİN KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNE ETKİLERİ VE ALINABİLECEK ÖNLEMLER

TEKİN, Sezai Alper
Niğde Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman : Yrd.Doç.Dr. Yusuf Erkan YENİCE

Temmuz 2005, 78 sayfa

Ses, metin ve görüntünün yer aldığı ortamlar arttığı için geniş bant iletişim ortamları gerekmektedir. Kablosuz optik haberleşme sisteminin yaygınlaşması, geniş bant iletişimi ihtiyacı için cazip bir seçenek olacaktır. Kablosuz optik haberleşmenin performansını etkileyen en büyük sorun atmosferin ışığın yayılımı üzerindeki etkileridir.

Bu çalışmada, diğer bir seçenek olabilecek, geniş bant erişim teknolojisi olan yerel çok noktalı dağıtım sistemi ile kablosuz optik haberleşme arasında karşılaştırma yapılmış ve kablosuz optik haberleşme sistemlerini meteorolojik bazı şartlarda yedeği olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir. Atmosferin etkilerine karşı alınabilecek iki önlem önerilmiştir. Pratik kullanım için ilk defa önerilen bu yöntemler, dalga boyu çeşitlemesi yöntemi ve uyarlanırlı görüş alanlı optik alıcıdır. Dalga boyu çeşitlemesi için, kuvvetli türbülans bölgesinde en uygun dalga boylarının bulunmasına çalışılmış ve en uygun dalga boylarının 0.8-3.8 μm olduğu görülmüştür. Uyarlanırlı görüş alanlı alıcı kullanılarak SNR'de iyileşme elde etmek için optimum görüş alanı elde edilmeye çalışılmıştır. Bu önlemlerin kablosuz optik haberleşme sisteminin performansını bazı şartlarda iyileştirdiği görülmüştür. Simülasyon için matlab programı kullanılmıştır.

Anahtar sözcükler: Atmosfer türbülansı, dalga boyu çeşitlemesi, görüş alanı, kablosuz optik haberleşme

SUMMARY

EFFECTS OF ATMOSPHERE ON OPTICAL WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS AND COUNTERMEASURES

TEKİN, Sezai Alper

Niğde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical-Electronics Engineering

Supervisor : Assist.Prof.Dr.Yusuf Erkan YENİCE

July 2005, 78 pages

Broadband communication media is necessary, because of widespread usage of environment including voice, text and image. Increasing usage of optical communication is an option for need of broadband communication. The most important problem affecting the performance of optical communication is the effect of atmosphere on the propagation of light.

In this thesis, optical communication and local multi-point distribution system, a broadband communication technology and can be used as another option, are compared. Based on this comparison, it is shown that local multi-point distribution system can be used as a replacement of optical communication under some meteorological circumstances. Two counter-measures are suggested for the effects of atmosphere. These two methods which haven't been used practically are spectral diversity and adaptive field of view optical receiver. In order to get most appropriate wavelength, study is done at strong turbulence zone and it is seen that wavelengths are 0.8-3.8 μm for spectral diversity. By using adaptive field of view optical receiver, optimum field of view can be obtained to get certain amount of increase in SNR. As a result, if these two methods are used, under some circumstances, performance of the optical communication gets higher. Matlab is used for simulation.

Keywords: Atmospheric turbulence, Spectral diversity, field of view, optical communication

TEŐEKKÖR

Bu araŐtırmayı yÖneten, yÖrÖtÖlÖŐü ve yazımı sırasında değerli katkılarını esirgemeyen ve alıŐmam sırasında bana bÖyÖk sabır gÖsteren danıŐmanım Yrd.Doç.Dr. Yusuf Erkan YENİCE'ye teŐekkÖr eder, Őukranlarımı sunarım

Sezai Alper TEKİN



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
SUMMARY	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGE VE KISALTMALAR	xi
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç ve Kapsam.....	1
1.2 Kablosuz Optik Haberleşmenin Tarihçesi	2
1.3 Kablosuz Optik Haberleşme Teknikleri	3
1.4 Kablosuz Optik Haberleşme Sistemlerinin Avantajları	4
1.5 Atmosfer Türbülansının Etkilerini Azaltmak için Yapılmış Çalışmalar	5
BÖLÜM 3. ATMOSFER TÜRBÜLANSI VE IŞIĞIN TÜRBÜLANSLI ATMOSFERDE YAYILIMI	8
2.1 Hava Sirkülasyonları ve Türbülansın Oluşmasındaki Etkenler.....	8
2.2 Mekanik Türbülans.....	9
2.3 Optik Dalgaboylarında Atmosferin Kırılma İndisi.....	10
2.4 Optik Türbülans.....	11
2.5 Yapı Fonsiyonu.....	12
2.6 Türbülansın Kolmogorov Teorisi.....	13
2.7 Türbülansın Modellenmesi.....	18
2.8 C_n^2 Modelleri.....	18
2.9 Deneysel SLC Modeli.....	20
2.10 Hufnagle-Valley Modeli.....	21
2.11 Faz Uyumluluk Ölçeği.....	21
2.12 Optik Işınlrın Atmosferde Yayılımı ve Türbülansın Etkisi.....	22
2.13 Born Yaklaşımı.....	23
2.14 Rytov Yaklaşımı.....	24
2.15 Parıldama(scintillation).....	25
2.16 Faz Bozulması.....	27
2.17 Hüzme Genişlemesi.....	28
2.18 Hüzme Gezinmesi.....	29
2.19 Varış Açısı Dalgalanmaları.....	30

BÖLÜM 3. LMDS ile KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	32
3.1. Kablosuz Haberleşme Sistemleri ve Diğer Geniş Bant Erişimi Teknolojileri.....	32
3.2 LMDS (Yerel Çok Noktalı Dağıtım Sistemi).....	33
3.3 LMDS ve Yağmurun Etkisi.....	34
3.3 Kablosuz Optik Haberleşme Sistemleri.....	35
2.3.1 Molekül Soğurumu Ve Rayleigh Saçılması.....	35
2.3.2 Atmosfer Türbülansının Etkileri.....	36
2.3.3 Bulanık Hava Etkileri....	36
3.4 Türkiye ve Dünyadaki Durum.....	37
2.5 Karşılaştırma.....	38
BÖLÜM 4. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE DALGA BOYU ÇEŞİTLEMESİ.....	41
4.1 Dalga Boyu Çeşitlemesi.....	41
4.2 Spektral kovaryans teorisi.....	42
4.3 Quantum Cascade Lazerler (QC).....	48
4.4 Dalga boyu seçimi.....	48
4.5 Uzaysal çeşitleme.....	50
4.6 Dalga Boyu Çeşitlemesi ile Uzaysal Çeşitlemenin Karşılaştırılması.....	51
BÖLÜM 5. KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE UYARLANIR GÖRÜŞ ALANI.....	58
5.1 Görüş Alanı(FOV).....	58
5.2 Uyarlanıır Optik Zum.....	59
5.3 Görüş Alanı ve Sis.....	60
5.4 Ayarlanabilir Odak Uzunluklu Mercekler.....	62
5.5 Görüş Alanı ve Türbülans.....	62
5.6 Faz Uyumluluk Ölçüsü İstatistikleri.....	67
5.7 Arka plan gürültüsü ve Görüş Alanı.....	69
5.8 Uyarlanıır Görüş Alanı.....	70
5.9 Arkaplan Işımasına Göre Optimum FOV ve Maksimum Snr İçin FOV Karşılaştırması.....	73
BÖLÜM 6.TARTIŞMA VE SONUÇ	76
KAYNAKLAR	79
EKLER	84

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.2 SLC modeli.....	20
Tablo 3.1 Bazı şirketlerin ürünlerine ilişkin özet bilgiler.....	38
Tablo 3.2 KOH ve LMDS karşılaştırılması.....	39
Tablo 4.1 Uzaysal kovaryansın parametreleri.....	52
Tablo 4.2 Uzaysal çeşitleme ile parıldama için iyileşme.....	57



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Kolmogorov kaskat teorisiyle türbülansın gösterimi.....	13
Şekil 2.2 Tatarski ve Hill spektrumları.....	16
Şekil 2.3 Düzeltilmiş Hill ve Von Karman spektrumları.....	17
Şekil 2.5 Belirli bir bölgede ölçülmüş C_n^{-2} değerleri.....	19
Şekil 2.6 Kırılma indisi dalgalanmalarının sonucu oluşan düzlemsel dalgada ki bozulmanın sembolik gösterimi	22
Şekil 2.7 Rasgele ortam için saçılmanın tanımlanması.....	23
Şekil 2.8 Çevri boyutunun parıldama etkisindeki rolünün geometrik gösterimi.....	26
Şekil 2.9 Parıldama varyansının yayılım mesafesine göre değişimi.....	27
Şekil 2.10 Lazer ışığına farklı zamanlarda türbülanslı atmosferin etkileri.....	29
Şekil 2.11 Alıcı düzlemde hüzmeye gezinmesi ve geliş açısı dalgalanmaları.....	31
Şekil 3.1 Yağmur şiddetine göre birim mesafedeki zayıflama.....	34
Şekil 3.2 Atmosferin ışığı çok az kayıpla geçirdiği pencereleri.....	36
Şekil 4.1 Dalga boyu çeşitlemesi.....	42
Şekil 4.2 Zayıf türbülans teorisi ve deneysel değerler.....	43
Şekil 4.3 Spektral korelasyon katsayısının türbülans şiddetine göre değişimi (0.8 μ m-1.55 μ m).....	47
Şekil 4.4 Spektral korelasyon katsayısının türbülans şiddetine göre değişimi (0.8 μ m-3.6 μ m).....	47
Şekil 4.5 Kırınım Sınırı.....	49
Şekil 4.6 Alıcı için uzaysal çeşitleme.....	50
Şekil 4.7 Yanal mesafe ile korelasyon katsayısının arasındaki ilişki.....	51
Şekil 4.8 Hüzmeye genişlemenin geometrik gösterimi.....	53
Şekil 4.9 Işık şiddeti oranının yanal mesafeye göre değişimi.....	54
Şekil 4.10 Alıcı düzlemde ıraksama açısı 50 μ rad için hüzmeye durumu.....	55

Şekil 4.11 Alıcı düzlemde iraksama açısı 100 µrad için hüzmelin durumu.....	55
Şekil 4.12 Çok verici kullanılarak yapılan uzaysal çeşitlemenin parıldama varyansına etkisi.....	56
Şekil 5.1 Optik alıcı.....	58
Şekil 5.2 Doğrultu hatası mevcutken çoklu saçılma ortamında ışığın davranışının sematik gösterimi.....	61
Şekil 5.3 Türbülans olmadığında ortalama alınan güç.....	64
Şekil 5.4 Görüş alanının fonksiyonu olarak normalize edilmiş alınan ortalama güç... ..	65
Şekil 5.5 Türbülans şiddetinin fonksiyonu olarak optimum FOV.....	66
Şekil 5.6 Standart beta dağılımı($p=q=2$).....	68
Şekil 5.7 FOV'un fonksiyonu olarak SNR değişimi.....	70
Şekil 5.8 Sabit FOV için SNR.....	71
Şekil 5.9 Uyarlanırlı FOV kullanıldığında SNR.....	72
Şekil 5.10 Uyarlanırlı FOV alıcının sabit FOV alıcıya göre SNR'de sağladığı yüzde olarak iyileşme.....	72
Şekil 5.11 Arkaplan ışımalarının değişimine göre optimum FOV ile SNR maksimum değeri için FOV arasındaki ilişki.....	74
Şekil 5.12 Arkaplan ışımalarının değişimine göre optimum FOV için SNR ile SNR maksimum değeri arasındaki ilişki.....	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

KOH	: Kablosuz Optik Haberleşme
A	: Özgül zayıflama (dB/km)
F	: frekans (Hz)
R_c	: Reynold sayısı
R_i	: Richardson sayısı
T	: Sıcaklık($^{\circ}$ K)
C_n^2	: Kırılma indisi yapı sabiti($m^{-2/3}$)
P	: Basınç (milibar)
L_0	: Dış ölçek (m)
l_0	: İç ölçek (m)
κ	: Uzaysal dalga sayısı
L	: Yayılım mesafesi
ρ_0	: Faz uyumluluk ölçeği(m)
σ_i^2	: Parıldama varyansı
ρ_s^2	: Hüzme genişlemesi
k	: Optik dalga sayısı
ρ_w^2	: Hüzme gezinmesi
α^2	: Varış açısı dalgalanması
R	: Korelasyon katsayısı
I	: Işık şiddeti
FOV	: Görüş alanı
v	: Dedektör düzlemindeki normalize koordinat
θ	: Açısal görüş alanı
LMDS	: Yerel çok noktalı dağıtım sistemi
QC	: Quantum cascade lazer

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Amaç ve Kapsam

Ses, metin ve görüntünün birlikte yer aldığı çoklu ortam uygulamaları, geniş bantlı iletişim ortamları gerektirmektedir. Bu tür uygulamaların yaygınlaşması ve çeşitlenmesi bant genişliği ihtiyacının daha da arttırmaktadır. Özellikle, internetin yaygınlaşması bant genişliği ihtiyacını oldukça arttırmıştır. Sorunun nihai çözümü muazzam bir bant genişliği potansiyeline sahip olan optik haberleşme şebekelerinin tüm kullanıcılara erişecek şekilde genişletilmesidir. Bu çözümün önündeki en büyük engellerden birisi son kullanıcıların bulunduğu uç noktaya kadar fiber optik kablo döşenmesinin genellikle çok pahalı ve bazı durumlarda da bunun çeşitli sebeplerle (örneğin arkeolojik sit alanında kazıya izin verilmemesi) mümkün olmamasıdır. Bu nedenle kablosuz optik haberleşme şebekeleri bu uygulamalar için önemli bir seçenek olacaktır.

Kablosuz optik haberleşme sistemlerde performansı etkileyen en önemli etken, atmosferin ışın yayılımı üzerine etkileridir. Bu etkiler, bulanık hava etkileri yani görüş mesafesinin düştüğü sis, pus, kar, yağmur gibi meteorolojik olaylar ile atmosferde duman veya çeşitli parçacıkların bulunduğu durumlar ve açık hava etkileri, yani molekül soğurumu ve Rayleigh saçılması ile türbülansın etkileridir. Bu etkilerin en önemlisi atmosferdeki türbülansdır. Türbülans sıcaklık gradyanına sahip hava bloklarını parçalayıp karıştırarak, sıcaklığın (dolayısıyla kırılma indisinin) konuma ve zamana göre kaotik bir şekilde değiştiği bir ortam oluşturur. Bu ortamın, çevri adı verilen, kırılma indisinin kendi içinde sabit olduğu, her yöne rastgele hareket eden çeşitli büyüklüklerdeki parçalardan oluştuğu varsayılır. Işığın hüzmeye çapından büyük çevrilerin hüzmeyi bir bütün olarak rastgele saptırması hüzmeye gezinmesi ve geliş açısı dalgalanmasına sebep olur. Hüzmeye çapına yakın boyutlardaki çevriler, hüzmeyi tamamı veya bir kısmını odaklayan veya iraksatan mercekler gibi davranarak, hüzmeye yayıldıkça hüzmeye kesitinde yapıcı ve yıkıcı girişime yol açar ve buna parıldama denir. Küçük çevriler hüzmeyi küçük parçalarını birbirinden bağımsız olarak kırılma ve saçılmaya uğratarak hüzmeye genişlemesine ve dalga cephesinin fazının bozulmasına

sebeplerdir. Bu çalışma, bahsedilen etkilerin azaltılması için çeşitli öneriler getirilen bir çalışmadır.

Birinci bölümde, kablosuz optik haberleşme sistemlerinin neden gerekli olduğu ve bu çalışmanın niçin yapıldığı açıklanmıştır. Atmosferin kablosuz optik haberleşme sistemlerine etkilerinden bahsedilmiş ve temel olarak yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

İkinci bölümde, Atmosferdeki türbülans ve ışığın yayılımında en büyük etkiyi meydana getiren türbülansın nasıl etkileri olduğu konusuna değinilmiştir.

Üçüncü bölümde, birbirlerini tamamlayıcı olarak kullanılabilen durumları belirlemek için, kablosuz optik haberleşme sistemi, bir başka geniş bant haberleşme sistemi olan çok noktalı dağıtım sistemi ile propagasyon konusuna ağırlık verilerek karşılaştırılmıştır. Sis ve türbülans etkisinin, kablosuz optik haberleşmenin hangi şartlarda yedek sistem ile desteklenebileceği konusuna değinilmiş ve kablosuz optik haberleşme sistemindeki etkilerin belirli şartlar altında bertaraf edilmesi amaçlanmıştır.

Dördüncü bölümde, pratik olarak kullanılabilen ilk defa bu çalışmada önerilen, dalga çeşitlemesi yönteminin kablosuz optik haberleşme sistemlerinde parıldamanın etkisinin azaltılmasında hangi şartlarda performansı artıracak konusuna değinilmiş ve diğer bir çeşitleme yöntemi olan uzaysal çeşitleme ile karşılaştırılmıştır. Farklı iki dalga boyunda lazer kullanılarak çeşitleme yapılması ile korelasyon katsayısının düşürülmesi ile parıldama etkisinin azaltılması amaçlanmıştır.

Beşinci bölümde uyarlanabilir görüş alanı yöntemi ile optik alıcının maksimum gücü alırken sinyal gürültü oranının maksimum olması için gereken optimum görüş alanı belirlenmeye çalışılmıştır.

Altıncı bölümde ise, elde edilen sonuçlardan bahsedilmiştir.

1.2 Kablosuz Optik Haberleşmenin Tarihçesi

Kablosuz optik haberleşme sistemleri, Başkan Reagan zamanında başlatılan "Yıldız Savaşları" projesi ile başlatılmış ve gelişmiştir. Kablosuz optik haberleşme düşüncesi 1880'de Graham Bell'in başlattığı çoklu uçtan çoklu uca erişim teknolojisi, 1960'larda geliştirildi. 1980'de askeri amaçlı uygulamalara geçildi. Askeri amaçlarla kullanıldıktan sonra üniversite kampüslerinde yerel ağ (LAN) ve internet erişiminin

optimum maliyetlerle iyileştirilmesi amaçları ile kullanılmaya başlanmıştır. 1996 yılında ticari amaçla kullanılmak üzere piyasaya sürülmesi ile beraber başta British Telecom olmak üzere pek çok telekomünikasyon ve bilişim kurumu tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknolojinin 2004 başı itibarıyla, dünyada 8000'in üzerinde, Türkiye'de de 70-80 civarında uygulaması vardır [1].

1.3 Kablosuz Optik Haberleşme Teknikleri

KOH sistemleri birbirini gören iki noktaya yerleştirilen KOH cihazları ile lazer ışınlarını kullanarak kablosuz veri transferi sağlar. Açık kapalı anahtarlama (OOK) şeklinde veya şiddet modülasyon ve alıcı tarafında doğrudan algılama (IM/DD) olarak tanımlanan teknik kullanılır. Kablosuz haberleşme sistemleri, fiber kablolu ile ulaşılabilen gigabit mertebesinde bant genişliklerine kablosuz ulaşabilmenin tek yoludur. Dalga boyu 800-1550 nm olan lazer ışığı kullanılarak ve noktadan noktaya veri iletişimi sağlarlar

KOH sistemlerde kullanılan frekans spektrumu içerisinde ışığı gönderen ve karşıdan gelen ışığı almaya yarayan, cihazdan karşıdaki diğer cihaza gözle görülemeyen ve aynı zamanda göze zarar vermeyen düşük enerjili kızıl ötesi ışık hüzmesi yollandığıdır. KOH sistemlerinde gönderilen hüzme diğer taraftan son derece hassas dedektörler tarafından karşılanmaktadır. Bu hassas alıcılar mercekler sayesinde gönderilen sinyali toplamaktadır. Ticari olarak şu anda 10 Mbps'ten 2,5 Gbps'e kadar farklı kapasitelerde çalışmasına karşın şu andaki teknoloji ile 160 Gbps gibi yüksek hızlara çıkabileceği öngörülmektedir[2].

KOH sistemlerde performansı etkileyen en önemli husus, ışığın yayılımı üzerinde atmosferin etkileridir. Bu etkilerden en önemlisi atmosferdeki türbülansdır. Türbülanslı atmosferin kablosuz optik haberleşme sisteminin performansına etkilerini en aza indirmek için alınabilecek önlemler iki gruba ayrılabilir. Birinci grup, elektronik sinyal bir ışık kaynağı tarafından optik sinyale dönüştürülmeden önce ve optik sinyalin optik dedektör tarafından elektronik bir sinyale dönüştürülmesinden sonra uygulanabilecek sinyal işleme ve kodlama yöntemleridir. Optik sistem konfigürasyonu tasarlanırken alınabilecek önlemler de mevcuttur. Önerilen çözümler arasında, birden fazla alıcı veya verici kullanarak uzaysal çeşitlemenin sağlanması, gönderilen ışığın şiddet profiline değiştirilmesi (hüzme şekillendirmesi), uyarlanabilir optik tekniklerinin

kullanılması, gönderilen ışığın hüzme genişliğinin türbülansın şiddetine göre ayarlanması, gönderilen ışığın faz uyumluluğunun kısmen bozulması sayılabilir. Farklı dalga boyunda ışık gönderilerek dalga boyu çeşitlemesinin sağlanması gibi önlemler mevcuttur.

1.4 Kablosuz Optik Haberleşme Sistemlerinin Avantajları

KOH sistemlerinin diğer haberleşme sistemlerinin üstünlük sağladığı durumlar mevcuttur. Örneğin KOH sistemleri alternatif sistemlere göre daha hafif olduğu, daha az yer kapladığı ve daha az enerji harcadığı için uydu haberleşme sistemlerinde tercih edilir. Deniz suyu çok düşük frekanslar haricinde tüm radyo frekans sinyallerini zayıflattığı için, denizaltı haberleşme sistemlerinde radyo frekans sinyalleri kullanılamamaktadır. Yeşil-mavi optik ışınlar deniz suyunda fazla zayıflamadığı için bu sorunun potansiyel çözümü olarak görülmekte ve üzerinde çalışılmaktadır. KOH sistemlerin askeri açıdan üstünlükleri ise, optik ışınların radyo frekans sinyalleri gibi çok geniş bir bölgeye yayılmaması ve dolayısıyla istenmeyen kişilerin sinyalleri elde etme olasılığının çok çok düşük, neredeyse imkansız olması, kolay taşınabilir ve büyük bir süratle kurulabilir olmasıdır. Radyo frekansı kullanmadığı için ITU (International Telecom Union) standartlarında lisansa tabi değildir. Bu yüzden bürokratik işlemlere de tabii değildir. Radyo frekansı kullanmak suretiyle çalışan diğer kablosuz teknolojilerin etkilendiği dış etkenlerden daha az etkilenirler (Yağmur, kar, frekans kirliliği). Yine radyo frekansı kullanmadığı için çok daha güvenlidir. Çünkü noktadan noktaya (point-to-point) veri transferi sağlar. Kablolama ile ulaşılabilen bant genişliklerini sağlamak için gerek zaman gerekse maliyet açısından büyük avantajlar sağlayabilir. Tüm bu etkenler göz önünde bulundurulduğunda KOH sistemleri bugüne kadar gerek frekans kirliliği gerekse güvenlik, bant genişliği nedenleriyle kablosuz çözüm uygulanamayan projelerin tekrar hayata geçmesini sağlamaktadır. Özet olarak, uzun vadede çeşitli teknolojik ve ekonomik sorunların çözülmesiyle haberleşme sistemlerinin tümünün optik olacağı, KOH sistemlerin bunun ayrılmaz bir parçası olacağı tahmin edilmektedir [1], [2].

Buradan kablosuz optik haberleşme sistemlerinin temel avantajları özetlenebilir. Birkaç kilometreye kadar kurulabilir. Yüksek bant genişliği sağlar. Frekans planlama ve lisans gerektirmez. Hızlı bir şekilde kurulabilir, bu nedenle geçici ve mobil bağlantılarda kullanılması cazip durumdadır. Zamanla artacak ihtiyaçları karşılayabilme

olanağı sağlar. Hassas ve gizli bilgilerin başkaları tarafından alınmamasını sağlar ve bilgi güvenliği üst seviyededir. Manyetik kirlilik KOH sistemler için bir sorun teşkil etmez. Ayrıca haberleşme için kullanılan dalga boylarında insan sağlığı için hiçbir zararlı etkisi yoktur

1.5 Atmosfer Türbülansının Etkilerini Azaltmak İçin Yapılmış Çalışmalar

Kablosuz optik haberleşme sistemlerdeki, atmosfer türbülansın etkilerinin azaltılması konusunda bir çok çalışma mevcuttur. Esasen bu çalışmaların temel olanlarını almak, bu çalışmanın kapsamına uygun olacaktır.

Bu çalışmalardan bir tanesi açıklık ortalaması olarak bilinen metottur. Alıcıda ışığın toplanmasını sağlayan mercekle açıklığının boyutunun artmasına göre alınan ışık miktarının artırılabilceği durum olarak tanımlanabilir. Bu etkide, mercekle açıklığına göre merceğe gelen ışık şiddeti dalgalanmasının ortalaması alınır. Alıcının açıklık ortalaması katsayısı alıcı açıklığı veya mercekle çapı ile alıcıya gelen ışığın şiddet dalgalanmalarının oranı olarak tanımlanabilir. Burada çeşitli yaklaşımlar ve metotlar kullanılarak ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak çeşitli koşullara göre parıldamanın etkisinin azaltılabileceği konusunda araştırmalar yapılmıştır [3].

Diğer bir çalışmada görüntülemesiz optik tekniği kullanılmıştır. Burada kablolu optik haberleşme sistemlerindeki fiber optik malzemedeki dielektrik materyal kullanılarak ışığın parabolik bir kılavuz tarafından alınarak alıcıya gelmesi sağlanmış ve hüzme gezinmesinin etkisini azaltmak için bir önlem olarak önerilmiştir. Ayrıca bit hata oranında (BER) iyileşme olduğu ifade edilmiştir. [3].

Optik dizi alıcı kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Standart optik alıcıda, tek alıcı açıklığından sinyal enerjisi dedektör üzerine odaklanır. Optik dizi alıcıda bir çok ışığı kısım kısım odaklayarak, ayrı ayrı dedektörlere gönderilir. Buradan üretilen elektriksel sinyaller karar verme ve istatistik metotları kullanılarak, atmosferin etkilerini azaltmak için önerilmiş bir yöntemdir. Burada, arkaplan ışımalarının etkilerinin azaltmak için görüş alanının kırınım sınırlı ışık hüzmesi için ayarlanması gerektiği ve alıcı açıklığındaki kısmi ışığın odaklanmasını sağlayacak açıklığın faz uyumluluk yarı çapından büyük olması gerektiği ifade edilmiştir [4].

Hüzme şekillendirmesi de önerilen yöntemlerden bir tanesidir. Burada hüzmenin şiddet profili değiştirilerek türbülansa etkilerini azalmada etkili olup olmayacağı araştırılmıştır. Yapılan çalışmalardan biri, bir Gauss hüzmesi ile daha küçük bir Gauss hüzmesinden çıkararak elde edilen ışığın şiddet profilinin atmosfer türbülansa etkisinin azaltmada yararlı olup olmayacağını araştırmışlar. Hüzme şekillendirilmesi kullanılarak oluşturulan şiddet profilili ışık; atmosfer türbülansından dolayı, ışık şiddetinin serbest uzay kaybı nedeniyle azalmasından, daha fazla bir zayıflama olduğu görülmüş, parıldama etkisinin ise belirli nispette azaltılabildiği görülmüştür [5].

En çok kullanılan yöntemlerden bir tanesi de uyarlanırlık optik teknikleridir. Uyarlanırlık optik atmosfer türbülansının bulunduğu ortamda optik haberleşme açısından gelişmeler sağlamıştır. Temel uyarlanırlık optik sistem, dalga cephesi sensörü, biçim değiştirebilen aynalar veya hareketli aynalar ve kontrol ünitesinden oluşur. Kontrol ünitesi dalga cephesi sensöründen gelen verilere göre karar vererek biçim değiştiren veya hareketli aynaların durumunu belirler [6].

Uyarlanırlık optik sistemlerinde genellikle, faz eşleniği prensibi kullanılır. Işık hüzmesinin hem genliği hem de fazı matematiksel olarak elektrik alanına göre tanımlanır. Uyarlanırlık optik, hüzmenin fazını bozarak faz bozulmasını karşılamayı amaçlar. Bu fazı bozma işlemi, fazın eşleniğinin alınmasıyla yapılır. Sadece bozulmuş fazı karşılamak düzeltmek gereklidir [6].

Uyarlanırlık optik sisteminin telafi sınırları vardır. Esasen uyarlanırlık optik sistemlerin atmosfer için telafisi mükemmel değil, hatta mükemmellikten çok uzaktır. Biçim değiştiren aynaların performansı ile sınırlıdır. Bant genişliği ve biçim değiştiren aynaların oluşturacağı eğim uyarlanırlık optik sistemlerin sınırları belirleyen etkenlerdendir. Ayrıca dalga cephesi sensörlerdeki gürültüde etken olabilir. Ancak bu gürültü ihmal edilebilecek düzeydedir [6].

Diğer bir önlem ise uyarlanırlık hüzme boyutudur. Hüzme genişliği ile atmosferdeki türbülansı ile ilgili olarak çevri boyutu ile ilişkilendirebilir. Hüzme genişliğinden büyük çevriler hüzmenin gelişi güzel hareket etmesine sebep olacaktır. Hüzme ile aynı boydaki çevriler hüzmede yapıcı ve yıkıcı etkilerinden dolayı şiddet dalgalanmalarına sebep olacaktır. Hüzme genişliğinden küçük çevriler ise hüzmenin kısım kısım saçılmasına neden olacağından hüzmenin genişlemesine imkan verecektir.

Yapılan diğer bir çalışmada ilk olarak hüzme genişlemesi ve hüzme genişliği ilişkisi incelenmiş ve hüzme genişliğinin faz uyumluluk yarı çapına oranının artması ile hüzme genişlemesinde bir artış olduğu belirli bir hüzme genişliği faz uyumluluk yarı çapı oranından sonra genişlemenin çok daha hızlı bir şekilde arttığı görülmüş ve hüzme genişlemesini minimum tutmak için hüzme çapının faz uyumluluk ölçüsünden küçük olması gerektiği kanaatine varılmıştır. Sonsuz bir dış ölçek değerinde hüzme gezinmesi hüzme boyutundan etkilenmez. Fakat dış ölçek değerleri sonlu bir değer ise o zaman özellikle yerden uyduya kablosuz optik haberleşme sistemlerinde önem arz eder. Parıldama varyansında hüzme çapı ile ilişkilidir. Bu yüzden bu etkilerin hepsini düşük seviyede tutulabileceği optimum bir değer bulunmalıdır. Bunun için türbülansın istatistik olarak değerlendirilmesi yapıp optimum hüzme boyutu belirlenmeye çalışılmıştır [7].



BÖLÜM 2

ATMOSFER TÜRBÜLANSI VE IŞIĞIN TÜRBÜLANSLI ATMOSFERDE YAYILIMI

Kablosuz optik haberleşme sistemlerine en büyük etki atmosfer türbülansının etkileridir. Bu bölümde türbülansın meydana geliş sebepleri ve atmosfer türbülansının oluşmasındaki şartlar açıklanmıştır. Türbülansın modellenmesi hakkında bilgi verilmiştir. Türbülanslı atmosferin ışığın yayılımında ne şekilde etkiler oluşturduğu açıklanmış ve bu etkiler izah edilmiştir. Ayrıca ışığın dalga denklemi için kullanılan yaklaşımlar hakkında bilgi verilmiştir. Atmosferin türbülans dışındaki diğer etkilerine üçüncü bölüm değinilecektir.

2.1 Hava Sirkülasyonları ve Türbülansın Oluşmasındaki Etkenler

Kütlesel hava hareketleri olan atmosfer sirkülasyonları, gözlemlenen rüzgar sistemleri ile bunların yıl boyunca veya mevsimsel olarak meydana gelen değişimlerinden oluşur. İklim kuşakları bu şekilde ortaya çıkar.

Kütlesel sirkülasyonlar iki nedenle oluşurlar. Bunlar, dünya üzerindeki radyasyonun farklı dağılımı ve küresel dönme hareketidir. Bunlardan radyasyon dağılımı sirkülasyonun meydana gelmesine, dünyanın dönmesi ise sirkülasyonun biçiminin belirlenmesine yol açmaktadır. Kütlesel hava sirkülasyonu ekvatora yakın yerlerde ona yönelen doğulu, ılıman bölgelerde ise kutuplara doğru yönelen batılı karakterdedirler. Bu sirkülasyonların yön ve şiddetleri yerel topografya, basınç merkezlerinin konumu ve deniz-kara ilişkisi ile büyük ölçüde değişiklik göstermektedir.

Dünyaya giren ve çıkan enerji miktarlarının eşit olmasına karşın, yerel olarak ekvator bölgesinde uzaya geri verildiğinden fazla enerji soğurulmakta, kutuplarda ise aksine güneşten gelenden fazla enerji uzaya salınmaktadır. Dünyanın yüzeyindeki bu enerji dengesizlikleri atmosferdeki havanın ısıtılması ve soğutulması yoluyla ortadan kaldırılır. Böylece enlem kuşaklarını dik olarak kat eden ve sıcak havanın yükselerek soğuk bölgeye doğru ısıtma etkisi yapmak suretiyle alçalan bir sirkülasyon meydana gelir. Eğer dünya dönmeseydi yükseklerde ekvator-kutup, alçalarda kutup-ekvator yönlü rüzgarlar egemen olacaktı ve bunlar enlemlere dik olacaktı. Ama Dünya döndüğü

ve üstelik yeryüzü çok sayıda topografik pürüzlülükler ve deniz-kara etkileri içerdiği içindir ki, kutuplarla ekvator arasındaki enerji aktarımı böyle tek bir sirkülasyonla karşılanmamakta, hücrelere bölünmektedir. Bu bölünme kuzey-güney ekseninde olup üç adet hücreden meydana gelmektedir. Dünya'nın dönmesine bağlı olan çarpıtma kuvveti, hava kütlelerini batıdan doğuya doğru savurmaktadır.

Türbülans iki nedenle ortaya çıkar: (1) büyük ölçekli rüzgarların hız ve yön değiştirmeleri sırasında, (2) ısı konveksiyonları nedeniyle, ki bunlar alttan ısınma yada üstten soğuma sırasında görülen konvektif çevrintiler olabilir [8].

Rüzgarlı bir günde yer seviyesinde daima az veya çok türbülans ortaya çıkar. Bunun nedeni pürüzlü zeminde rüzgara olan yer direncinin karşılığı olan ters kesme kuvvetinin ortaya çıkmasıdır. Bu kuvvet yer ne kadar pürüzlü ise ve rüzgar ne kadar şiddetli ise o kadar güçlüdür. Güneş ışınlarının bulunduğu gündüz saatlerinde bu mekanik nedenlere dayalı türbülanslar da güçlü olmakta, geceleri ise genellikle gücünü kaybetmektedir. Yerden 10 km kadar yükseklerde özellikle dağlık bölgelerde açık havada gözlenen türbülanslarda rüzgar hızının düşey ekseninde değişimi birkaç yüz metre içinde son derece güçlü olabilmektedir. Normal meteoroloji istasyonlarının kolay kolay göremeyeceği kadar çok ince bir tabaka olmasına rağmen, güçlü türbülanslara bu gibi yerlerde her zaman rastlanabilir.

Türbülans havanın kaotik hareketini sağlayan temel nedendir. Nem, momentum ve ısı değişimlerini sadece türbülans sağlar diyebiliriz. Türbülansın oluşturduğu ısı gradyanları kırılma indisi farklılığında dalgalanmalar oluşturmakta çok etkili olur. Bu durum kablosuz optik haberleşme sistemlerinde performansı etkileyen en önemli unsurdur.

2.2 Mekanik Türbülans

Akışkanlar mekaniğinde, türbülans bir akış tipidir. Viskoz akışkanın akışı Reynolds sayısı ile karakterize edilmiştir. Reynolds sayısı ;

$$R_e = \frac{v.L}{\nu_k} \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada v akışkanın karakteristik hız değeri L karakteristik uzunluk ve ν_k ise kinematik viskozitedir. Her akışkanın kendine has viskozite değeri vardır. Reynolds sayısının kritik bir değerinden sonra laminar akıştan, kaotik bir akışa doğru değişim göstermeye başlar. Bu durum türbülansın oluşmasına sebep olur. Akışkan içindeki farklı kuvvetlerinde etkisiyle, hareket eden akışkan ve akışkanın kendi sınırları arasındaki sürtünmeden dolayı türbülans kısmen ortaya çıkar. Bu durum bölgesel hızların oluşmasına, vektörel hızları farklı bölgelerin kaotik olarak hareket etmesine neden olur. Bu değişim girdap biçiminde artar. Bu girdabın sonucu olarak, akışkanın diğer karakteristikleri karışır.

Atmosferde reynolds sayısı tipik değerlerin çok üstündedir. Bu nedenle atmosfer her zaman türbülanslıdır. Atmosfer gündüzleri yerden 1 km'e kadar, geceleri 100m'ye kadar ve okyanus üzerinde birkaç yüz metre kadar türbülanslıdır. Daha uzun mesafelerde, rüzgarın hızı ve yönündeki değişimlerin etkisiyle türbülans katmanlar halinde meydana gelmektedir. Rüzgarla birlikte türbülans değişimi atmosferin karışmasına ve içindeki molekül, sıcaklık, su buharı miktarını değişimine sebep olur. Bu değişim dalga propagasyonu ile ilgili kırılma indisini etkiler. Türbülans boyutsal ve sıcaklık olarak farklı hava bölgeleri oluşturur [10]. Sıcaklık ve bunun sonucu olarak kırılma indisi farklı bu bölgelere çevri(ing, eddy) denilmektedir. Isınan hava kütlelerinin yerden yükselerek, türbülansın etkisiyle parçalanır ve yukarıda bahsedildiği gibi cevriler oluşur. Bu bölgeler kırılma indisinin sıcaklığa göre dalgalanmalar göstermesine sebep olur. Bu yüzden elektromanyetik dalgaların bozulmasına sebep olur.

2.3 Optik Dalgaboylarında Atmosferin Kırılma İndisi

Atmosferin kırılma indisi yerden 40 km yükseklikteki mesafenin altında sıcaklığa, basınca, neme ve optik ışının dalga boyuna bağlıdır. Türbülansın sebep olduğu basınç dalgalanmalarının etkisi sıcaklık ve nem dalgalanmalarının etkisi, göz önüne alındığında ihmal edilecek kadar azdır. Optik uygulamalarda nem değişiminin etkisi ihmal edilebilir. Nemin etkisi milimetrik dalga boylarında daha fazladır. Ortalama kırılma indisi için dalga boyu önemli bir parametre olsa da indisin uzaysal dalgalanmasında fazla etkisi yoktur[9]. Bu yüzden kırılma indisi sadece sıcaklık

dalgalanmalarına bağlıdır. Tipik sıcaklık dalgalanmaları santigrat derecenin onda biri civarında farklılıklar gösterir.

2.4 Optik Türbülans

Türbülanslı akış tek başına kırılma indisi dalgalanmalarının meydana gelmesi için yeterli değildir. Sıcaklık gradyanının mevcut olduğu türbülanslı bir akış olmalıdır. Bunun anlamı, optik etkiler, havanın mekanik taşınımı ile direkt olarak alakalı olmaması demektir. Gerçek sıcaklık sapma oranı(adiyabatik sapma oranı olarak) gerekli bir parametredir.

Hava bloğu denge pozisyonundan mekanik olarak yer değiştirirse, hava bloğunun yükseklikle sıcaklığının değişmesi (-9,7 °K/km) adiyabatik sapma oranı olarak tanımlanır.. Standart atmosferde sapma oranı troposfer için -6,5°K/km'dir. Bu yüzden yükselen hava bloklarının daha önce bulunduğu ortama göre daha hızlı soğumasına sebep olacaktır. Yeni konumunda hava bloğunun yoğunluğu, konum değişiminden dolayı bu bölgede kırılma indisi bakımından daha yoğundur. Ortamda daha yoğun olduğundan dolayı yükselme gücü sonucu yükselen hava bloğunun denge konumuna ulaşması için aşağıya doğru hareket eğilimi başlar. Diğer taraftan bazı yüksekliklerde atmosferik sapma oranı, adiyabatik sapma oranına eşitse, o zaman yön değiştiren havanın yoğunluğu daha önce bulunduğu ortamdaki yoğunluğuna eşit olacaktır. Sonuç olarak, ortamdaki hava ile ilişkili bir kırılma indisi farklılığı yoktur. Bu yüzden büyük mekanik türbülanslar bulunmasına rağmen optik etki meydana gelmez. Adiyabatik sapma oranlarında olmayan güçlü mekanik türbülanslar sadece zayıf optik türbülanslar oluşturur. Optik türbülansın miktarını bulmak için *Richardson sayısı* kullanılır. Richardson sayısı

$$R_i = \frac{(g/\Theta)(d\Theta/dz)}{(dV/dz)^2} \quad (2.2)$$

ile verilir. Burada g yer çekimi ivmesi, Θ potansiyel sıcaklık, V ortalama dikey rüzgar hızıdır. Rüzgar üretimli türbülans, yükselme eğilimi ile kararsız durumda artar. Konvektif durumlarda artar ve kararlı durumda türbülans yok olur. Kararlılık derecesi Richardson sayısı ile ölçülür. Rüzgar kesintisinden türbülansın oluşma oranı da kararlı katmanlara göre türbülansın yok olma oranı olarak ta Richardson sayısı tanımlanabilir.

R_i negatif ise ısı akışı yukarı doğrudur(kararsız hava) ve R_i pozitif ise ısı akışı aşağı doğrudur(kararlı hava). R_i sıfır ise ısı akışı yoktur. Sadece mekanik türbülans vardır [9].

R_i sayısının kritik değeri olduğu zaman türbülans görülmez. Richardson sayısının kritik değeri yaklaşık 0.25'dir. Bu kritik değer optik türbülansın olması için $|R_i| < 0.25$ şartının sağlanmasının gerekli olduğu anlamına gelmektedir..

2.5 Yapı Fonksiyonu

Türbülans rasgele bir işlem olduğu için, istatistiksel miktarın terimleriyle tanımlanmalıdır. Şu an için, küçük akışkan kütlelerin düzensiz hareketi, sıcaklık ve hız bakımından her an tüm detayıyla açıklayacak bir teori olmayacak biçimde karmaşıklık arz eder. Aslında türbülansın tam istatistiksel analizini yapmak çok zordur. Bu yüzden birkaç yetersiz de olsa, tanımlama yapılabilir.

Hem teorik hem de göreceli basitleştirmeler sabit bir durumda tanımlanır. Zamanla değişmeyen değişken istatistiksel özellikler durağan kabul edilebilir. Eğer belirli ölçü boyutlarında ortalama değerler sabit ve rasgele dalgalanmalarda, bir noktadan başka bir noktaya, uzaysal olarak seçilen noktaya bağlı olmadığı durumda türbülanslı akış homojendir. Türbülanslı akışın yatay konum dışında homojen olmaması muhtemeldir. Eğer arazi homojen değilse, tepe, vadi, şehir, orman gibi alanlar ise, akışın homojen olması beklenemez. Yapı fonksiyonunu içeren bir metotla ve sadece lokal olarak, homojen durumu olabilir ve karşılaşılan bu problemde yapı fonksiyonu kısmen başarılıdır. Eğer ortam iki nokta arasındaki ilişki gözlenen noktalardaki büyüklüklerle ilişkilidir ve yönden bağımsızdır ve bu orta izotropiktir. Lokal olarak izotropi olabilir. Lokal izotropi bütün küçük ölçek hareketlerde görülmez. Buna karşın, sadece çok küçük ölçeklerdeki dalgalanmalarda izotropiktir. Kırılma indisi dalgalanmaları da küçük ölçekte dalgalanma olarak nitelendirilebilir

Rasgele kırılma indisi varyasyonlarının uzaysal istatistiği ve dalga cephelerinin uzaysal istatistiği geleneksel otokovaryans veya otokorelasyon fonksiyonlarından ziyade yapı fonksiyonu ifadeleri ile verilir. Yapı fonksiyonunun kullanımı yavaş olarak

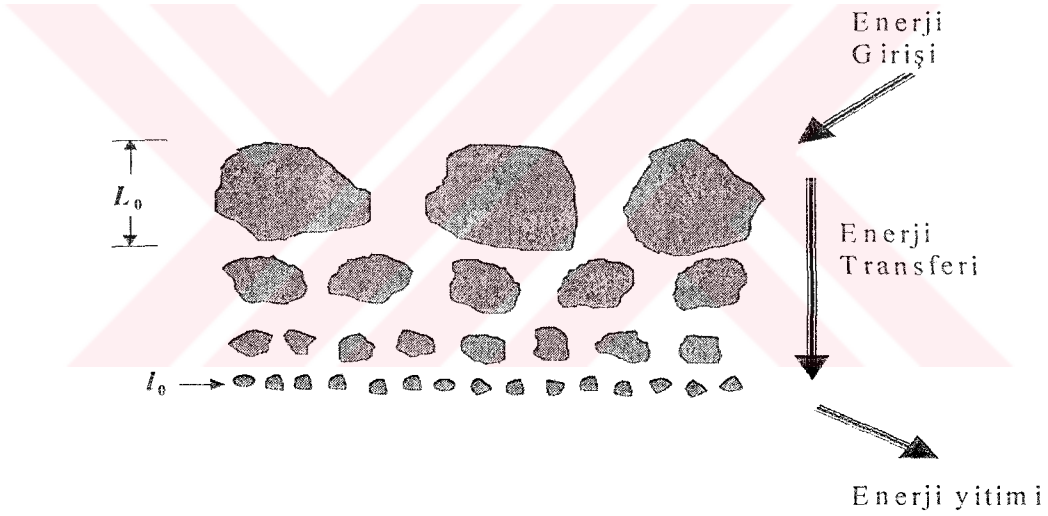
değişimle rasgele işlemin davranışının temelini sağlar. $D_r(r)$, yapı fonksiyonu, keyfi uzaysal dağılımdaki rasgele değişim $R(r)$ ile

$$D_r(r) = \langle [R(r_1) - R(r_2)]^2 \rangle \quad (2.3)$$

olarak verilir. $r = r_1 - r_2$ ve açılı parantez ortalamayı ifade eder. Eğer rasgele işlem üretimi R izotropik ise $D_r(r)$ sadece $r = |r|$ 'nin fonksiyonudur [9]. Burada r konumsal farkı, yani iki nokta arasındaki mesafeyi ifade eder.

2.6 Türbülansın Kolmogorov Teorisi

Türbülansın klasik araştırmaları viskoz akışkanın hızı içindeki dalgalanmalarla ilgilenir. Türbülanslı atmosferdeki rasgele dalgalanmaları, uzaysal ve farklı zaman aralıklarında herhangi bir noktadaki değerler alınarak tanımlanmaya çalışılır.



Şekil 2.1 Kolmogorov kaskat teorisiyle türbülansın gösterimi[10]

İstatistiksel yaklaşım, atmosferdeki türbülansın tanımlanmasında ve kablosuz optik haberleşme sistemlerinde üzerindeki etkilerin açıklanmasına elverişlidir. Amaç matematiksel basitleştirme ise, belirli ölçü boyutlarında homojenlik ve izotropi önemli karakteristikler varsayılarak istatistiksel yaklaşım için zorunludur. İstatistiksel homojenlik, belirli ölçü boyutlarında ortalama değerler sabit ve rasgele dalgalanmalarda, bir noktadan başka bir noktaya, uzaysal olarak seçilen noktaya bağlı olmadığı şeklinde ifade edilebilir. Eğer rasgele dalgalanmalar istatistiksel olarak izotropikse, iki nokta arasındaki ilişki gözlenen noktalarındaki büyüklüklerle ilişkilidir ve

yönden bağımsızdır. Şekil 2.1'de istatistik olarak verilen aralık L_0 ölçek ve l_0 'da iç ölçek değeridir. İç ölçek ve dış ölçek değerleri türbülansın şiddetine göre değişebilir.

Kolmogorov türbülans teorisi, büyük ölçekli yapılardan bağımsız, istatistiksel olarak homojen ve izotropik küçük ölçekli yapılar hipotezine dayanır. Büyük ölçeklerde enerji kaynağı rüzgar yönünün ve hızının değişimi ve konveksiyondur. Rüzgar hızı belirli bir şiddete ulaştığı zaman Reynold sayısının kritik değerini aşar. Büyük kararsız hava kütleleri oluşturur. Reynold sayısının kritik değeri $Re \approx 10^5$ aşıldığında akış türbülanslıdır. Eylemsizlik(inertial) gücü etkisi altında kararsız hava kütlesi, makro ölçeklerden L_0 (türbülansın dış ölçeği) mikro ölçeğe(türbülansın iç ölçeği) kadar enerji transferi için sürekli çevriler daha küçük çevrilere bölünür. Bu enerji kaskat teorisi olarak tanımlanır.

Türbülans üç alan içinde karakterize edilmiştir. Çevri boyutu L_0 'dan büyük olduğundaki giriş aralığı, L_0 altındaki ve l_0 üstündeki boyutlardaki çevrilerin olduğu aralığa eylemsizlik aralığı denilmektedir. l_0 'dan daha küçük boyutlarda akışkan hareketinde kalan enerji ısı olarak yitirilir. Bu alana yitim aralığı denilir.

Atmosferdeki herhangi bir R noktası için kırılma indisi

$$n(R) = 1 + 79 \times 10^{-6} [P(R)/T(R)] = 1 + n_1(R) \quad (2.4)$$

olarak verilir. $n(R)$ kırılma indisinin ortalama değeri n_0 ile normalize edilmiştir. P basıncı, T sıcaklığıdır. Kırılma indisi optik dalga boylarına fazla bağlı olmadığı için dalga boyu ihmal edilmiştir. Eylemsizlik aralığında homojen ve izotropik özelliklerinin var olduğu optik türbülansın içinde kırılma indisinin dalgalanması sıcaklığın neden olduğu dalgalanmalardır. Potansiyel sıcaklık yapı fonksiyonu

$$D(R) = \langle (T_1 - T_2)^2 \rangle = C_T^2 R^{2/3} \quad l_0 < R < L_0 \quad (2.5)$$

olarak verilir. T_1 ve T_2 , aralarında R mesafesi olan iki noktanın sıcaklıklarıdır. C_T^2 sıcaklık yapı sabitidir. Buradan kırılma indisi yapı fonksiyonu ise

$$D(R) = \langle [n(R_1) - n(R_2)]^2 \rangle = C_n^2 R^{2/3} \quad (2.6)$$

olarak verilir. Burada R_1 ve R_2 ayrı iki noktayı ifade eder. Aralarındaki mesafe R 'dir. C_n^2 kırılma indisi yapı sabitidir. Türbülansın şiddeti olarak da tanımlanabilir. Buradaki C_n^2 ifadesi, C_T^2 sıcaklık yapı sabiti cinsinden ifadesi

$$C_n^2 = (79 \times 10^{-6} P/T^2) C_T^2 \quad (2.7)$$

olarak verilir. Burada P milibar cinsinden basınç ifadesi, T ise kelvin cinsinden sıcaklığı ifadesi olarak kullanılmıştır [10].

Kırılma indisi yapı parametresi günün değişik zamanlarında yeryüzünden birkaç on metreye kadar çok değişik değerler alabilir. Bu değerlerler yeryüzünün güneş ışınlarını soğurması ve yansıtmasından oluşan ısınma ve gece sıcaklığın düşmesinden dolayı yeryüzünden havaya doğru oluşan ısı transferi meydana gelir. Bu da kırılma indisi yapı parametresinde değişikliklere sebep olacaktır. Kırılma indisi dalgalanmalarında basınç, nem gibi parametreler çok etkili olmadığı için sadece sıcaklık dalgalanmaları ile kırılma indisi dalgalanmaları ifade edilebilir. Kırılma indisi dalgalanmalarının spektrumu

$$\Phi(\kappa) = 0.033 C_n^2 \kappa^{-11/3} \quad (2.8)$$

ile verilir. Burada $\kappa = 2\pi/l$ uzaysal dalga sayısı, l ise çevrinin boyudur. Bu ifade kolmogorov spektrumu olarak bilinen ifadedir. Burada sıfır iç ölçek, sonsuz dış ölçek olduğu kabul edilmiştir. Eğer C_n^2 konuma göre değişmiyorsa, denklem (2.8) tamamen geçerlidir. Fakat C_n^2 konuma göre değiştiği zaman denklem (2.9) kullanılmalıdır.

$$\Phi(z, \kappa) = C_n^2(z) \Phi_n(\kappa) \quad (2.9)$$

Bu eşitlik konumun fonksiyonu olarak değişen türbülans gücünü verir. Dalgalanmaların spektral değişiminden bağımsızdır.

Bir çok uygulama için eylemsizlik aralığı dışındaki spektrumun değişimi önemlidir. Bu nedenle giriş aralığında ve yitim aralığında iyi bir değişim oluşturacak bir modifikasyon yapılmalıdır. Yitim aralığında $\kappa^{-11/3}$ 'den daha hızlı bir düşüş oluşturan spektrum olması açıktır. Bu amaç için Tatarski modifikasyon yapmıştır[11]. Tatarski spektrumu denklem (2.10) gibidir.

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033\kappa^{-11/3} \exp[-(\kappa/\kappa_m)^2] \quad (2.10)$$

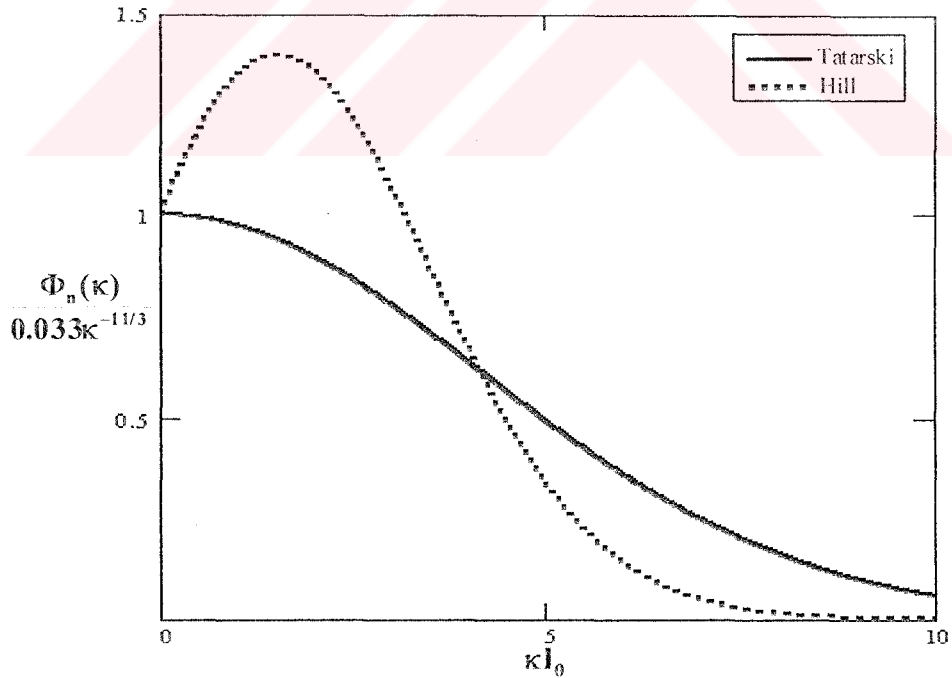
Burada $\kappa_m = 5.92/l_0$ 'dir. Tatarski spektrumunda olduğu gibi spektrumda çok hızlı bir şekilde düşüş olmamalıdır. Hızlı düşüş iç ölçek etkilerinin bulunduğu durumda başlar. Bu yüzden çeşitli analitik yaklaşımlar yapılmıştır. Hill iç ölçeğin önemli olduğu bölgede daha hızlı düşüşün meydana getiren nümerik bir metot kullanmıştır [9], [10]. Bu nümerik metotla ortaya çıkan analitik yaklaşım aşağıdaki verilir

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033\kappa^{-11/3} \exp[-(\kappa/\kappa_1)^2] \left[1 + 1.802\left(\frac{\kappa}{\kappa_1}\right) - 0.254\left(\frac{\kappa}{\kappa_1}\right)^{7/6} \right] \quad (2.11)$$

Burada Kolmogorov modeline göre L_0 ' dan daha büyük çevrilerin enerjisinden L_0 'ın enerjisi daha küçük olmalıdır. Bunu sağlayan yaklaşım von Karman spektrumudur[11], [13]. Denklem (2.12) görülüyor

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033\kappa^{-11/3} (\kappa^2 + \kappa_1^2)^{-11/6} \quad (2.13)$$

Burada $\kappa_1 = 2\pi/L_0$ 'dir.



Şekil 2.2 Tatarski ve Hill spektrumları

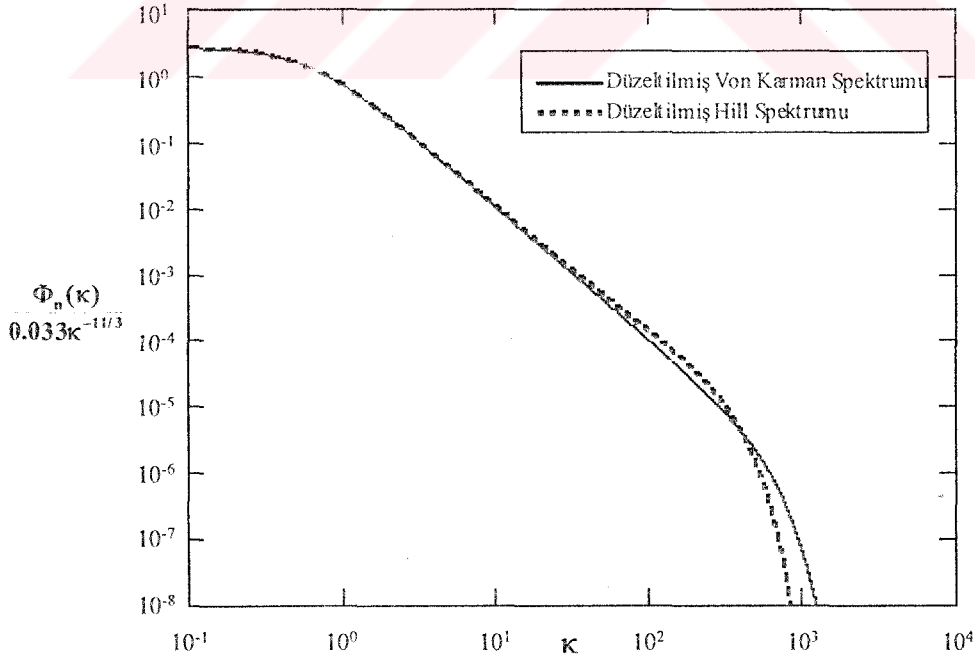
Matematiksel olarak kolaylık sağlaması açısından Tatarski ve Von Karman spektrumları birleştirilerek bir denklem oluşturulmuştur.

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033 \frac{\exp[-(\kappa/\kappa_m)^2]}{(\kappa^2/\kappa_1^2)^{11/6}} \quad (2.14)$$

Bu spektrum, düzeltilmiş Von Karman spektrumu olarak adlandırılır. Şekil 2.3 de görülmektedir [10]. Başka bir seçenek Hill ve Tatarski spektrumlarının birleştirilmesi ile oluşturulmuş, nümerik hesaplamalarla yapılan analitik yaklaşım düzeltilmiş Hill spektrumdur [9], [11].

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033 \left[1 + 1.802 \left(\frac{\kappa}{\kappa_1} \right) - 0.254 \left(\frac{\kappa}{\kappa_1} \right)^{7/6} \right] \frac{\exp[-(\kappa/\kappa_1)^2]}{(\kappa^2/\kappa_0^2)^{11/6}} \quad (2.15)$$

Burada $\kappa_1 = 3.3/l_0$ ve $\kappa_0 = 2\pi/l_0$ dir. Bu iki spektrumda yüksek dalga sayılarında, iç ölçekteki daha hızlı düşüşü sağlar. Düzeltilmiş Hill spektrumu daha hızlı bir şekilde düşüşü sağlar. Düşük dalga sayılarındaki dış ölçek durumunda da sabit yaklaşımı ifade edebilmektedir. Her iki spektrum eylemsizlik aralığında yani orta dalga sayılarında – 11/3 kanununa uygun davranır.



Şekil 2.3 Düzeltilmiş Hill ve Von Karman spektrumları

Diğer spektrum örnekleri de benzer şekillerdedir. Bu ifadeler sadece eylemsizlik aralığı dışında belirtilen aralıklarda geçerlidir. Eğer ilgili olayların yayılımı L_0 'a çok bağlıysa, o zaman atmosfer hakkındaki bu bilgilerin kesin bir açıklama getiremediği farz edilir. Bir çok durumda atmosfer için yapılan modelin ve yaklaşımların seçilen spektrumla açıklanabilmesi önemlidir. Fakat gerçek atmosferde bu model ve yaklaşımlar bütün zaman aralıklarında ve bütün konumlarda kullanılamazlar. Bu denklemlerin geçerlilik aralığını çok iyi yorumlamak zor olabilir.

2.7 Türbülansın Modellenmesi

Önceki konularda atmosferdeki türbülansın kırılma indisinin spektrumu hakkında belirli bir form elde edilmesi işlenilmiştir. Fakat bu modelin parametreleri; C_n^2 , L_0 , l_0 gerçek değerlerin ile ilişkili bir referans oluşturulmamıştır.

Mühendislik uygulamalarında kullanımı için türbülansın ve rüzgarın modeli oluşturulurken yaklaşımlar basit olması zorunludur. Bu yüzden meteorolojik bilgilerin ışığı altında yapılan türbülans modeli mühendislik açısından daha kullanışlı ve pratik olacaktır.

2.8 C_n^2 Modelleri

Yatay bir yol boyunca propagasyonu içeren uygulamalarda C_n^2 'nin sabit olduğu varsayılır. Dikey veya belirli bir açı olan bir yolda C_n^2 sabit değildir. Bu sebeptendir ki C_n^2 'yi tanımlamayı sağlayan ve dikey yol boyunca değişen fonksiyonlar oluşturulmuştur.

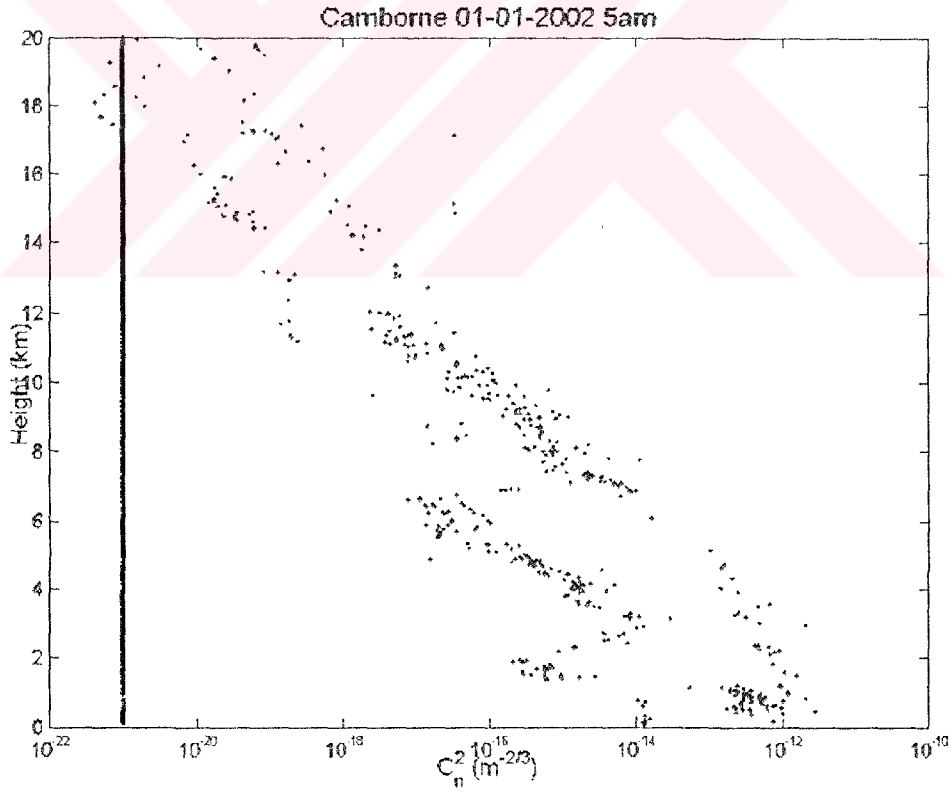
Atmosferdeki hareketleri iki kısma ayırmak uygun olur. Türbülans iki kısımda da farklı etkenlerle meydana gelir. Bunlar kısımlar, sınır katmanı ve serbest atmosferdir (free atmosphere). Sınır katmanında yeryüzü ile ısı alış verişleri ve etkileşimi önemlidir. Serbest atmosferde atmosferin hareketi daha karmaşık yapıdadır.

Sınır katmanını üç kısma ayırmak mümkündür. Bunlar yüzey katmanı, karışık katman ve geçiş katmanıdır. Yerden birkaç metre yüksekliğe kadar olan katman yüzey katmanıdır. Yerle hava arasındaki atmosfer parametreleri açısından farklılığa göre katmanın yüksekliği değişebilir. Geçiş katmanı ısınıp yükselmekte olan havanın tersine

dönüş yaptığı bölgedir. Karışık katman ise yüzey katmanı ile geçiş katmanı arasındaki bölgedir.

Sınır katmanı düz bir arazi içinde daha iyi tanımlanabilir ve belirlenebilir. Geçiş katmanının yüksekliği arazinin içeriği, rüzgar, bitki örtüsü gibi çeşitli faktörlerle değişir. Bir çölde sınır katmanı 3 km civarında olabilirken dağ gibi yüksek bölgelerde sınır katmanının sarmaladığı bölge ısı farkının fazla olmamasından dolayı oldukça düşüktür [12],[13].

Gündüzleri, yeryüzü ile atmosfer arasındaki ısı farkı çok fazla olduğu için ısınan hava yükselir. Sınır katmanı 3 km ye kadar artabilir. Gündüz ve gece boyunca sınır katmanında oldukça farklılıklar vardır. Gece yerin yüzeyi havadan soğuk olacağı için hava aşağı doğru yönelir. Yerçekimi dalgaları (gravity waves) oluşturur [14]. Gece sınır katmanı birkaç yüz metreye kadar düşer. Isı etkileşimine göre ve sınır katmanının yüksekliği azalır veya artar.



Şekil 2.5 Belirli bir bölgede ölçülmüş C_n^2 değerleri[15]

Türbülans gücü sınır katmanın da geniş aralıklarda değişir. Bu aralık yaklaşık $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ ve $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ arasında değişmektedir. Bunun sebebi coğrafik koşullar ve günün herhangi zamanındaki koşullara göre değişmektedir. Şekil 2.5 da ölçülen türbülans şiddeti değerleri görülmektedir. Burada değişik yükseklik için ölçüm alınmış ve noktalar şeklinde her ölçüm değeri işaretlenmiştir.

Serbest atmosferde ise durum daha farklı ve karmaşıktır. Troposfer ve ince stratosfer bölgesini içerir. Optik türbülans bu bölgede tamamıyla anlaşılabilir. Genel olarak serbest atmosferde dikey yolda C_n^2 eksponansiyel bir düşüş gösterir. C_n^2 'nin büyük değerleri çok ince katmanlarda meydana gelir. Bu katmanların geçici süreç olarak iyi anlaşılması imkansızdır. Bu katmanlar sebebiyle C_n^2 değerlerinde büyük değişimler ve çeşitlilik meydana gelir.

2.9 Deneysel SLC Modeli

Tablo 2.1 SLC modeli

SLC Gündüz Modeli	
C_n^2 (h)	Yükseklik
1.7×10^{-14}	$0 < h < 18.5 \text{ m}$
$3.13 \times 10^{-13} / h^{1.05}$	$18.5 < h < 240 \text{ m}$
1.3×10^{-15}	$240 < h < 880 \text{ m}$
$8.87 \times 10^{-7} / h^3$	$880 < h < 7200$
$2.0 \times 10^{-16} / h^{1/2}$	$7200 < h < 20000 \text{ m}$
SLC Gece Modeli	
C_n^2 (h)	Yükseklik
8.4×10^{-15}	$0 < h < 18.5 \text{ m}$
$2.87 \times 10^{-12} / h^2$	$18.5 < h < 240 \text{ m}$
2.5×10^{-16}	$240 < h < 880 \text{ m}$
$8.87 \times 10^{-7} / h^3$	$880 < h < 7200$
$2.0 \times 10^{-16} / h^{1/2}$	$7200 < h < 20000 \text{ m}$

Ölçülerek alınmış ortalama veriler kullanılarak meydana getirilmiş bir modeldir. Optik haberleşme sisteminde geniş kullanılan modeldir. Çeşitli yükseklik aralıklarındaki veriler kullanılarak C_n^2 değerini verecek nümerik yaklaşımlar kullanılmıştır. Bu modelde C_n^2 değeri konuma bağlıdır. Tablo 2.1 de SLC modelinde kullanılan yaklaşımlar görülmektedir [11].

2.10 Hufnagle-Valley Modeli

Birçok $C_n^2(h)$ modeli çeşitli optik haberleşme uygulamaları için kullanılmaktadır. Bu modellerin çoğu birbirlerine çok benzer sonuçlar vermektedir. Genellikle lokal durumların küçük bir kısmını ve belirli durumların ortalaması alınarak oluşturulan modeller bulunmaktadır. Bu modellerden bir tanesi de Hufnagle-Valley modelidir. Bu model H-V modeli olarak ta ifade edilmektedir. H-V modeli denklem 2.18 deki gibidir[16].

$$\begin{aligned} C_n^2(h) = & 0.00594(v/27)^2(10^{-5}h^{10})^{10} \exp(-h/100) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) \\ & + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) \\ & + A \times \exp(-h/100) \end{aligned} \quad (2.18)$$

2.11 Faz Uyumluluk Ölçeği

Vericiden veya bir kaynaktan yayılan dalga çok büyük uzaysal uyumluluk göstermesine karşın, Dalga cephesindeki uzaysal uyumluluk, dalganın atmosferdeki türbülans boyunca propagasyonundan sonra ρ_0 kadar azalacaktır. Dalga cephesindeki iki nokta arasında ρ_0 değerinden büyük mesafelerde ilişki kalmayacaktır. Faz uyumluluk ölçeği aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\rho_0 = (1.46 \int_{z=0}^L C_n^2(z)Q(z)dz)^{-3/5} \quad (2.19)$$

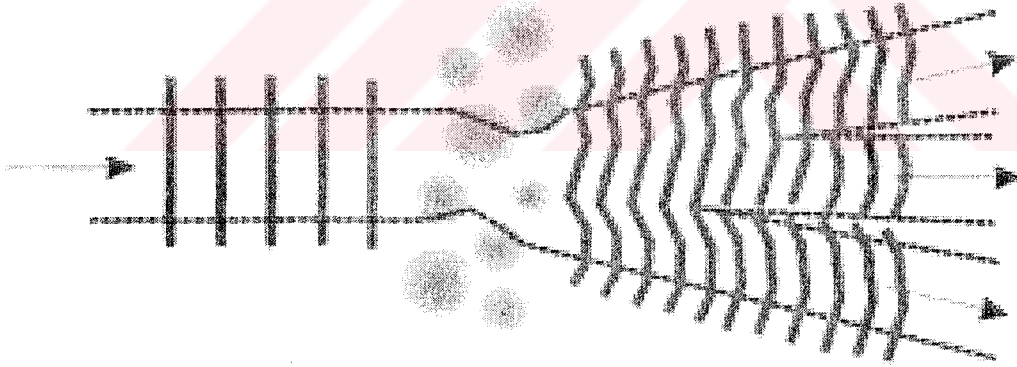
Burada $k = 2\pi/\lambda$ optik dalga sayısı , yayılım mesafesi L , λ optik ışının dalga boyu, $Q(z)$ optik kaynağın doğasına bağlı ağırlık fonksiyonudur. Sonsuz düzlem dalga için $Q(z)=1$ dir. Nokta kaynak için $(z/L)^{5/3}$ dür. ρ_0 dalga boyu artıkça $\lambda^{6/5}$ katı artar.

Faz uyumluluk ölçüsü gibi çok sık tercih edilen bir parametrede Fried parametresidir. Bu parametre faz uyumluluk ölçüsünün $(3.44)^{-3/5}$ katıdır. Buna göre $\rho_0=0.477 r_0$ olarak tanımlanır. Farklılık farklı tanımlamalar kullanıldığı için ortaya çıkar. Birine uyumluluk alanı için yarıçap, diğerinde çap olduğu varsayılır [11].

2.12 Optik Işıkların Atmosferde Yayılımı ve Türbülansın Etkisi

Türbülansın etkisiyle farklı karakteristikteki çevriler arasındaki kırılma indisi farklılıkları optik ışıkların propagasyonunda önemlidir. Çevri boyutlarının büyük veya küçük olması optik ışıklara çeşitli etkilere sebep olur. Optik ışığın çapından daha büyük çevriler huzmenin gelişigüzel bir şekilde gezinmesine ve varış açısı dalgalanmalarına neden olur. Optik ışığın çapındaki çevriler optik ışığın birbiri üzerine yapıcı veya yıkıcı girişim yapmasından dolayı huzmenin kısım kısım zayıflamasına ve güçlenmesine sebep olur(parıldama). Optik ışığın çapından küçük çevriler bağımsız olarak optik ışığın kısmen bozulması ve saçılması ile huzmenin genişlemesine ve fazın bozulmasına neden olacaktır.

Atmosferdeki türbülansın lazer huzmesi üzerinde etkisinin fiziksel değişimlerini tanımlamak kolaydır. Fakat tam bir nitel tanımlama oldukça zordur. Bu rasgele ortamdaki dalganın çoğu genel probleminin özel durumudur. Rasgele ortamda dalga propagasyonunun genel problemi için bir çok yaklaşım yapılmıştır. Dalga yayılırken belirli karakteristiklerine göre basitleştirme yapılabilir. Özellikle dalgaboyu iç ölçekten küçük olduğu durumlarda çok küçük bir saçılma açısı olacaktır.



Şekil 2.6 Kırılma indisi dalgalanmalarının sonucu oluşan düzlemsel dalgadaki bozulmanın sembolik gösterimi

Ama daha büyük ölçeklerde saçılma büyüyeceğinden büyük kırılma dalgalanmalarının içinde dalga koni şekli olarak yayılacaktır. Bu şekilde olduğundan dolayı polarizasyondan söz etmek zor olur ve dalga denkleminde polarizasyon ihmal edilebilir. Dalga denklemi skaler olur.

Rasgele bir ortamdaki dalga denklemleri tanımlayabilmek için çeşitli yaklaşımlar vardır. Bunlardan ikisi, Born yaklaşımı ve Rytov yaklaşımıdır.

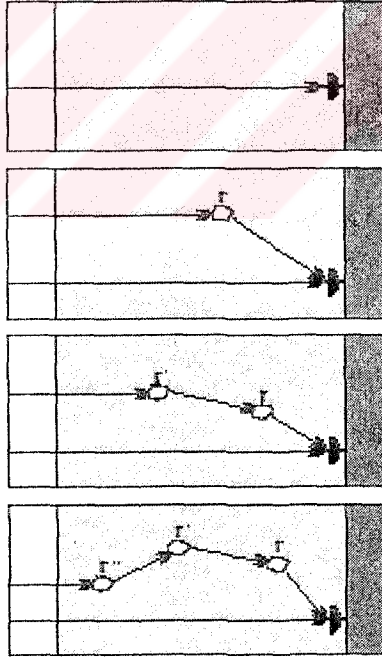
2.13 Born Yaklaşımı

Kırınım olaylarının tamamını içine alan zayıf saçılmanın ilk tanımlamasını yapan Born yaklaşımıdır. Bu teknik saçılma problemlerinin kuantum mekaniğinde çözülmesi için geliştirilmiştir. Rasgele ortama göre elektromanyetik saçılmadaki uygulamalarda dielektrik dalgalanmalarının, bir ile arasındaki küçüklüğü kullanılmıştır. Buradan dielektrik sabiti dalgalanmaları ifade edilirse;

$$\delta_{\epsilon_{rms}} \ll 1 \quad (2.20)$$

Burada δ_{ϵ} 'nin verdiği daha yüksek güçler için ortalaması olan terimlerin serisi içinde elektrik alan gücü genişletilebilir.

$$E = E_0 + E_1 + E_2 + E_3 + \dots \quad (2.21)$$



Şekil 2.7 Rasgele ortam için saçılmanın tanımlanması[17]

Bu yaklaşım saçılma işleminin fiziksel tanımlamasını yapmakta avantajlıdır. Yukarıdaki serinin bütün terimleri şekil 2.7'de örneklenmiştir. E_0 ortamda düzensizlik yokken

mevcut alan gücü E_1 , r noktasında düzensizlik varken gelen düzlem dalga tek saçılma terimidir. Saçılan dalga alıcıda küresel dalga olarak görülür. Çift saçılmada E_2 terimini temsil eder. Üç saçılma ise diğer terimi temsil etmektedir. Bu yaklaşımla türbülansın düzensizliğinden elektromanyetik özellikleri ayrılabilir. Bir çok uygulamada propagasyon hesaplamalarını basitleştirmek için kullanılabilir. Bu avantajlarına rağmen rasgele ortamda saçılmanın tanımlanmasında yaklaşımın belirli bir sınırı vardır. Yaklaşımdaki serinin birkaç teriminde sinyalin fazının ve genliğinin birlikte kullanılması gerekir. Born yaklaşım koşulu denklem 2.21'deki gibidir.

$$(\varphi^2) + (X^2) < 1 \quad (2.21)$$

Burada φ işaretin fazı, X işaretin genliğidir. İşaretin genliği (X) tatmin edici bir koşuldur. Çünkü saçılma genliğin değişiminde etkilidir. Diğer taraftan faz değişimi önemli bir engeldir. Çünkü faz değişimi, 5 Ghz'den küçük mikrodalga sinyalleri için küçük değerlerdedir [17]. Bu yüzden born yaklaşımı optik sinyallere uygulanamaz olmasına karşın, Born yaklaşımı yeni yaklaşımlar için ışık olmuştur.

2.14 Rytov Yaklaşımı

Rytov yaklaşımında esas olarak geometrik optik genişletilmiştir. Kırınım etkileri de dahil edilmiştir. Bu metodun özü elektrik alan gücü yerine eksponansiyel bir fonksiyon kullanılmıştır. Logaritmik terimler seriye açılmıştır. Bu bakımdan Born yaklaşımına biraz benzemektedir.

Eğer polarizasyon ihmal edilirse, türbülans boyunca propagasyonun başlama noktası dalga denklemidir. Maxwelli denklemlerinden polarizasyon ihmal edildiği için skaler dalga denklemi kullanılır.

$$\nabla^2 E + k^2 n^2 E = 0 \quad (2.22)$$

Burada E elektrik alan, n kırılma indisi, $k=2\pi/\lambda$ ve λ dalga boyudur. Kırılma indisi stokastik bir denklemdir. Bu yüzden kesin bir çözümü yoktur. Boş uzaydaki genlik ve faz değişimleri ile daha ilgilidir. Bu yüzden E yerine $E/\langle E \rangle$ ve E/E_0 yazılarak Rytov metoduna başlangıç yapılabilir. Buradan

$$\frac{E}{E_0} = \frac{A}{A_0} \exp(i(\varphi - \varphi_0)) = \exp(\Psi) \quad (2.23)$$

Burada A genlik, φ fazdır. $\Psi = X + i(\varphi - \varphi_0)$ ve bu yüzden $X = \log(A/A_0)$ olur. X logaritmik genliktir(log-amplitude). Rytov yaklaşımında $E = \exp(\Psi)$ dalga denklemi yerine kullanılır. Bu dalga denkleminde Ricatti denklemleri iyi sonuç verir

$$\nabla^2 \Psi + \nabla \Psi \cdot \nabla \Psi + k^2 n^2 = 0 \quad (2.24)$$

Ψ 'da karmaşık bir genişletme yapmak Rytov yaklaşımının esasıdır.

$$\Psi = \Psi_0 + \Psi_1 + \Psi_2 + \dots \quad (2.25)$$

İlk terim saçılmanın olmadığı dalganın terimidir. İkinci terimde tek saçılma mevcuttur. Üçüncü terim de çift saçılma mevcut olup seri böylece devam edecektir. Sadece ikinci terime kadar devam ettirilirse;

$$\begin{aligned} \Psi &= \log\left(\frac{E}{E_0}\right) = \log\left(1 + \frac{A_1}{A_0}\right) + i(\varphi - \varphi_0) \\ &\approx \frac{A_1}{A_0} + i(\varphi - \varphi_0) \end{aligned} \quad (2.26)$$

Yukarıdaki eşitliklere göre; $X = \log(A_1/A_0)$ ve $\varphi_1 = \varphi - \varphi_0$ olur. Rytov metodundaki rasgele değişim logaritmik genliktir(log-amplitude). Bu yaklaşım normalize edilmiş genlik dalgalanmalarının tanımlanması anlamına gelir. Direk karışıklık yaklaşımı olarak Rytov metodunun avantajı geçerliliğinin daha büyük aralıklarda olmasıdır. $E = \exp(\Psi_0) \cdot \exp(\Psi_1)$ olduğundan karmaşıklık çarpım durumunda olduğundan, karmaşıklık dalga boyu ölçütüne göre küçük olmalıdır. Yani karmaşıklık işaretten küçük olmalıdır. Rytov metoduna göre X ve φ_1 ortalaması sıfır olan bir dağılım gösterir [9].

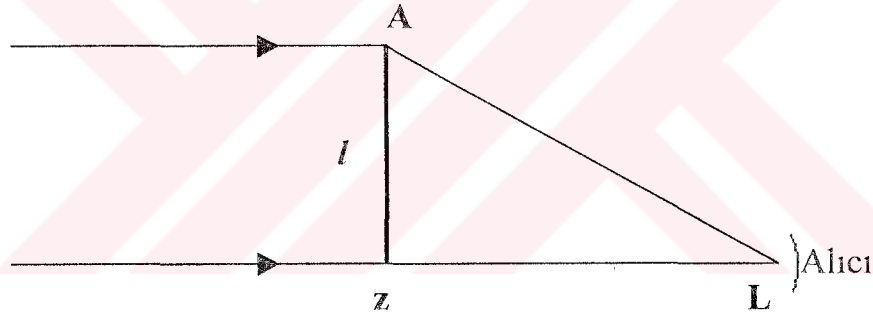
2.15 Parıldama

Parıldama atmosferdeki türbülansın en önemli etkilerinden biridir. Çevri boyutları parıldama etkisinde önemli faktördür. Optik işareti anlaşılabilir hale

getirebilmektedir. Optik ışının genliğini ve gücünü logaritmik olarak etkileyecek bir şekilde etkisi olur.

Parıldama, optik hüzmenin çapına yakın boyutlardaki çevriler hüzme kesitinde yapıcı ve yıkıcı girişime sebep olacaktır. Yani ışığın içinde girişim yapmasından dolayı bir kısmında ışık şiddeti çok yüksek, bir kısmında ise ışık şiddeti çok düşük olacaktır. Bu da ortalama ışık şiddetinde kayıp olmamasına rağmen, ışık şiddeti dalgalanmalarına sebep olacaktır

Önemli karakteristiklerden biri parıldamanın oluşmasının basit geometrik analizlerle açıklanabilmesidir. Parıldamanın oluşmasının basit bir geometri ile ifade edilebilir. Şekil 2.8' de kırılma indisi farklı çevrinin boyutu l , değişen konum z , alıcı ile verici arasındaki mesafe de L ile gösterilmiştir. $z=L$ durumunda parıldamanın alıcıda oluşturulduğu biçim görülür. Burada çevrinin oluşturduğu güç dalgalanmalarını faz ifade edilmektedir. Bu yüzden çevri parıldama oluşumunda tamamen etkilidir.



Şekil 2.8 Çevri boyutunun parıldama etkisindeki rolünün geometrik gösterimi

Parıldamanın ışık şiddetinin dalgalanması olarak tanımlanabilir. Parıldamanın normalize varyansı;

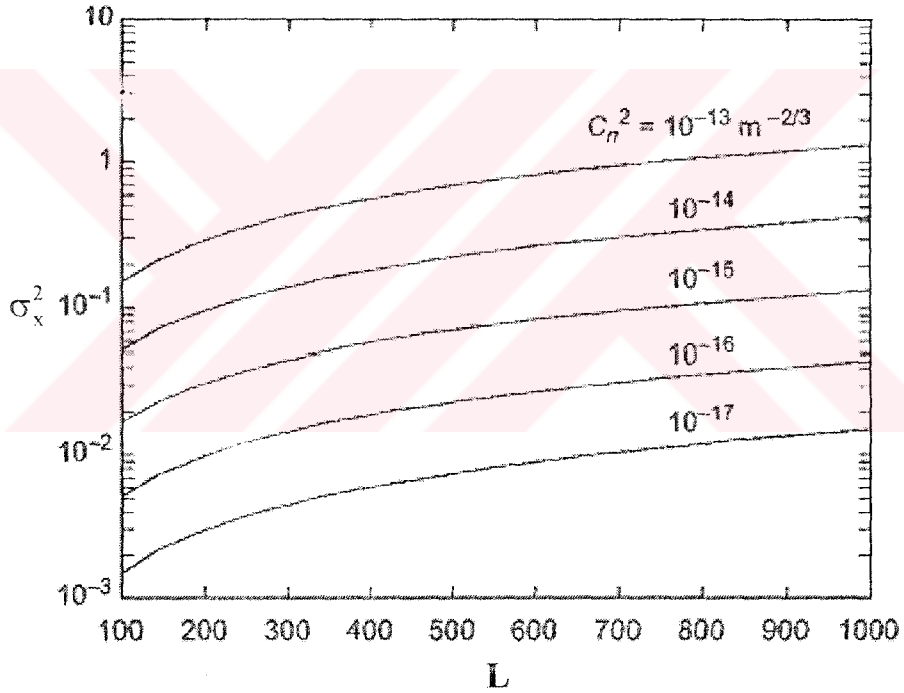
$$\sigma_1^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (2.27)$$

olarak verilir[12]. Burada I ışık şiddetidir. Bu değer ölçülebilen değerdir. Logaritmik genlik(Log-amplitude) için, yani Rytov yaklaşımı ve kolmogorov teorisi kullanılarak parıldama varyansı;

$$\sigma_x^2 = 2\pi k^2 L \int_{\kappa}^{\infty} \kappa \phi(\kappa) \left(1 - \frac{k}{\kappa^2 L} \sin\left(\frac{\kappa^2 L}{k}\right) \right) d\kappa \quad (2.28)$$

olarak verilir. Burada k optik dalga sayısı, κ uzaysal dalga sayısı ve L ise yayılım mesafesi olarak tanımlanmıştır.

Şekil 2.9'de parıldama varyansının farklı kırılma indisi yapı sabiti değerlerinde L yayılım mesafesine göre değişimi görülmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere L arttıkça parıldama varyansı değeri artmaktadır. Işık şiddetindeki dalgalanmalar artmaktadır. Türbülans şiddeti de artıkça parıldama varyansında artma görülmektedir. Uzun yayılım mesafelerinde ışık şiddetindeki dalgalanmalar oldukça fazla olacağı görülmektedir



Şekil 2.9 Parıldama varyansının yayılım mesafesine göre değişimi[18]

2.16 Faz Bozulması

Hızme çapından küçük çevriler hızme genişlemesine ve dalga cephesinin fazının bozulmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle küçük çevriler, ışığın dalga cephesinin farklı farklı hız ve ışığın gittiği yol boyunca etkili olacaktır. Dalga cephesinin fazında bozulmalar olacaktır. Faz bozulması kırılma indis farklılıklarından

dolayı hüzmelerin bazı kısımlarının daha yavaş, bazı kısımlarının daha hızlı hareket etmesiyle ve hüzmelerin farklı parçalarının farklı yönlerde kırılması ve dolayısıyla bir süre sonra kendi kendine girişim yapmasıyla oluşur. Fazı bozulmuş ışık hüzmesi kabaca düzgün bir kağıdı avucumuzda topaç haline getirip iyice buruşturduktan sonra tekrar açtığımızda geldiği duruma benzetilebilir. Bu kağıt (ışık hüzmesi) yeterince, yani atmosferin faz uyumluluk ölçüsü kadar, parçalara ayrılırsa her bir parçanın bozulması sadece bir eğiklik şeklinde olacaktır. Faz uyumluluk ölçüsünün değerinin büyük olmasıyla faz bozulması azalır. Faz uyumluluk ölçüsü sabit bir değer olmayıp rasgele değişir.

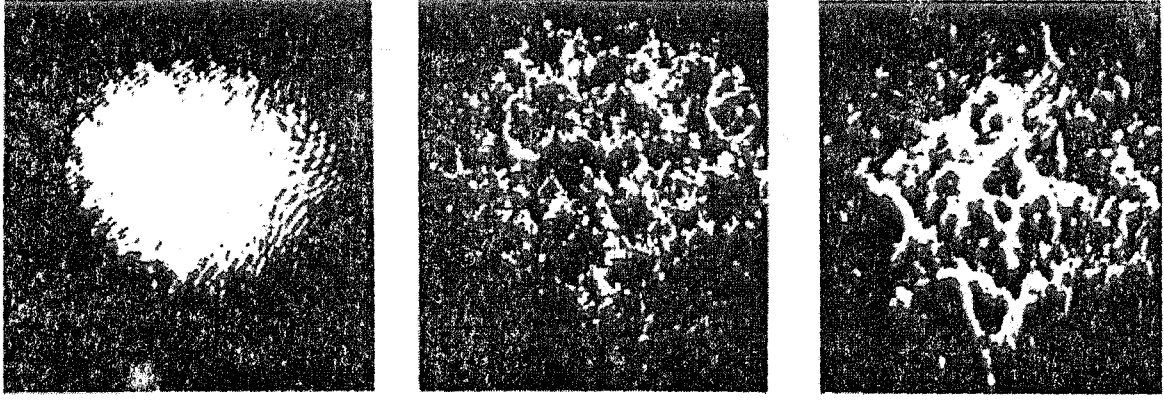
2.18 Hüzme Genişlemesi

Atmosferdeki türbülansın olmadığı durumlarda optik ışın belirli genişlikte kaynaktan çıktıktan sonra doğası gereği kırınımdan dolayı genişlemeye başlar. Bununla birlikte türbülanslı atmosferde, türbülansın etkisiyle de genişlemede artış meydana gelir. Bundan dolayı hüzmelerin genişlemesi, kırınımdan dolayı meydana gelen genişlemeden daha fazla olmasına neden olur. Hüzmelerin görünen boyutun da bozulmalar olabilir. Kısa bir an için hüzmedeki genişleme değeri ortalama olarak ifade edilirse aşağıdaki gibidir [19].

$$\langle \rho_s^2 \rangle = \frac{4L^2}{k^2 D_T^2} + \frac{D_T^2}{4} \left(1 - \frac{L}{W}\right)^2 + \frac{1.76L^2}{k^2 r_0^2} \left[1 - 0.48 \left(\frac{r_0}{D_T}\right)^{1/3}\right]^{6/5} \quad (2.29)$$

Burada L yayılım mesafesi, k optik dalga sayısı, D_T lazer verici çapı, W lazer hüzmesinin kavis yarıçapı ve r_0 Fried'in faz uyumluluk çapıdır. Daha geniş bir zaman aralığındaki hüzme gezinmesi ve genişlemesinin birlikte ifadesi hızlı bir şekilde hüzmelerin gezindiği noktalar hüzmelerin genişlemesi gibi görülebilmekte ve birlikte ifade edilebilmektedir.

Hüzme genişlemesinin öncelikli etkisi optik ışının güç ortalamasının daha büyük bir bölgeye dağılmasıdır. Optik ışının gücü eksenin merkezine doğru fazla olduğu için hüzme genişlemesinden merkezdeki gücün yoğunluğu azalacaktır. Hüzmelerin genişlemesi menzil arttıkça artacaktır.



(a) (b) (c)
Şekil 2.10 Lazer ışığına farklı zamanlarda türbülanslı atmosferin etkileri

Küçük çevriler hüzmeye genişlemesine ve dalga cephesinin fazının bozulmasına, Hüzmeye çapına yakın boyutlardaki çevriler hüzmeye kesitinde yapıcı ve yıkıcı girişime (parıldama) sebep olacaktır. Şekil 2.10 da hüzmeye dedektör düzlemindeki fotoğrafı görülmektedir. Bu fotoğraf sadece hüzmeye bir andaki durumunu temsil eder ve hüzmeye durumu zamanla değişir. Şekil 2.10 da hüzmeye dedektör düzleminde türbülanslı atmosferden geçtikten sonraki oluşan bozulmalar görülmektedir. Şekil 2.10 a da türbülansın etkilerinin çok az olduğu durumdaki hüzmeye alıcı düzlemindeki durumu görülmektedir. Neredeyse hiç bozulma yoktur. Şekil 2.10 b de ise türbülans etkilerinin çok yoğun olduğu durumda hüzmeye durumu görülmektedir. Parıldama ve hüzmeye genişleme anlaşılabilir. Şekil 2.10 c de ise b deki türbülans etkilerine göre daha az türbülans şiddetinde hüzmeye dedektör düzlemindeki durumu görülmektedir. Burada da hüzmeye genişlemesi ve parıldama görülmektedir. Türbülans şiddeti daha az olduğu için parıldamanın daha düşük seviyelerde olduğu anlaşılabilir.

2.19 Hüzmeye Gezinmesi

Atmosferdeki türbülans büyük ölçüde kaotik bir yapı meydana getirdiği için, optik ışının gelişini güzel olarak yönünü değiştirerek ilerlemesine sebep olur. Açısal olarak optik ışının ilerleyeceği istikametten ayrılması hüzmeye gezinmesi olarak karakterize edilmiştir.

Bu açısal sapmanın büyüklüğü, optik ışının alıcıya ulaşmaması veya hüzmeye kısmen alıcıya ulaşmasına neden olur. Hüzmeye alıcıya ulaşsa bile açısal olarak farklı olduğu için güç kayıplarına sebep olacaktır. Kısa bir an için hüzmeye gezinmesinin

değeri yarıçap ve ortalama olarak ifade edilirse aşağıdaki gibidir [20]. Burada hüzmeye gezinmesi;

$$\langle \rho_w^2 \rangle = \frac{10.22L^2}{k^2 r_0^{5/3} D_T^{1/3}} \quad (2.30)$$

olarak verilir. Burada L yayılım mesafesi, k optik dalga sayısı, D_T lazer verici çapı ve r_0 Fried'in faz uyumluluk çapıdır.

Şekil 2.11 da görüldüğü gibi T aralıklarıyla hüzmeyi alan düzlemde farklı uzaysal noktalarda bulunduğu görülmektedir. Ayrıca hüzmeye gezinmesinin P_L aralığında meydana geldiği için hüzmeyi alan P_L yarı çapı kadar genişlediği söylenebilir. Varış açısı

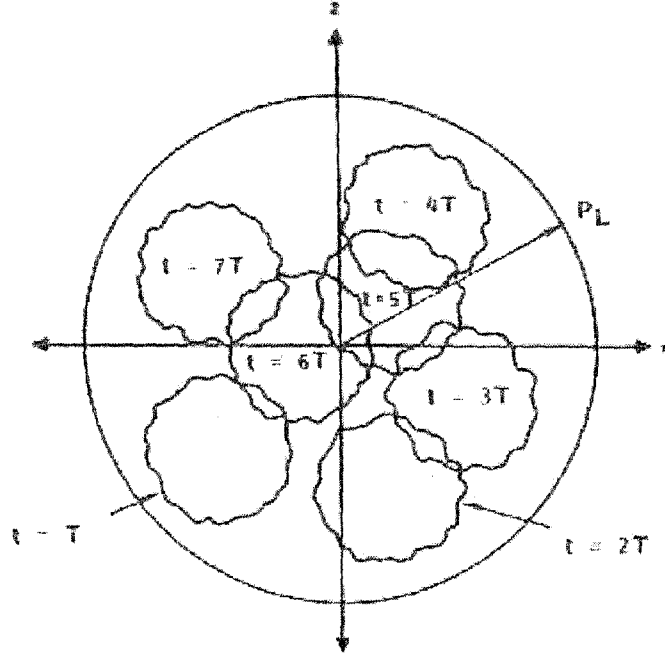
2.20 Varış Açısı Dalgalanmaları

Kırılma indisi dalgalanmalarından dolayı ve hüzmeye çapından büyük olan kırılma indisi farklı çevrilerin etkisiyle hüzmeye geliş güzel hareket eder. Buda alıcı düzleme ulaşan hüzmeyi dik olarak gelmesi gerekirken, çeşitli açılarla dedektöre ulaşmasına sebep olacaktır. Bundan dolayı dedektöre gelen birim alana düşen ışık şiddetinin düşmesine neden olacaktır. Fazının bozulmasına da katkı sağlayacaktır. Varış açısı faz dalgalanmalarında etkilidir. Varış açısı dalgalanmalarından dolayı dalga cephesi alıcı düzlemine farklı, eğik bir şekilde gelecektir. Bu eğiklik faz dalgalanması olarak tanımlamak mümkündür. Dalga cephesindeki eğim nedeniyle sürekli farklı ışık şiddeti dağılımları alıcı açıklığın farklı bölgelerinde düzensiz şiddet dağılımına sebep olacaktır.

Ortalama varış açısı dalgalanmaları aşağıdaki bağıntı ile parıldama varyansının çok küçük değerleri için ifade edilebilir [20]. Bu bağıntı ışık şiddeti dalgalanmalarının çok zayıf olduğu durumda kullanılabilir. Başka bir deyişle $\sigma_1^2 \ll 1$ olmalıdır. Bu şart altında düzlem dalga için ortalama varış açısı dalgalanmaları

$$\langle \alpha^2 \rangle = 1.64 C_n^2 L I_0^{-1/3} \quad (2.31)$$

olarak verilir. L yayılım mesafesi, C_n^2 kırılma indisi yapı sabiti, I_0 ışık şiddetidir. Varış açısı dalgalanmaları alıcı açıklığının mesafesi gelen ışığın şiddetinin korelasyon mesafesini oluşturur. Bu etki dalgalanmaların olduğu bölümde ortalama şiddet dağılımında azalmaya sebep olacaktır.



Şekil 2.11 Alıcı düzlemde hızme gezinmesi ve geliş açısı dalgalanmaları

Şekil 2.11 de görüldüğü gibi hızme gezinmesi ile birlikte varış açısı dalgalanmalarından dolayı oluşan hızme desenindeki bozulmalarda görülmektedir. Her T zamanı için ayrı ayrı hızme deseni ve hızmenin konumu görülmektedir.

BÖLÜM 3

LMDS ile KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Meteorolojik şartlara göre ve türbülansın çok şiddetli olduğu durumlarda KOH sistemlerin yedeği olarak, farklı geniş bant erişim teknolojisi kullanılabilir. Burada KOH sistemleri, duruma göre alternatifi veya tamamlayıcısı olabilecek yerel çok noktalı dağıtım sistemleriyle (LMDS) propagasyon ağırlıklı olarak karşılaştırılmıştır. İki sistem paralel bağlanarak oluşturulan sistem, yağmurlu, sisli havalara karşı devreye girdiği gibi, aşırı türbülansın etkisinin KOH sistemini devre dışı bıraktığı durumda da devreye girebilir.

3.1 KOH ve Diğer Geniş Bant Erişim Teknolojileri

Kablosuz optik haberleşme sistemleri diğer geniş bant haberleşme sistemlerinin yerine veya yedeği olarak kullanılabilir. KOH sistemlerin performansını daha iyi kavrayabilmek açısından farklı bir geniş bant erişim teknolojisi ile kablosuz haberleşme sistemlerini karşılaştırmak yararlı olacaktır. Propagasyon açısından performansının düştüğü durumlarda bir geniş bant erişim teknolojisi ile yedekleme ile KOH sistemleri etkileyen meteorolojik şartlar bertaraf edilebilir.

Bu çalışmada söz konusu kullanım amaçları için LMDS(yerel çok noktalı dağıtım sistemi) ve KOH sistemlerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Bu sistemlerin performansı özellikle meteorolojik şartlara çok bağlı olduğu için genel geçer bir sonuç çıkarmak zor olmakla birlikte, neredeyse üstel olarak artan bant genişliği ihtiyacı düşünüldüğünde orta-uzun vadede KOH sistemlerinin tercih edileceği aşikardır.

LMDS 20 GHz'in üzerindeki radyo frekanslarda, noktadan noktaya ve bir noktadan çok noktaya geniş bantlı bağlantı sağlayan haberleşme sistemleridir [21], [22]. Kablosuz optik haberleşme sistemleri ise optik dalga boylarında (görünür ışık ve yakın kızılaltı bölgesi) çoğunlukla noktadan noktaya bağlantılar için kullanılmakla birlikte, bir noktadan çok noktaya bağlantı da mümkün olabilir. KOH sistemleri üzerindeki çalışmalar 1960'lardan beri devam etmekle birlikte yaygın kullanıma girmesi bakımından her iki sistem de yeni teknolojidir ve dolayısıyla kullanıcı açısından

belirsizliklerle doludur. Bu belirsizliklerin en hayati olanı da söz konusu sistemlerin performanslarının propagasyon şartlarına (yani meteorolojik şartlara) sıkıca bağlı olması ve henüz çeşitli şartlarda uzun süre sorunsuz çalışarak kendilerini kanıtlamamış olmalarıdır. Bu sebeple karşılaştırma yapılırken propagasyon konusuna ağırlık verilmiştir.

Propagasyon şartları dışında KOH sistemlerinin performansını sınırlayan teknolojik bir eksiklik olmayıp, bu sistemler boşlukta (örneğin uydular arası haberleşme ortamında) sınırsız uzaklıklara neredeyse sınırsız bant genişliği sağlayabilecek potansiyele sahiptir.

Milimetrik dalgalarda çalışan cihazlar nispeten yeni teknoloji olduğu için, özellikle güç yükselteçleri konusundaki yeni gelişmeler LMDS sistemlerinin performansını arttırabilecektir.

Literatürde LMDS ve KOH sistemlerini karşılaştıran iki benzer çalışmaya rastlanmıştır [23], [24]. Diğerlerinden farklı olarak bu çalışmada karşılaştırma belirli bir kullanım amacıyla sınırlanarak ve propagasyon konusuna ağırlık verilerek yapılmaktadır.

3.2 LMDS (Yerel Çok Noktalı Dağıtım Sistemi)

LMDS bağlantısının erişebileceği mesafe istenen kullanılabilirlik oranına bağlıdır. Kullanılabilirlik haberleşme sisteminin yılda kesintiye uğramama yüzdesi olarak tanımlanabilir. Örneğin %99,9'luk kullanılabilirlik yeterli ise, mesafe 14 km'ye kadar çıkabilir [21]. Bu şartlarda kurulan bir bağlantı yılda en fazla 8 saat kesintiye uğrayabilecektir. %99,99'luk bir kullanılabilirlik için mesafe 5 km civarına düşer. %99,999'luk bir kullanılabilirlik istenirse azami mesafe 2,5 km'ye kadar düşebilir. Bu sayılar yaklaşık olup, kesin rakamlar sistem tasarımının ayrıntılarına bağlıdır.

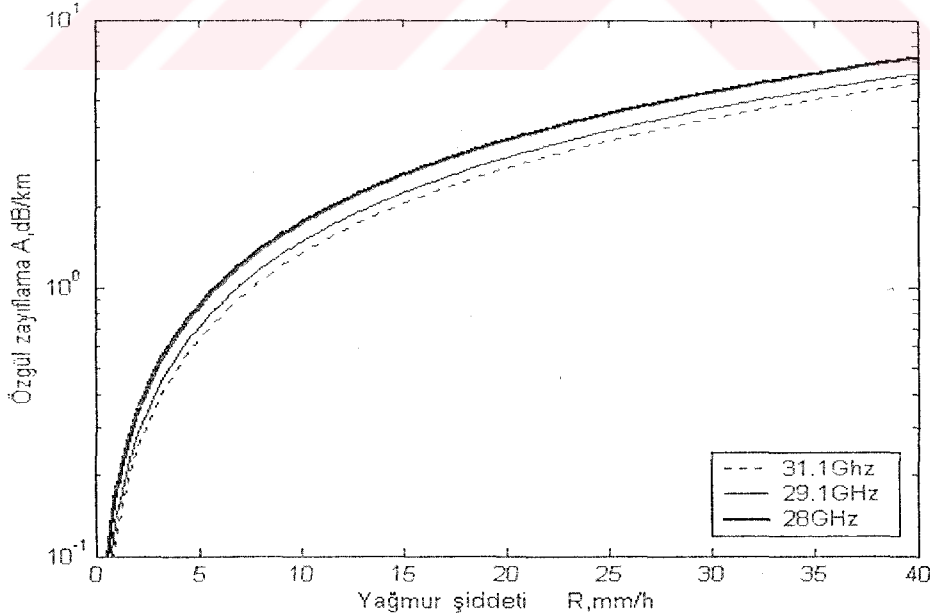
Modülasyon türü de erişim mesafesini etkiler. Diyelim QPSK veya 4-QAM modülasyonu kullanılarak 10 km'ye erişilebiliyorsa, 16-QAM için mesafe 5 km'ye, 64-QAM içinse 2,5 km'ye düşebilir [21]. Modülasyon yöntemine göre bant genişliği değişmektedir. 64-QAM toplam bant genişliği 4750 Gbps olurken, 16-QAM için bant genişliği 2000 Gbps olmaktadır. Bu değerler verici gücü ve diğer parametrelerin sabit olduğu varsayımına dayanır. Gerçekten de milimetrik dalga yükselteç teknolojisi henüz

gelişme aşamasında olduğu için, erişim mesafesini sınırlayan parametrelerden biri de verici gücüdür.

3.3 LMDS ve Yağmur Etkisi

Yağmurdan geçen elektromanyetik dalga, gücünün bir kısmının kayıplı bir dielektrik ortam olan su tarafından soğurulması yüzünden zayıflar. Ayrıca enerjinin bir kısmının yağmur damlaları tarafından hüzmeye dışına saçılması da zayıflamaya sebep olur. Saçılma kaybı soğurulma kaybına göre küçüktür. Zayıflamayı bulmak için geliştirilen teori bir yağmur damlasının soğurma ve saçılma kesitlerinin hesaplanmasına dayanır. Yağmur damlası küresel kabul edilirse bu hesap kolaydır, ancak milimetrik dalga boylarında damlanın gerçek şeklinin dikkate alınması gerekir, ki bu da zor ve zahmetli bir iştir. Bilgisayar desteğiyle matematiksel zorluklar aşılabilsede, asıl zorluk damla büyüklüğüne ve yağmur şiddetine bağlı olan damla şeklinin belirlenmesidir. Haberleşme sistem tasarımı çalışmalarında bu tür teorik hesaplar yerine, ölçüm sonuçlarından elde edilen ve birim mesafedeki zayıflamayı yağmur şiddeti ve sıcaklıkla ilişkilendiren

$$A = a.R^b \quad \text{dB/km} \quad (3.1)$$



Şekil 3.1 Yağmur şiddetine göre birim mesafedeki zayıflama

bağıntısı (ve benzerleri) daha kullanışlıdır [25]. Burada R mm/h cinsinden yağmur şiddeti, (LMDS frekansları ve 0 C sıcaklık için) $a = 4.21 \times 10^{-5} \times f^{2.42}$, $b = 2.63 \times f^{-0.272}$

olup, f dalganın GHz cinsinden frekansdır. Şekil 3.1’de bazı LMDS frekansları için zayıflamanın yağmur şiddetine göre değişimi görülmektedir.

Yağmur zayıflamasının yaratacağı sorunları önlemenin iki yolu vardır. Birincisi, sistemin kurulacağı yerin yağış istatistikleri incelenerek en kötü durumları karşılayacak şekilde güç bütçesine emniyet payı koymaktır. Diğeri, LMDS bağlantısını yağmurdan etkilenmeyen bir bağlantıyla yedeklemektir. Bu çevirmeli bir bağlantı olabileceği gibi, bir kablosuz optik sistem de olabilir. İlerleyen bölümde görüleceği gibi propagasyon özellikleri açısından LMDS ile KOH sistemleri birbirini tamamlayıcıdır.

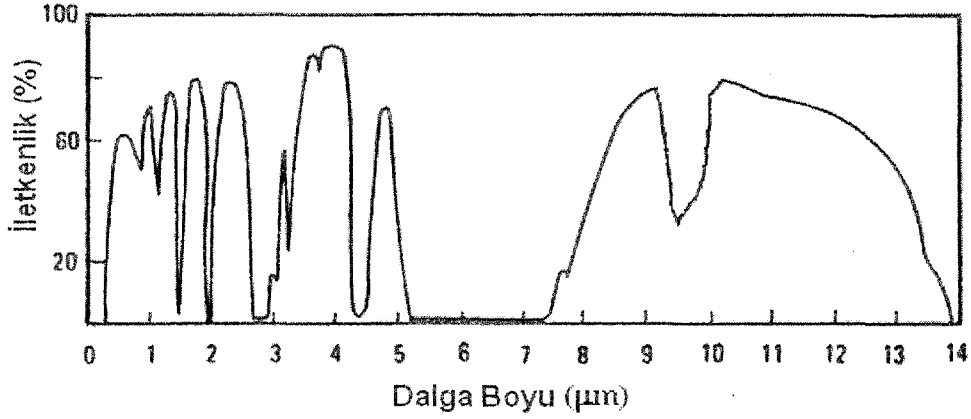
Çok yollu yansıma, alıcı ile verici arasında bulunabilecek ağaç yaprakları, depolarizasyon gibi diğer propagasyon konuları Papazian ve arkadaşları tarafından deneysel olarak incelenmiş ve ciddi bir sorun teşkil etmedikleri görülmüştür [26].

3.4 Kablosuz Optik Haberleşme Sistemleri

Atmosferin optik ışınlar üzerindeki etkileri (i) Açık hava etkileri, (ii) Bulanık hava etkileri, (iii) Yüksek güç etkileri olmak üzere üçe ayrılabilir. Yüksek güç etkileri, lazer ışığının gücünün atmosferde belirli bir yoğunluğun üzerine çıkarak atmosferin mahiyetini değiştirmesi sonucu ortaya çıkar. Göz güvenliği ve başka sebeplerle haberleşme sistemlerinde kullanılan güçler bu etkilerin ortaya çıktığı eşğin çok çok altındadır. Açık hava etkileri de (i) Molekül soğurumu ve Rayleigh saçılması, (ii) Türbülansın etkileri şeklinde ikiye ayrılır.

3.4.1 Molekül Soğurumu Ve Rayleigh Saçılması

Atmosferi oluşturan bileşenlerin moleküllerinin ışığı soğurması ve saçılmaya uğratması zayıflamaya sebep olur. Bu zayıflatma mekanizmaları ışığın dalga boyuna oldukça bağlıdır, ancak Şekil 3.2’de görüldüğü gibi atmosferin ışığı çok az kayıpla geçirdiği “pencereleri” vardır. Bu pencerelerin içinde kalan bir dalga boyu seçilir ve güç bütçesinde yeterli pay bırakılırsa bu etkiler sorun olmaz. En çok kullanılan 0.8 μm ve 1.55 μm dalga boylarında ışık gönderen lazerler, atmosferin az kayıpla geçirdiği pencereleri içerisindedir.



Şekil 3.2 Atmosferin ışığı çok az kayıpla geçirdiği pencereleri[27]

3.4.2 Atmosfer Türbülansının Etkileri

Üzerinde lazerin icat edildiği 1960'lerden önce çalışılmaya başlanan ve henüz kesin bir sonuca bağlanamayan önemli sorun türbülanslı atmosferin ışık üzerindeki etkileridir. İkinci bölümde de geniş bir şekilde açıklandığı gibi, türbülans havanın farklı kırılma indislerine sahip kısımlarını parçalayıp karıştırarak, kırılma indisinin konuma ve zamana göre kaotik olarak değiştiği bir ortama dönüştürür. Böyle bir ortamda dalga denklemi tam olarak çözülememiştir. Literatürde bazı varsayımlarla dalga denkleminde yaklaşık çözümler getiren veya dolaylı yöntemlerle türbülansın ışık üzerindeki gözlemlenebilen etkilerini betimleyen sayısız teorik çalışma mevcuttur. Birçok teorik sonuç deney sonuçlarıyla makul ölçüde uyum sağlamaktadır, ancak henüz tam olarak çözülemeyen problem ise türbülansın modellenmesidir. Bu yapılamadıkça da, oluşan devasa teorik literatür sistem tasarımcısına belirli bir yere kurulacak bir optik sistemin performansına ilişkin güvenilir bilgi sağlamayabilir. Güvenilir bilgi, şu anda ancak o yerde çok uzun vadeli ve sistematik türbülans ölçümlerinin yapılmasıyla elde edilebilir. [28], [29], [30], [31].

3.4.3 Bulanık Hava Etkileri

Bulanık hava denince görüş mesafesinin düştüğü sis, pus, kar, yağmur gibi meteorolojik olaylar ile atmosferde duman veya çeşitli parçacıkların bulunduğu durumlar anlaşılır. Optik haberleşme açısından bunlardan en önemlisi sistir. Yoğun siste ışığın zayıflaması rahatlıkla 20 dB/km'yi aşır, bir çok durumda optik bağlantıyı imkansız hale getirir [34]. Meteoroloji birimlerinde genellikle şehirlerin görüş mesafesi

verileri bulunur. Optik haberleşmede görünür ışıktan daha uzun dalga boyları kullanıldığı için bu mesafeler fazla ihtiyatlı sınırlar olarak kabul edilmelidir. Chu ve Hogg [34] 0.63 μm 'de yağmur zayıflatmasını 0.2 (dB/km)/(mm/h) civarında ölçmüşlerdir. Zayıflama 3.5 μm ve 10.6 μm 'de %20 ila %40 daha fazla çıkmıştır. Yağmur zayıflatması milimetrik dalgalardan görünür ışığa doğru yavaşça azalır [31], [32], [33], [34].

3.5 Türkiye ve Dünyadaki Durum

Yakın geçmişte ABD'de açık arttırmayla çeşitli firmalara LMDS lisansı verilmiştir. LMDS teknolojisi küçük-orta ölçekli iletişim şirketlerinin kentsel alan ağı (MAN) kurmaları için oldukça elverişli görülmektedir. IEEE'nin 802.16 kurulunun kablosuz MAN standartlarını oluşturma çalışmaları sürmektedir. Türkiye'de lisanslama çalışmaları konusunda bilgi almak için Telekomünikasyon Kurumu'nun çeşitli görevlileriyle temas kurulmuş, ancak henüz somut bir çalışma yapılmadığı izlenimi edinilmiştir. LMDS bağlantılarının bir seçenek olarak değerlendirilmeye alınabilmesi için özellikle büyük şehirlerde hangi frekans bantlarının iletişim şirketlerine tahsis edileceği, hangi frekansların noktadan-noktaya bağlantılar için kullanılabileceğinin netleşmesi gerekir.

Lisans gerektirmeyen optik sistemler piyasada yer edinme bakımından da bir adım önde gitmektedir. Münhasıran kablosuz optik haberleşme sistemleri geliştiren çok sayıda şirket mevcuttur [1]. Bu şirketlerden bazılarının ürünlerine ilişkin özet bilgiler Tablo 3.1'de verilmektedir. Tablodaki dalga boyu değerleri atmosferin az kayıpla geçirdiği pencereleri içerisindedir.

Türkiye'de de KOH sistemlerinin pazarlamasını yapan iki şirket tespit edilmiştir [2]. Bu şirketlerle temasa geçilmiş, ancak Türkiye'de bu sistemlerin 2004 başı itibariyle 72 adet kurulduğu öğrenilmekle birlikte, nerelere, hangi mesafelere kurulduğuna ilişkin henüz bilgi elde edilememiştir.

Tablo3.1 Bazı şirketlerin ürünlerine ilişkin özet bilgiler

Şirketler	Lightpointe	Canon Beam	fSona Beam	Tera Beam	Cablefree
Mesafe	400m-1.1km	1km-2km	50m-2.3km	20m-4km	200m-2km
Bit oranı	54Mbps-2.5Gbps	1.192Gbps	1.5Mbps-2.5Gbps	100Mbps-155Mbps	622Mbps
Dağa boyu	850nm-1550nm	785nm	1550nm	1550nm	780nm-980nm
Fiyat	Bilgi alınamadı	\$53500-\$63500	\$6000-\$50000	Bilgi alınamadı	\$10000-\$45000

3.6 Karşılaştırma

LMDS ve KOH sistemlerinde alıcı ve verici antenleri birbirini görmesi gerekir. Bu sistemler yayın uygulamalarına elverişli olmayıp, noktadan noktaya veya bir noktadan çok noktaya geniş bantlı bağlantılar için kullanılabilir. Bir LMDS bağlantısının sağlayacağı azami bant genişliği özgül sistem parametrelerine bağlı olmakla birlikte, yaklaşık 2 GHz'le sınırlıdır. Bu da modülasyon şekline göre maksimum bant genişliği 4750 Gp/s ile sınırlıdır. ABD'de verilen lisanslar ise 850 MHz'i kapsamaktadır. Günümüzde 1 Gb/s'lik veri hızı sağlayan KOH sistemleri ticari olarak mevcut olup, çok daha yüksek bant genişliğine sahip sistemler çeşitli amaçlarla geliştirilmiştir. KOH sistemlerinin sağlayabileceği potansiyel bant genişliği fiber optik sistemlere eşdeğerdir ve neredeyse sınırsızdır.

LMDS sistemlerinin birbirini girişime uğratmaması için kullanılacak frekansların, polarizasyon türlerinin, hücre boyutlarının vs. eşgüdümünün sağlanması gerekir, ki bu da yetkili bir kurumun kullanıcılara lisans vermesiyle sağlanır. Bu işlem sırasında toplam bant genişliğinin bölünerek çeşitli kullanıcılara paylaşılması ihtimali de kuvvetlidir. KOH sistemlerinde girişim sorunu olmadığından, göz güvenliği standartlarına uymak şartıyla serbestçe kullanılabilir.

Bu sistemlerin erişebileceği mesafeler öncelikle istenen kullanılabilirlik oranına ve hava şartlarına bağlıdır. İlke olarak az yağmur alan bölgelerde LMDS, sis ve pusun az görüldüğü, havanın genellikle açık olduğu bölgelerde KOH sistemleri tercih

edilebilir. Milimetrik dalga boylarında yağmur zayıflatması sis zayıflatmasından yaklaşık 100 kat fazla iken, optik dalga boylarında sis zayıflatması yağmur zayıflatmasının yaklaşık 100 katıdır. Dolayısıyla bu sistemler birbirini tamamlayıcı özelliklere sahip olduğundan, birlikte kullanılarak sistemin hava şartlarına olan bağışıklığı artırılabilir. Bununla birlikte, atmosfer türbülansının ışık üzerindeki etkileri birikimlidir ve türbülans şiddetine bağılı olarak 1 km'yi aşan mesafeler için çok ciddi sorunlar oluşturur. Bu sebeple, Tablo 1'de de görüldüğü gibi, piyasadaki sistemlerin mesafeleri şimdilik birkaç kilometre ile sınırlıdır. Ancak atmosfer türbülansının sistem performansı üzerindeki etkilerini en aza indirmek için alınabilecek çeşitli önlemler üzerinde çalışılmakta olup, çok uzak olmayan bir gelecekte erişim mesafelerinin artırılması muhtemeldir.

Bazı durumlarda önemli olabilecek bir konuda haberleşme güvenliğidir. Günümüzde haberleşme güvenliği çeşitli kriptografi yöntemleriyle sağlanmaktadır, ancak birilerinin bu yöntemlerin açıklarını bulmadıklarından hiçbir zaman emin olunamaz. Optik haberleşme sistemlerinde hüzme genişliği çok küçük (uygulamada genellikle miliradyanlar seviyesinde olmakla birlikte, istenirse mikroradyanlar seviyesine indirilebilir) olduğu için, üçüncü kişilerin sinyali elde etme ihtimali neredeyse sıfırdır.

Tablo 3.2 KOH ve LMDS karşılaştırılması

KOH Sistemleri	LMDS
Lisans gerektirmez	Lisans gerektirir
Bant genişliği neredeyse sınırsız	Azami bant genişliği 2 GHz'le sınırlı Bant genişliğinin paylaşılması gerekir
Erişim mesafesi birkaç km ile sınırlı	Erişim mesafesi 10 km'yi aşabilir
Daha güvenli haberleşme sağlar	KOH sistemleri kadar güvenli değildir
Sis ve pusun az görüldüğü, türbülans şartlarının elverişli olduğu bölgeler için uygundur	Az yağmur alan bölgeler için uygundur
Piyasada daha kolay bulunabilir	Yeni gelişen bir teknoloji. Yeterince yaygın değil

LMDS ve KOH sistemlerinin ana hatlarıyla karşılaştırılması Tablo 3.2'de özetlenmiştir. Bu sistemlerin performansı özellikle meteorolojik şartlara çok bağılı olduğu için genel geçer bir sonuç çıkarmak zordur. Duruma göre mevcut şartların tümü

dikkate alındığında bunlardan biri veya diğeri tek seçenek olabilir. Eğer ilk değerlendirmede her iki sistem de seçimlik olabiliyorsa, neredeyse üstel olarak artan bant genişliği ihtiyacı düşünülerek KOH sistemlerinin tercih edilmesi gerektiği, orta-uzun vadede tek seçenek olarak kullanılabilceğini söylenebilir.



BÖLÜM 4

KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE DALGA BOYU ÇEŞİTLEMESİ

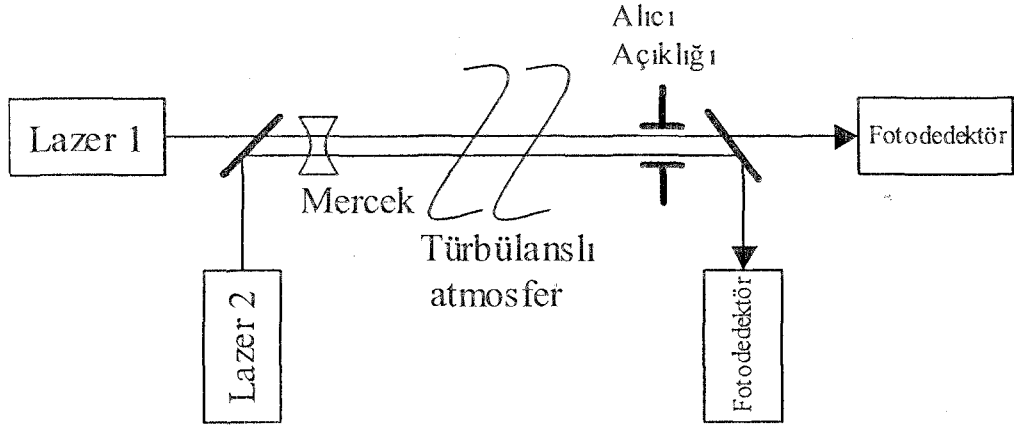
Bu bölümde atmosfer türbülansının etkilerine karşı kablosuz optik haberleşme sisteminin performansını artıracakı düşünölen dalga boyu çeşitlemesi yöntemi işlenmiştir. Dalga boyu çeşitlemesinin hangi şartlarda, ne kadar parıldama etkisinin azaltılmasında etkili olacağı hakkında çalışmalar yapılmış ve Quantum cascade (QC) lazerler sayesinde dalga boyu çeşitlemesinin uygulanabilme aralığının genişlemiş olması münasebetiyle, çeşitleme için en uygun dalga boyu ifade edilmiştir. Diğer bir çeşitleme yöntemi olan uzaysal çeşitleme ile karşılaştırılması yapılmış, birbirine olan üstünlükleri ve dezavantajları üzerinde durulmuştur.

4.1 Dalga Boyu Çeşitlemesi

Dalga boyu çeşitlemesi, türbölanslı atmosferin kablosuz optik haberleşme sistemlerinin performansına etkilerini en aza indirecek önlemler arasında düşünölmüş, fakat zayıf türbölans teorisi ile birlikte düşünöldüğü için, pek kullanışlı olmadığı kanaatine varılmıştı. Erken dönem araştırmacıları, zayıf türbölans teorisiyle hesaplanan ışık şiddeti dalgalanmalarının spektral kovaryansının büyük dalga boyu farklarında bile yüksek korelasyon göstermesi sebebiyle, dalga boyu çeşitlemesinin bu bağlamda işe yaramayacağına kanaat getirmişlerdir. Ancak, daha sonraki yıllarda yürütölen ve spektral kovaryansın geçerlilik sınırlarını genişleten teorik ve deneysel çalışmalar ile yeni geliştirilmekte olan ve kullanılabilir dalga boyu sınırını diğer atmosfer pencerelerine doğru genişleten QC lazerler sayesinde, dalga boyu çeşitlemesinin yeniden bir seçenek olabileceği görölmektedir. Burada dalga boyu çeşitlemesi her yönüyle ele alınarak, ve özellikle de uzaysal çeşitleme ile karşılaştırılarak, hangi şartlarda tercih edilebileceği ortaya koyulmaktadır.

Dalgaboyu çeşitlemesi yöntemi iki farklı dalgaboyunda optik ışın gönderilerek atmosferin etkilerinin azaltılmasına çalışılan bir yöntemdir. Sistemde iki farklı dalga

boyunda optik ışın üreten lazer ve iki farklı fotodedektör vardır. Şekil 4.1 de dalga boyu çeşitlemesi konfigure edilmiş optik haberleşme sistemi görülmektedir.



Şekil 4.1 Dalga boyu çeşitlemesi

Farklı dalga boyundaki optik ışınlar kırılma indisi dalgalanmalarında farklı etkilere maruz kalırlar. Bu nedenle farklı dalgalarda optik ışınların atmosferdeki türbülans etkilenmelerinde ilişki vardır. Aralarındaki bu ilişki dalga boyu farklarının artırılmasıyla aynı atmosfer etkilerinden, etkilenmelerinde farklılıklar görülecektir. Burada uygun dalga boyları ile çeşitleme yapılırsa aralarındaki korelasyon düşük çıkabilir. Böylece çeşitli işaret işleme yöntemleri bu farklı dalga boyundaki işaretler parıldama etkisi altında daha kolay anlamlandırılabilirler.

4.2 Spektral kovaryans teorisi

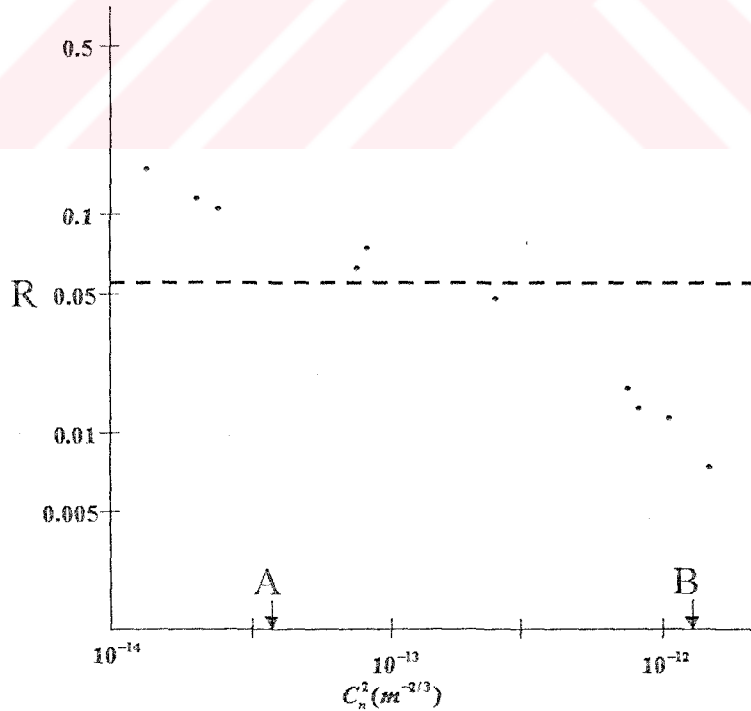
Kabaca saçılma açısını veren dalga boyu/çevri büyüklüğü oranları farklı olduğu için, türbülanslı atmosferde yayılan farklı dalga boylarındaki ışık hüzmelerinin dalgalanan şiddetleri arasındaki korelasyon katsayısı 1'den küçük olacaktır. Yani hüzmeler birbirinin aynı kırılma indisi alanını görseler bile, hüzmelerin karşılaştığı türbülans miktarı arttıkça ışık şiddetleri arasındaki korelasyon azalacaktır. Fried sıfır iç ölçek ve zayıf türbülans varsayımıyla, farklı dalga boylarındaki iki dalganın korelasyonunu veren bir ifade geliştirmişti. Fried spektral kovaryansın dalga boyu farkına bağımlılığının çok zayıf olduğunu görerek, dalga boyu çeşitlemesi ile parıldamanın azaltılması yönteminin pek umut vaat etmediği sonucuna varmıştır [35]. Zayıf türbülans teorisine göre, sıfır iç ölçekli ortamdaki bir nokta alıcı için korelasyon katsayısı

$$R=(1-\Delta^{5/6})/(1-\Delta^2)^{5/12} \quad (4.1)$$

ile verilir [35]. Burada $\Delta=|\lambda_1-\lambda_2|/(\lambda_1+\lambda_2)$ 'dir. Dalga boylarının $0.8 \mu\text{m}$ ve $1.55 \mu\text{m}$ olduğu bir çeşitleme düzeneği çok kullanışlı olabilirdi, ancak dalga boyu farkının nispeten büyük olduğu bu durumda bile korelasyon katsayısı 0.642 'dir. Korelasyon katsayısı ancak çok büyük farklar için ($\lambda_1=10.6 \mu\text{m}$, $\lambda_2=0.5 \mu\text{m}$) cazip seviyelere düşmektedir ($R=0.157$).

Ben Yosef ve arkadaşları korelasyon katsayısının iç ölçeğe duyarlı olduğunu göstermiştir. Sıfırdan büyük iç ölçek için genellikle katsayı daha yüksektir [36]. Sıfırdan büyük alıcı açıklığı çapı için de katsayı yükselir. Alıcı açıklığının etkisini içeren teorik bir ifade, zayıf türbülans için geliştirilmiştir [37], [38].

Spektral korelasyon katsayısının türbülans şiddetinden bağımsız olduğunu öngören zayıf türbülans teorisinin yetersizliğine ilk dikkati çekenler Pincus ve Kerr olmuştur; ölçülen katsayı, görece zayıf türbülans şiddetleri için teorik değerlerden yüksek çıkmış ve türbülans şiddeti arttıkça sürekli bir düşüş göstermiştir [39].



Şekil 4.2 Zayıf türbülans teorisi ve deneysel değerler[38]

Yapılan deneyler de korelasyon katsayısının türbülans şiddeti yüksek çıktıkça korelasyon katsayısının düştüğünü göstermektedir. Şekil 4.2 de görülen ölçümlerde dalga boyları 0.488µm ve 10.6µm alınarak, dalga boyu çeşitlemesi yapılmıştır. Menzil L=1600m için korelasyon katsayıları ölçülmüştür[39]. Görüldüğü gibi zayıf türbülans teorisi ile karşılaştırıldığında zayıf türbülans bölgesinde korelasyon daha yüksek çıkmakta ve türbülans şiddeti arttıkça korelasyon katsayısında düşüş olmaktadır. Zayıf türbülans teorisinin kuvvetli türbülans bölgesi için korelasyon katsayısının tanımlanmasında yetersizliğini göstermektedir.. Korelasyon katsayısının iç ölçek ve faz uyumluluk ölçeği ile ilişkili olduğunu düşündürmektedir.

Gurvich ve arkadaşları tarafından kuvvetli türbülans bölgesinde yürütülen deneyler de bu bulguyu doğrulamıştır [40]. Bilindiği kadarıyla, kuvvetli türbülans bölgesi için tam bir teori mevcut değildir. Bununla birlikte, Churnside ve arkadaşları [36] zayıf türbülans ifadesinde, çok sağlam bir teorik dayanağı olmayan, ancak fiziksel olarak makul görünen ve deneysel korelasyon verileriyle oldukça iyi uyuşan bir değişiklik önermiştir.

Parıldamanın spektral kovaryansının ifadesi aşağıdaki gibi teorik olarak zayıf türbülans ifade edilmiştir[36];

$$\begin{aligned}
B_{1,2}(\lambda_1, \lambda_2, D, I_0) &= 16\pi^2 k_1 k_2 \int_0^L dz \int_0^\infty d\kappa \kappa \\
&\times \phi_n[\kappa, C_n^2(z), I_0(z)] \\
&\times \sin\left[\frac{\kappa^2 z(L-z)}{2k_1}\right] \\
&\times \sin\left[\frac{\kappa^2 z(L-z)}{2k_2}\right] \\
&\times \left[2 \frac{J_1(\kappa Dz/2L)}{(\kappa Dz/2L)}\right]^2
\end{aligned} \tag{4.2}$$

Burada $k_{1,2} = 2\pi/\lambda_{1,2}$ optik dalga sayısı , yayılım mesafesi L, $\lambda_{1,2}$ optik ışının dalga boylarını ve hüzmelin genişliği D olarak gösterilmiştir. Düzensiz kırılma boyunca dalga sayısı κ , ϕ_n kırılma indisi güç spektrumudur. Kırılma indisi güç spektrumu, spektrumun seviyesini tanımlayan C_n^2 kırılma indisi yapı parametresine bağlıdır. I_0 iç

ölçektir. Kolmogorov spektrumu $\phi_n[\kappa, C_n^2(z), I_0(z)] = \phi_k[\kappa, C_n^2(z)]\bar{F}_{IS}[K, I_0(z)]$ tanımladığı denklemdir. Burada $\phi_k[\kappa, C_n^2(z)] = 0.033C_n^2(z)\kappa^{-11/3}$ olarak tanımlanan fonksiyon ve $\bar{F}_{IS}[\kappa, I_0(z)] = \exp(-1.28\kappa^2 I_0^2) + 1.45 \times \exp[-0.97[\ln(\kappa I_0) - 0.45]^2]$ olarak tanımlanmış fonksiyondur [36]. Buradan daha özet bir ifadeyle parıldamanın spektral kovaryansı;

$$B_{1,2}(\lambda_1, \lambda_2, D, I_0) = 0.33 \frac{4\pi^2}{L^2} \int_0^L dz C_n^2(z) z^2 (L-z)^2 \times \int_0^\infty d\kappa \kappa^{4/3} \bar{F}_{IS}[\kappa, I_0(z)] \times F_{FZ1}[\kappa, \sqrt{\lambda_1 L}] F_{FZ2}[\kappa, \sqrt{\lambda_2 L}] \times F_A[\kappa, D] \quad (4.3)$$

Burada $F_{FZ1,2}[\kappa, \sqrt{\lambda_{1,2} L}] = \sin \text{ci} \left[\frac{\kappa^2 z(L-z)}{2k_{1,2}} \right]$ ve $F_A[\kappa, D] = J_{1e^2} \left(\frac{\kappa D z}{2L} \right)$ olarak ifade edilmektedir. Bu ifadeler zayıf türbülans için geçerlidir. Zayıf türbülansta parıldama kovaryansının korelasyonu düşük değerlerde çıkmaktadır. Kuvvetli türbülansta korelasyon katsayı değerlerine bakılacak olursa, ρ_0 faz uyumluluk ölçeği (coherence scale) göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Kuvvetli türbülansta ($\rho_0 > (\lambda L)^{1/2}$) çok yüksek korelasyon olduğu görülmektedir.

Kuvvetli türbülansta parıldama kovaryansı hesaplanırken, ρ_0 parametresinin etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır. Faz uyumluluk ölçüsü deneysel sonuçlardan spektral kovaryans değerini etkilediği görülmüştür. Burada aşağıdaki fonksiyon teorik bir dayanağı olmayan fakat deneysel sonuçlarla iyi örtüşen denklem 4.4'deki ifadeyi oluşturmak için spektral kovaryans ifadesindeki integral ifadesinin içine çarpım olarak gelerek faz uyumluluk yarıçapını da spektral kovaryans ifadesinde etkili olması amaçlanmıştır. Kuvvetli türbülans bölgesindeki spektral kovaryans ifadesi elde edilmeye çalışılmıştır [36].

$$NC = \exp\left[-\frac{1}{2}D(z, 2/\kappa)\right] \quad (4.4)$$

Burada $\rho_0 = (0.545k_1k_2C_n^2)^{-3/5} \gg l_0$ şartı sağlandığında aşağıdaki ifade kullanılır.

$$D(p, \rho_0) = (p / \rho_0)^{5/3} \quad (4.5a)$$

Diğer bir şart olarak $\rho_0 = (0.545k_1k_2C_n^2 l_0^{1/3})^{-1/2} \ll l_0$ durumunda ise aşağıdaki ifade MCF fonksiyonu bulunurken kullanılır.

$$D(p, \rho_0) = (p / \rho_0)^2 \quad (4.5b)$$

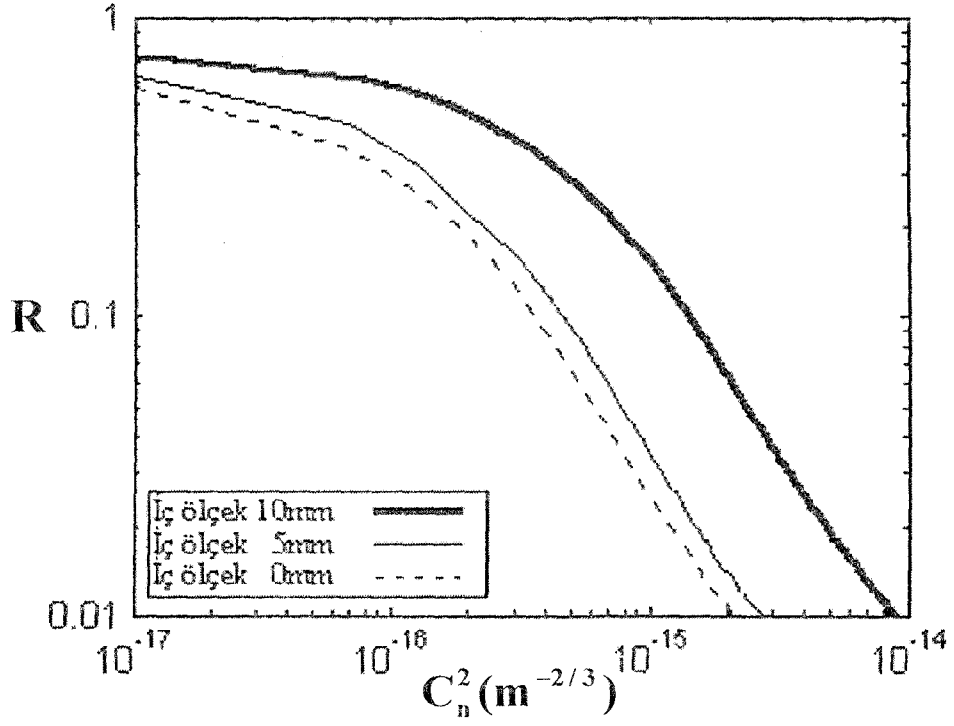
Parıldamanın spektral kovaryansından korelasyon katsayısı ifade edilmiştir. Burada korelasyon katsayısı;

$$R = \frac{B_{1,2}}{\sqrt{(B_{1,1}^2 \cdot B_{2,2}^2)}} \quad (4.6)$$

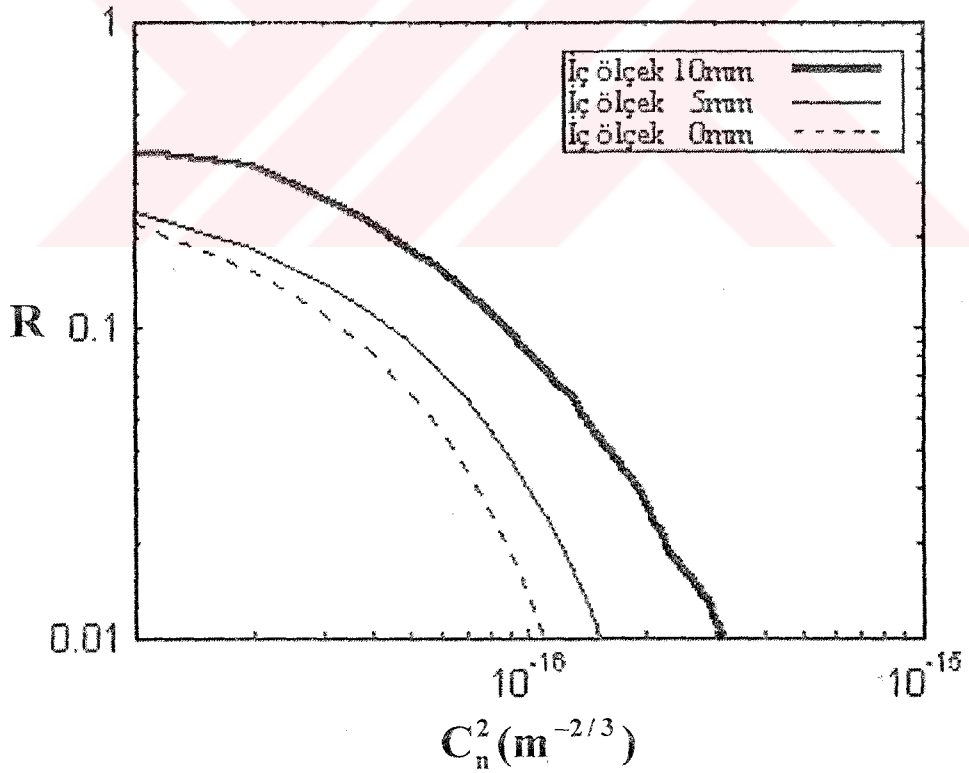
olarak verilir. $B_{1,1}$ çeşitleme yapılacak birinci dalga boyu için , $B_{2,2}$ ikinci dalga boyu için parıldamanın varyansıdır. Önerilen ifade kullanılarak ($L=4$ km) nümerik olarak spektral korelasyon katsayıları çeşitli iç ölçek değerleri için hesaplanmıştır. Şekil 4.3 de görülmektedir.

Burada 0.8-1.55 μm ile yapılacak dalga boyu çeşitlemesi için ve 0.8-3.6 μm ile yapılacak dalga boyu çeşitlemesi için korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Ayrıca türbülans şiddetine göre korelasyon katsayısının değişimi de gösterilmiştir.

Şekil 4.3 incelendiğinde, optik haberleşmede yaygın kullanılan 0.8 ve 1.55 μm lazerlerle yapılacak çeşitlemenin, ancak kuvvetli türbülans ve küçük iç ölçek şartlarında yüksek başarımlı sağlayabileceği, daha geniş kullanım alanı için ikinci dalga boyunun daha uzun olması gerektiği görülmektedir. Son yıllarda geliştirilen ve 3.5-20 μm arasındaki yakın kızılaltı bölgesinin tamamını kapsayan yarı iletken QC (quantum cascade) lazerlerin, atmosfer üzerinden yüksek bant genişlikli bağlantılar sağlayabileceği gösterilmiştir [41], [42].



Şekil 4.3 Spektral korelasyon katsayısının türbülans şiddetine göre değişimi (0.8µm-1.55µm)



Şekil 4.4 Spektral korelasyon katsayısının türbülans şiddetine göre değişimi (0.8µm-3.8µm)

Şekil 4.4 incelendiğinde 0.8 ve 3.6 μm lazerlerle yapılacak çeşitlemenin kuvvetli türbülans ve iç ölçek şartlarının büyük olması durumunda da başarımlı sağlayabileceği görülmektedir. Optik haberleşmede yaygın kullanılan 0.8 ve 1.55 μm ile yapılan çeşitlemeye göre daha geniş kullanım alanı sağlayabilir. Zaten amaç mesafeyi 4 km 'ye çıkartmak olduğu için kuvvetli türbülans bölgesinde dalga boyu çeşitlemesine ihtiyaç olacaktır.

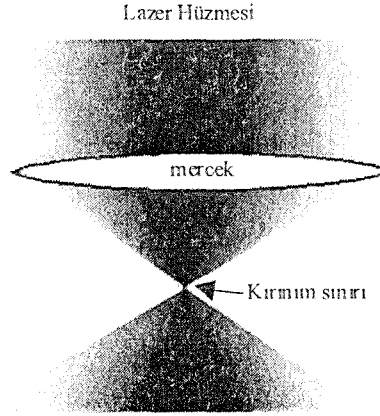
4.3 Quantum Cascade Lazerler (QC)

Quantum Cascade lazerler son yıllarda geliştirilen ve 3.5-20 μm arasındaki yakın kızılaltı bölgesinin tamamını kapsayan yarı iletken lazerlerdir. Geleneksel yarı iletken lazerlerden farklılıkları vardır. Geleneksel yarı iletken lazerlerde p-n jonksiyonu formunda, elektron yüksek enerji seviyesinden daha düşük enerji seviyesine geçer ve dışarı belirli bir dalga boyunda foton yayar. Dalgaboyu kullanılan materyallerin cinsine göre değişir. QC Lazerlerde ise bir çok yarı iletken katman arasında belirli bir enerji seviyesine yükseltelen elektron için bir çok katmanda bu devam ettirilir. Son aktif bölgede enerjisi düşük enerji seviyesine geçer ve her geçişte foton yayar. Bu olay yarı iletken bir çok katman arasında yapılır. QC lazerlerde dalga boyu yarı iletken katmanların kalınlığına bağlı olduğu için yayılan fotonun dalga boyu geniş aralıklarda ayarlanabilir. QC lazerlerde materyal olarak AlInAs/GaInAs ve GaAs/AlGaAs çeşitli lazer tiplerine göre kullanılır. QC lazerler üretilen ışık gücü diğer yarı iletken lazerlere göre daha fazladır [43]. Ayrıca oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda da çalışabilir. Ancak çok kolay kırılabilir yapıya sahiptir. Güç düzensizliği ve dalgalanmalar olmaktadır [44].

4.4 Dalga boyu seçimi

Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde dalga boyu seçimi, dalga yayılımı meseleleri, arka plan ışınması, göz güvenliği ve gerekli teknolojilerin birlikte değerlendirilmesine dayanmalıdır. Shaik ve Hemmati ile Manor ve Arnon'un çalışmaları bu amaçla kullanılabilir [45] [46]. Teknolojik ve ekonomik sorunların zamanla çözüleceği varsayılırsa, 3.5-20 μm aralığında mümkün olan en kısa dalga boyunu seçmek için iki temel sebep vardır: (i) Serbest uzay kaybının artması yüzünden

alıcıya ulaşan güç yoğunluğu λ^2 ile orantılı olarak azalır. (ii) Atmosfer $4 \mu\text{m}$ 'den büyük dalga boylarında ikincil bir ışık kaynağı gibi davranarak kuvvetli bir arka plan gürültüsüne sebep olur.



Şekil 4.5 Kırınım Sınırı

Hüzme gezinmesi dalga boyundan bağımsızdır, ancak dalga boyu arttıkça kırınım sınırlı hüzme genişliği artacağından, hüzme gezinmesinin etkisi görece azalabilir. Bir hüzmenin kırınım sınırı; hüzmenin çapını alabileceği en küçük değerdir. Daha küçük değerlerde alınırsa hüzme daha kısa mesafede kırınım sebebiyle genişlemeye başlayacaktır. Kırınım sınır dalgaboyu ile ilişkilidir. Dalga boyu artarsa kırınım sınır değeri artacaktır. Şekil 4.5 de görüldüğü gibi mercek ile bir noktaya odaklanmış hüzmenin çapı kırınım sınırına kadar küçülür ve sonra iraksamaya başlar.

Işığı çok az kayıpla geçiren atmosfer pencereleri içinde olmak kaydıyla, dalga boyunun molekül soğurumu ve Rayleigh saçılması üzerindeki etkisi ihmal edilebilir. Manor ve Arnon'a göre, sadece bulanık (sisli, puslu, yağmurlu vs.) hava etkileri ele alındığında tercih edilmesi gereken dalga boyu aralığı $8-13 \mu\text{m}$ 'dir [46]. Ancak diğer etkiler de dikkate alındığında, elde edilen çok mütevazî kazancın yukarıda sayılan olumsuz etkileri karşılamaya yetmediği görülmektedir.

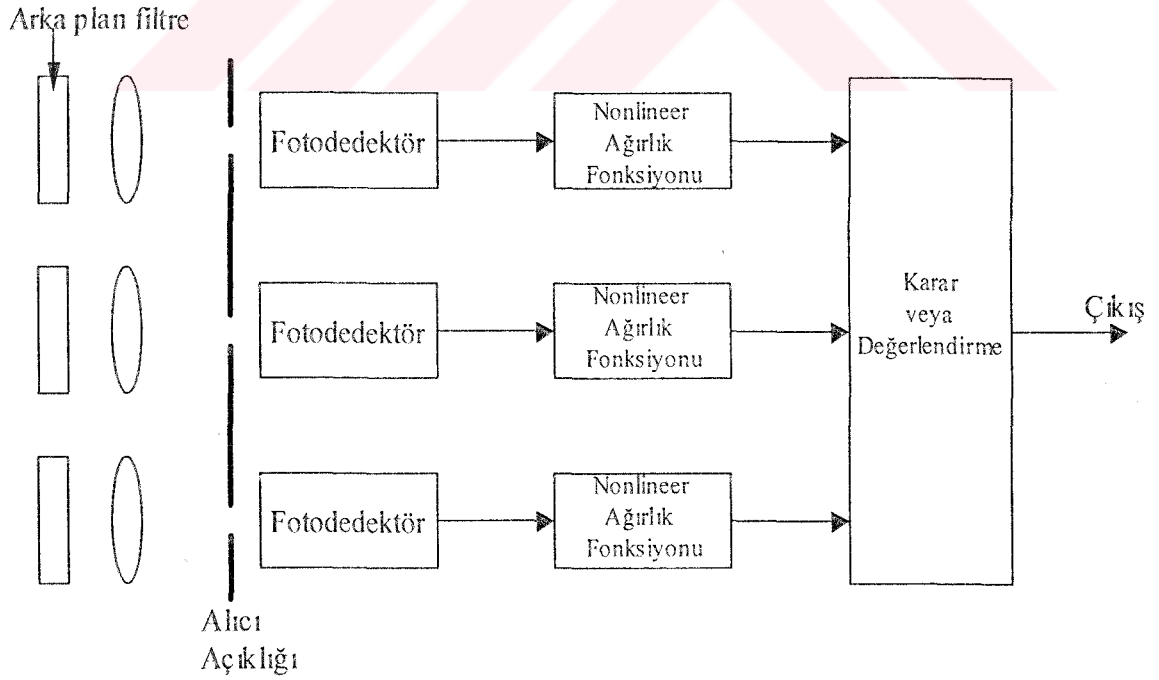
Uzun dalga boylarının cazip yanı parıldama varyansının $\lambda^{-7/6}$ ile orantılı olarak azalmasıdır. Kullanılan dalga boyu artırılarak parıldama ihmal edilebilecek seviyelere

indirilebilir; tabii ki bu durumda dalga boyu çeşitlenmesine gerek kalmaz. Dolayısıyla, bu seçenek dalga boyu çeşitlenmesinin alternatifi olarak düşünülmelidir.

1968'de NASA ve MIT tarafından ortaklaşa düzenlenen optik haberleşme konferansında 3.8 μm 'de düşük arka plan gürültüsüyle çakışan düşük kayıplı bir atmosfer penceresi bulunduğu ifade edilmiş, ancak uygun ışık kaynağı ve dedektör olmadığı için bu potansiyel değerlendirilememiştir [47]. Bu sorun artık aşıldığına göre, dalga boyu çeşitlenmesinde kullanılacak ikinci kaynak için 3.8 μm önerilebilir. Şekil 4.4'de verilen, $\lambda_1=0.8 \mu\text{m}$ ve $\lambda_2=3.8 \mu\text{m}$ için korelasyon katsayısının türbülans şiddetine göre değişimi, bu sistemin diğerine göre çok daha geniş bir uygulama alanı olacağını göstermektedir.

4.5 Uzaysal çeşitleme

Türbülansın etkilerine karşı alınabilecek önlemlerden bazıları birlikte, bazıları ise birbirinin yerine kullanılabilir. Bu konuda ayrıntıya girilmesi çalışmanın kapsamını çok aşacağından, parıldamanın etkisini azaltmak için çeşitlemeye karar verildiği varsayılarak, dalga boyu çeşitlenmesi uzaysal çeşitleme ile karşılaştırılacaktır.



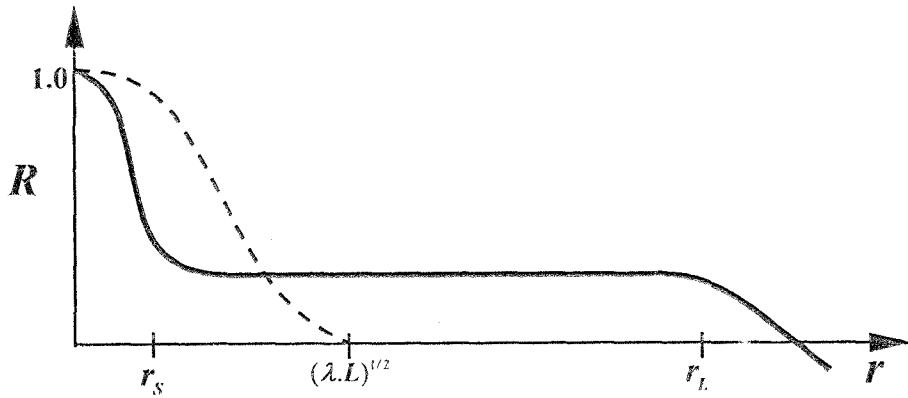
Şekil 4.6 Alıcı için uzaysal çeşitleme

Atmosferdeki türbülansının etkilerine karşı alınan önlemlerden bir tanesi Uzaysal çeşitleme birden fazla alıcı veya verici kullanarak yapılan bir optik haberleşme sistemidir. Optik ışınlar atmosferde farklı yollardan ilerleyerek farklı etkilere maruz kalırlar. Bu yüzden optik ışının bozulması da farklı olacaktır. Optik ışın aynı dalgaboyunda, birden fazla vericiden tek alıcıya ya da bir vericiden birden çok alıcıya gönderilerek uzaysal çeşitleme yapılır.

Kuvvetli türbülansla uzaysal çeşitlemede birden fazla alıcı veya verici arasındaki mesafe parıldama kovaryansında etkili rol oynamaktadır. Şekil 4.6 de alıcıda kullanılan uzaysal çeşitleme yöntemi görülmektedir. Burada belirli yanal mesafeler bırakılarak, üç farklı alıcı kullanılmıştır. Fotodetektörden alınan üç işaret karar verme yöntemleri ile çıkış olarak alınmıştır.

4.6 Dalga Boyu Çeşitlemesi ile Uzaysal Çeşitlemenin Karşılaştırılması

Farklı dalga boylarında birden fazla verici kullanmak yerine, tek bir verici ve aralarında yeterince yanal mesafe bulunan birden fazla alıcı kullanarak da çeşitleme yapılabilir. Zayıf türbülansla ışık şiddeti dalgalanmaları $r=(\lambda L)^{1/2}$ civarındaki yanal mesafe içinde ilişkilidir. Yani menzilin kısa olduğu durumlarda uzaysal çeşitleme çok caziptir. Bu mesafeden sonra korelasyon katsayısı yaklaşık sıfırdır. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi, kuvvetli türbülans bölgesindeki uzaysal korelasyon, zayıf türbülans bölgesinden çok farklıdır. Kuvvetli türbülansla korelasyon katsayısı $r=(\lambda L)^{1/2}$ 'den daha kısa bir mesafede (r_s) hızla düştükten sonra neredeyse yatay seyrederek ve $r=(\lambda L)^{1/2}$ 'den daha büyük bir mesafede (r_L) sıfıra düşer.



Şekil 4.7 Yanal mesafe ile korelasyon katsayısının arasındaki ilişki

Buna göre kuvvetli türbülans bölgesinde, alınan sinyaller arasındaki korelasyonu sıfıra düşürmek için alıcılar arasında en az r_L kadar mesafe bırakılmalıdır. Bireysel tüketiciye yönelik uygulamalarda tasarımın derli toplu olması çok önemli olduğundan, gerekli r_L mesafesi arttıkça uzaysal çeşitleme dalga boyu çeşitlemesine göre cazibesini kaybedecektir.

Zayıf türbülans bölgesinde korelasyon katsayısı çok küçük yanal mesafe (r_L) değerlerinde sıfıra yaklaşmaktadır. Bu değer birkaç santimetredir. Ancak kuvvetli türbülans bölgesinde yanal mesafe (r_L) korelasyon kat sayısının sıfıra yaklaşması için birkaç metre olması gerekmektedir.

Yanal mesafenin değerinin bulunması için belirli şartlar dahilinde bir ifade geliştirilmiştir. Bu ifade

$$\sigma_1^2 = 1.23k^{7/6}C_n^2L^3 \gg 1 \quad (4.6a)$$

$$\sigma_0^2 = (2\pi/l_0)^{7/3}C_n^2L^3 \gg 1 \quad (4.6b)$$

şartları sağlanırsa tablo 4.1 deki ifadeler ile yanal mesafe hesaplanabilir. Daha geniş kullanım için ne kadar yanal mesafenin gerektiği konusunda fikir sahibi olunabilir[48].

Tablo 4.1 Uzaysal kovaryansın parametreleri [48]

Durum	H	r_S	r_L
$\frac{l_0}{\rho_0} \ll 1$	$\frac{0.43}{(\sigma_1)^{4/5}}$	ρ_0	$\frac{0.18(\lambda L)}{\rho_0}$
$\frac{l_0}{\rho_0} \gg 1$	$\frac{1.02}{(\sigma_0)^{1/3}}$	$0.77(\rho_0)^{5/6}(l_0)^{1/6}$	$\frac{0.16(\lambda L)}{(l_0)^{1/6}(\rho_0)^{5/6}}$

Tablo 4.1 deki ifadeler kullanılıp şartlar sağlandığındaki olması gereken yanal mesafe farklı iç ölçek şartları ve kuvvetli türbülans için hesaplandı. Yanal mesafe değeri 2.74m ve 3.47 m arasında değerler olarak hesaplandı. Bu değerler iç ölçek ve faz uyumluluk ölçüsünün değerlerine göre değişim göstermektedir. İç ölçek küçük değerlerde ise yanal mesafe daha küçük, büyük olduğu zaman daha büyük değerlerde olmaktadır. Ama kuvvetli türbülans bölgesinde uzaysal çeşitleme yapılacak ise yanal mesafenin birkaç metre olması gerektiği görülmektedir.

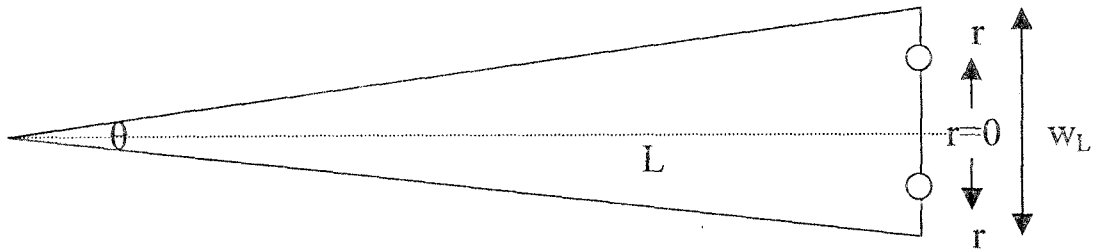
Vericiden çıkan ışığın şiddetinin yanal mesafeye (r) göre değişimi (TEM₀₀ temel mod için) gauss dağılımına uyar (hüzmenin merkezi r=0'dır). Zayıf türbülans bölgesinde ışık bu şeklini muhafaza eder. Yani, alıcı düzleminde de ışık şiddeti Gauss eğrisi şeklinde değişir. Alıcı düzleminde hüzme merkezindeki (azami) ışık şiddeti ile başka bir nokta arasındaki ışık şiddeti oranı, Vericinin veya alıcının uzak alanında bulunduğu varsayılarak

$$I/I_0 = \exp [- (2r^2) / (L^2 \cdot \theta^2)] \quad (4.7)$$

bağıntısından bulunabilir [49]. Burada θ vericinin iraksama açısıdır. Iraksama açısı, yani ışığın alıcıya ulaşmaya dek kırınım yüzünden ne kadar genişleyeceği, dalga boyuna, hüzme belinin yarı çapına ve kavis yarıçapına bağlıdır:

$$\theta = f(\lambda, w_0, R_0) \quad (4.8)$$

Uzaysal çeşitlemede alıcılar arasındaki mesafe (r_L) ışığın alıcı düzlemindeki çapını (w_L) aşmamalıdır. Uzaysal çeşitleme yapılırken yanal mesafenin alıcı düzlemdeki ışığın erişebileceği çapı aşmaması gerekir. Bu şart sağlanmaz ise uzaysal çeşitleme yöntemi kullanılamaz.



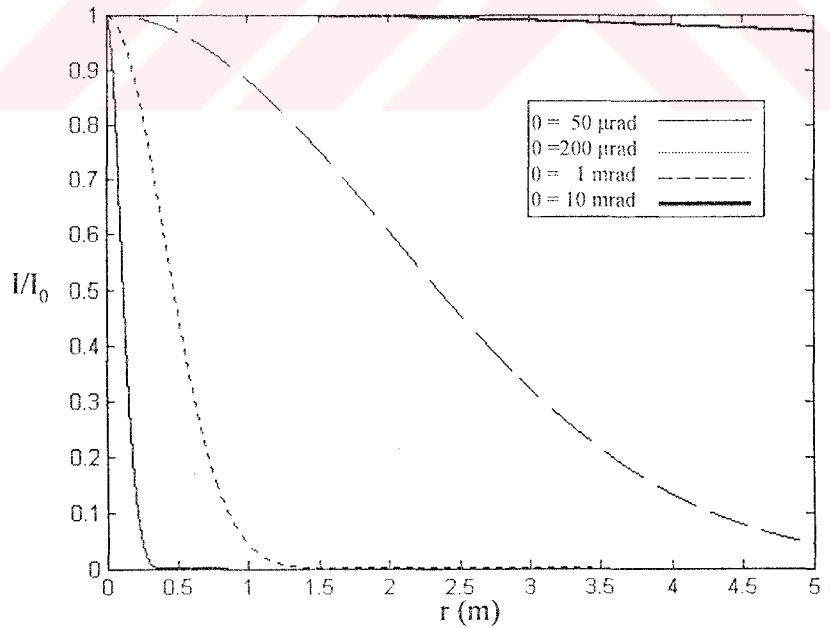
Şekil 4.8 Hüzmedeki genişlemenin geometrik gösterimi

$L \gg w_L$ olduğundan $\theta \approx w_L/L$ alınabilir. Buradan

$$r_L < 0.L \quad (4.9)$$

şartı sağlanmalıdır. Bu şart sağlansa bile ortalama ışık şiddetinde bir miktar düşme olacaktır. Düşme miktarına ilişkin bir fikir sahibi olmak için $L=4$ km ve $\theta=50$ μ rad, 200 μ rad, 1 mrad, 10 mrad için I/I_0 'ı r 'ye değişimi ifade edilebilir.

Şekil 4.8 de, menzil $L=4000$ metre ve vericinin ıraksama açısı $\theta=50$ μ rad, 200 μ rad, 1 mrad, 10 mrad için, ışık şiddeti oranının (I/I_0) yanıl mesafeye (r) değişimi görülmektedir. Vericiden gelen ışığın ıraksama açısı ne kadar büyük olursa yanıl mesafe de o kadar arttırılabilir. Fakat ortalama güçte azalma olmasa bile ıraksama açısı büyük olduğundan dolayı ortalama gücün dağıldığı alan büyüyecektir. Bundan dolayı dedektöre gelen gücün azalmasına sebep olacaktır. Uzun mesafelerde uzaysal çeşitleme kullanılması pek cazip olmayacaktır. Kırınımdan dolayı olan genişleme dışında, ilave olarak türbülans etkisinden dolayı hüzmede bir genişleme olacak ve dedektöre düşen ortalama ışık şiddeti daha da düşecektir.

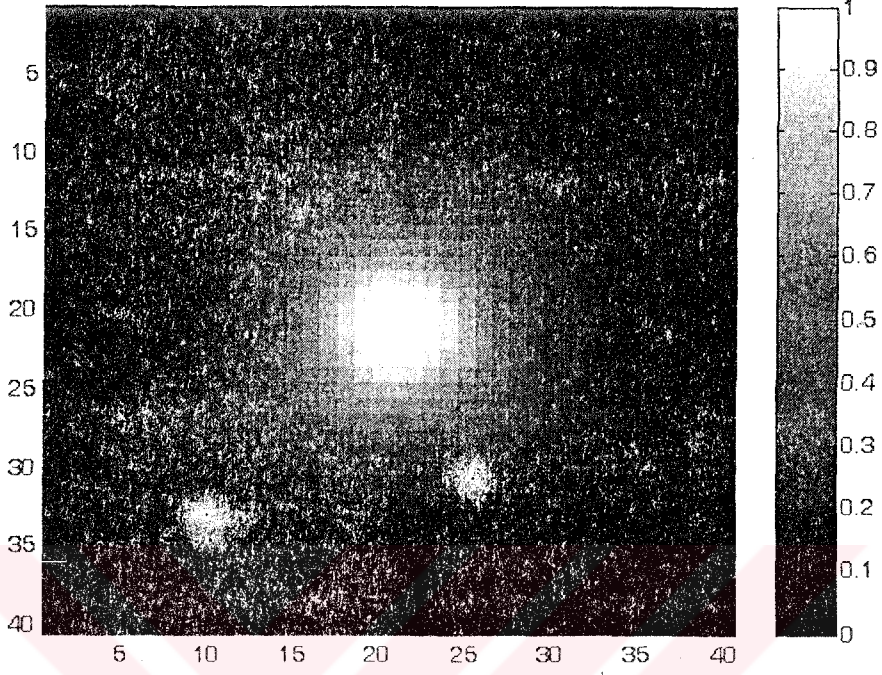


Şekil 4.9 Işık şiddeti oranının yanıl mesafeye göre değişimi

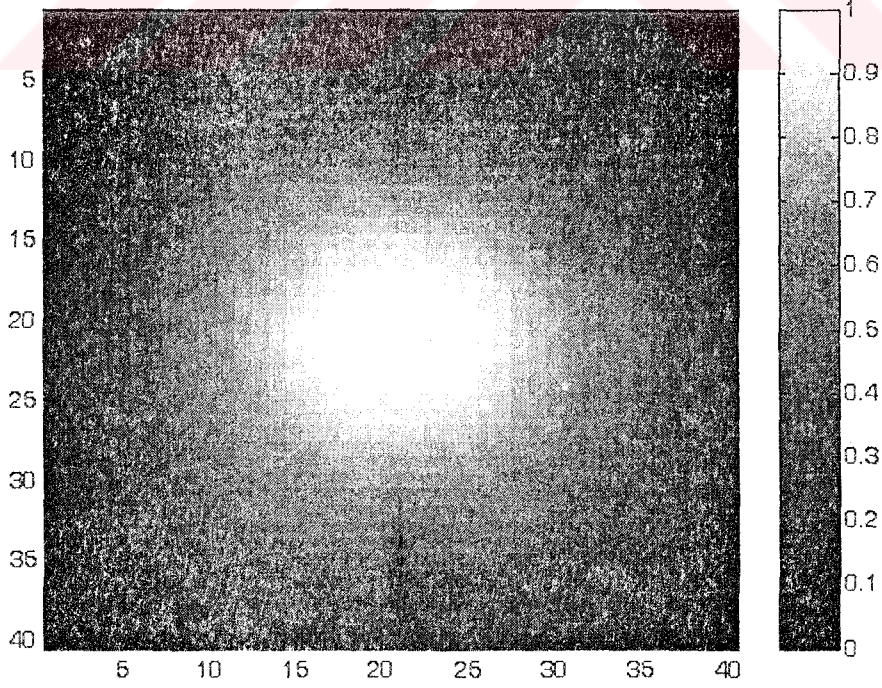
Sonuç olarak yanıl mesafenin, ışık şiddetinde azalma olmaması için ve uzaysal çeşitleme yönteminin kullanılabilmesi için denklem 4.10 da ki şartı sağlaması gerekir.

$$0.L > r > r_L$$

(4.10)



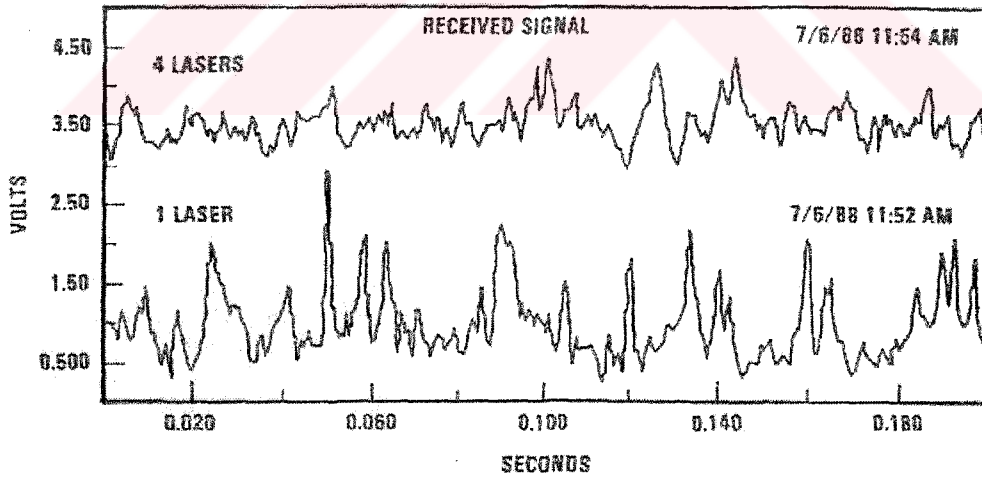
Şekil 4.10 Alıcı düzlemde ıraksama açısı 50 μ rad için hüzmelin durumu (ölçek (1/4)cm)



Şekil 4.11 Alıcı düzlemde ıraksama açısı 100 μ rad için hüzmelin durumu (ölçek (1/4)cm)

Şekil 4.10 ve 4.11 da türbülans etkisi olmadığı durumda, çeşitli iraksama açıları için hüzmelerin durumları görülmektedir. Iraksama açısı ne kadar büyük olursa genişlemenin artacağı görülmektedir. Burada da uzaysal çeşitleme için gereken yanal mesafenin artacağı görülmektedir. Ayrıca alacağımız yanal mesafenin alıcı düzlemdaki alıcı düzlemdaki hüzmeye çapından küçük olmalıdır

Uzaysal çeşitleme, aralarında yeterli yanal mesafe bırakılan, aynı dalga boyunda birden fazla verici kullanarak da gerçekleştirilebilir. Birden fazla verici kullanılmasının, birden fazla alıcı kullanılmasından hiçbir farkı yoktur. Yani aynı durumlar çok vericili uzaysal çeşitleme için de geçerlidir. Bu seçeneğin de parıldama varyansını düşürmede etkili olduğu deneysel olarak gösterilmiştir [50]. Şekil 4.12 da görüldüğü gibi deneyde tek lazer kullanılarak alınan veri grubu ile 4 lazer ile uzaysal çeşitleme yöntemi kullanılarak alınmış veri grubu görülmektedir. Buradan da uzaysal çeşitlemenin parıldama varyansının düşürmede etkili olduğu görülmektedir. 4 lazer ile uzaysal çeşitleme yapıldığında, veri grubuna bakıldığı zaman tek lazerle haberleşme yapılan optik sisteme göre işaret dalgalanmalarında büyük bir azalma görülmektedir. Bu parıldama varyansının düştüğü anlamına gelmektedir.



Şekil 4.12 Çok verici kullanılarak yapılan uzaysal çeşitlemenin parıldama varyansına etkisi [50]

Tablo 4.2 de de parıldama varyansının yani veri grubundaki dalgalanmanın azalması net bir şekilde görülmektedir. Ortalama standart sapma değeri her farklı üç

veri grubu içinde verilmiştir. Buradan da görüleceği üzere parıldama varyansının iyileştirilmesinde ortalama %50'lik başarı sağlanmıştır.

Uzaysal çok alıcılı çeşitleme uzun menzillerde kullanılması pek uygun olmayacaktır. Çünkü uzun yol kat edeceğinden kırınım sebebi ile ışık genişleyecektir. Yerden uyduya haberleşmede, çok uzun yol kat eden ışığın korelasyon mesafeleri kırınım sebebiyle çok büyüyeceğinden, diğer uzaysal çeşitleme seçeneği uygulanamaz. Bunun dışında, yukarıda çok alıcılı çeşitleme için yapılan değerlendirme, çok vericili uzaysal çeşitleme için de geçerlidir.

Tablo 4.2 Uzaysal çeşitleme ile parıldama için iyileşme [49]

Veri Grubu	1 lazer için ortalama standart sapma	4 lazer için ortalama standart sapma	Oran
1	0.39	0.22	0.56
2	0.48	0.24	0.50
3	0.48	0.25	0.52

Uzaysal çeşitleme kısa yayılım mesafelerinde yüksek başarımlı sağlanmasına rağmen; daha uzun mesafelerde, başka bir deyişle kuvvetli türbülans bölgesinde aynı performansı gösterememektedir. Uzaysal çeşitlemenin parıldamanın etkisinin azaltılmasına katkı sağlar. Buna karşı alınan ortalama ışık şiddetinde düşüş meydana gelecektir.

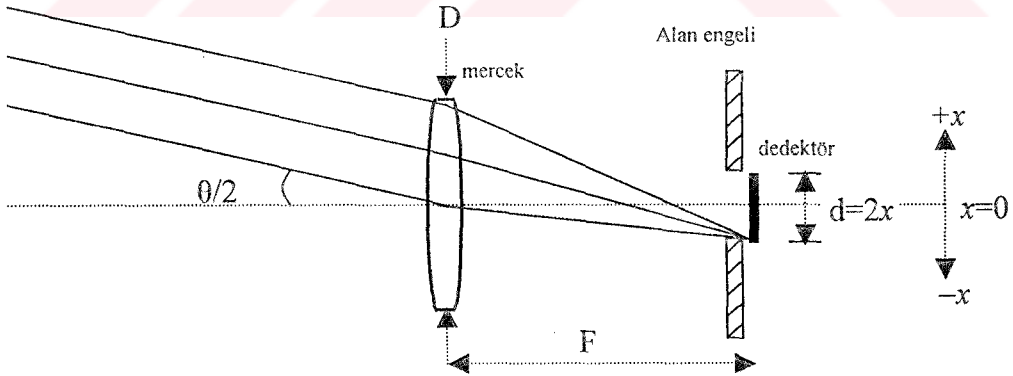
BÖLÜM 5

KABLOSUZ OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE UYARLANIR GÖRÜŞ ALANI

Bu bölümde, optik alıcıdaki görüş alanı ifade edilmiş, alınan ışık gücünün maksimum olması ve bunun yanında, arka plan gürültüsünün minimum seviyede tutulması için gerekli optimum görüş alanı belirlenmiştir. Bu optimum görüş alanı, uyarlanırlar görüş alanı olarak uygulanabilirse kablosuz optik haberleşme sistemlerinin performansını nasıl etkilediği konusu işlenmiştir.

5.1 Görüş Alanı(FOV)

Ayarlanabilir görüş alanlı (FOV) alıcı tasarımı sis boyunca kablosuz optik haberleşme sistemlerinde sinyal-gürültü oranının iyileştirilmesinde kullanılmıştır. Ayarlanabilir odak uzunluklu merceklerdeki son gelişmeler, eş zamanlı FOV ayarı uygulamalarını cazip hale getirmiştir. Bu nedenle uyarlanırlar FOV alıcısının kullanılmasının, optik haberleşme sistemlerinde açık hava türbülansı boyunca propagasyon için yararlı olabileceğini göstermektedir.



Şekil 5.1 Optik alıcı

Optik alıcı temel olarak mercek, dedektör ve alan engelinden meydana gelir. Mercek gelen ışığı merceğin odak noktasında bulunan dedektöre düşmesini sağlar. Bu durum Şekil 5.1’de görülmektedir. Alan engeli, boyutunun dışındaki ışığın dedektöre

gelmesini engeller. Alan engeli mercekten önce de olabilir. Eğer fiziksel bir engel yoksa, dedektör üzerine düşen ışık alan engelinin izin verdiği ölçüttedir.

Dedektör tarafından ışığın alınabileceği açısal alan, görüş alanı(FOV) olarak ifade edilir. Burada dedektör boyutu veya alan engelinin izin verdiği alıcı açıklığı d ve mercek ile odak noktası arasındaki uzunluk F olarak tanımlanmıştır. Açısal görüş alanı

$$\theta = 2 \cdot \tan^{-1}\left(\frac{d}{2F}\right) \cong \frac{d}{F} \quad (5.1)$$

şeklinde ifade edilir [54]. Açısal görüş alanı 20° 'den küçük olduğunda tanjantın tersine $\tan^{-1}(x)=x$ (radyan) şeklinde bir yaklaşım yapılabilir ve bu genelde doğrudur. Kırınım sınırlı alıcının açısal görüş alanı denklem 5.2 gibi tanımlanır

$$\theta_0 = 2.44 \frac{\lambda}{D} \quad (5.2)$$

Bu optik sistem uzak alan durumlarında dedektördeki kırınım desenine göre, esas olarak maksimum sinyal prensibine göre haberleşme sağlayan sistemdir. Burada λ dalga boyu, D alıcı optik sistemin çapıdır.

5.2 Uyarlanır Optik Zum

Hareketli ve uyarlanır optik, görüntü ve lazer projeksiyon uygulamalarında oldukça çok kullanılmaya başlamıştır. Şekli değiştirilebilen aynalar sayesinde son otuz yıl içinde astronomik görüntüleme kabiliyetinde devrim yaşanmıştır. Atmosferik hataların düzeltilmesindeki başarı diğer uygulamalarda kullanımı için bir kıvılcım niteliği taşımıştır. Bu sistemlerde esneklik ve kabiliyet artarken, boyutun, ağırlığın ve maliyetin düşmesi uyarlanır optik uygulamalarını çok cazip hale getirmiştir.

Burada küçük bir görüntü için büyüme gereksinimi olacaktır. Işık ağırlıklı görüntüleme sensörlerindeki geniş görüş alanı ile dar görüş alanı arasında hızlı bir geçiş yaparak yüksek bir çözünürlük ve iyi bir görüntü elde edilebilir. Böyle sistemlerden, gözlem ve uzaktan algılama dahil, yararlanılabileceği uygulama çeşitleri vardır. Büyük hareketli kısımlar olmadan, görüntüleme sisteminin kırınım sınırlı görüş

alanı çok hızlı bir şekilde düzenlenerek uyarlanır optik kullanılabilir. Araştırmalarda sıvı kristal mercekler, uzaysal ışık modülatörleri ve şekli değişebilen aynalar kullanılarak değişebilen görüş alanı bulunan uyarlanabilir optik, x3.9'a kadar bir optik zum gerçekleştirilebilmiştir [51]. Kırınım deseni ile gelen ışık, uzaysal ışık modülatörü sayesinde genlik ve faz olarak değiştirilerek görüntü için uygun ışık desenini oluşturmak için kullanılırlar [64].

Görüntüleme düzlemi sabit olmak kaydıyla odak uzunluğu veya büyüklüğü değişen optik sistem zum mercekleridir. Mekanik Zum mercekleri çok yavaş büyütme işlemi gerçekleştirirler. Sıvı kristal odak uzunluğu değişebilen mercekler bu işi çok daha çabuk gerçekleştirebilirler. Optik zum kullanıldığında büyütme işleminden sonra görüntü oldukça kalitelidir.

Dijital ve elektronik zum işleminde ise büyütülen görüntü piksel olarak büyütüldüğü için büyüme işlemi görüntünün çok kaliteli olmasında engelleyici bir unsur olur. Çok kaliteli bir büyütme için görüntüleme düzleminin boyutunun oldukça büyütülmesi gerekecektir. Bu da optik sistemin boyutunun büyümesine sebep olacağından dolayı çok cazip bir uygulama olduğunu söylemek zordur [50].

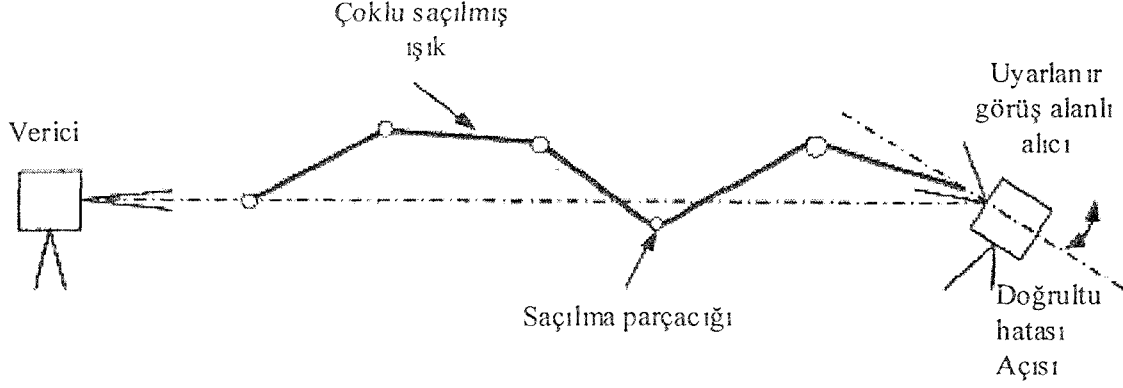
Bu yüzden ki; odak uzunlukları değişebilen mercekler kullanılarak görüş alanı değiştirilerek kullanılacak uyarlanır optik sistemlerin görüntü kalitesi ve sistem boyutları açısından daha cazip bir uygulama olduğu kanısına varmak zor değildir.

5.3 Görüş Alanı ve Sis

Çoklu saçılma ortamı boyunca ilerleyen ışık, soğurulma ve uzaysal genişlemeye maruz kalacaktır. Bu etkilerden ziyade varış açısı büyüyecektir. Bundan dolayı alınan güç FOV sınırlarının üstüne çıkan varış açısından dolayı azalacaktır.

Kenar ve Arnon Çoklu saçılma ortamında ışığın propagasyonunu modelleyerek, kırınım sınırlı minimum açıdan büyük açılarda ileri saçılan ve alıcı açıklığına gelen ışığın, alıcının elektronik elemanlarından ve diğer kaynaklardan oluşan ek gürültü gücünü de ilave ederek, optimum bir FOV değeri tanımlanabilirliği konusunda araştırmalar yapmışlardır[52], [53].

Uyarlanır FOV ile sisli ortamda iyileştirme için yapılan genel model çok karmaşık olmasına karşın, değişebilir FOV tasarımı ile, kablosuz haberleşme sistemlerinde SNR’de iyileşme olacağı görülmüştür. Özellikle de doğrultu hatalarının mevcut olduğu şartlarda iyileşme göstermiştir.



Şekil 5.2 Doğrultu hatası mevcutken çoklu saçılma ortamında ışığın davranışının şematik gösterimi[52]

Doğrultu hatası alıcı ve verici arasında hüzmelerin dalga cephesinin yönüne göre hizalamanın tam yapılmadığı durumlardan dolayı oluşan bir problemdir. Sinyal gücünün azalmasına sebep olacaktır. Çünkü Alıcı verici arasındaki hizalama uygun olmayınca varış açısı dalgalanmaları olacağından ve sinyal gücünün bir kısmı alınamayacaktır. Uyarlanır görüş alanlı alıcı bu problemin mevcudiyetinde uygun bir seçenek durumundadır.

Benzer bir optimizasyon problemi açık havadaki haberleşme için de mevcuttur. Doğrudan sezmeli (foton sayan) bir optik alıcıda, türbülans kaynaklı mercek düzlemindeki geliş açısı dalgalanmaları görüntünün dedektör düzleminde gezinmesine, dalga cephesindeki faz bozulmaları ise görüntünün büyümesine sebep olur. İlke olarak, bu etkiler büyük görüş alanlı bir alıcı kullanarak yok edilebilir. Ancak, eğer alıcı izotropik arka plan ışımalarının bulunduğu ortamda (yani gündüz) çalışıyorsa, dedektör girişindeki arka plan gürültüsü görüş alanının karesiyle orantılı olarak artacaktır [51]. Daha büyük görüş alanı aynı zamanda daha yüksek dedektör gürültü seviyeleri ve daha büyük dedektör sığası (yani bant genişliğinin azalması) demektir. Dolayısıyla, türbülans etkilerinin büyük kısmını telafi ederken, mümkün olduğunca az gürültü girmesini sağlayan bir en uygun görüş alanı mevcuttur.

5.4 Ayarlanabilir Odak Uzunluklu Mercekler

Mercek optik sistemler için önemli bir elemandır. Standart mercekler cam, polimer veya diğer saydam sert materyallerden yapılmaktadır. Merceklerin odak uzaklığı elektro-mekanik olarak lenslerin birlikte kullanılmasıyla ayarlanmaktadır. Bu mercek odak uzaklığının düzenlenmesi için etkili bir uygulamadır. Fakat bu uygulama çok fazla eleman kullanıldığından dolayı çok ağır, hantal ve geniş hacimli olması bir dezavantajdır.

Ayarlanabilir odaklı mercekler zaten doğada da bulunmaktadır. Örnek olarak; insan gözündeki geniş odaklama aralığındaki tek mercek ile odak değiştirilebilmektedir. Gözdeki merceğin kendisine has kırılma indisi gradyanı mevcuttur. Gözdeki kasların kontrolü ile mercede şekil değişiklikleri yapan, birinci sınıf uyarılama mekanizması vardır. Araştırmacılar, insan gözünü taklit ederek bir çok yaklaşımlar geliştirmişlerdir. Burada yaklaşımlarda sıvı, mikroakışkan, polimer ve sıvı kristal gibi bir çok materyal kullanılmıştır. Farklı materyaller olmasına rağmen , gözdeki mekanizmanın şekil değiştirmesinin ve kırılma indisi değişmesinin kontrolü ve oluşturulması açısından farklı optik yollar için altında kalmışlardır. Son gelişmelerle çeşitli materyaller kullanılarak mercede şekil değiştirilme işlemi yapılarak mercek odak uzaklığı uyarlaması yapılmaktadır[54], [55].

Sıvı kristaller(LC), bazı saydam malzemeler birleştirilerek Ayarlanabilir odaklı mercekler oluşturulmuştur. Elektrik alanı kullanılarak odak uzaklığı eş zamanlı olarak değiştirilme işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Adaptive FOV uygulaması açısından Ayarlanabilir odaklı mercekler oldukça kullanışlı olabilir[54]

5.5 Görüş Alanı ve Türbülans

Doğrudan sezmeli alıcılarda, türbülansın etkisiyle dedektör düzleminde varış açısı dalgalanmaları ve dalga cephesinde faz bozulması etkileri oluşur. Prensip olarak, bu etkiler kırınım sınırlı FOV alıcılardan daha büyük olan FOV alıcılar kullanılarak bu etkiler elemine edilebilir . Herhangi bir alıcının görüş alanı düzlemsel açı (θ) ile tanımlanmıştır. Mercek üzerine düşen fazy bozulmuş ışığın tamamına yakınının dedektör üzerine düşürülmesi için $\theta \gg \theta_0$ olmalıdır. Ancak, θ 'nın aşırı büyük olması istenmez. Çünkü daha büyük θ değerlerinde (thermal and dark) gürültü seviyeleri artacaktır. Eğer

alıcı izotropik (yönsemez) arka plan gürültüsüne maruz ise, θ 'nın artırılarak faz bozulmasının etkisinin azaltılması, dedektöre giren arka plan gürültüsünün $(\theta/\theta_0)^2$ kat artması karşılığında elde edilir. Dolayısıyla, hem merceğe üzerine düşen ışığın çoğunun dedektöre girmesini, hem de mümkün olduğu kadar az gürültü alınmasını sağlayacak en uygun görüş alanının bulunması gerekir.

Açısal görüş alanına göre dedektörün alışında faz bozulması göz önünde bulundurulur. Atmosferden dolayı oluşan bozulma genellikle lokal olarak türdeş alınır ve yapısal fonksiyonlara göre karakterize edilir. dedektör düzlemindeki ortalama ışık şiddetinin dağılımı;

$$\langle I(v) \rangle = 8 \int_0^1 T_0(\xi) \exp(-D_\psi(\xi)/2) J_0(2\pi\xi v) \xi d\xi \quad (5.3)$$

ile verilir. Burada $T_0(\xi) = 2 \left[\arccos(\xi) - \xi \sqrt{1-\xi^2} \right] / \pi$ alıcı sisteminin optik transfer fonksiyonu, $D_\psi(\xi)$ faz bozulmalarını gösteren yapı fonksiyonu, ξ alıcı merceğe düzlemindeki normalize koordinat, v ise dedektör düzlemindeki normalize koordinattır. Denklemdenki normalizasyon, faz bozulması olmadığı, yani $D_\psi(\xi)=0$ olduğu zaman, $\langle I(0) \rangle = 1$ olacak şekilde yapılmıştır. Normalize edilmiş dedektör boyutu denklem 5.4'de ki gibi tanımlanmıştır [56].

$$v = \frac{x \cdot D}{\lambda \cdot F} \quad (5.4)$$

Burada x dedektör düzlemindeki koordinat, F ise optik sistemin odak uzaklığıdır. Dedektör düzleminde v 'nin sınırladığı alan $\theta = 2v\lambda/D$ ile verilen görüş alanına karşılık gelir. Kırınım sınırlı görüş alanı θ_0 ise $v_0 = 1.22$ 'ye karşılık gelir. v 'nin sınırladığı alandaki ortalama sinyal gücü

$$\langle P(v) \rangle = \int_0^v \langle I(v') \rangle v' dv' \quad (5.5)$$

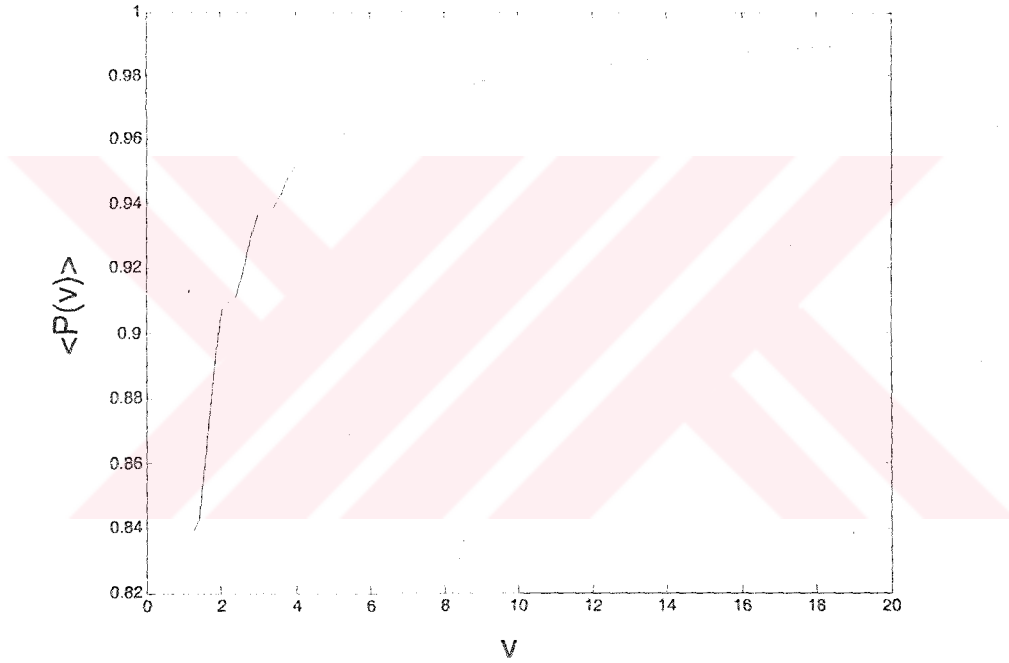
olarak ifade edilir. Denklem 5.3 yerine koyulursa,

$$\langle P(v) \rangle = 2\pi v \int_0^1 T_0(\xi) \exp(-D_\psi(\xi)/2) J_1(2\pi\xi v) d\xi \quad (5.6)$$

$D_\psi(\xi)=0$ için denklem 5.6'deki integral alınır, alınan bir düzlem dalganın kırınım deseni elde edilir :

$$P(v) = 1 - J_0^2(\pi v) - J_1^2(\pi v) \quad (5.7)$$

Denklem 5.6'teki ifade fazı bozulmuş sinyaller için girişteki sinyal-gürültü oranını incelemek için kullanılabilir. Görüş açısı θ ve buna karşılık gelen dedektör boyutu v olan alıcıdaki ortalama sinyal gücü $\langle P(v) \rangle$ ile tanımlanır.



Şekil 5.3 Türbülans olmadığında ortalama alınan güç

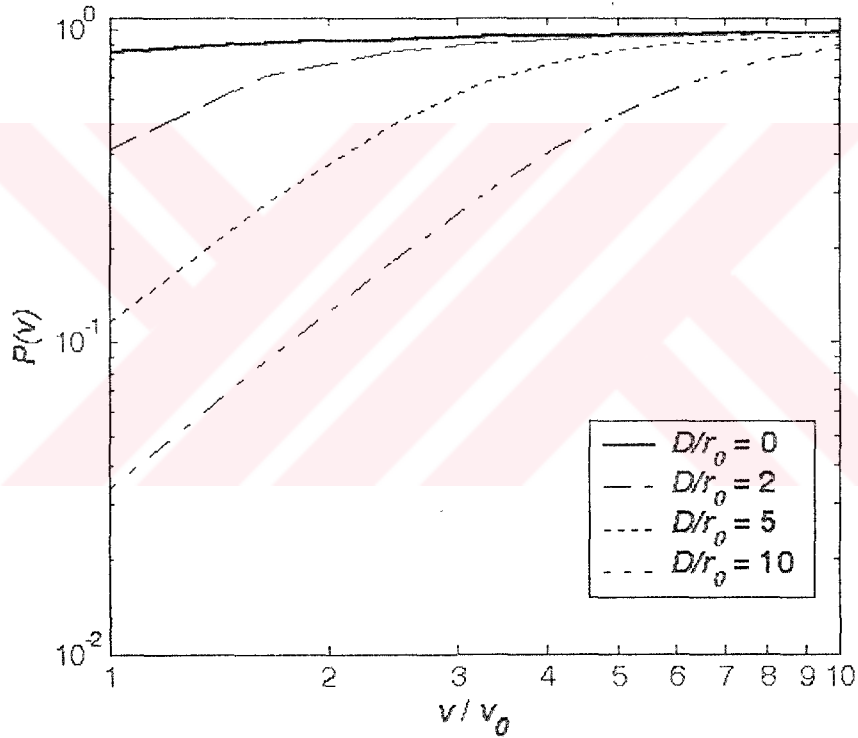
Dedektör girişindeki arka plan gürültüsü ise $(\theta/\theta_0)^2$ ile orantılıdır. θ ve v birbirine bağlı olduğu için $\theta > \theta_0$ için (izafi birimlerde) sinyal-gürültü oranı $\alpha = \langle P(v) \rangle \times (v_0/v)^2$ 'dir. Dikkat edilirse denklem 5.6'dan normalize edilmiş güç $P(\infty)=1$ olur. Ortalama Güç $P(v)$ belirli bir v değerinden sonra doyuma ulaşır. Belirli bir noktadan sonra v ne kadar artarsa artsın $P(v)$ değerinde artış çok yavaş olacaktır (Şekil 5.3). Atmosfer türbülansının sebep olduğu faz bozulmalarını veren yapı fonksiyonu olarak aşağıdaki ifadeler kullanılır.

$$D_{\psi}(\xi) = 6.88(\xi D/r_0)^{5/3} \quad (5.8a)$$

Bu ifade, sabit alıcılara göre hem varış açısı dalgalanmalarını hem de faz bozulmalarını kapsar. Buradaki r_0 türbülanslı atmosfer için faz uyumluluk ölçüsüdür (Cn^2 'nin fonksiyonudur). Alıcının gelen dalga cephesinin eğimini takip ettiği uyarlamalı alıştır

$$D_{\psi}(\xi) = 6.88(\xi D/r_0)^{5/3}(1 - \xi^{1/3}) \quad (5.8b)$$

ifadesi kullanılır. Kırınım sınırlı bir alıcıda faz bozulmasının olmadığı durumda toplam ani gücün %84'ü alınabilir. Yani $P(v_0) = 0.84$ olur.

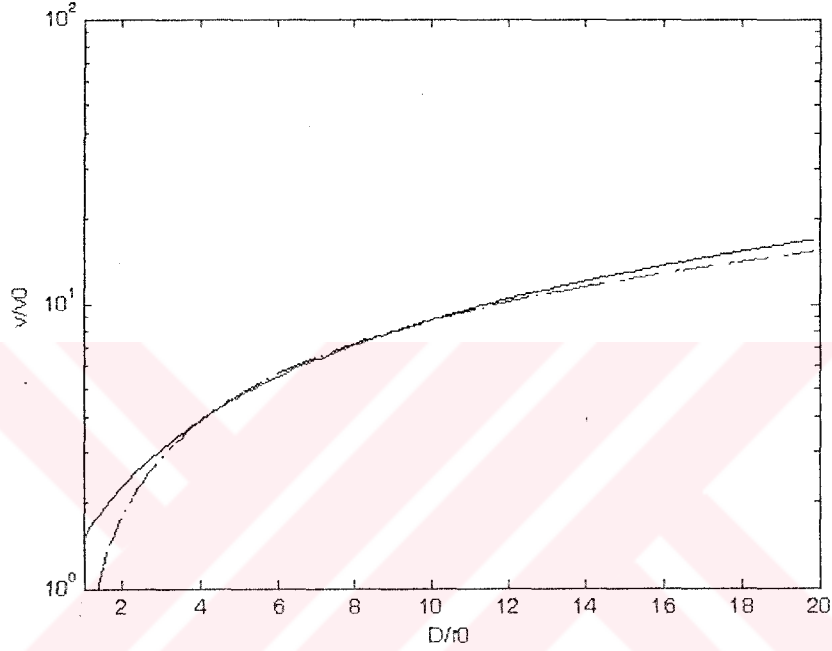


Şekil 5.4 Görüş alanının fonksiyonu olarak normalize edilmiş alınan ortalama güç

Şekil 5.4 de çeşitli D/r_0 değerleri için v/v_0 'ın fonksiyonu olarak $P(v)$ gösterilmiştir. Görüldüğü gibi $P(v)$ alınan ani güç v/v_0 'ın belirli değerinden sonra doyuma ulaşmaktadır. Bu yüzden v/v_0 ne kadar artırılırsa artırılırsa, alınan sinyal gücünde çok yavaş bir artış olacaktır. Belirli bir maksimum v/v_0 değerinden sonra ani güç doyuma ulaşmıştır. Sinyal gücünün tamamının alınması çabası, FOV'un

arttırılmasına neden olacaktır. Fakat önerilen, sinyal gücünün %80-90 alınacağı FOV değeridir.

v/v_0 belirli bir değerinden sonra türbülans dolaylı oluşan faz bozulmasının etkisi önemli derecede elemine edilecektir. Bu sınır değeri $(v/v_0)_{\max}$ olarak tanımlanabilir ve türbülans olduğunda kırınım sınırlı güç seviyesini(0.84) veren v/v_0 değeri olarak açıklanabilir.



Şekil 5.5 Türbülans şiddetinin fonksiyonu olarak optimum FOV

Bu güç seviyesi, heterodyne alıcıların normalize SNR değeriyle veya görüntüleme sistemlerinin çözünürlüğüyle ilişkilidir. Şekil 5.5'de FOV ile ilgili optimum varyasyonları yani, $(v/v_0)_{\text{opt}}$ değerlerinin D/r_0 oranına göre değişimi görülmektedir. Düz çizgi ile çizilmiş eğri nümerik olarak hesaplanan değerleri, kesikli çizgi ile çizilmiş eğri bu çalışmada oluşturulan analitik ifadeyi göstermektedir. Bu ifade denklem 5.9'daki gibidir.

$$(v/v_0)_{\text{opt}} \approx \frac{1.418(D/r_0)^{14/5}}{\left[1 + (D/r_0)^{5/3}\right]^{6/5}} \quad (5.9)$$

Denklem 5.9'un verdiği eğri, $1 < v/v_0 < 10$ aralığında yaklaşık olarak maksimum %3 lük bir hatayla oldukça kullanışlıdır. Aslında eğri $1 < v/v_0 < 10$ için $v/v_0 \approx D/r_0$ yaklaşımı yapabilir. Böylece, kırınım sınırı için mevcut olan güç seviyesi muhafaza edilmesi için D/r_0 artıkça, FOV'un artırılması, yani v/v_0 değerinin artması gerekir. $v/v_0 > 10D/r_0$ durumunda eğri doyuma ulaşacaktır. Bu yüzden $v/v_0 > 10D/r_0$ olduğunda türbülans etkisi hemen hemen hiç kalmayacaktır.

5.6 Faz Uyumluluk Ölçüsü İstatistikleri

Faz uyumluluk ölçüsü yatay istikamette $r_0 = (0.16 \cdot k^2 L \cdot C_n^2)^{-3/5}$ olarak verilir. Burada k dalga sayısı, L menzil, C_n^2 kırılma indisi yapı sabitidir. Dikey istikamette faz uyumluluk ölçüsü yola göre C_n^2 'nin integrali alınarak hesaplanabilir. Faz uyumluluk ölçüsü, C_n^2 rasgele varyasyonlarının sonucu olarak, rasgele değişir. Uzun dönem ve kısa dönem ölçümlerine göre, faz uyumluluk ölçüsü normal dağılım ile log-normal dağılım arasında bir dağılım göstermektedir [57], [59]. Modelleme ve simülasyon için beta dağılımı çok daha cazip görünmektedir [58].

Beta dağılım fonksiyonu çeşitli parametrelere göre farklı biçimlerde olabilir. Standart beta fonksiyonu

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 t^{\alpha-1} (1-t)^{\beta-1} dt \quad (5.10)$$

olarak verilir. Beta dağılım fonksiyonu a ve b üst ve alt sınır olmak üzere aşağıdaki gibidir.

$$f(x) = \frac{(x-a)^{p-1} (b-x)^{q-1}}{B(p, q)(b-a)^{q-1}} \quad a \leq x \leq b, \quad p, q > 0 \quad (5.11)$$

Burada p ve q fonksiyonun şekil parametreleridir [63].

Rasgele değerlerin ortalaması \bar{x} ile ve standart sapma S_x^2 ile tanımlanırsa,

$$Y = \frac{(\bar{x} - a)}{(b - a)} \quad (5.12a)$$

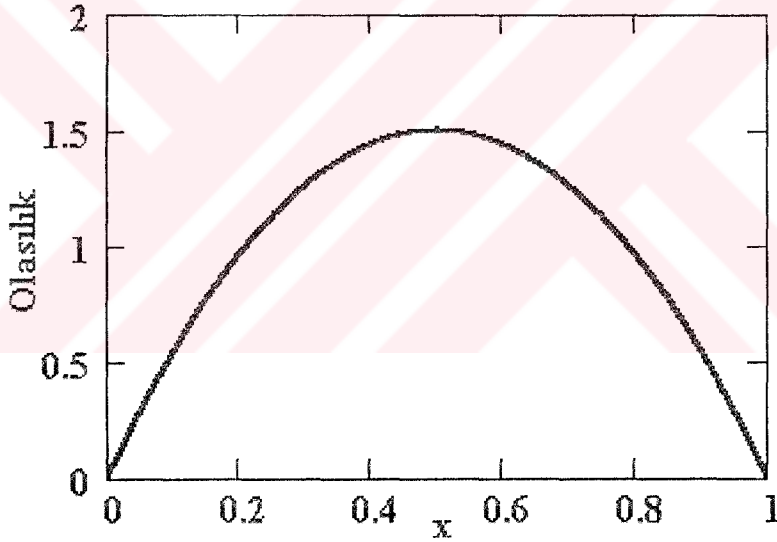
$$V = \left(\frac{S_x^2}{(b - a)} \right)^2 \quad (5.12b)$$

Burada $S_x^2 = S \bar{x}$ dir. S standart sapma katsayısıdır.

Denklem 5.12 deki ifadelerden p ve q

$$p = \frac{Y^2}{V} (1 - Y) - (1 + Y) \quad (5.13a)$$

$$q = \frac{(p + 1)}{Y} - (p + 2) \quad (5.13b)$$



Şekil 5.6 Standart beta dağılımı(p=q=2)

olarak ifade edilir[53]. Genellikle beta dağılımı için dört parametre istenir. Bunlar: şekillendirme parametreleri, ortalama, standart sapma ve dağılımın sıfırdan büyük olduğu alt ve üst sınırlardır. Araştırmalara göre $C_n^2 = 10^{-18}$ ve 10^{-12} sınır değerleri olarak alınabilir. $\log C_n^2$ nin standart sapması olarak 6dB alınabilir [59].

5.7 Arka plan gürültüsü ve Görüş Alanı

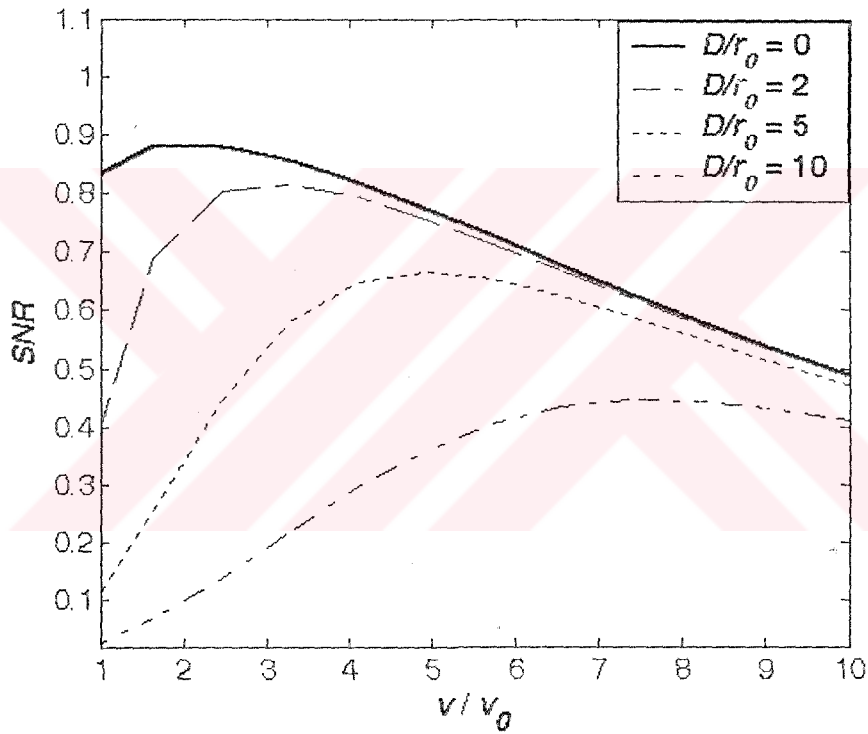
Direct detection receiver lar için alıcı sinyal gücü ile varsayılan arka plan gürültü gücünün birbirine oranı (P_s/P_b) yeterli bir ifade olarak tanımlanamaz. Bunun sebebi direk arka plan etkilerinin bir şekilde elemine edilebilmesidir. Arka plan ışması kuantum gürültüsünün artmasına ve SNR nin azalmasına sebep olur [59], [60]. Dedektörlerin gelen ışığı alma kabiliyetleri esas sinyalde ki dalgalanmalara veya gürültüye göre sınırlandırılmıştır. Dedektör üzerine gelen fotonlar enerjilerini dedektör üzerindeki elektronlara transfer ederek bir akım oluşmasına sebep olurlar. Burada dedektör hem kendi özelliğinden dolayı hem de gelen ışıktan dolayı akım dalgalanmalarına sebep olur. Bu da sinyale Kuantum gürültü olarak yansır. Dedektöre gelen fotonlar dedektör elemanlarında ısınma oluşturduğu için karakteristiklerinde değişim olmakta ve bir voltajın oluşmasına sebep olmaktadır. Bu da Termal gürültüdür. Eğer dedektör kazancı bir ise, termal gürültü genelde kuantum gürültüsün'den çok büyüktür. Bu yüzden arka plan gürültüsü yok sayılabilir. Dedektör kazancı birden büyük olduğunda kuantum gürültüsü ağır basar ve SNR'nin azalmasına neden olacaktır. Buradaki SNR ifadesi

$$\begin{aligned} \text{SNR} &\cong \left(\frac{\eta}{2hfB} \right) \frac{P_s}{1 + \frac{1}{(P_s/P_b)}} \\ &= \text{SNR}_0 \frac{\langle P(v) \rangle}{1 + (P_{b0}/P_{s0}) \frac{(v/v_0)^2}{\langle P(v) \rangle}} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Burada P_{b0} kırınım ile sınırlı bir alıcının geçirdiği arka plan gürültüsü, P_{s0} giriş merceği üzerine düşen ortalama sinyal gücü, η dedektörün kuantum verimi, h Planck sabiti, f taşıyıcı frekansı, B alıcının bant genişliğidir. SNR_0 değeri sabit bir değer alınırsa optimum değerlerin bulunmasında daha kolay olacaktır. P_{b0}/P_{s0} bilindiği zaman, verilen SNR fonksiyonunun FOV ile ilişkili optimum değerleri farklı D/r_0 değerleri için şekil 5.7'da görülmektedir.

FOV ilişkili bir maksimum değer hesaplanabilir. Çünkü alınan sinyalin doğası gereği oluşan kuantum gürültüsü arkaplanda indüklenen kuantum gürültüsüne eşittir. Bu değer genellikle birden büyüktür.

SNR değerinin v/v_0 değerine göre değişimi şekil 5.7 da görülmektedir. Belirli bir v/v_0 değerinde SNR değeri maksimum olmaktadır. Bu maksimum değeri D/r_0 değerlerine göre değişmektedir. D/r_0 değeri arttıkça SNR'nin maksimum değeri düşmektedir. $v/v_0=10$ için SNR değeri çok düşük seviyelere düşmektedir. SNR değerinin yüksek değerlerde olması için daha önceden de bahsedildiği görüş alanı mümkün olduğunca küçük olması uygun olacaktır. Bununla birlikte ışığın da mümkün olan en yüksek seviyede alınması uygun olacaktır.

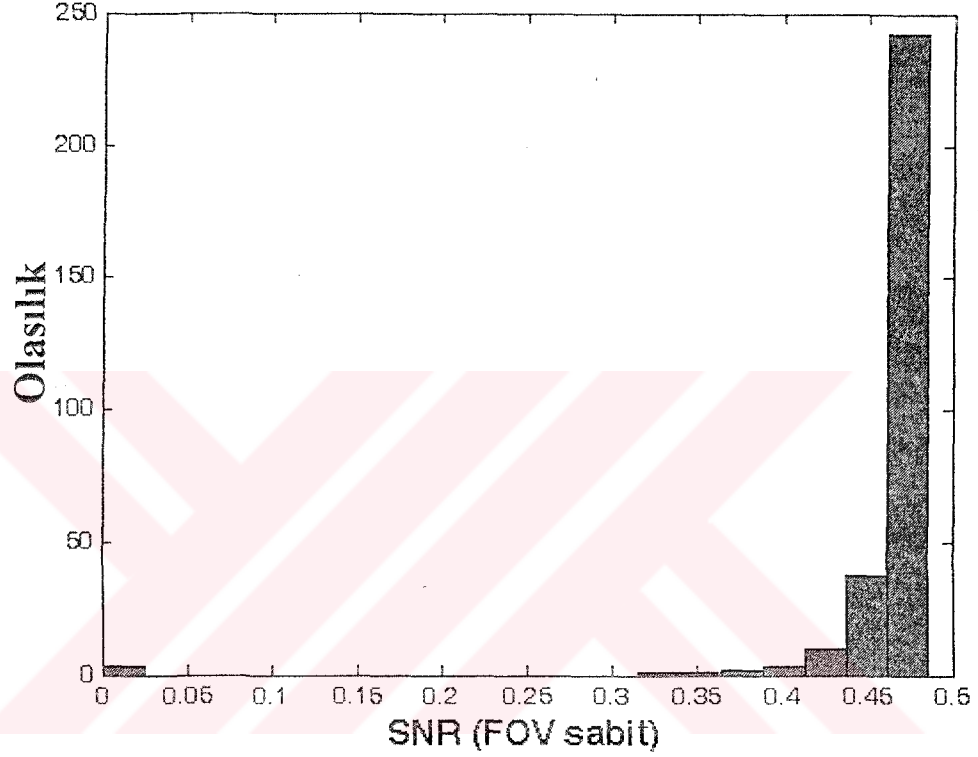


Şekil 5.7 FOV'un fonksiyonu olarak SNR değişimi

5.8 Uyarlanırlı Görüş Alanı

Türbülans ve arka plandan dolayı, diğer sistem tasarımları ve pratikteki nedenler FOV'un sınırlandırılmasına neden olacaktır. Eğer mümkün olan aralık $v/v_0 = 10D/r_0$ değerinde büyük ise zaten türbülans etkisi ortadan kalkacaktır. Eğer zaten bu durumda Adaptive FOV uygulanabiliyorsa, değişen arka plan durumlarına göre FOV düzenlenebilir. Eğer mümkün olan aralık $1 < v/v_0 < 10$ ise, FOV değişen türbülans

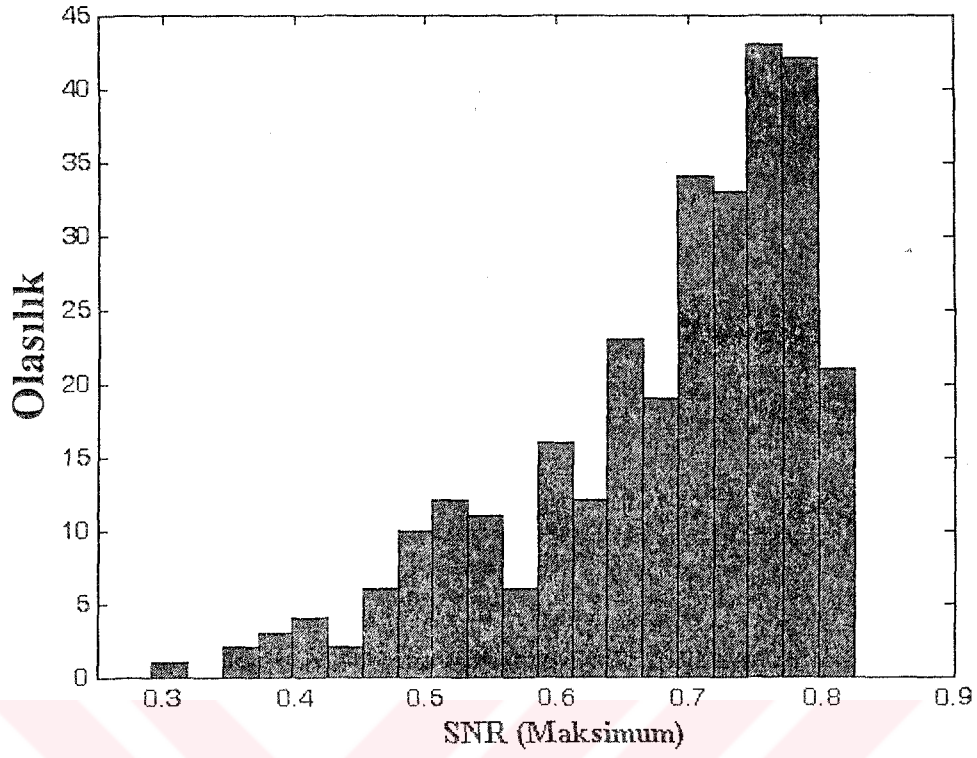
durumlarına göre düzenlenerek SNR de iyileşme sağlanabilir. Uyarlanı FOV'un, sabit FOV 'a göre SNR değerlerindeki iyileşmeyi bulmak için simülasyon yapıldı. Örnek için kullanılan parametrenin değerleri şöyledir: $D=20\text{cm}$, $\lambda=1.55\mu\text{m}$, $L=4\text{km}$, Beta dağılımında $C_n^2(\text{min})=10^{-18}\text{m}^{-2/3}$, $C_n^2(\text{maks})=10^{-12}\text{m}^{-2/3}$, $C_n^2(\text{ort})=10^{-14}\text{m}^{-2/3}$, $C_n^2(\text{standart sapma})=4 \times C_n^2(\text{ort})$, $P_{b0}/P_{s0}=1/100$, $v/v_0=10$ (sabit FOV için). Simülasyon için matlab programı kullanılmıştır. Yazılan programlar ektedir.



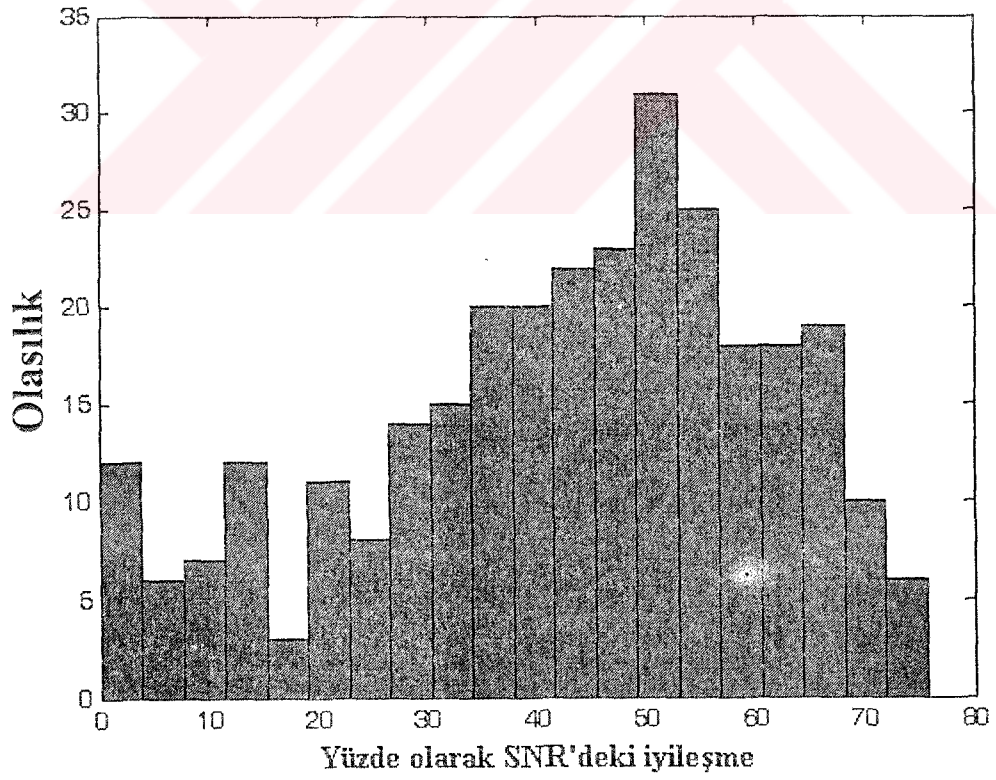
Şekil 5.8 Sabit FOV için SNR

Sabit FOV alındığında rasgele(beta dağılımı) değişen faz uyumluluk ölçeği değerlerinde SNR değişimi şekil 5.8 de görülmektedir. Görüldüğü gibi SNR değeri çoğunlukla 0.48 civarında değerler almaktadır.

Uyarlanı FOV kullanıldığında SNR değerleri Şekil 5.9 de görülmektedir. SNR değerleri sabit FOV durumundaki SNR değerlerine göre yüksek değerlere kaymış ve simülasyonda, belirli miktarda iyileşme olduğu görülmektedir.



Şekil 5.9 Uyarlanırlı FOV kullanıldığında SNR



Şekil 5.10 Uyarlanırlı FOV alıcının sabit FOV alıcıya göre SNR'de sağladığı yüzde olarak iyileşme

Önemli derecede iyileşme için D/r_0 dağılımı, $1 < D/r_0 < 10$ bölgesinin belirli bir kısmında olmalıdır. Bunu belirli parametreler, aperture size, menzil, ortalama kırılma indisi yapı parametresi ve buna benzer pratik durumlar belirler. Diğer bir önemli parametre de sabit FOV'dur. Eğer D/r_0 dağılımının çok iyi bilindiği farz ediliyorsa, ayarlanan optimum sabit FOV, adaptive FOV alıcılarla yapılan iyileşmenin düşmesi anlamına gelecektir. SNR değerlerinin histogramına bakılırsa adaptive FOV alıcılar kullanıldığında BER(Bit hata oranı) sebep olan kuyruk bölümleri sağa kaydığından dolayı BER'de de iyileşme olacaktır.

5.9 Arkaplan Işımasına Göre Optimum FOV ve Maksimum Snr İçin FOV Karşılaştırması

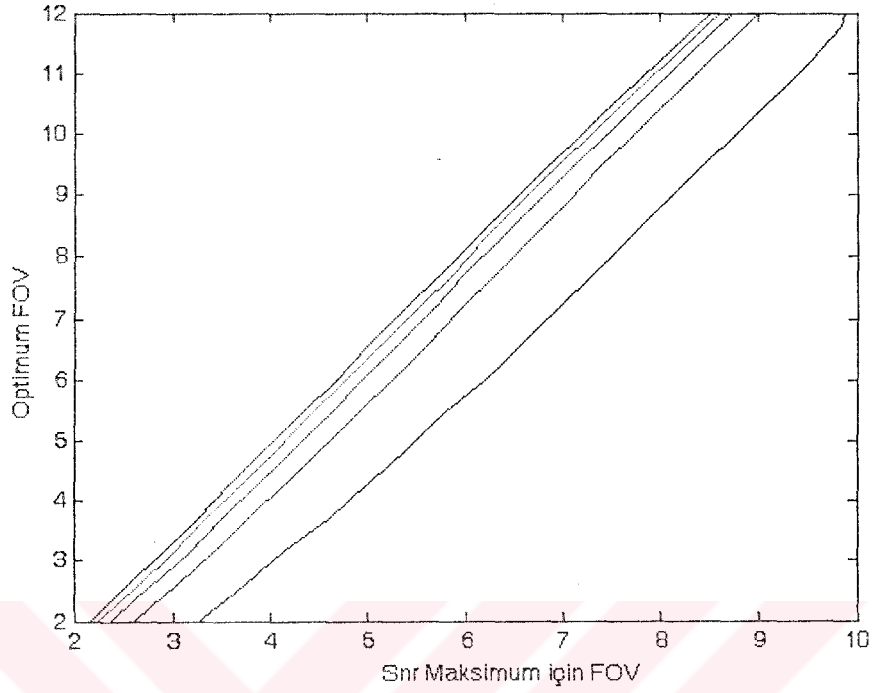
Ortalama güç değerini $P(v)$ en iyi seviyede alabileceğimiz optimum FOV değeri ile maksimum SNR değerini elde edebileceğimiz FOV değerlerini karşılaştırmak yararlı olacaktır. Optimum FOV değerinde alınacak güç için önerilen değer gücün %80- 90 alınmasıdır. Burada kırınım sınırlı bir alıcının alabileceği güç olan gücün %84'ü için FOV değeri optimum FOV olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca adaptive FOV uygulamasının hangi FOV değerine göre uygulanacağı veya iki değer arasında optimum FOV değeri daha mı faydalı olacağı belirlenmesi gerekir. Çünkü pratikte arka plan ışışmasının ölçülmesi oldukça zordur ve bu uygulama için kullanışlı olmayabilir.

Arka plan ışışmasına $P_{b0}/P_{s0}=1/100-1/10$ aralığında değerler verilerek, optimum FOV durumundaki SNR değerleri ve maksimum SNR değerleri hesaplanmıştır. Optimum FOV $(v/v_0)_{opt}$ değeri ile maksimum SNR için gereken FOV $(v/v_0)_{max}$ değerleri karşılaştırıldı (Şekil 5.11). Buradaki SNR ve FOV değerleri, $D/r_0 = 1-16$ aralığındaki değerler alınarak ve arkaplan ışışmasının $P_{b0}/P_{s0}=1/100-1/10$ aralığındaki değerleri kullanılarak göre hesaplanmıştır.

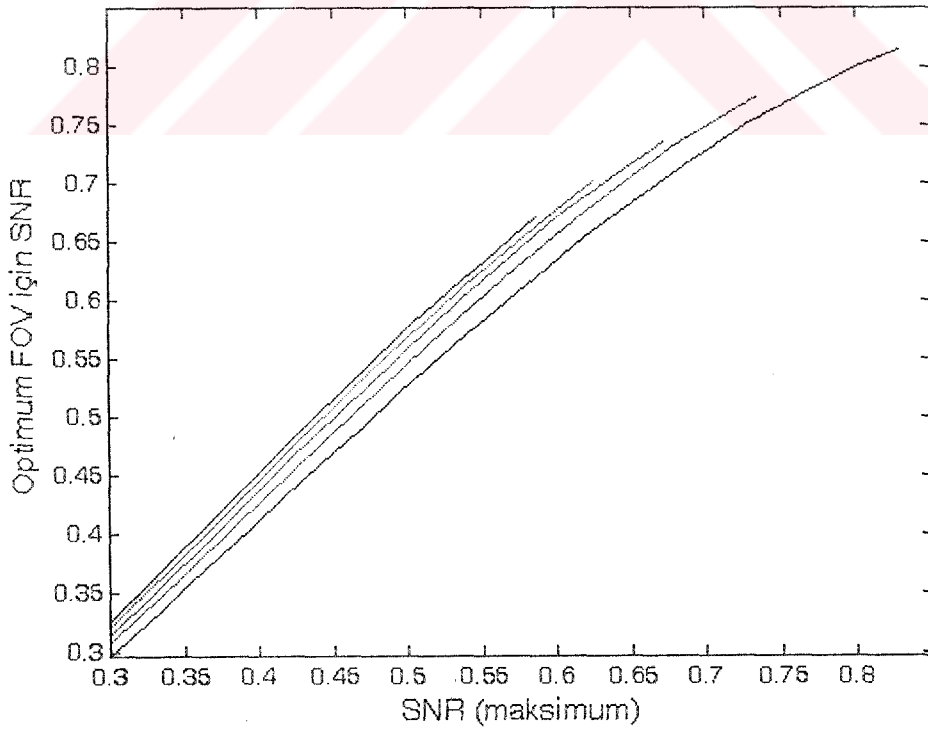
Optimum FOV için hesaplanan SNR değerleri ile maksimum SNR değerlerinin D/r_0 'ın değişimine göre karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırma, arkaplan ışışmasının çeşitli değerleri için $(P_{b0}/P_{s0}=1/100-1/10)$ yapılmıştır (Şekil 5.12) .

Bu hesaplanan değerlere göre, optimum FOV değeri $1 < v/v_0 < 10$ arasında olduğu durumda, optimum FOV için SNR ile maksimum SNR arasında maksimum %4 civarında kayıp olmaktadır. Buna karşın, SNR maksimumdaki FOV değeri $v/v_0 > 10$

olduğunda, optimum FOV için SNR ile maksimum SNR arasında maksimum %18 civarında kayıp olmaktadır.



Şekil 5.11 Arkaplan ışımalarının değişimine göre optimum FOV ile SNR maksimum değeri için FOV arasındaki ilişki



Şekil 5.12 Arkaplan ışımalarının değişimine göre optimum FOV için SNR ile SNR maksimum değeri arasındaki ilişki

Diğer parametrelerin etkisini görmek amacıyla, r_0 için beta dağılımını kullanılıp D/r_0 değerleri rasgele alındı. Kırılma indisi yapı sabitini $C_n^2=0.5 \times 10^{-15}-10^{-14}$ aralığında alarak, $L=3,4,5$ Km için, yine arka plan ışmasını aynı değerler kullanılarak ($P_{b0}/P_{s0}=1/100-1/10$), bu parametrelerin bütün varyasyonları için SNR hesaplanarak karşılaştırma yapıldı. Burada $C_n^2=10^{-14}$ olduğunda ve $L=3,4,5$ km için, optimum FOV için SNR ile maksimum SNR arasında maksimum %18 civarında kayıp olmaktadır. Bu değerler için kayıpların histogramı çizildiğinde %18 kaybın çok fazla ağırlıkta olmadığı, maksimum kaybın bütün varyasyonlarda %5 civarında olduğu görülmüştür.

Hesaplamaların sonucu olarak, faz uyumluluk ölçüsünün beta dağılımında değerler aldığını farz edersek; FOV değeri, optimum FOV değerine göre değiştirilirse bazı durumlar dışında maksimum SNR değerine göre maksimum %5 kayıp oluşacaktır. Bu seçeneğin pratik uygulama açısından daha kullanışlı olacağı için kullanılması daha cazip görülmektedir. Ayrıca arkaplan ışması değeri de ortalama bir değer alınabilir. Çünkü hesaplamalardan görüleceği üzere optimum FOV Arkaplan ışmasının değişiminden oldukça cüzi miktarda etkilenmektedir.

BÖLÜM 6

TARTIŞMA VE SONUÇ

Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde, atmosferindeki türbülansın etkileri önemli bir problemdir. Türbülans kırılma indisi dalgalanmaları meydana getirdiğinden dolayı ışığın bozulmasına neden olur. Türbülans boyutsal ve sıcaklık olarak farklı hava bölgeleri oluşur. Sıcaklık ve bunun sonucu olarak kırılma indisi farklı bu bölgelere çevri(ing, eddy) denilmektedir. Kırılma indisi farklılıkları olan çevriler atmosferde yayılan hüzmelerin bozulmasına sebep olur. Hüzmeye genişliğinde olan çevriler hüzmeye yapıcı ve yıkıcı etkiler oluşturarak şiddet dalgalanmalarına; yani parıldamaya, hüzmeye daha küçük olan çevriler ise hüzmeye kısım kısım saçılmasına; yani hüzmeye genişlemesine ve faz bozulmasına sebep olacak, hüzmeye boyutundan büyük çevriler ise hüzmeye rasgele hareket etmesine ve bunda dolayı hüzmeye gezinmesine neden olacaktır.

Türbülanslı atmosferin kablosuz optik haberleşme sisteminin performansına etkilerini en aza indirmek için alınabilecek önlemler iki gruba ayrılabilir. Birinci grup, elektronik sinyal bir ışık kaynağı tarafından optik sinyale dönüştürülmeden önce ve optik sinyalin optik dedektör tarafından elektronik bir sinyale dönüştürülmesinden sonra uygulanabilecek sinyal işleme ve kodlama yöntemleridir. Optik sistem konfigürasyonu tasarlanırken alınabilecek önlemler de mevcuttur. Önerilen çözümler arasında, birden fazla alıcı veya verici kullanarak uzaysal çeşitlemenin sağlanması, gönderilen ışığın şiddet profilinin değiştirilmesi (hüzmeye şekillendirmesi), adaptif optik tekniklerinin kullanılması, gönderilen ışığın hüzmeye genişliğinin türbülansın şiddetine göre ayarlanması, gönderilen ışığın faz uyumluluğunun kısmen bozulması sayılabilir.

Dalga boyu çeşitlemesi yönteminin daha önce türbülansın etkisine bir önlem olamayacağı ve spektral kovaryansın korelasyonunun zayıf türbülansla bile düşük çıkacağı öngörülmüştü. Parıldamanın etkisini azaltmada dalga çeşitlemesi yönteminin bir seçenek olamayacağı sonucuna varılmıştı. Daha sonra spektral kovaryansın korelasyonunun daha iyi teorilerle ve deneysel sonuçlarla iyi uyuşan ifadelerle tanımlanmıştır. Dalga boyu seçeneği olarak uygulanabilecek aralık QC lazerler ile artmış ve daha geniş bir dalga boyu aralığı kullanılabilme imkanı sağlamıştır. Çeşitli konular ele alındığında 0.8 ve 1.55 μm ile yapılacak çeşitlemenin kuvvetli türbülans ve küçük iç ölçek şartlarında başarımlı sağladığı

görülmüştür. 0.8 ve 3.8 μm çeşitleme ise kuvvetli türbülans ve büyük iç ölçek şartlarında başarımlı sağladığı için daha geniş kullanım alanı sağlayacaktır. Çeşitli meseleler ele alındığında çeşitleme için ikinci dalga boyunun 3.8 μm olmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Daha önce kısaca bahsedilen önlemlerden bazıları birlikte, bazıları ise birbirinin yerine kullanılabilir. Hatta parıldama etkisi, dalga boyunu yeterince büyük alınması ile çeşitleme yapmadan, elemine edilebilir. Fakat diğer etkilerinde göz önüne alınıp ona göre değerlendirilmesi uygun olur. Bu konuda ayrıntıya girilmesi çalışmanın kapsamını aşacağından, parıldama etkisini azaltmak için çeşitlemeye karar verildiği varsayılarak, dalga boyu çeşitlemesi uzaysal çeşitleme ile karşılaştırılmıştır. Piyasada mevcut tasarımların azami menzili genellikle 1-2 km civarında olup, yürütülen ar-ge çalışmaları çoğunlukla menzilin 4 km ve ötesine çıkarılmasına yöneliktir. Buradan, çeşitlemeye çoğunlukla kuvvetli türbülans bölgesinde ihtiyaç duyulacağı sonucu çıkar. Özellikle 0.8-1.55 μm lazerlerle yapılacak çeşitlemenin yeterli performans sağladığı şartlarda dalga boyu çeşitlemesinin tercih edilmesi gerekir. 0.8-3.8 μm 'lik çeşitleme içinse, QC lazerin getireceği maliyet vb. külfetler ile aralarında büyük mesafe bulunan iki parçadan oluşan alıcı veya verici tasarımının sakıncaları karşılaştırılarak karar verilmelidir. Örneğin QC lazerlerin çok kırılğan materyalli yapıya sahip olmaları ve güç düzensizliklerinin olması gibi sakıncaları göz önüne alınmalıdır.

Bir başka yöntem olarak, uyarlanırlı görüş alanı yöntemi kullanılarak maksimum gücün dedektöre gelmesi ve arka plan gürültüsünün minimum olması için optimum bir görüş alanı belirlenmeye çalışılmıştır. Optimum nokta için bir analitik ifade geliştirilmiş, $1 < v/v_0 < 10$ aralığında optimum görüş alanı kullanılabileceği ortaya konmuştur.

Türbülanslı atmosferde yayılan lazer ışığı için en uygun görüş alanını ele alan daha önceki bir çalışma genişletilerek şu sonuca varılmıştır : Eğer genel sistem tasarımı mülahazaları alıcının görüş alanının $1 < v/v_0 < 10$ bölgesini de içeren bir aralıkta ayarlanmasına izin veriyorsa, ve eğer D/r_0 dağılımının önemli bir kısmı $1 < D/r_0 < 10$ aralığındaysa, uyarlanırlı görüş alanlı alıcı tasarımı, yüksek arka plan gürültüsü şartlarında, yüksek dedektör kazançlı bir alıcının performansını arttıracaktır. Ayrıca, gerçek zamanlı hesaplamalar için yaklaşık bir analitik ifade önerilmiştir. Değişik şartlar için maksimum

ortalama güç alabilmemiz için gereken optimum görüş alanı ile maksimum sinyal gürültü oranı için optimum görüş alanı karşılaştırıldı. Sonuçta görüş alanı değerlerinde maksimum %5 lik bir fark olduğu görülmüştür. Bu nedenle; gerçek zamanlı uygulamalar için, geliştirilen analitik ifadenin kullanılmasının uygun olacağı görülmüştür. Gerçekleştirim meselesine gelirsek, r_0 yaygın kullanılan dalga cephesi algılayıcılarından biri, örneğin Shack-Hartman algılayıcısı ile ölçülebilir. Hatta, eğer alıcı ile verici arasındaki arazi profili yeterince düzgünse, bir C_n^2 algılayıcısı bile yeterli olabilir. Ayarlanabilir odak mesafeli mercekler konusundaki son gelişmeler de görüş alanının gerçek zamanlı ayarlanması seçeneğini gittikçe daha cazip hale getirmektedir. Eğer bir bölgenin faz uyumluluk ölçeği tam olarak bilinebiliyorsa bir optimum değer bulup görüş alanını ayarlamak yeterli olacak, uyarlanırlı görüş alanı olarak bir seçeneğe gerek kalmayacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] Omnitek Bilişim ve İletişim Teknolojileri San. Ve Tic. A.Ş. (www.omnitek.com.tr), Telekom Mühendislik, San. ve Tic. Ltd. Şti. (www.telekomeng.com.tr).
- [2] Örneğin: LightPointe Co. Inc. (www.lightpointe.com), Cablefree Solutions Inc. (www.cablefreesolutions.com), fSona (www.fsona.com), Terabeam (www.terabeam.com), Canon (www.usa.canon.com).
- [3] Wasiczko L. M, Techniques to Mitigate The Effects of Atmospheric Turbulence on Free Space Optical Communication Links, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, (2004)
- [4] Vilnrotter V., Lau C.-W., Srinivasan M., Andrews K and Mukai R., Optical Array Receiver for Communication Through Atmospheric Turbulence, Journal of Lightwave Technology, (2005), Vol. 23, No. 4
- [5] Vetelino F. E. S., Andrews L. C., Annular Gaussian beams in turbulent media, Proc. of SPIE, (2004), Vol 5160 pp 86-97.
- [6] Tyson R K., Frazier B. W., Field Guide to Adaptive Optics, SPIE Press Bellingham, WA, (2004).
- [7] Yenice Y. E., Evans B. G., Adaptive Beam-Size Control Scheme for Ground-to-Satellite Optical Communications, SPIE, (1999), pp.1889-1895.
- [8] Müezzinoğlu A, Atmosfer Kimyası, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, (2003).
- [9] Yenice Y. E., Effects of Atmospheric Turbulence on Ground-satellite Optical Communications and Countermeasures, University of Surrey, England,(1999).
- [10] Andrews L. C., Field Guide to Atmospheric Optics, University of Central Florida, Florida USA, (2004).
- [11] Paterson C., Constraints of Ground-Based Observations: The Atmosphere, University of Lyon, Lyon, France, (2002).
- [12] Weiss A, Determination of Thermal Stratification and Turbulence of The Atmospheric Surface Layer Over Various Types of Terrain by Optical Scintillometry, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, (2002), Chapter 1
- [13] El-Nouby M., Haggagy A., A Sodar-based Investigation of The Atmospheric Boundary Layer, Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg, Freiburg, Germany, (2003).

- [14] Max C., Atmospheric Turbulence and its Effects on Image Formation, University of California Observatories, UC Santa Cruz, USA, (2003), Chapter 2
- [15] Sterenborg M.G., Poiaras Baptista J.P.V., Bühler S., Determining the Refractive Index Structure Constant Using High-Resolution Radiosonde Data, European Space Agency, Noordwijk ZH, Netherlands, (2003).
- [16] Andrews L.C., Phillips R.L., Yu P.T., Optical Scintillation and Fade Statistics for a Satellite-Communication System, Applied Optics, (1995), Vol 33, 7742-7751
- [17] Wheelon A.D., Electromagnetic Scintillation II: Weak scattering, Cambridge University Press, England, (1990), Chapter 1
- [18] Zhu X., Joseph M.K, Free-Space Optical Communication Through Atmospheric Turbulence Channels, IEEE Transactions on Communications, (2002), VOL. 50, NO. 8.
- [19] Yaoheng X., Hesheng F., Modification of Laser Ranging Equation, Yunnan Observatory, National Astronomical Observatories, CAS, China, (2002).
- [20] Consortini A., Sun Y. Y., Innocenti C., Zhi Ping Li, Measuring Inner Scale of Atmospheric Turbulence by Angle of Arrival and Scintillation, Optics Communications, (2003), Vol 21, pp19-23.
- [21] International Engineering Consortium, "Local Multipoint Distribution System (LMDS)". (www.iec.org)
- [22] Kaplan Y., Çölkesen R., "Yüksek Hızlı Kablosuz Hücreli Ağ Erişimi", Telepati Telekomünikasyon, (2001),s. 68-73,.
- [23] Willebrand H., Mayhew L., Clark G., Andreu von Euw C. G., "LMDS versus Free Space Optical Networks", Optical Wireless Communications IV, Proc. SPIE, (2001),Vol. 4530.
- [24] Optical Access, "Comparison between a Meshed Wireless Optical Access Network and Reference LMDS Alternative", (2001), White paper.
- [25] Collin R. E., "Antennas and Radiowave Propagation", McGraw-Hill,(1985).
- [26] Papazian P. B., Hufford G.A., Achatz R.J., Hoffman R., "Study of the Local Multipoint Distribution Service Radio Channel, IEEE Transactions on Broadcasting, , (1997),Vol. 43, No. 2, s.1-10.
- [27] Butler M.J.A., Mouchot M.-C., Barale V., LeBlanc C. The application of remote sensing technology to marine fisheries: an introductory manual, (1988)
- [28] Sasiela R.J., "Electromagnetic Wave Propagation in Turbulence", Springer, New York, (1994).

- [29] Strohbehn J.W. (Ed.), "Laser Beam Propagation in the Atmosphere", Springer Verlag, New York, (1978).
- [30] Andrews L.C., Phillips R.L., "Laser Beam Propagation through Random Media", SPIE Press, Bellingham, Washington, (1998).
- [31] Weichel H., "Laser Beam Propagation in the Atmosphere", SPIE Press, Bellingham, Washington, (1990).
- [32] Zeisse C.R., Nener B.D., Dewees R.V., "Measurement of low altitude infrared propagation", Applied Optics, (2000), Vol. 39, 873-886.
- [33] Strickland B.R., Lavan M.J., Woodbridge E., Chan V., "Effects of fog on the bit-error rate of a free-space laser communication system", Applied Optics, (1999), Vol. 38, 424-431.
- [34] Chu T.S., Hogg D.C., "Effects of precipitation on propagation at 0.63, 3.5, and 10.6 microns", Bell System Tech. Journal, May-June (1968), 723-759.
- [35] Fried, D.L., "Spectral and angular covariance of scintillation for propagation in a randomly inhomogeneous medium", Applied Optics, (1971), Vol. 10, pp. 721-731.
- [36] Churnside, J.H., Latatis, R.J., and Wilson, "Two-Color Correlation of Atmospheric Scintillation", Applied Optics, (1992), Vol. 31, pp. 4285-4290.
- [37] Ben-Yosef, N., Goldner, E., and Weitz, A., "Two-color correlation of scintillations", Applied Optics, (1991), Vol. 24, pp. 3486-3489.
- [38] Tamir M., Azoulay, E., Tsur S. and Halavee U., "Aperture averaged spectral correlations of beams in a turbulent atmosphere", Applied Optics, (1984), Vol.23, pp.2359-2362.
- [39] Pincus, P.A., and Kerr, J.R., "Spectral covariance of scintillations", Applied Optics, (1976), Vol. 15, pp. 2305.
- [40] Gurvich, A.S., Kan, V., and Pokasov, V.V., "Two-frequency fluctuations of light intensity in a turbulent medium", Optica Acta, (1979), Vol. 26, pp. 555-562.
- [41] Blaser, S., Hofsetter, D., Beck, M. and Faist, J., "Free-space optical data link using Peltier-cooled quantum cascade laser", Electronics Letters, (2001), Vol.37, pp.778-780.
- [42] Martini, R., Gmachl, C., Falciglia, J., Curti, F.G., Bethea, C.G., Capasso, F., Whittaker, E.A., Paiella, R., Tredicucci, A., Hutchinson, A.L., Sivco, D.L. and Cho, A.Y., "High-speed modulation and free-space optical audio/video transmission using quantum cascade lasers", Electronics Letters, (2001), Vol.37, pp.191-193.

- [43] Capasso F., Piella R., Martini R., Colombelli R., Gmachl C., Myers T.L., Taubmann M. S., Williams R. M., Quantum Cascade Lasers: Ultra High-Speed Operation Optical Wireless Communication, Narrow Linewidth, and Far-Infrared Emission, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, (2002), Vol 38, pp 511-532
- [44] Wawer D., Wójcik-Jedlińska A., Ochalski T., Piwoński T., Bugajski M., Temperature Maps of GaAs/AlGaAs Quantum Cascade-Laser Facets Measured by Micro-Thermoreflectance, *Etos 2004 Conference*, University College Cork, Ireland, (2004).
- [45] Shaik, K. and Hemmati, H., "Wavelength Selection Criteria for Laser Communications", *Free-space Laser Communications Technologies X*, (1995), *Proc. SPIE*, Vol.2381, pp.342-357.
- [46] Manor, H. and Arnon, S., "Performance of an optical wireless communication system as a function of wavelength", *Applied Optics*, (2003), Vol.42, pp.4285-4294.
- [47] *Mit/Nasa Conference on Optical Communications*, Williamstown, Massachusetts, A.B.D., (1968).
- [48] Fante, R.L., "Inner-scale effect on the scintillations of light in the turbulent atmosphere", *JOSA*, (1983), Vol.73, pp.277-281.
- [49] Ibrahim, M.M. and Ibrahim, A.M., "Performance analysis of optical receiver with space diversity reception", *IEE Proc.-Commun.*, (1996), Vol.143, pp.369-372.
- [50] Bruno, W.M., Mangual, R. ve Zampolin, R.F., "Diode laser spatial diversity transmitter", *Optomechanical Design of Laser Transmitters and Receivers*, *Proc. SPIE*, (1989), Vol. 1044, s.187-194.
- [51] Wick D. V., Martinez T., *Adaptive Optical Zoom*, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, (2004), Vol 43, pp 8-9.
- [52] Kedar D. and Arnon S., "Adaptive field-of-view receiver design for optical wireless communication through fog", *Proc. SPIE*, (2002), Vol. 4821, p.110-120.
- [53] Kedar D. and Arnon S., "Optical wireless communication through fog in the presence of pointing errors", *Appl. Opt.*, (2003), Vol.42, p.4946-4954.
- [54] Ren H., Fan Y., Lin Y. and Wu S., "Getting in tune : Electronically controlled liquid crystal yields tunable-focal-length lenses", *OE Magazine*, (2004), p.25-27.
- [55] Takayama W. and Klaus W., "Application of negative refractive behaviour to field-of-view expansion in optical receivers", *J.Opt. A : Pure Appl. Opt.*, (2003), Vol 5, p.S305-S309.

- [56] Maltsev G.N., "Direct-detection receiver angle for an atmospheric optical communication line", *Izvestiya VUZ. Radioelektronika*, (1991), Vol. 34, No.9, p.88-90.
- [57] Walters D.L. and Bradford L.W., "Measurements of r_0 and θ_0 : two decades and 18 sites", *Appl. Opt.*, (1997), Vol. 36, p.7876-7886.
- [58] Andreas E.L., "The refractive index structure parameter, C_n^2 , for a year over the frozen Beaufort Sea", *Radio Science*, (1989), Vol.24, p.667-679.
- [59] Chadwick R.B. and Moran K.P., "Long-term measurements of C_n^2 in the boundary layer", *Radio Science*, (1980), Vol. 15, p.355-361.
- [60] Fried D.L. and Seidman J.B., "Heterodyne and photon-counting receivers for optical communications", *Appl. Opt.*, (1967), Vol. 6, p.245-250.
- [61] Leeb W.R., "Degradation of signal to noise ratio in optical free space data links due to background illumination", *Appl. Opt.*, (1989), Vol.28, p.3443-3449.
- [62] Pratt W.K., *Laser Communication Systems*, John Wiley, (1969), p. 177.
- [63] NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>
- [64] *Applied Optics* special issue on Spatial Light Modulators, Vol 31, No 20 & Vol 33, No 14.

EKLER
(Matlab Programları)



OPTİMUM GÖRÜŞ ALANININ BULUNMASI

```
v=1
D=0;
for i=1:6

    n=1;
    while n<2

        E=2.*pi.*v.*(quadr(@myfun,0,1,{}, {},v,D));
        if E<0.837785
            v=v+0.001;
        elseif E>0.838010
            v=v-0.001;
        else
            n=3;
            DR0(i)=D;
            V(i)=v;
        end
    end

    end
D=D+2;
'lutfen bekleyin'
v=v+2;
end
clc
DR0
V %Optimum V değeri her mercecek çapı faz uyumluluk ölçüsü oranına göre
semilogy(DR0,V)

function y=myfun(z,v,D)

Tz=2*(acos(z) -z.*sqrt(1-z.^2))/pi;Dfi = 6.88*(z*D).^(5/3);
y = Tz.*exp(-Dfi/2).*besselj(1,2*pi*z*v);
```

UYARLANIR GÖRÜŞ ALANI İLE SNR'DEKİ İYİLEŞME

Function f=randomDR0=(num)

k=2*pi/1.55e-6 %dalga sayısı

L=4e+3 %mesafe

D=0.2 %mercecek çapı

Cn2min=1e-18; Cn2max=1e-12; Cn2ort=1e-14 %Cn2 istatistiği

sdf=0.4 %standart sapma katsayısı

r0ort=(0.16*k^2*L*Cn2ort)^(-3/5) %faz uyumluluk ölçüsü istatistik için

```
sigmar0=r0ort*sdf; %standart sapma
r0max=(0.16*k^2*L*Cn2max)^(-3/5); %faz uyumluluk ölçüsü istatistik için
r0min=(0.16*k^2*L*Cn2min)^(-3/5); %faz uyumluluk ölçüsü istatistik için
```

```
%beta dağılımı parametreleri
y=( r0ort- r0min)/( r0max- r0min)
V=((sigmar0)/( r0max- r0min))^2;
p=(y^2/V)*(1-y)-(1+y);
q=(p+1)/y-(p+2);
mode=(p-1)/(p+q-2);
```

```
R=betarnd(p,q,[i num]);
R0=(R.*( r0max- r0min)+ r0min);
f=D/R0;
```

```
global v Dbr0
```

```
Dbr0arr=f
varr=1:20 ; v0=1.22 %kırınım sınırlı görüş alanı
```

```
for iD=1:length(Dbr0arr)
    Dbr0=Dbr0arr(iD);
    n=1;
    v=12.2;
    pbps=1/100;
    res00=2*pi*v*quadr(@myfun,0,1);
    a=(pbps.*(v/v0)^2)/res00;
    res22=res00/(1+a);
    snrsabit(iD)=res22; % sabit görüş alanında SNR değeri
    figure(1); hist(snrsabit,20)
```

```
res3=0
v=1.22; % optimum görüş alanının bulunduğu kısım
```

```
while n<2
    res0=2*pi*v*quadr(@myfun,0,1);
    a=(pbps.*(v/v0)^2)/res0;
    res2=res0/(1+a);
```

```
if res2<res3
    snrmax(iD)=res3; % uyarlanır görüş alanı ile maximum SNR değeri
    vmax(iD)=v-0.2
    n=2;
else
    res3=res2;
end
```

```
v=v+0.2;
end
```

```
snryuzde=( snrmax-snrsabit)./snrsabit).*100 %SNR deki yüzde iyileşme
```

```
figure(2); hist(snryuzde,20)
```

```
function y=myfun(z)
```

```
Tz=2*(acos(z) -z.*sqrt(1-z.^2))/pi;Dfi = 6.88*(z*D).^5/3;  
y = Tz.*exp(-Dfi/2).*besselj(1,2*pi*z*v);
```

