

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**UYDULARARASI VE UYDUDAN YERE LASER İLE İLETİŞİM İÇİN
TASARIM PARAMETRELERİ**

Deniz KARAÇOR

ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA

2008

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

UYDULARARASI VE UYDUDAN YERE LASER İLE İLETİŞİM İÇİN TASARIM PARAMETRELERİ

Deniz KARAÇOR

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Faruk ÖZEK

Yarı-iletken teknolojisinde son zamanlardaki gelişmeler ile optiksel telsiz, diğer bir ifade ile serbest ortam optiksel iletişim (SOOİ), mikrodalga ve radyo frekans (RF) sistemlerine oldukça cazip bir alternatif haline gelmiştir. Tez çalışmasında bir optiksel uydu terminalinin temel yapısı ve fonksiyonları analiz edilmekte, uydulararası ve uydudan yere laser ile iletişim için temel tasarım parametreleri (laser dalgaboyu, teleskop büyüklüğü, iletilen optiksel güç, link uzunluğu, alıcı duyarlılığı ve veri hızı) incelenmektedir. Uydulararası SOOİ, yeryüzünde farklı noktalar arasında yüksek hızlarla iletişimi mümkün hale getirmektedir. Bununla birlikte gönderici ve alıcı arasındaki büyük uzaklıklar optik sinyalde yüksek zayıflamaya neden olmaktadır. Uydu uygulamalarında önemli olan minimum güç tüketimi ile minimum bit hata oranının (BER) elde edilebilmesidir. Bu amaç ile, APD dedektöre sahip sistem ve optiksel ön-yükselteçli sistem olmak üzere iki farklı optiksel iletişim sistemi önerilmiştir. Sistemlerin performansları sinyal gürültü oranı (SNR) ve alıcı duyarlılığı açısından karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

2008, 91 sayfa

Anahtar Kelimeler: Optiksel telsiz, Uydu, Kanal etkileri, Sinyal gürültü oranı, Duyarlılık, Bit hata oranı, Erbiyum Katkılı Fiber Optik Yükselteç

ABSTRACT

Master Thesis

DESIGN PARAMETERS FOR INTERSATELLITE AND SATELLITE-TO-GROUND LASER LINKS

Deniz KARAÇOR

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Faruk ÖZEK

With the recent developments in semiconductor technology, optical wireless, alternatively free space optical communication (FSOC) has become an attractive alternative to microwave or radio frequency (RF) systems. In this work the basic concept and the functions of a satellite optical terminal are analyzed and the major design parameters (laser wavelength, telescope size, optical transmit power, link distance, receiver sensitivity and data rate) for intersatellite and satellite-to-ground laser links are investigated. FSOC between satellites permits high data rates between different places on Earth. However, the long distance between the transmitter and the receiver results in a relatively high attenuation in optical signal. It is important in satellite optical communication to obtain minimum bit error rate (BER) using minimum power. To achieve this aim, two optical communication systems are proposed: one with an APD (Avalanche Photodiode) detector and one with an optical pre-amplifier. The two systems are compared and the results in terms of signal-to-noise ratio (SNR) and receiver sensitivity are presented.

2008, 91 pages

Key Words: Optical wireless, Satellite, Channel effects, Signal-to-noise ratio, Sensitivity, Bit error rate, Erbium-Doped Fiber Amplifier

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sırasında araştırma olanağı sağlayan, çalışmamın her safhasında yakın ilgi ve önerileri ile beni yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Faruk ÖZEK'e ve hiçbir yardımını benden esirgemeyen Araş. Gör. Filiz SARI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Deniz KARAÇOR

Ankara, Ocak 2008

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. UYDU UYGULAMALARI İÇİN LASER İLE İLETİŞİM SİSTEM YAPISI....	10
2.1 Yönlendirme/İşaretleme, Yakalama, İzleme.....	10
2.2 Hedef Yakalama Açısı (<i>Point Ahead Angle</i>).....	11
2.3 Optiksel Uydu Terminali.....	12
2.3.1 4-kadran dedektörün laser izleme alt sistemine uygulanması.....	16
2.4 Optiksel Yer İstasyonu (<i>Optical Ground Station, OGS</i>).....	18
2.5 Titreşim (<i>Vibration</i>) Etkileri.....	20
3. LASER İLE İLETİŞİM İÇİN SİSTEM BİLEŞENLERİ.....	22
3.1 Optiksel Antenler.....	22
3.2 Gönderici (<i>Transmitter, Sender</i>).....	24
3.2.1 Laser kaynakları.....	25
3.3 İletişim Kanalı.....	30
3.3.1 Atmosferik etkiler.....	30
3.3.2 Uydu uygulamalarında atmosferin etkisi.....	34
3.3.3 Link eşitliği.....	37
3.4 Alıcı.....	42
3.4.1 Filtreler.....	43
3.4.2 Dedektörler.....	44
3.4.3 Trans-empedans yükselteç.....	49
3.4.4 4-kadran dedektör (<i>Four-Quadrant Detector</i>).....	50
4. UYDULARARASI İLETİŞİM İÇİN SNR HESAPLAMALARI.....	54
4.1 Arkaplan Gürültüsü.....	54
4.2 APD’li Sistem İçin SNR.....	55

4.3 Optiksel Yükselteçli Sistem İçin SNR.....	65
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	72
KAYNAKLAR.....	77
EKLER	
EK 1 Uydu Uygulamalarında Laser ile İletişimin Tarihçesi.....	81
EK 2 SILEX Programının Temel Özellikleri.....	84
EK 3 Çeşitli Hava Koşulları Altında Görüş Uzaklığı ve Zayıflama Oranları.....	85
EK 4 Farklı Şartlarda Gökyüzü Işımasının Tipik Değerleri.....	86
EK 5 Elektrik Alanın Fonksiyonu Olarak Hole ve Elektronların İyonizasyon Katsayıları.....	87
EK 6 APD’li Sistem için Kullanılan Parametre Değerleri.....	88
EK 7 BER ve Q Değeri Arasındaki Değişim.....	89
EK 8 Optiksel Yükselteçli Sistem için Kullanılan Parametre Değerleri.....	90
ÖZGEÇMİŞ.....	91

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AO	<i>Adaptive Optics</i>
APD	<i>Avalanche Photodiode</i>
ARTEMIS	<i>Advanced Relay and Technology Mission Satellite</i>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CDR	<i>Clock Data Recovery</i>
EDFA	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
FOV	<i>Field of View</i>
GaAlAs	<i>Gallium Aluminum Arsenide</i>
Ge	<i>Germanium</i>
GEO	<i>Geosynchronous Earth Orbit</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GI	<i>Görünür Işık</i>
InGaAs	<i>Indium Gallium Arsenide</i>
InGaAsP	<i>Indium Gallium Arsenide Phosphate</i>
IR	<i>Infrared</i>
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
LA	<i>Limiting Amplifier</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
LM	<i>Link Margin</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
Nd:YAG	<i>Neodymium Yttrium Aluminum Garnet</i>
NEA	<i>Noise Equivalent Angle</i>
NEP	<i>Noise Equivalent Power</i>
OGS	<i>Optical Ground Station</i>
OICETS	<i>Optical Inter-Orbit Communications Engineering Test Satellite</i>

OOK	<i>On-Off Keying</i>
PAT	<i>Pointing-Acquisition-Tracking</i>
PIN	<i>Positive-Intrinsic-Negative</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
SF	<i>Slope factor</i>
SILEX	<i>Semiconductor Laser Intersatellite Link Experiment</i>
Si	<i>Silicon</i>
SNR	Sinyal Gürültü Oranı
SOOİ	Serbest Ortam Optiksel İletişim
TIA	<i>Trans-impedance Amplifier</i>
UV	Ultraviyole

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Elektromagnetik spektrum.....	1
Şekil 1.2 Binalar arası optiksel telsiz ile iletişim.....	2
Şekil 1.3 Gezgin terminaller arası optiksel telsiz ile iletişim.....	2
Şekil 1.4 Sabit terminaller arası laser ile iletişim sisteminin temel fiziksel yapısı.....	3
Şekil 1.5 Uydu ağı.....	5
Şekil 1.6 LEO uydusunun dengelenmesi.....	5
Şekil 1.7 Yer uyumlu üç adet uydunun yeryüzünü kapsama durumu.....	7
Şekil 1.8 Bir terminalin optiksel uydu sistemi için blok diyagramı.....	8
Şekil 1.9 ESA'nın İspanya Tenerife'deki optiksel yer istasyonu.....	81
Şekil 1.10 SPOT-IV, ARTEMIS ve yer istasyonu arasında laser ile iletişim.....	82
Şekil 2.1 Hedef yakalama açısının (β) oluşumu.....	12
Şekil 2.2 Uydu-yer-uydu iletişiminde oluşan hedef yakalama açısı.....	12
Şekil 2.3 Uydulararası iletişim için optiksel terminal sistem yapısı.....	13
Şekil 2.4 Uydulararası iletişim için a. gönderici, b. alıcı yapısı.....	14
Şekil 2.5 Laser izleme sistemi.....	17
Şekil 2.6 LEO-GEO iletişim aşamalarının modellenmesi.....	18
Şekil 2.7 Optiksel yer istasyonu alıcı yapısı.....	19
Şekil 2.8 Uydu-yer iletişimi için yönlendirme ve izleme alt sistemi.....	20
Şekil 2.9 Gönderici gücünün titreşim genliğindeki değişimlere göre uyarlanması.....	21
Şekil 3.1 Optiksel ve mikrodalga sistemler için teleskop kazancının çapına (0.1-2 m) göre değişimi.....	23
Şekil 3.2 Merceğin f-sayısı ve geçirgenliği.....	24
Şekil 3.3 Gauss profilinin şiddetindeki değişim.....	26
Şekil 3.4 Gauss profilinin yayılımı.....	27
Şekil 3.5 Gauss ışınının odaklanması.....	28
Şekil 3.6 Soğurma moleküllerinin dalga boyuna bağlı geçirgenliği.....	31
Şekil 3.7 Farklı iki dalgaboyunda zayıflamanın görüş uzaklığına göre değişimi.....	33
Şekil 3.8 Atmosferik türbülansın ışın üzerindeki etkisi.....	34
Şekil 3.9 Güneş ışıması spektral dağılımı.....	35
Şekil 3.10 Çeşitli uydu uygulamaları.....	35

Şekil 3.11 Adaptif optik yaklaşımı.....	36
Şekil 3.12 İletilen ve alınan güç arasındaki ilişkiyi belirleyen temel parametreler.....	37
Şekil 3.13 Geometrik kayıp.....	39
Şekil 3.14 Uydulararası iletişim için toplam zayıflama faktörünün uzaklığa göre değişimi ($D_T = D_R = 25 \text{ cm}$, $T_T = T_R = 0.8$).....	40
Şekil 3.15 Uydudan yere iletişimde zayıflama faktörünün uzaklığa göre değişimi ($\lambda = 850 \text{ nm}$, $D_T = 25 \text{ cm}$, $D_R = 1 \text{ metre}$, $T_T = T_R = 0.8$, $r_0 = \infty$).....	41
Şekil 3.16 Uydudan yere iletişimde zayıflama faktörünün alıcı teleskop çapına göre değişimi ($\lambda = 850 \text{ nm}$, $D_T = 25 \text{ cm}$, $T_T = T_R = 0.8$, $A_{\text{atm}} = 1 \text{ dB}$, $r_0 = \infty$).....	42
Şekil 3.17 Temel alıcı yapısının basitleştirilmiş blok diyagramı.....	43
Şekil 3.18 Dar band geçiren girişim filtresi.....	44
Şekil 3.19 Alıcının görüş açısı.....	45
Şekil 3.20 Yarı-iletken dedektörler için dedektör tepkisinin dalgaboyuna göre değişimi.....	47
Şekil 3.21 APD kazancının ters kutuplama voltajına göre değişimi.....	48
Şekil 3.22 Trans-empedans yükselteç.....	49
Şekil 3.23 Dairesel 4-kadran dedektör.....	50
Şekil 3.24 Kadran çıkışlarının yükseltilerek gerilime dönüştürülmesi.....	51
Şekil 3.25 Dedektör üzerinde oluşan spot.....	51
Şekil 3.26 Eğim faktörü.....	53
Şekil 4.1 Farklı M değerleri için SNR'nin uzaklığa (1000-50000 km) göre değişimi....	57
Şekil 4.2 Optimum APD kazancının uzaklığa (1000-2000000 km) göre değişimi.....	58
Şekil 4.3 OOK için hata olasılığı.....	60
Şekil 4.4 Si APD'li alıcının duyarlılığının dedektör kazancına göre değişimi.....	62
Şekil 4.5 Alıcı girişindeki gücün uzaklığa göre değişimi ve gerekli minimum değeri...	63
Şekil 4.6 Gerekli minimum güç ve $D_T = D_R = 30 \text{ cm}$ için alıcı girişindeki gücün uzaklığa göre değişimi.....	64
Şekil 4.7 EDFA'nın göndericide kullanılması.....	65
Şekil 4.8 EDFA'nın optiksel ön-yükselteç olarak alıcıda kullanılması.....	65
Şekil 4.9 EDFA'nın tipik çıkış güç spektrumu.....	66
Şekil 4.10 Optiksel yükselteçli sistem için SNR'nin uzaklığa göre değişimi ($B=1 \text{ GHz}$).....	68

Şekil 4.11 InGaAs APD’li alıcının duyarlılığının dedektör kazancına göre değişimi....	70
Şekil 4.12 APD’li ve EDFA’lı sistem için alıcı duyarlılığının bit hızına göre değişimi.....	70
Şekil 4.13 APD’li ve EDFA’lı sistem için SNR’nin uzaklığa göre değişimi.....	71

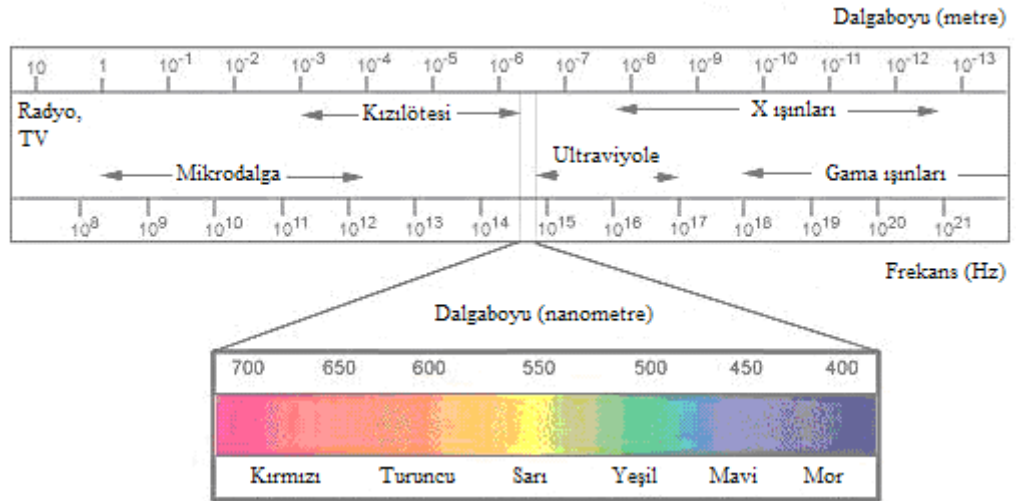
ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 LEO, MEO ve GEO uydularının özellikleri.....	6
Çizelge 3.1 Laser kaynakları ve özellikleri.....	25
Çizelge 3.2 Yarı-iletken dedektörler için tipik parametre değerleri.....	47
Çizelge 4.1 Uydulararası üç farklı bağlantıda $D_T = D_R = 30$ cm için optimum APD kazancı, alınan güç, gerekli minimum güç ve sistem kazancı.....	64

1. GİRİŞ

Genişband kablosuz iletişime olan ihtiyacın artmasıyla birlikte, bir opto-elektronik uygulaması olan optiksel telsiz ile iletişim önem kazanmıştır. Bu iletişimde modüle edilmiş ışık, gönderici ve alıcı arasındaki serbest ortamdan iletilmektedir.

Şekil 1.1’de elektromagnetik spektrum görülmektedir. Elektromagnetik spektrumun opto-elektronik uygulamaların yer aldığı kısmına optik band adı verilir. Optik band ultraviyole (UV), görünür ışık (GI) ve kızılötesi (IR) bölgelerinden oluşur (Özek 1995). Optiksel telsiz sistemleri IR bölgede çalışmaktadır (Chen 2003).



Şekil 1.1 Elektromagnetik spektrum

Serbest ortam teknolojisinde gönderici ile uzaktaki alıcı arasında ışığın yol alabileceği bir görüş ekseninin (*Line of Sight, LOS*) bulunması gerekir. Böyle bir iletim hattında kabloların bulunmaması nedeni ile kurulum maliyeti büyük oranda azalmaktadır.

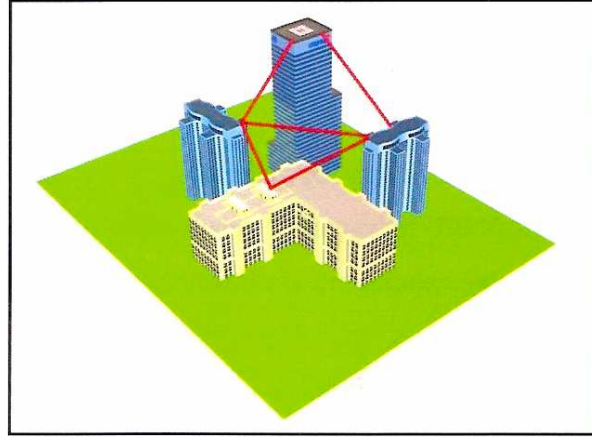
Optiksel telsiz, diğer bir ifade ile SOOİ (Serbest Ortam Optiksel İletişim), güncel uygulama örneklerine sahiptir. Uygulamalar için verilebilecek birkaç örnek şöyledir:

Kapalı alan (*Indoor*):

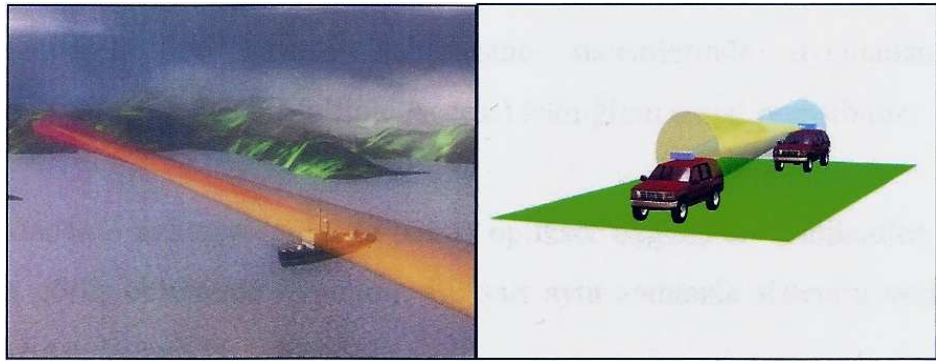
- IR ışıma yapan ledler ile bilgisayarlar arası yerel alan ağıları (*Local Area Network, LAN*)

Açık alan (*Outdoor*):

- Yerleşke (*campus*) uygulamaları: Üniversite, kongre binaları, iş merkezi grupları arasında kalıcı veya geçici iletişim (Şekil 1.2)
- Doğal afet bölgelerinde geçici iletişim uygulamaları
- Görüntü iletimi: Spor karşılaşmaları
- Gezgin terminaller arası iletişim (Şekil 1.3)



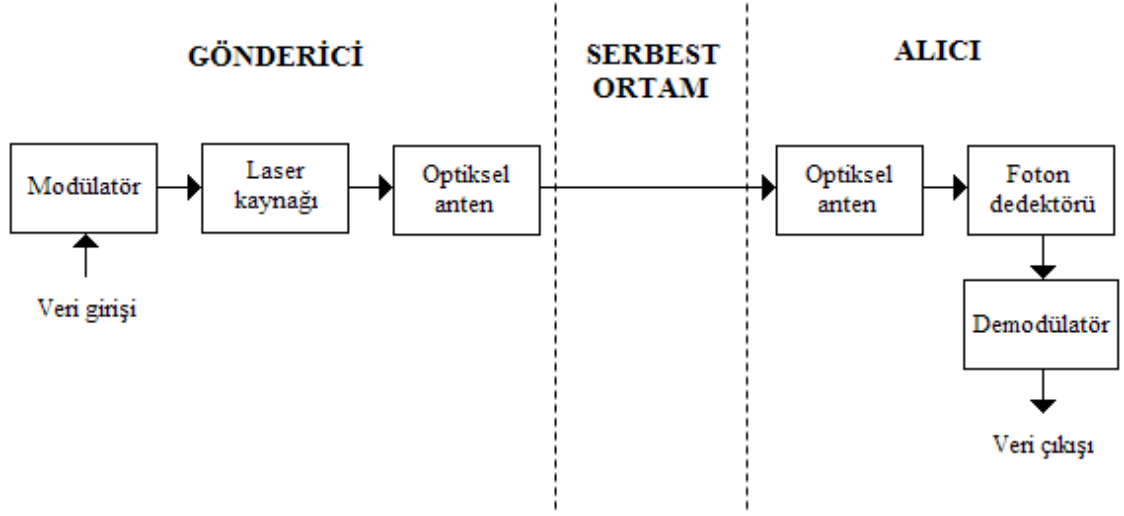
Şekil 1.2 Binalar arası optiksel telsiz ile iletişim



Şekil 1.3 Gezgin terminaller arası optiksel telsiz ile iletişim

İletişimde gönderici ve alıcının aynı görüş ekseninde olması şarttır. Şekil 1.4'te karşılıklı olarak hizalanmış sabit terminaller arası iletişim sisteminin temel fiziksel

yapısı görülmektedir.



Şekil 1.4 Sabit terminaller arası optiksel telsiz ile iletişim sisteminin temel fiziksel yapısı

Terminaller gezgin olduğunda ise, hem göndericinin hem de alıcının terminallerin hareketinden bağımsız olarak birbirlerini görmeleri sağlanmalıdır. Bu da göndericinin ve alıcının birbirlerini izlemelerini ve böylece birbirlerini görüş açıları içinde tutmalarını gerektirmektedir (Özek vd. 2001).

RF (*Radio Frequency*) tabanlı sistemler ile karşılaştırıldığında, kablosuz optiksel iletişim sistemlerinin uygulamada tercih edilmesini sağlayan önemli avantajları:

- Kullanılan optik ışıma dalga boyunun kısa, frekansının yüksek olması nedeni ile bandgenişliği çok daha büyüktür. Bunun bir sonucu olarak çok daha yüksek veri iletim hızlarına ulaşılabilir.
- RF tabanlı sistemler ile girişim (*interference*) oluşmaz.
- Girişimin oluşmaması nedeniyle sistem kullanımı için resmi izin (lisans) gerekmez.

- Gizlilik isteyen bazı uygulamalarda güvenli veri aktarımı için oldukça faydalıdır.

Hem sabit terminaller arasında hem de gezgin sistemlerde iletim gizliliği (*covertness*) ve bilgi gizliliği (*privacy*) sağlamak amacıyla IR gibi gözle görülmeyen laser ışınları kullanılmaktadır.

Ayrıca noktadan-noktaya (*point-to-point*) optiksel bağlantıda terminallerin aynı görüş ekseninde olması zorunluluğu, veri güvenliği açısından sistemin önemli bir avantajıdır.

Kablosuz optiksel iletişimin belirtilen olumlu özelliklerinin yanında dezavantajları ise:

- Özellikle gündüz uygulamalarında güneşin neden olduğu çevre ışıması, iletişim sistemi için bir gürültü kaynağıdır ve sistem performansını düşürmektedir.
- Pus, sis, yağmur gibi atmosfer şartlarından olumsuz etkilenir.
- İletişim uzaklığı daha kısadır (tipik olarak 4-5 km).

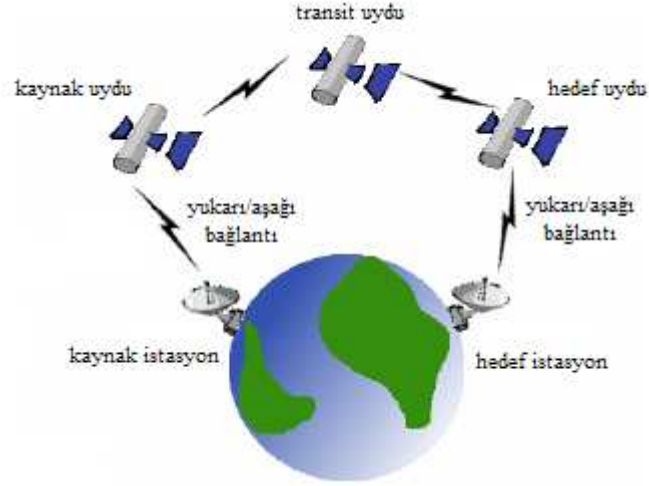
Optiksel sistemin çalışmadığı kötü hava şartlarında, iletişimi sürdürebilmek amacıyla, otomatik olarak devreye giren bir RF yedek iletişim sistemi bulundurulmaktadır. Her iki tür yapıyı (Optiksel+RF) bünyesinde bulunduran melez (*hybrid, tandem*) sistemler, günümüz iletişim teknolojisinin yaygın bir uygulamasıdır.

Uydu Uygulamalarında Laser ile İletişim ve Uydu Yörüngeleri

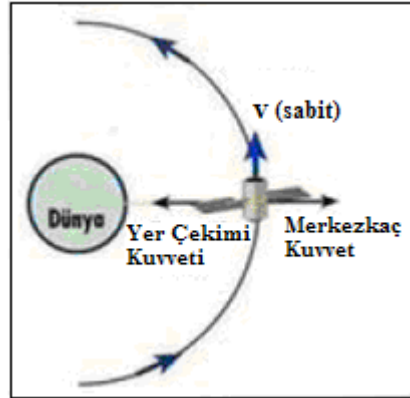
Dünya üzerindeki herhangi bir noktadan diğerine iletişim için uydu ağı kullanılmaktadır. Bilgi, yer istasyonundan ona en yakın uyduya transfer edilir ve uydular arasında iletilerek hedeflenen yer istasyonuna ulaştırılır (Şekil 1.5).

Uydunun fırlatıldıktan sonra yörüngesinde kalması, yeryüzünün çevresinde

dönmesinden dolayı oluşan merkezkaç kuvvet ile yeryüzünün çekim kuvvetinin dengelenmesinin bir sonucudur. Uydunun dengelenmesi Şekil 1.6’da görülmektedir.



Şekil 1.5 Uydu ağı



Şekil 1.6 LEO uydusunun dengelenmesi

Dünyaya yakın yörüngelerde uydu daha fazla yer çekimi kuvvetine maruz kalacağından, bu kuvveti dengelemek için uydunun daha hızlı dönmesi gerekmektedir. Bu nedenle dünyaya yakın olanlar hızlı, uzak olanlar ise yavaş dönmektedir (Akıncı ve Taşçı 2005).

Uydular işlevlerine göre farklı yükseklikteki yörüngelere yerleştirilir. Uydu yörüngeleri, dünyaya olan uzaklıklarına göre şöyle sınıflandırılmaktadır:

- Alçak Yörünge *Low Earth Orbit, LEO*
- Orta-yüksek Yörünge *Medium Earth Orbit, MEO*
- Yer Uyumlu Yörünge *Geosynchronous Earth Orbit, GEO*

LEO, MEO ve GEO uydularının yeryüzüne olan uzaklıkları, yörünge dönüş periyotları ve her yörünge turunda yer istasyonları ile iletişim kurabildikleri süreler Çizelge 1.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 1.1 LEO, MEO ve GEO uydularının özellikleri

Uydu Tipi	Yeryüzüne Uzaklık	Dönme Periyodu	İletişim Süresi
LEO	2000 km’ye kadar	1.5-2 saat	5-20 dakika
MEO	2500-19000 km	5-12 saat	2-4 saat
GEO	35786 km	23 saat 56 dakika 4 saniye	Devamlı

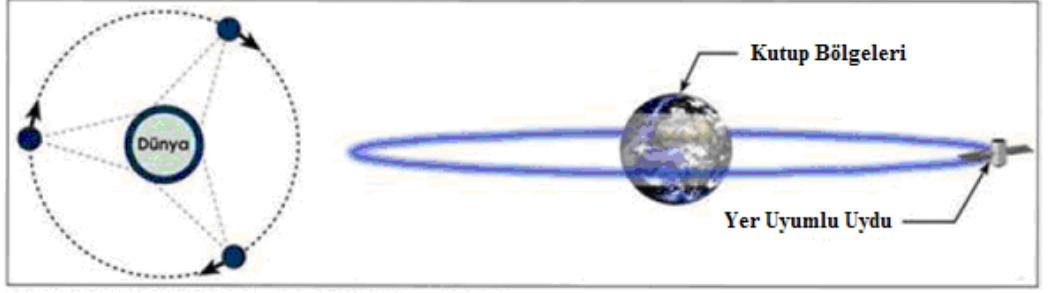
LEO ve MEO uyduları yeryüzündeki herhangi bir noktaya göre durağan kalmaz. Uydular ile yer istasyonları arasındaki iletişim süreleri kısadır. Uydu yer istasyonunun görüş alanına girdiğinde, yer istasyonu anteni uyduyu takip eder. Bu uyduların en büyük dezavantajı, uydu izleme donanımlarının karmaşıklığı ve yüksek maliyetidir.

GEO uydularının açısız hızının dünyanın açısız hızına eşit olması nedeniyle, dönme periyodu da dünyanın kendi çevresinde dönme periyoduna eşit olmaktadır. Dolayısıyla bu uyduların konumu yeryüzündeki belli bir noktaya göre sabittir ve kapsama alanlarındaki tüm yer istasyonları ile sürekli iletişim kurabilmeleri mümkündür. Aralarında 120° açı bulunan üç adet yer uyumlu uydu, kutup bölgeleri haricinde tam bir yer kapsamı sağlamaktadır (Şekil 1.7).

Haberleşme ve yayıncılık servisi veren uydular, genellikle yer uyumlu yörüngeyi kullanmaktadır. Ancak uydunun bu yörüngeye fırlatılmasında ağır ve gelişmiş roketlerin kullanılması bir dezavantajdır.

Uzay ve uydu teknolojisinin gelişmesi sonucunda yer istasyonları ile yörüngedeki uydular arası ve uzak erişimli uydulararası laser ile iletişim amacıyla denemeler

başarıyla gerçekleştirilmiştir ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir (Arı 2006).



Şekil 1.7 Yer uyumlu üç adet uydunun yeryüzünü kapsama durumu

Uydu uygulamalarında laser ile iletişim sisteminin kullanılması, RF tabanlı sistemlerin kullanılmasına göre, daha önce belirtilen avantajlara ek olarak şu önemli avantajları sağlamaktadır:

- Kullanılan terminallerin boyutu daha küçüktür, ağırlığı daha azdır.
- Tüketilen güç miktarı daha düşüktür.

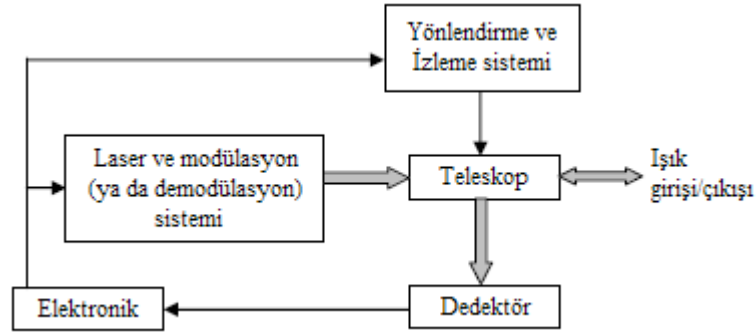
Özellikle atmosferin üstündeki dış bölgede uydulararası optiksel linklerin, yeryüzünde farklı noktalar arasında yüksek hızlarla iletişimi mümkün hale getirmesi önemlidir.

Uydu yapılarının küçültülerek maliyetlerin azaltılması diğer bir önemli avantajdır. Ancak küçük uydu yapılarında yedeklemelerden taviz verilmesi, tüm sistemin çalışmasındaki risk faktörünü artırmaktadır.

Uzayda optiksel telsiz ile iletişimin temel dezavantajı, sistemin teknolojik karmaşıklığa sahip yeni bir uygulama olmasıdır. Çok dar demet açılı laser ışınlarının kullanılması, teknolojik karmaşıklığın başlıca nedenidir. Ayrıca uyduların çevre ve alt sistemlerin etkisiyle titreşimi, alınan sinyalin azalmasına neden olmaktadır.

Uydulararası iletişimde her iki terminal, yer-uydu ve uydu-yer iletişimde ise terminallerden biri sürekli olarak hareket etmektedir. Uyduların hareketi ve titreşimi

devam ederken çok dar açılı demetler ile büyük uzaklıklar üzerinden optiksel linkin kurulabilmesi ve terminallerin veri aktarımı süresince aynı görüş eksenini üzerinde kalmalarının sağlanabilmesi için, yerdeki sabit terminaller arası iletişim sisteminden farklı olarak, ilave alt sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Alt sistemler ile tüm sistemin yapısı daha karmaşık hale gelmektedir. Şekil 1.8’de bir terminalin optiksel uydu sistemi için blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 1.8 Bir terminalin optiksel uydu sistemi için blok diyagramı

Yeni teknik ve teknolojiler uydu sistemlerinde uygulama bulmadan önce yer uygulamaları ile denenmekte ve yer uygulamalarında bu sistemlerin olgunlaşması beklenmektedir. Dolayısıyla uydu sistemlerinde güvenilirliğini kanıtlamış teknolojiler kullanılmaktadır (Şenol ve Güler 2005).

Ek 1’de uydu uygulamalarında laser ile iletişimin tarihçesi, Ek 2’de ise ilk defa Kasım 2001’de gerçekleştirilen uydulararası iletişime ait temel özellikler verilmiştir.

Tez çalışmasında,

- uydulararası ve uydudan yere laser ile iletişim için sistem yapısı analiz edilmiş ve sistemi oluşturan bileşenler ayrı ayrı ele alınmıştır.
- yer uygulamalarında ve uydu-yer-uydu iletişimi üzerinde atmosferin etkisi incelenerek çalışma dalga boyları belirlenmiştir.

- uydu uygulamalarında uzak erişimli iletişimin etkileri ele alınarak APD’li sistem ve optiksel yükselteçli sistem olmak üzere iki farklı sistem yapısı önerilmiştir.
- önerilen sistemler için sinyal gürültü oranı (*Signal-to-Noise Ratio, SNR*) hesaplamaları yapılarak, minimum bit hata oranının (hatalı bit sayısı/toplam bit sayısı) (*Bit Error Rate, BER*) elde edilebilmesi için alıcı girişinde gerekli olan optiksel güç değerleri hesaplanmıştır.
- büyük uzaklıklar ve uyduların titreşimi nedeni ile iletişimde oluşan yüksek güç kayıplarına rağmen, minimum güç tüketerek minimum BER’in elde edilmesi amaçlanmıştır.

2. UYDU UYGULAMALARI İÇİN LASER İLE İLETİŞİM SİSTEM YAPISI

2.1 Yönlendirme/İşaretleme, Yakalama, İzleme

Uydulararası ve uydudan yere laser ile iletişimin sağlanabilmesi için gönderici, kanal ve alıcıya ek olarak üç alt sistem kullanılmaktadır:

- | | |
|---------------------------|--------------------|
| 1. Yönlendirme/İşaretleme | <i>Pointing</i> |
| 2. Yakalama | <i>Acquisition</i> |
| 3. İzleme | <i>Tracking</i> |

Alt sistemler iki tamamlayıcı bilgi kaynağından yararlanarak laser ışınını uygun yönde yönlendirmektedir:

1. Yörünge denklemine göre uydunun yerini tanımlayan veriye (*Ephemeris data*) dayalı kaba yönlendirme
2. Bir opto-elektronik izleme sistemine dayalı tam yönlendirme

Yönlendirme/İşaretleme: Bu aşamada, belirsiz alanın büyüklüğünü azaltabilmek için, gönderici ve alıcının pozisyonları ile ilgili bilginin mevcut olması gerekmektedir. Gönderici, bu ön bilgiye dayanarak alıcıya doğru yönlendirilmektedir.

Ön bilginin hesaplanması, her iki terminal üzerine yerleştirilen GPS (*Global Positioning System*, Küresel Konumlama Sistemi) alıcılarından gelen veriye göre yapılmaktadır. Bu sayede laser ışınını alacak olan terminalin içinde bulunduğu belirsiz alanın büyüklüğü nispeten küçültülmüş olmaktadır.

Yakalama: Başlangıcı tipik bir tarama işlemi olan yakalama aşamasında, alıcının yeri tam olarak belirlenmekte ve terminallerin aynı görüş eksenini üzerinde yer almaları sağlanmaktadır. Bu amaçla kullanılan tekniklerden biri, alıcıya bir işaretleyici (*beacon*) laserin yerleştirilmesidir.

İşaretleyici, veri taşıyan laser demeti ile karşılaştırıldığında, farklı bir dalga boyunda ve modüle edilmeyen geniş açılı bir laser demetidir. Alıcıdan gelen geniş açılı işaretleyici ışığının, güneşin neden olduğu çevre ışığından daha güçlü olması ve gönderici PAT sistemi tarafından bulunması gerekmektedir. Yeterince parlak olmaması, çevre ışığı ile uyumlu olmasına ve sistem kamerası tarafından görüntülenememesine neden olmaktadır. Bu amaçla, birkaç yüksek güçlü (500 mW) laser diyot birleşimi kullanılabilir ya da bir optiksel yükselteçten faydalanılabilir .

İzleme: Alıcının yerinin başarılı bir şekilde tespit edilmesinden sonra, son aşama olan izleme başlamaktadır. İzlemenin amacı iletişim süresi boyunca terminallerin aynı eksen üzerinde kalmalarını devam ettirmek ve dolayısıyla da veri taşıyan demetin alıcı üzerine hedeflenmiş bir şekilde tutulmasını sağlamaktır. Alıcı, veri taşıyan demeti alma işlemini tamamlayana kadar işaretleyici ışığını söndürmemektedir (Epple 2005).

2.2 Hedef Yakalama Açısı (*Point Ahead Angle*)

Sonlu ışık hızı ve hareket eden iki terminalin bağıl açısal hızı yüzünden veri taşıyan demetin alıcının daha geç zamanda sahip olacağı pozisyona doğru yönlendirilmesi gerekmektedir.

Şekil 2.1’de iki uydu arasında laser ile çift yönlü iletişim gerçekleşirken hedef yakalama açısının (β) oluşumu görülmektedir (Leeb 2000).

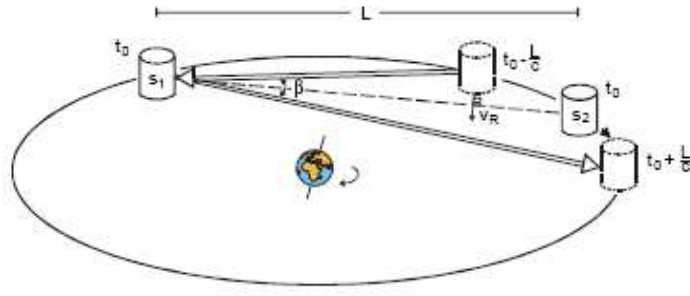
Açının değeri Eşitlik 2.1 ile hesaplanmaktadır:

$$\beta = \frac{2 \cdot v_R}{c} \quad (2.1)$$

Burada,

c: Işık hızı ($3 \cdot 10^8$ m/s)

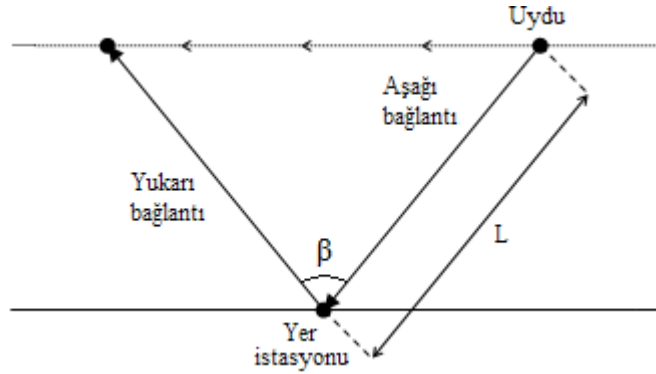
v_R : Gönderici ve alıcının görüş eksenine dik bağıl hız miktarı



Şekil 2.1 Hedef yakalama açısının (β) oluşumu (S_1 : Alıcı uydu 1, S_2 : Alıcı uydu 2)

Hedef yakalama açısı iki GEO uydusu arasındaki iletişimde 40 μ radyana, bir LEO ve bir GEO uydusu arasındaki iletişimde ise 70 μ radyana kadar çıkabilmektedir.

Benzer durum uydu ve yer arasındaki çift yönlü iletişim için de geçerlidir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Uydu-yer-uydu iletişiminde oluşan hedef yakalama açısı

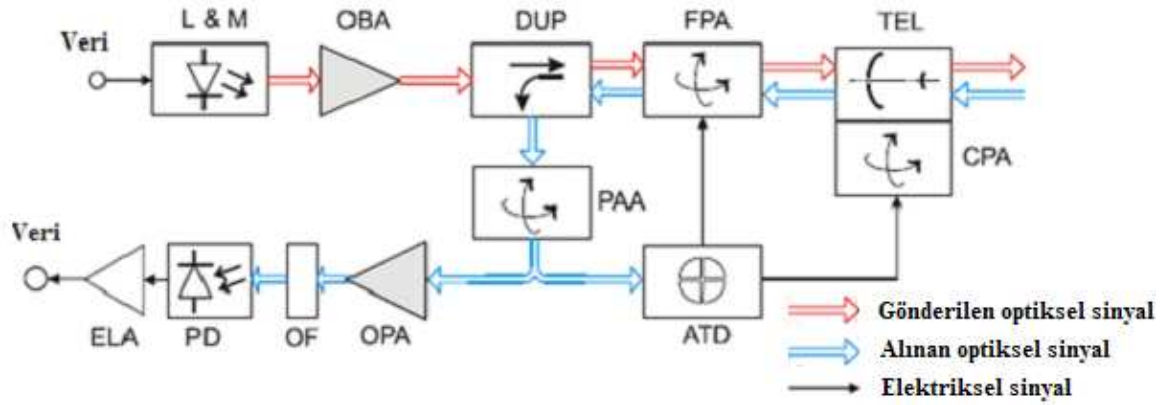
Açının her bir terminalin ya gönderici ya da alıcı kısmında sisteme tanıtılması gerekmektedir. Ayrıca bağıl hızın zamanla değişmesi durumunda ayarlanabilmelidir. Ancak otomatik olarak ayarlanmasını sağlayan bir kontrol devresinin tasarlanması çok zordur. Bu nedenle yörünge denkleminde göre uydunun yerini tanımlayan veriye dayalı olarak yapılan hesaplamalardan yararlanılmaktadır.

2.3 Optiksel Uydu Terminali

Uzayda optiksel iletişim terminalleri, en azından yakalama ve izleme aşamaları dikkate alındığında, her iki yönde eşzamanlı linkler için tasarlanır. Bu nedenle hem bir

göndericiyi hem de bir alıcıyı içerirler. Gönderici ve alıcı birimleri için tek bir optiksel anten kullanılabileceği gibi, ayrı antenler de kullanılabilir. Eğer terminal tek bir antene sahipse, bir duplexer elemanının kullanılması ve bu sayede gönderilen ve alınan demet ayrımının yapılması gerekir (Leeb 2000).

Şekil 2.3'te uydulararası iletişim için optiksel terminal sistem yapısı görülmektedir (Leeb 2005).



Şekil 2.3 Uydulararası iletişim için optiksel terminal sistem yapısı

Burada,

L&M: Lazer kaynağı ve modülatör

Laser and Modulator

OBA: Optiksel yükselteç

Optical Booster Amplifier

DUP: Duplexer

FPA: Tam yönlendirme birimi

Fine Pointing Assembly

TEL: Teleskop (Optiksel anten)

Telescope (Optical Antenna)

CPA: Kaba yönlendirme birimi

Coarse Pointing Assembly

PPA: Hedef yakalama birimi

Point Ahead Assembly

ATD: Yakalama ve izleme dedektörü

Acquisition and Tracking Detector

OPA: Optiksel ön-yükselteç

Optical Pre-Amplifier

OF: Optiksel band geçiren filtre

Optical Bandpass Filter

PD: Foto dedektör

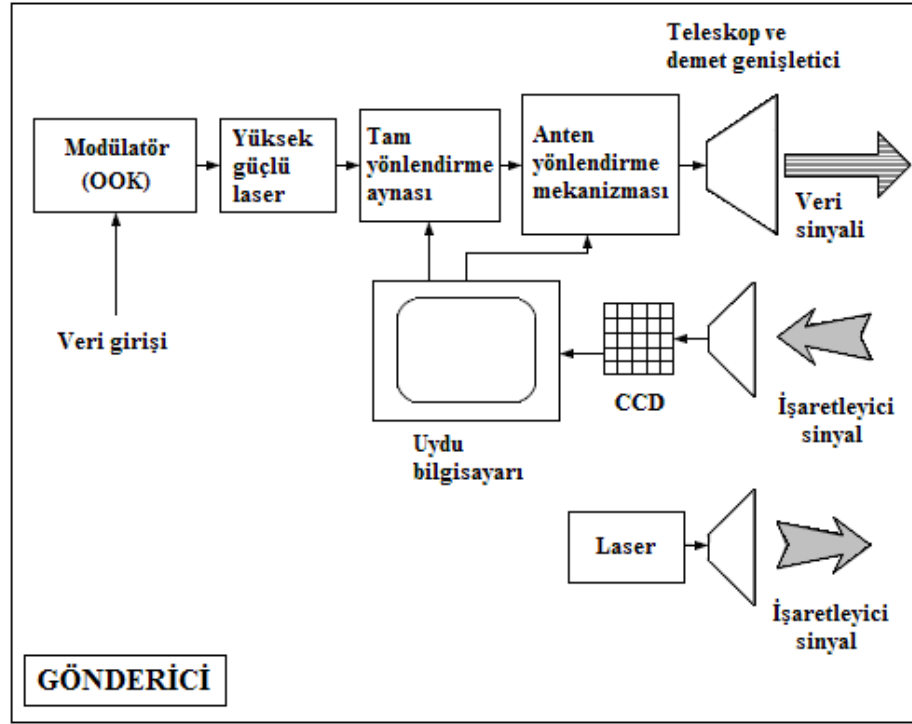
Photo Detector

ELA: Yükseltme ve verinin elde edilmesi

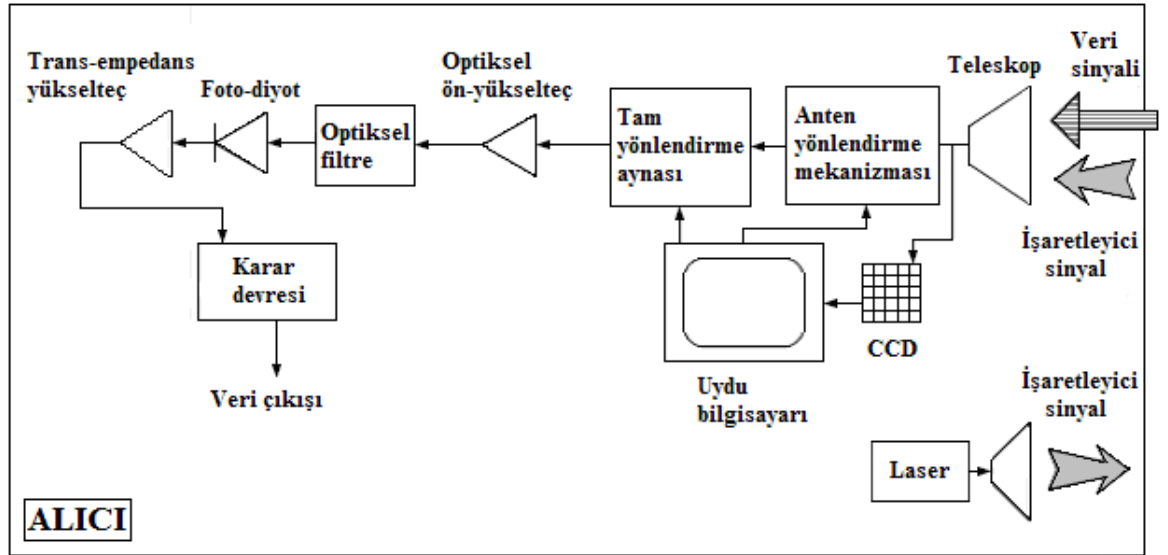
Electronic Amplification and Data

Recovery

Şekil 2.4'te ise gönderici ve alıcı birimleri ayrı ayrı verilmiştir (Arnon *et al.* 2003).



a.



b.

Şekil 2.4 Uydulararası iletişim için a. gönderici, b. alıcı yapısı

Sistemin çalışması şu şekilde özetlenmektedir:

- Alıcı uydu tarafından, karşı terminali aydınlatmak için, bir işaretleyici sinyal yayılır.
- Gönderici uydu tarafından bulunan işaretleyici sinyal, teleskop yardımıyla CCD (*Charge Coupled Device*) üzerine odaklanır.

Yakalama ve izleme dedektörü olarak kullanılan CCD, karşı uydunun yerini tespit etmektedir. Üzerine düşen ışığı elektrik sinyaline dönüştürür. Daha sonra elektrik sinyali bir işlemci yardımıyla görüntüye çevrilir.

- Gönderici uydu, uydu bilgisayarı tarafından kontrol edilen tam yönlendirme ve anten yönlendirme mekanizmalarını kullanarak optiksel eksenini hizalar ve modüle edilmiş laser demetini işaretleyici ışımalarının geldiği doğrultuda gönderir.

Genellikle SOOİ sistemlerinin büyük kısmı basitçe açık-kapalı anahtarlama (*On-Off Keying*, OOK) methodunu kullanmaktadır. Bu yöntemde bilgi işareti sayısal formatta (mantık '1' için optik ışıma var, mantık '0' için optik ışıma yok) gönderilmektedir.

- Alıcı uyduya gelen modüle edilmiş sinyal yükseltilir, filtelenir ve foto-diyot tarafından elektrik sinyaline dönüştürülür. Bir trans-empedans yükselteç (*Trans-impedance amplifier*, TIA) yardımıyla yükseltilecek elektrik sinyali, karar devresi ile demodüle edilir.

Uyduların titreşim etkisine rağmen aynı görüş ekseninde kalmalarını sürdürebilmek için, işaretleyici sinyallerin her iki yönde yayılması gerekmektedir (Leeb 2000). Bu nedenle gönderici uydu tarafından da bir işaretleyici sinyal yayılır ve bu sinyal alıcı uydu tarafından izlenir. Bu sayede alıcı uydunun tam yönlendirme ve anten yönlendirme mekanizmaları da gönderici uydunun pozisyonuna göre kontrol edilebilmektedir.

CCD

Günümüzün yüksek kaliteli kameraları genellikle CCD algılayıcıları kullanmaktadır. Yarı-iletken CCD algılayıcı, kameranın optiksel görüntüyü elektronik çıkışa çeviren kısmı olup bir mozaik dedektör sistemidir (*mosaic, matrix detector array*). Görüntü her bir dedektör arasında bölüşülür, dolayısıyla da her bir dedektör bir görüntü elemanıdır (*pixel*) (Özek 1998).

Görüntülenen cisimden gelen ışık, dedektörlerde ışık şiddetine bağlı olarak elektrik sinyaline dönüştürülür. Bu sinyal analog-sayısal (A/D) çeviriciye verilir ve çeviriciden çıkan sayısal bilgiler görüntü işleme birimine aktarılır.

CCD algılayıcıların boyutları, sahip oldukları piksel sayısına ve pikselin boyutuna göre değişmektedir. Piksel boyutu küçüldüğünde ve sayısı arttığında görüntünün niteliği yükselmektedir.

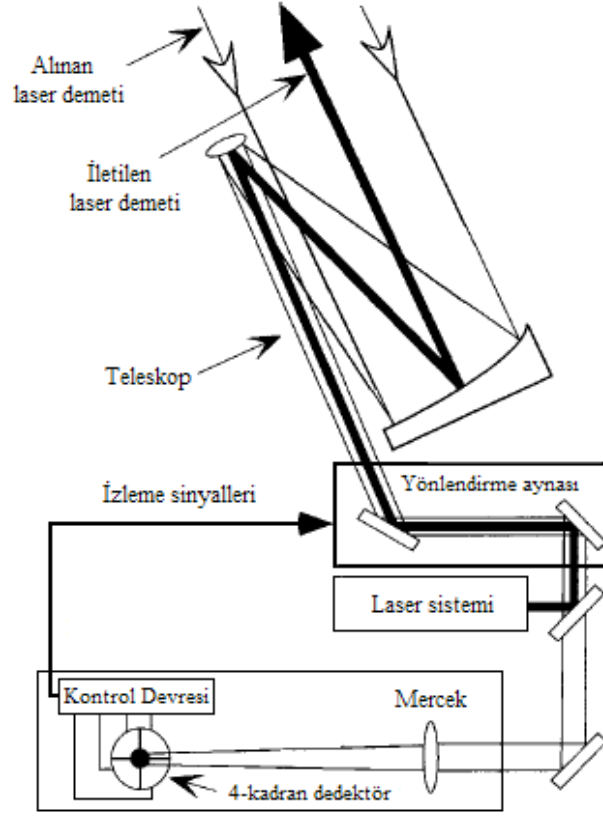
Günümüzde 49.0×36.7 mm boyutlarında 5440×4080 (22195200) pikselden oluşan CCD algılayıcılar mevcuttur. Piksel boyutu mikron ile ölçülmektedir.

2.3.1 4-kadran dedektörün laser izleme alt sistemine uygulanması

Şekil 2.3 ile verilen sistemde yakalama ve izleme aşamaları için bir CCD algılayıcı, veri taşıyan sinyalinin alınması için ise bir foto-diyot kullanılmıştır. Bu durumda her iki terminal üzerinde işaretleyici laserlerin bulunması gerekmektedir.

Yakalama işlemi için CCD algılayıcısının, izleme ve veri taşıyan sinyalin alınması işlemleri için ise bir konum belirleyici dedektörün (*position sensing detector*) kullanıldığı sistem yapısı da mümkündür.

Uzak erişimli laser linkinde yönlendirme hatasını kompanze etmek için kullanılan bir laser izleme sistemi Şekil 2.5'te görülmektedir. Sistemde konum belirleyici olarak bir 4-kadran dedektör kullanılmıştır (Toyoda *et al.* 2002).

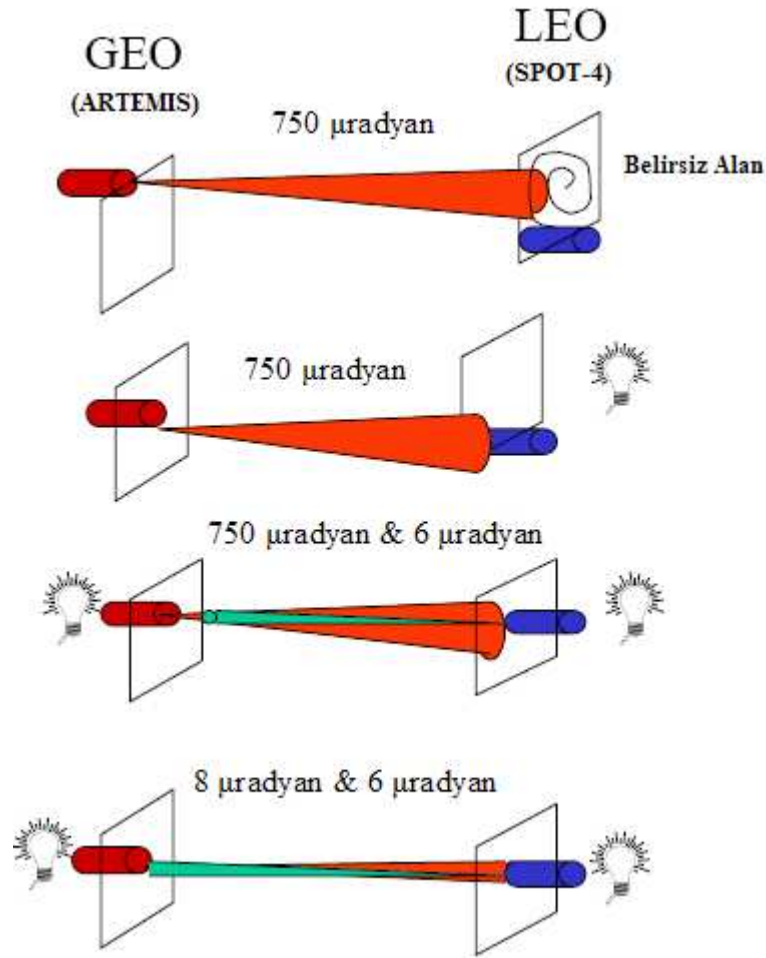


Şekil 2.5 Laser izleme sistemi

Alınan lazer demeti, mercek odak noktasına yakın bir noktaya yerleştirilen 4-kadran dedektör üzerine yoğunlaştırılır. Oluşan optiksel spot dedektörün merkezinde ise terminaller aynı eksen üzerindedir.

Kontrol devresi tarafından spotun pozisyonuna göre izleme sinyalleri sürekli hesaplanarak, yönlendirme aynası yardımıyla spotun dedektörün merkezinde tutulması sağlanır. Böylece her bir terminal, eşzamanlı olarak, diğer terminalden gelen lazer demetini izlemekte ve izleme sinyalleri optimum değerlerde iken kendi demetini gelen demet yönünde iletmektedir.

Bir LEO uydusu ve bir GEO uydusu arasındaki iletişimde böyle bir izleme sistemi kullanıldığında, işaretleyici laserin sadece GEO uydusu üzerinde yer alması yeterli olmaktadır. Şekil 2.6'da iletişim aşamaları modellenmiştir. ARTEMIS uydusunda kullanılan işaretleyici laserin dalga boyu 801 nm'dir.



Şekil 2.6 LEO-GEO iletişim aşamalarının modellenmesi

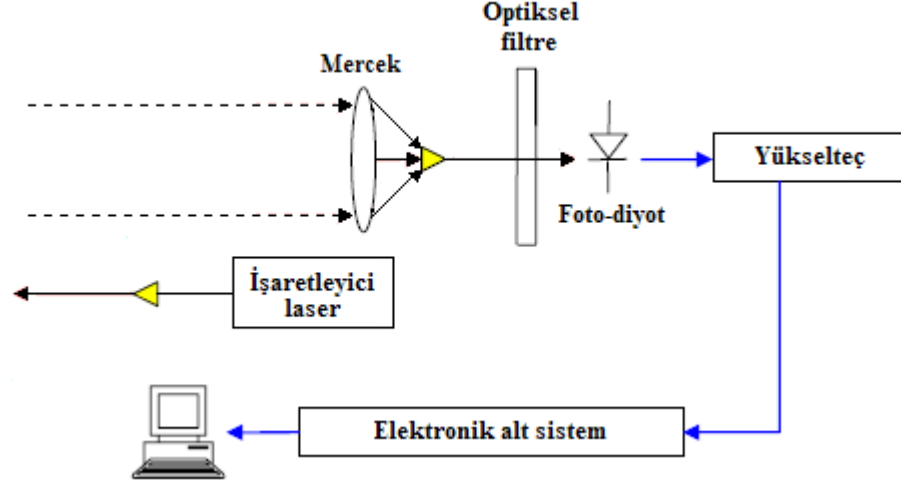
LEO uydusundan gönderilen modüle edilmiş demetin yakalanması ve 4-kadran dedektör üzerinde merkezlenmesine kadar geçen süre yakalama süresi (*acquisition time*) olarak adlandırılmaktadır. Bu süresinin sona ermesi ile izleme aşaması başlamaktadır.

Yakalama süresinin kısa ve izleme doğruluğunun yüksek olması için yeterli optiksel gücün alınması gerekir. Ayrıca geniş açılı işaretleyici demetlerin kullanılması, yakalama süresinin kısa olmasındaki diğer faktördür.

2.4 Optiksel Yer İstasyonu (*Optical Ground Station, OGS*)

Şekil 2.7’de verilen optiksel yer istasyonu yapısı, uydu terminaline benzerdir.

İşaretleyici sinyalin iletimi dışında, sadece veri sinyalini almak için tasarlanan bir yapıdır.



Şekil 2.7 Optiksel yer istasyonu alıcı yapısı (► : Optiksel yükselteç)

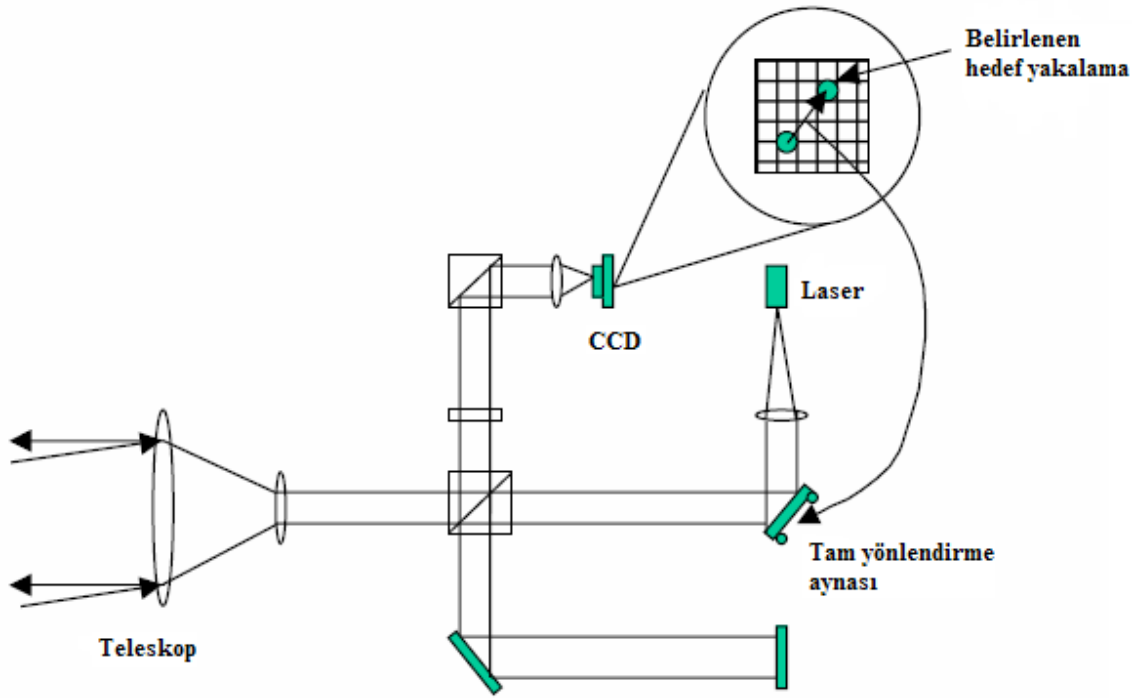
İstasyonun fonksiyonları şunlardır:

- İşaretleyici laser yardımıyla uyduyu araştırmak
- Uydudan gelen veri sinyalini almak ve işlemek

Şekil 2.8’de uydu-yer iletişimi için yönlendirme ve izleme alt sistemi verilmiştir. Yer istasyonundan gelen işaretleyici sinyal, uydu tarafından alınır. Hedef yakalama açısı hesaba katılarak veri taşıyan demet, tam yönlendirme aynası yardımıyla, yer istasyonuna gönderilir (Lee *et al.* 2000).

Uydudan yere laser ile iletişimde bağlı durağanlıklarından dolayı GEO uyduları, LEO uyduları ile karşılaştırıldıklarında, daha az karmaşık PAT sistemleri gerektirirler. Ayrıca GEO uyduları, daha uzun süreli iletişim sağlamaktadır.

Bu avantajlara karşın, GEO-yer iletişimde uzaklığa bağlı link zayıflamasının daha yüksek olması çok önemli bir dezavantajdır.



Şekil 2.8 Uydu-yer iletişimi için yönlendirme ve izleme alt sistemi

2.5 Titreşim (*Vibration*) Etkileri

Uydular sürekli titreşimlere ve darbelere maruz kalmaktadır. Uydunun bütün alt sistemlerini etkileyerek laser iletişim terminali gibi alt sistemler için büyük problemlere neden olan titreşim ve darbe kaynaklarını, iç ve dış kaynaklar olmak üzere iki temel gruba ayırmak mümkündür. Bu kaynaklar için verilebilecek birkaç örnek şöyledir:

İç kaynaklar:

- İzleme gürültüsü
- Anten yönlendirme mekanizmasının, güneş enerjisi mekanizmasının ve diğer bütün uydu alt sistemlerinin çalışması

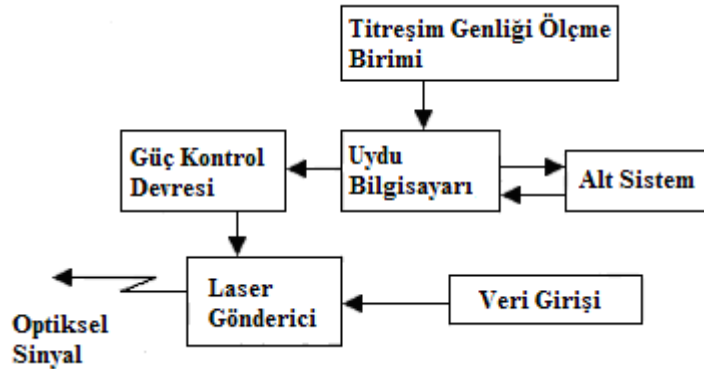
Dış kaynaklar:

- Mikrometeor çarpmaları
- Dünyanın çekim alanı
- Güneşin etkisiyle meydana gelen radyasyon basıncı

- Sıcaklık farklarından dolayı uydu yapısında ortaya çıkan değişiklikler

Güneş, ay ve yıldızların izleme sistemi görüş alanında yer alması, bu sistemin performansını azaltmaktadır. Mekanik titreşimlerin ve izleme sistemi gürültüsünün yönlendirme sistemini etkilemesi, iletilen demetin titreşimine neden olmaktadır. Alıcı teleskobunun da titreşimi ile alınan optiksel güç azalmakta, verim düşmekte ve dolayısıyla da BER değeri artmaktadır (Arnon 1999).

Titreşim etkilerini kompanze etmek ve de BER değerini sabit tutmak için önerilen çözüm, gönderici gücünün titreşim genliğine göre uyarlanması yöntemine dayanmaktadır. Bir başka ifade ile gönderici gücü, yönlendirme sisteminin performansındaki değişimlere göre ayarlanmaktadır. Şekil 2.9'da önerilen çözüm ile ilgili sistem yapısı görülmektedir.



Şekil 2.9 Gönderici gücünün titreşim genliğindeki değişimlere göre uyarlanması

Sistemin çalışması şu şekilde açıklanmaktadır:

- Titreşim genliği ölçme birimi tarafından her bir uydu için titreşim genliği değeri ölçülür.
- Alıcı uydu üzerinde belirlenen değer gönderici uyduya iletilir.
- Uydu bilgisayarı kendisine gelen veriyi işler ve güç kontrol devresine gönderir.
- Güç kontrol devresi ise gönderici gücünü BER değerini sabit tutmak için gerekli olan değere ayarlar.

3. LASER İLE İLETİŞİM İÇİN SİSTEM BİLEŞENLERİ

3.1 Optiksel Antenler

Optiksel anten (teleskop), mercekler ya da aynalar kullanılarak tasarlanmaktadır. Tasarımda, daha kolay hizalanmaları ve fiyatlarının uygunluğu nedeniyle, genellikle mercekler tercih edilmektedir.

Büyük teleskoplar, optiksel terminalin kütlesini ve boyutunu artırır. Bu nedenle uyduda kullanılan teleskopların çap değeri 30 cm'yi aşmamalıdır.

Tez çalışmasında yer istasyonu için ise, İspanya Tenerife'deki istasyonun teleskop çap değeri (1 metre) (Aspelmeyer *et al.* 2003) dikkate alınmıştır.

Hem mikrodalga hem de optiksel teleskopların kazancı, Eşitlik 3.1 ile hesaplanmaktadır:

$$G_a = 20 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot D_a}{\lambda}\right) \quad (\text{dB}) \quad (3.1)$$

Burada,

D_a : Teleskop çapı

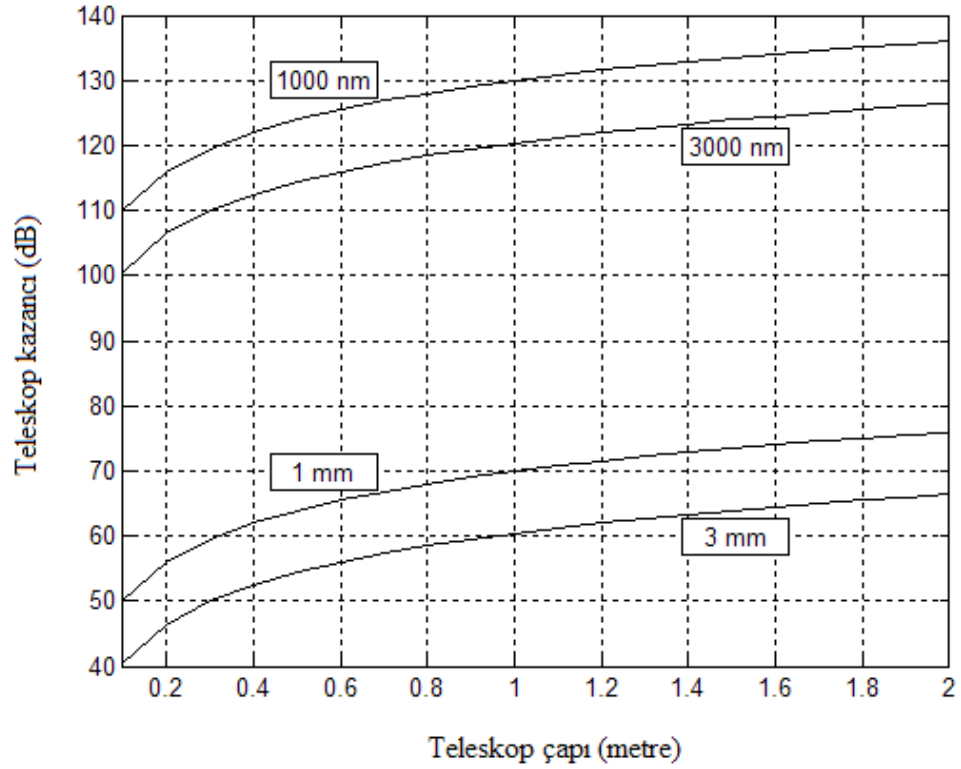
λ : Sinyal dalgaboyu

Optiksel ve mikrodalga uzay linkleri arasındaki temel farkı, çalışma frekansları arasındaki farklılık oluşturmaktadır. Şekil 3.1'de dört farklı dalgaboyu için teleskop kazancının çapına göre değişimi görülmektedir. Optiksel dalgaboylarında (1 μm ve 3 μm), mikrodalgalar (1 mm ve 3 mm) ile karşılaştırıldığında, daha küçük teleskop çapları ile daha büyük kazançlar elde edilmiştir.

Optiksel frekanslarda elde edilen yüksek teleskop kazancı şu avantajları sağlamaktadır

(Franz and Jain 2000):

- Teleskop çapının azalması
- Veri iletim hızının artması
- İletim uzaklığının artması



Şekil 3.1 Optiksel ve mikrodalga sistemler için teleskop kazancının çapına (0.1-2 m) göre değişimi

Mercekler

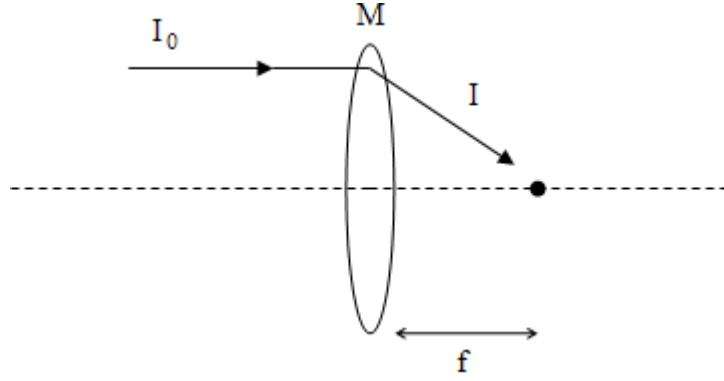
Mercekler ışın demetini bir noktaya odaklamak için kullanılırlar (Şekil 3.2). Böylece ışının yayılması azaltılır.

Mercekler için iki önemli parametre, f-sayısı ve t-sayısıdır. Bu parametreleri açıklamak için Şekil 3.2’den yararlanılmıştır.

f-sayısı (f-number, f/no): Odak uzaklığının (f) mercek çapına (D) oranıdır ve Eşitlik 3.2

ile verilmektedir:

$$f/No=f/D \quad (3.2)$$



Şekil 3.2 Merceğin f-sayısı ve geçirgenliği

t-sayısı (t-number): Merceğin geçirgenliğini (transmisyon) ifade eder. Mercek üzerine düşen ışık miktarı I_0 ve mercekten geçen ışık miktarı I ise, optiksel transmisyon Eşitlik 3.3 ile bulunmaktadır:

$$\tau_{opt} = \frac{I}{I_0} (\%) \quad (3.3)$$

I değeri, I_0 değerinden daha azdır. Bu azalmanın iki nedeni vardır. Birincisi, ışığın mercekten geçerken bir kısmının mercek tarafından absorblanmasıdır. İkincisi ise mercek üzerine düşen ışığın bir kısmının mercekten geri yansımadır (Özek 1995).

3.2 Gönderici (*Transmitter, Sender*)

Sayısal iletişim sisteminde, göndericide elektrik giriş sinyali modüle edilir. Tez çalışmasında, sayısal elektrik sinyalinin optiksel forma dönüştürülmesi için en yaygın şekilde kullanılan modülasyon türü olan OOK dikkate alınmıştır.

Modüle edilmiş ışık, gönderici optik bileşenlerinden olan teleskop yardımıyla iletişim kanalına verilir. Göndericinin diğer optik bileşeni ise laser kaynağıdır.

3.2.1 Laser kaynakları

Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) aynı dalga boyu, faz ve doğrultuda bir elektromagnetik ışımadır. Bu özellikleri nedeni ile fazla enerji kaybına uğramadan dar bir demet halinde çok uzak noktalara ulaşabilir. Görünür laserler olduğu gibi IR dalga boyunda yani görünmeyen laserler de vardır.

Uzayda optiksel iletişim için kullanılan laser kaynakları ve bu kaynakların yapıldıkları malzemeler, çalışma dalgaboyları ve tipik güç değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Laser kaynakları ve özellikleri

Laser Kaynağı	Malzeme	Çalışma Dalgaboyu (nm)	Tipik Tepe Gücü (W)
Katı-hal Laseri	Nd:YAG	1064	1-5
Yarı-iletken Laser Diyot	GaAlAs	780-890	0.20
	InGaAs	890-980	1
	InGaAsP	1300-1550	< 0.05

Yarı-iletken laser diyotlar küçük boyutları ve düşük ağırlıkları, hızlı ve verimli çalışmaları, fiyatlarının uygunluğu ve yüksek güvenilirlikleri nedeni ile daha çok tercih edilirler. Ancak çıkış güçleri, Nd:YAG laserler ile karşılaştırıldığında, daha düşüktür. Güç ile ilgili bu problem, birkaç yarı-iletken laser diyot birleşiminin kullanılması ile çözülebilir.

Tez çalışmasında dalgaboyu 850 nm, çıkış gücü 100 mW olan bir yarı-iletken laser diyot dikkate alınmıştır.

Laser Işınının Özellikleri

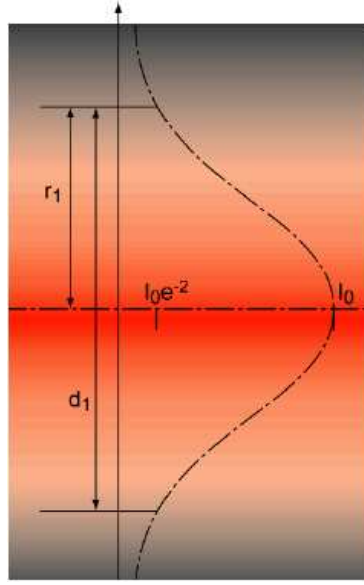
Bir laser kaynağının çıkışı diğer ışık kaynaklarına göre farklıdır. İdealde laser kaynağından yayılması istenen ışın, Gauss profilidir (Alda 2003).

Dairesel gauss profilinin şiddeti ışın eksenine göre simetriktir ve şiddetin maksimum

değeri (I_0) ışının merkezindedir. Şekil 3.3'te şiddetin ışın çapına göre değişimi görülmektedir.

Çapın fonksiyonu olarak şiddetin değişimi Eşitlik 3.4 ile belirlenmektedir:

$$I(d) = I_0 \cdot e^{-2d^2/d_1^2} \quad (3.4)$$

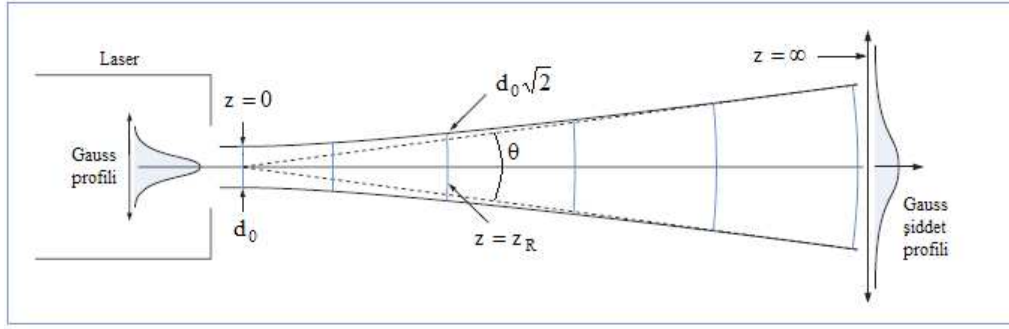


Şekil 3.3 Gauss profilinin şiddetindeki değişim

Bu eşitlikte d_1 parametresi, şiddetin $I_0 \cdot e^{-2}$ değerine eşit olduğu ya da maksimum değerinin % 13.5'ine düştüğü noktadaki çap değeri olarak tanımlanır. Bu parametre, Gauss profilinde gücün çoğunluğunu içinde bulunduran alanın ölçümünü sağlamaktadır ve genelde esas olarak kabul edilen demet çapı değeridir. Bunun bir sonucu olarak kaynak çıkış gücünün % 86.5'i, kullanılabilir güç miktarı olarak belirtilmektedir (Anonymous 1994).

Kaynaktan yayılan Gauss profili Şekil 3.4'te görülmektedir.

Çapın minimum olduğu nokta ışının beli, bu noktadaki çap ise bel çapı (d_0) olarak adlandırılmaktadır. Demet açısı (θ) ışının genişlemeye başladığı noktadaki açıdır.



Şekil 3.4 Gauss profilinin yayılımı

Çapın z eksenini boyunca bel noktasından uzaklığına bağlı olarak değişimi Eşitlik 3.5 ile verilmektedir:

$$d(z)^2 = d_0^2 + \theta^2 \cdot z^2 \quad (3.5)$$

Uydu uygulamalarında olduğu gibi $\theta \cdot z$ teriminin bel çapından çok büyük olduğu uzaklıklar için Eşitlik 3.5 yerine Eşitlik 3.6 kullanılmaktadır:

$$d(z) = \theta \cdot z \quad (3.6)$$

Işın çapının $d_0 \cdot \sqrt{2}$ değerine eşit olduğu uzaklık, Raleigh uzaklığı (z_R) olarak adlandırılmaktadır:

$$z_R = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4\lambda} \quad (3.7)$$

$z = 0$ noktasından uzaklaştıkça ışın çapı artmaktadır. $|z| \leq z_R$ için artış oranı küçük, $|z| \gg z_R$ için ise artış oranı hemen hemen sabittir ve Eşitlik 3.8 ile verilmektedir:

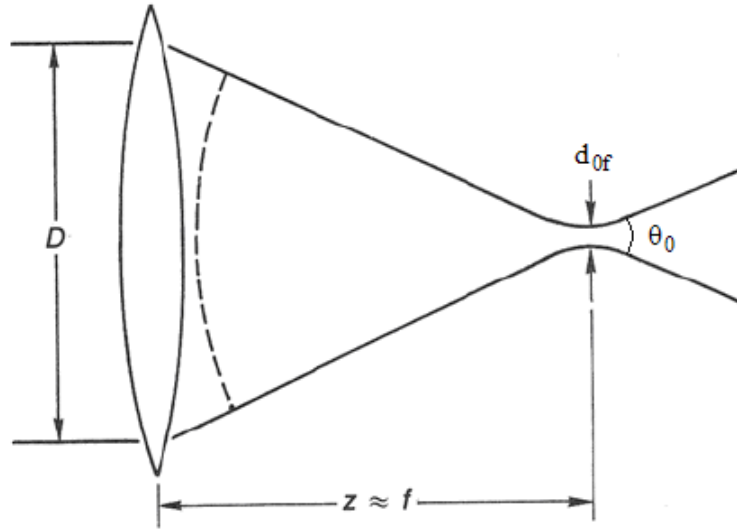
$$\theta = \frac{4\lambda}{\pi \cdot d_0} \quad (3.8)$$

Eşitlik 3.8'den anlaşılacağı gibi, belirli bir dalga boyuna sahip Gauss profili için $d_0 \cdot \theta$

terimi sabittir. Dolayısıyla küçük bel çapına sahip bir ışın için demet açısı büyük, küçük demet açılı bir ışın için ise bel çapı büyük olmaktadır. Uydu uygulamalarında dar demet açılı laser ışınlarının kullanılması gerektiğinden, demet genişletici (*beam expander*) yardımıyla bel çapı genişletilerek demet açısı daraltılabilir.

Odaklanabilirlik faktörü olarak tanımlanan M^2 parametresi, laser demet kalitesi için uluslararası kabul edilen bir değerdir. Laser demetinin kusursuz bir Gauss profilinden ne kadar saptığının ölçüsüdür. Teoride Gauss profili için $M^2 = 1$ iken, gerçek bir laser demeti için $M^2 > 1$ 'dir (Anonymous 2002).

Şekil 3.5'te görüldüğü gibi Gauss profili bir mercekle odaklandıktan sonra tekrar genişlemektedir.



Şekil 3.5 Gauss ışınının odaklanması

ISO 9000 standartına göre demet açısı Eşitlik 3.9 ile hesaplanmaktadır:

$$\theta_0 = d_{0f} / f \quad (3.9)$$

Burada,

d_{0f} : Merceğin odak uzaklığındaki demet genişliği

Işığın odaklanabilirliği ile ilişkili olan M^2 faktörü ise:

$$M^2 = \pi d_{0f} D_0 / 4\lambda f \quad (3.10)$$

Burada,

D_0 : Lense girişteki laser demet genişliği

Eşitlik 3.9 ve Eşitlik 3.10 kullanılarak Eşitlik 3.11 ve Eşitlik 3.12 elde edilmektedir:

$$M^2 = \pi \theta_0 D_0 / 4\lambda \quad (3.11)$$

$$\theta_0 D_0 / M^2 = 4\lambda / \pi \quad (3.12)$$

Eşitlik 3.12'den anlaşılabacağı gibi, M^2 değerinin değişmesi için ya θ_0 ya D_0 değerinin ya da her iki değerin birlikte değişmesi gerekmektedir. Genellikle θ_0 değeri değişir, çünkü D_0 değeri daha çok laserin mekanik yapısının bir fonksiyonudur (Dearden *et al.* 1996).

Uydu uygulamalarında kaynaktan yayılan demetin açısı yaklaşık olarak Eşitlik 3.13 ile hesaplanmaktadır (Leeb 2000):

$$\theta_T \approx \frac{\lambda}{D_T} \quad (\text{radyan}) \quad (3.13)$$

Burada,

D_T : Gönderici teleskobun mercek çapı

Tez çalışmasında uydu teleskoplarının 25 cm'lik çapa sahip olduğu varsayılmış ve Eşitlik 3.13 kullanılarak kaynaktan yayılan demetin açısı 3.4 μ radyan olarak bulunmuştur.

3.3 İletişim Kanalı

Yeryüzünde sabit ve gezgin terminaller arasında gerçekleştirilen optiksel telsiz uygulamalarında iletişim ortamını atmosfer oluşturur. Atmosfer, görünür ve yakın IR dalgaboyları için yüksek düzeyde geçirgen olmakla birlikte bazı dalgaboyu bandlarında moleküler içeriği sebebiyle soğurma (*absorption*) etkisi göstermektedir. Yakın IR dalgaboyu bölgesinde soğurma, özellikle hava içerisindeki su moleküllerinden kaynaklanmaktadır. 700 nm-10 µm dalgaboyu aralığında havanın tamamen geçirgen kabul edilebileceği iletim çerçeveleri (*transmission windows*) bulunmaktadır. Bu çerçeveler belirli merkez dalgaboyu bölgelerinde yer almaktadır ve SOOİ sistemlerinin çoğunluğu 780-850 nm ve 1520-1600 nm çerçevelerinde çalışmak üzere tasarlanmaktadır.

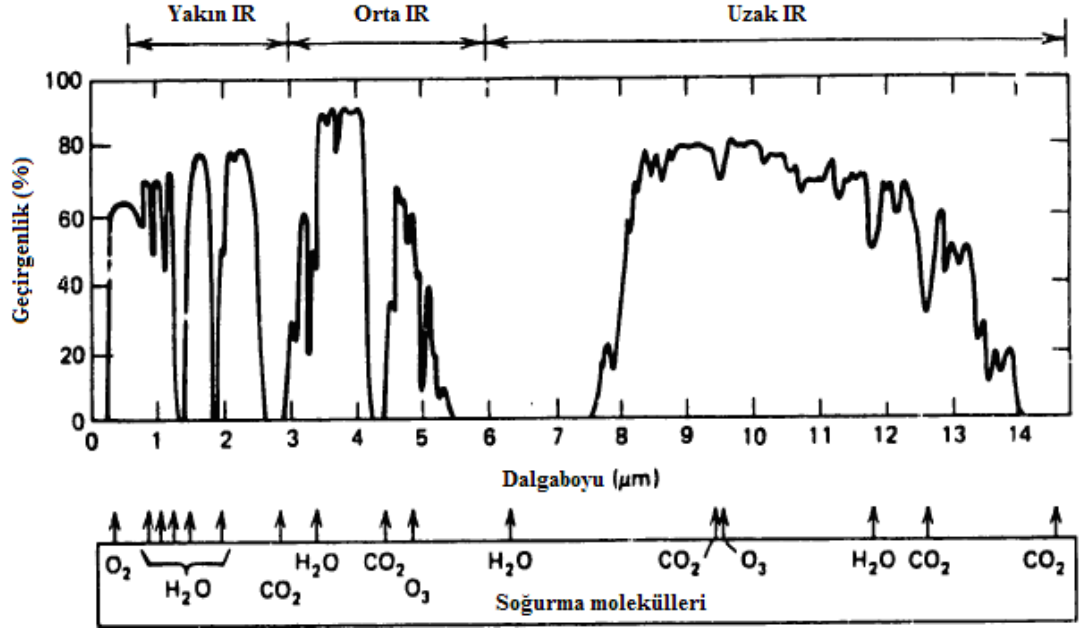
3.3.1 Atmosferik etkiler

Atmosferin fiziksel ve kimyasal özellikleri yükseklik ve coğrafi konuma göre değişmektedir.

Soğurma ve Saçılma

Atmosfer gazlarının moleküler yapısından kaynaklanan etkiler, soğurma ve saçılma (*scattering*). Bu etkiler temel olarak atmosfer içinde yer alan gazların kimyasal ve fiziksel yapılarından kaynaklanmakta ve optiksel sinyalde güç kaybına neden olmaktadır.

Atmosfer içindeki temel soğurma moleküllerinin IR ışımlar üzerindeki geçirgenlik miktarının dalga boyuna göre değişimi Şekil 3.6'da verilmiştir (Churnside and Shaik 1989). Su molekülleri tarafından soğurmanın en az olduğu dalgaboyları 850 nm ve 1550 nm'dir. Dolayısıyla bu dalgaboylarında işletim daha çok tercih edilmektedir. Ancak bu durum sadece açık hava koşullarında ve hafif puslu ortamlar için geçerlidir (Chen 2003).



Şekil 3.6 Soğurma moleküllerinin dalga boyuna bağlı geçirgenliği

Mevsimlere ve çevre şartlarına bağlı olan çeşitli hava koşulları (pus, sis, bulut, yağmur ve kar) da optik dalganın yayılımını olumsuz etkiler.

Hava koşullarına bağlı atmosferik zayıflama, oldukça geniş bir aralıkta değişmektedir (açık havada 0.2 dB/km, çok yoğun sis altında 350 dB/km). Optiksel iletimin en çok sis şartlarından olumsuz etkilenmesinin nedeni, sis aerosollerinin kullanılan dalgaboyları ile karşılaştırılabilir büyüklükte olmasından dolayı yüksek saçılmanın meydana gelmesidir. Bu etken SOOİ sistemlerinin iletişim uzaklığını büyük ölçüde kısaltmaktadır.

Hava koşullarına bağlı atmosferik zayıflama, Beer yasası ile tanımlanmakta ve Eşitlik 3.14 ile verilmektedir:

$$A_{\text{atm}} = 10 \cdot \log(e^{-\sigma \cdot z}) \quad (\text{dB}) \quad (3.14)$$

Burada,

σ : Atmosferik zayıflama katsayısı (Toplam sönme katsayısı)

z : Gönderici ve alıcı arasındaki uzaklık (km)

Birim uzaklık başına atmosferik zayıflama katsayısı ise:

$$\sigma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a \quad (3.15)$$

Burada,

α_m : Moleküler soğurma katsayısı

α_a : Aerosol soğurma katsayısı

β_m : Moleküler ya da Rayleigh saçılma katsayısı

β_a : Aerosol ya da Mie saçılma katsayısı

İletim çerçevelerindeki dalgalıboylarında moleküler soğurma, aerosol soğurma ve moleküler saçılma, aerosol saçılmaya göre daha küçüktür. Bu nedenle toplam sönme katsayısında baskın olan, aerosol saçılmadır (Kim *et al.* 1998).

Bu durumda görüş uzaklığı (*visibility*) ve dalgalıboyu ile ilişkili zayıflama katsayısı Eşitlik 3.16 ile verilmektedir:

$$\sigma \approx \beta_a = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550\text{nm}} \right)^{-q} \quad (3.16)$$

Burada,

V: Görüş uzaklığı (km)

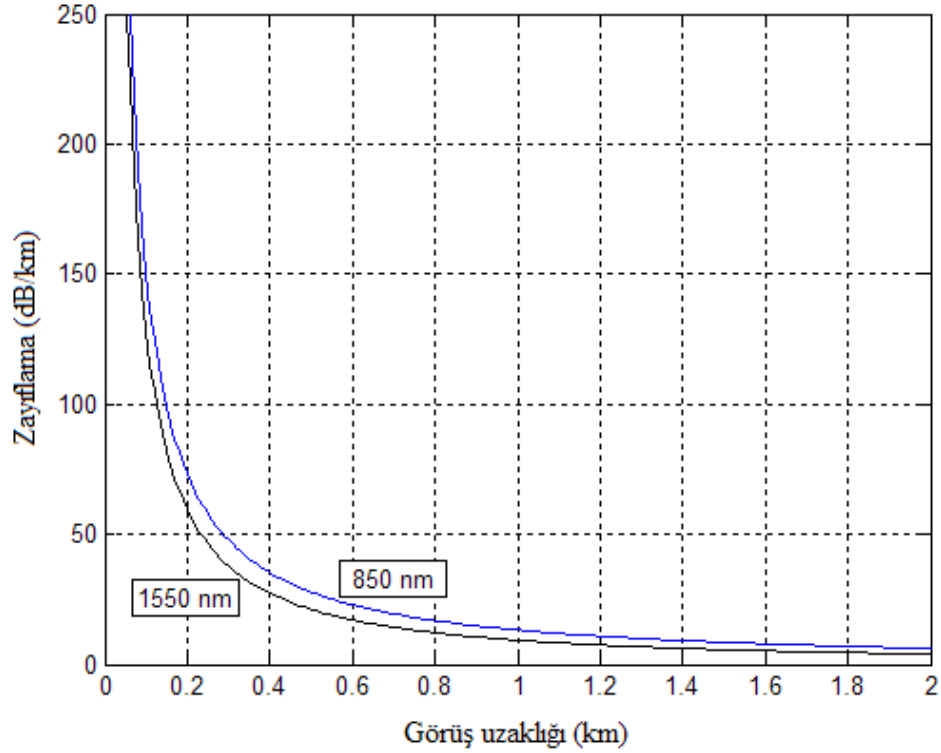
q: Saçılmaya neden olan parçacıkların büyüklük dağılım katsayısı

$V > 50$ km için $q=1.6$, $6 \text{ km} < V < 50$ km için $q=1.3$, $V < 6$ km için $q = 0.585V^{1/3}$

Bir SOOİ sisteminin maksimum iletişim uzaklığı, hava koşullarının veya görüş uzaklığının fonksiyonudur. Farklı hava koşulları için görüş uzaklığı ve zayıflama oranı, çeşitli çizelgeler halinde verilir. Örnek bir Uluslararası Görüş Uzaklığı Kod çizelgesi (Kim and Korevaar 2001) Ek 3'te verilmiştir.

Şekil 3.7'de 850 nm ve 1550 nm dalgalıboylarında zayıflama miktarının, görüş

uzaklığına göre değişimi verilmiştir. Daha uzun dalgaboyunda iletimin daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 3.7 Farklı iki dalgaboyunda zayıflamanın görüş uzaklığına göre değişimi

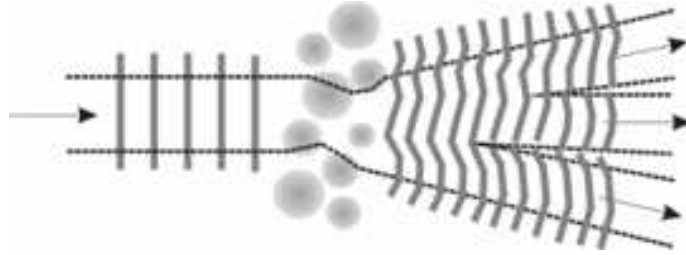
Ancak yoğun sis altında zayıflama miktarı dalgaboyundan bağımsızdır, dolayısıyla da uzun dalgaboyu kullanımı önemli bir uzaklık artışı sağlamamaktadır. Aşırı zayıflama koşullarında ise SOOİ sistemleri çalışmamaktadır.

Türbülans

Optik dalganın yayılımında olumsuz etki yapan diğer bir önemli faktör, atmosferdeki sıcaklık ve basınç farklılıkları ile bu farklılıklar sonucunda oluşan hava akımlarıdır (*turbulence*). Sıcaklık ve basınç değişimleri, özellikle atmosferin yüksek bölümlerinde ve gönderici ile alıcı arasında büyük yükseklik farklılıkları olduğunda önemli değerlere ulaşmaktadır.

Atmosferik sıcaklık değişimleri sinyalin kırılmasına dolayısıyla da dalga şeklinin

bozulmasına ve demetin genişlemesine yol açmaktadır. Sıcaklığa bağlı olarak kırılma sürekli değiştiği için oluşan titreşerek parıldama etkisi (*scintillation*) ile laser ışınını alıcıya odaklamak zorlaşır. Atmosferik türbülansın ışın üzerindeki etkisi Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.8 Atmosferik türbülansın ışın üzerindeki etkisi

Çevre Işığı

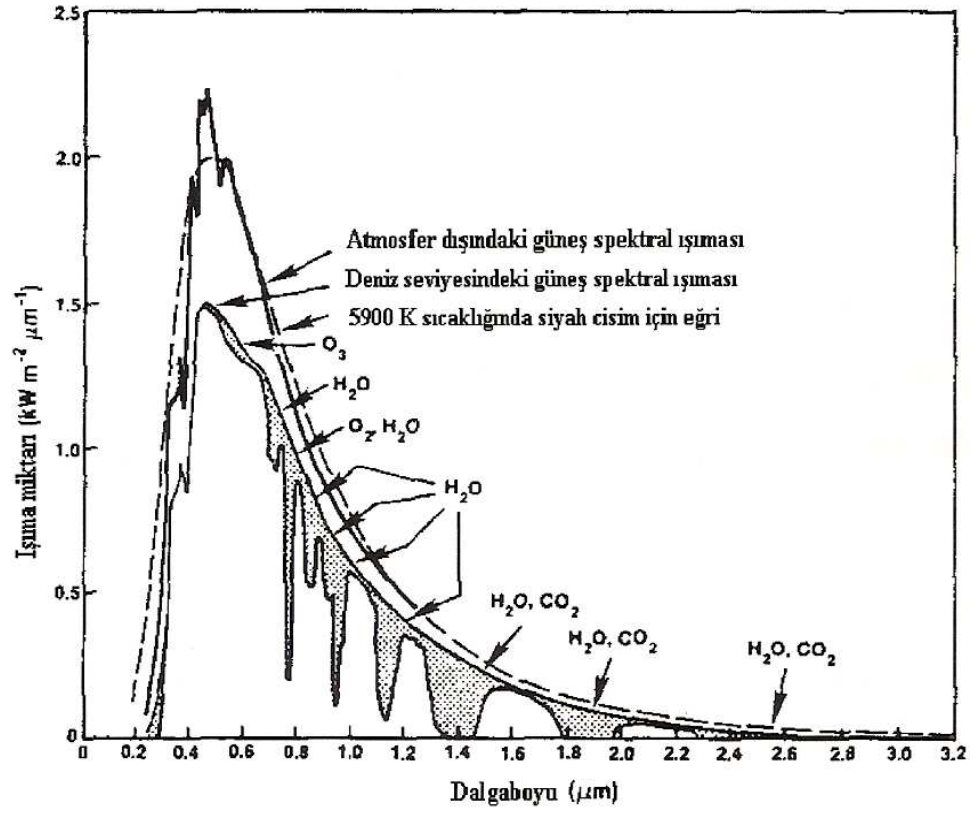
Bahsedilen ortam etkileri ile birlikte özellikle alıcı sistemini etkileyebilecek çevre ışığı etkileri de bulunmaktadır. Gökyüzünde güneş, ay ve yıldızlardan kaynaklanan çevre ışması, sistem için bir gürültü kaynağıdır ve sistem performansını düşürmektedir. En güçlü arkaplan (*background*) gürültü kaynağı olan güneş ışmasının spektral dağılımı Şekil 3.9’da görülmektedir.

3.3.2 Uydu uygulamalarında atmosferin etkisi

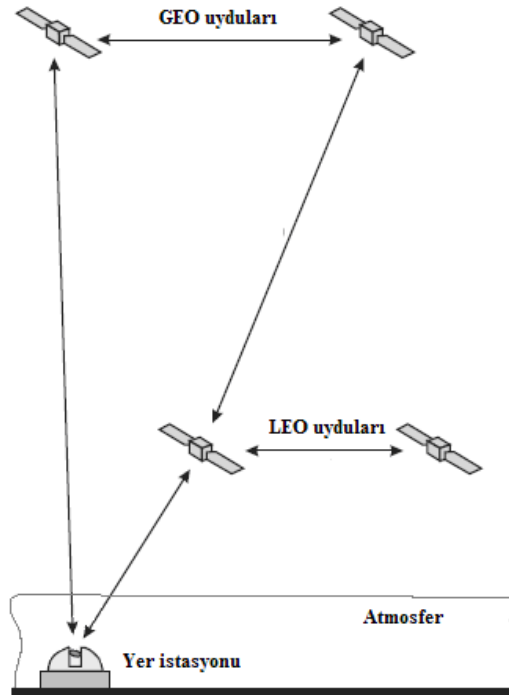
Şekil 3.10’da çeşitli uydu uygulamaları görülmektedir.

Uydulararası iletişimde atmosfer etkisinin olmaması önemli bir avantajdır. Uydu-yer ve yer-uydu iletişimi üzerinde ise atmosferik türbülansın etkisi birbirinden oldukça farklıdır (Aspelmeyer *et al.* 2003).

Uydu-yer iletişiminde ışın öncelikle uzaklığın büyük çoğunluğunda boşlukta ilerler. Daha sonra atmosfer tarafından etkilenmeye başlar.



Şekil 3.9 Güneş ışıması spektral dağılımı



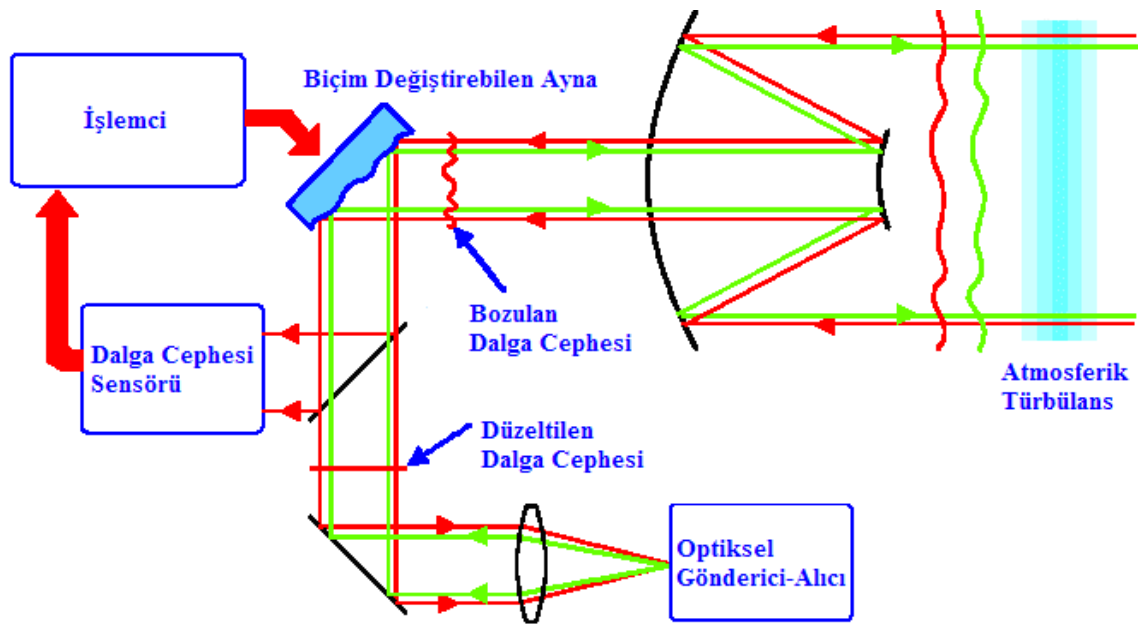
Şekil 3.10 Çeşitli uydu uygulamaları

Yer-uydu iletişiminde ışındaki bozulmalar ilerlemenin başlangıcında meydana gelir. Bu nedenle demet açısı büyük oranda artmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, sinyaldeki güç kaybı daha fazladır.

Ayrıca yer-uydu ve uydu-yer bağlantılarının sağlanabilmesi için gökyüzünün açık olması ve hiçbir bulutun bulunmaması gerekmektedir. Uydu yer istasyonunun üzerinden geçerken kötü hava koşulları nedeniyle bağlantı kaybedilebilir. Verinin daha sonra daha iyi hava koşullarında iletilmek üzere depolanması mümkündür.

Adaptif Optik (*Adaptive Optics, AO*) Yaklaşımı

Atmosferik türbülansın etkisi bir adaptif optik yaklaşımı kullanılarak giderilebilir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Adaptif optik yaklaşımı

Sinyaldeki bozulmaları kompanze etmek için teleskop ve alıcı arasına bir biçim değiştirebilen ayna (*deformable mirror*) yerleştirilir.

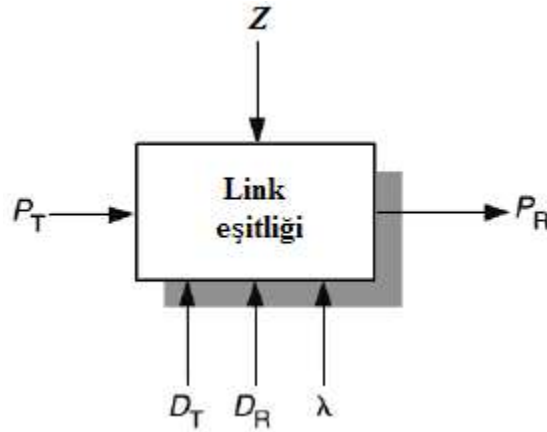
Laser ışını teleskoptan geçtikten sonra dalga cephesi sensörüne (*wavefront sensor*) gönderilir. Sensör, gelen ışını analiz ederek bozulmaları ölçer. Matematiksel olarak

tanımlanan ve miktarları sayısal olarak belirlenen bozulmalara zıt yönde ve eşit miktarda bozulma uygulayacak en iyi ayna biçimi belirlenir ve buna göre ayna yüzeyi yeniden şekillendirilir. Böylece sinyaldeki bozulmalar ortadan kaldırılmış olmaktadır.

Bu teknolojinin uydu terminali üzerinde kullanımı, terminal ağırlığının artmasına neden olacaktır. Dolayısıyla uydu-yer iletişimde sadece yer istasyonu alıcı alt-sisteminde kullanılması önerilmektedir.

3.3.3 Link eşitliği

Uydu uygulamalarında iletilen ve alınan optiksel güç arasındaki ilişkiyi belirleyen temel parametreler Şekil 3.12’de görülmektedir.



Şekil 3.12 İletilen ve alınan güç arasındaki ilişkiyi belirleyen temel parametreler

Uydulararası İletişim için Link Eşitliği

Uydulararası iletişimde alınan güç, Eşitlik 3.17 ile hesaplanmaktadır:

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot Z} \right)^2 \cdot T_T \cdot T_R \quad (3.17)$$

Burada,

P_R : Alıcı girişindeki optiksel güç miktarı
 P_T : Gönderici çıkışındaki optiksel güç miktarı
 G_T : Gönderici teleskobunun kazanç değeri
 G_R : Alıcı teleskobunun kazanç değeri
 Z : Terminaller arası uzaklık
 T_T : Gönderici optiğinin iletim faktörü (≤ 1)
 T_R : Alıcı optiğinin iletim faktörü (≤ 1)

Gönderici ve alıcı teleskopların kazanç değerleri sırasıyla Eşitlik 3.18 ve 3.19 ile verilmektedir:

$$G_T = \left(\frac{\pi \cdot D_T}{\lambda} \right)^2 = 4\pi \cdot \frac{A_T}{\lambda^2} \quad (3.18)$$

$$G_R = \left(\frac{\pi \cdot D_R}{\lambda} \right)^2 = 4\pi \cdot \frac{A_R}{\lambda^2} \quad (3.19)$$

Burada,

D_R : Alıcı teleskobun mercek çapı
 A_T : Gönderici teleskobun mercek alanı
 A_R : Alıcı teleskobun mercek alanı

$A_T \approx D_T^2$ ve $A_R \approx D_R^2$ kabul edilirse, P_T 'nin P_R 'ye oranı olarak tanımlanan toplam zayıflama faktörü (A) Eşitlik 3.20 kullanılarak hesaplanmaktadır:

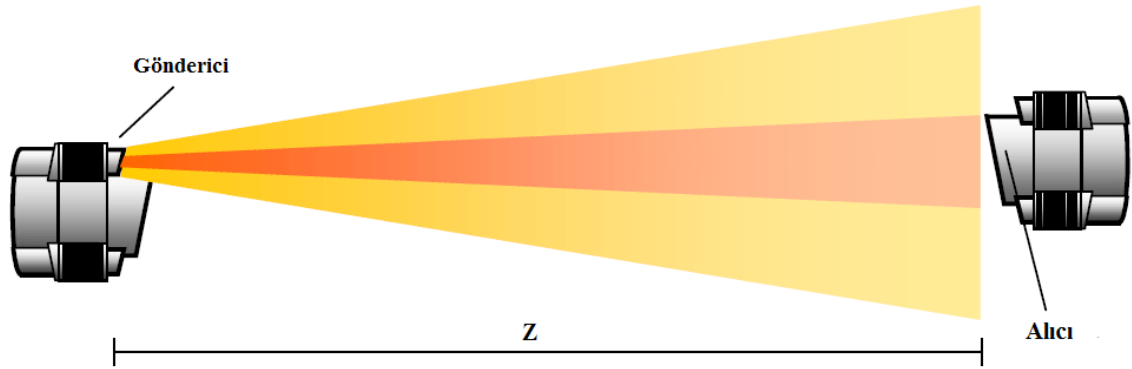
$$A = \frac{P_T}{P_R} = \frac{Z^2 \cdot \lambda^2}{D_T^2 \cdot D_R^2} \cdot \frac{1}{T_T \cdot T_R} \quad (3.20)$$

Eşitlik 3.20, Eşitlik 3.13 ile verilen gönderici teleskobu çıkışındaki demet açısının kullanılmasıyla, yeniden düzenlenmektedir:

$$A = \frac{Z^2 \cdot \theta_T^2}{D_R^2} \cdot \frac{1}{T_T \cdot T_R} \quad (3.21)$$

Geometrik Kayıp (Geometrical Loss)

Şekil 3.13'te görüldüğü gibi göndericiden çıkan laser demetinin Z uzaklığındaki genişliği, alıcı optiği üzerine düşen demet genişliğinden daha büyüktür.



Şekil 3.13 Geometrik kayıp

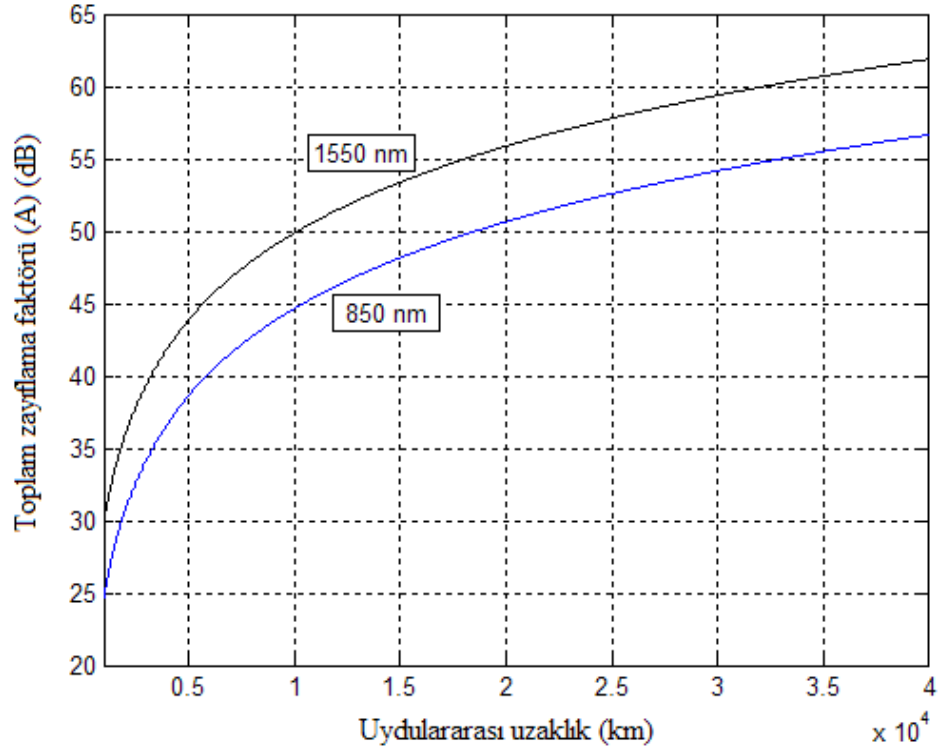
Laser ışınının uzaklığa bağlı olarak genişlemesinden kaynaklanan güç kaybı geometrik kayıp olarak adlandırılmakta ve Eşitlik 3.22 ile verilmektedir (Chen 2003):

$$\frac{A_R}{A_{proj}} \approx \frac{D_R^2}{Z^2 \cdot \theta_T^2} \quad (3.22)$$

Burada,

A_{proj} : Kaynaktan Z uzaklığında laser demeti kesit alanı

Şekil 3.14'te uydulararası iletişim için zayıflama faktörünün uzaklığa (1000-40000 km) göre değişimi verilmiştir. Uzun dalgaboyunda zayıflama faktörünün daha büyük olduğu açıktır. Dolayısıyla daha dar açılı demetlerin kullanılması, geometrik kaybın azalmasını sağlamaktadır. Ancak bu durumda daha hassas PAT sistemlerinin kullanılması gerekmektedir.



Şekil 3.14 Uydulararası iletişim için toplam zayıflama faktörünün uzaklığa göre değişimi ($D_T = D_R = 25$ cm, $T_T = T_R = 0.8$)

Uydudan Yere İletişim için Link Eşitliği

Uydu-yer ve yer-uydu bağlantıları için atmosferik zayıflama ve türbülans etkisinin hesaba katılarak zayıflama faktörü eşitliğinin yeniden düzenlenmesi ile Eşitlik 3.23 elde edilmektedir:

$$A = \frac{Z^2 \cdot (\theta_T^2 + \theta_{atm}^2)}{D_R^2} \cdot \frac{1}{T_T \cdot T_R} \cdot 10^{A_{atm}/10} \quad (3.23)$$

Burada,

θ_{atm} : Atmosferik türbülansın kaynaklanan ek demet açısı

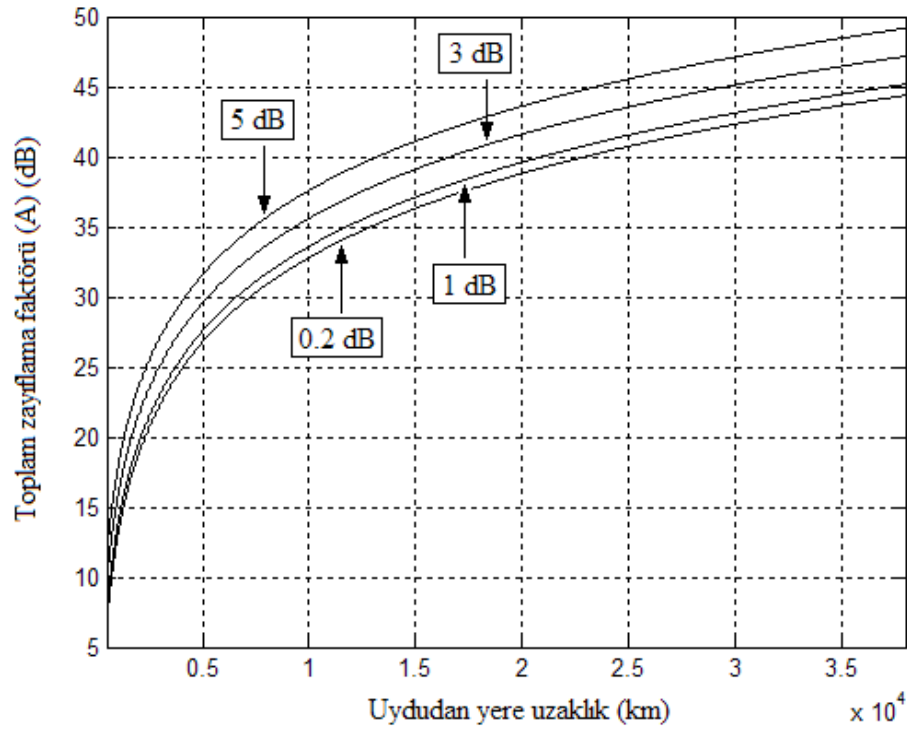
Atmosferik türbülansın demet açısında neden olduğu artış miktarı:

$$\theta_{\text{atm}} \approx \lambda/r_0 \quad (3.24)$$

Eşitlik 3.24'te Fried parametresi (r_0), atmosferik türbülans hücrelerinin büyüklüğünün bir ölçüsüdür. Atmosfer ne kadar çok türbülanslı olursa, Fried parametresi o kadar küçük olmaktadır (Przygodda *et al.* 2000).

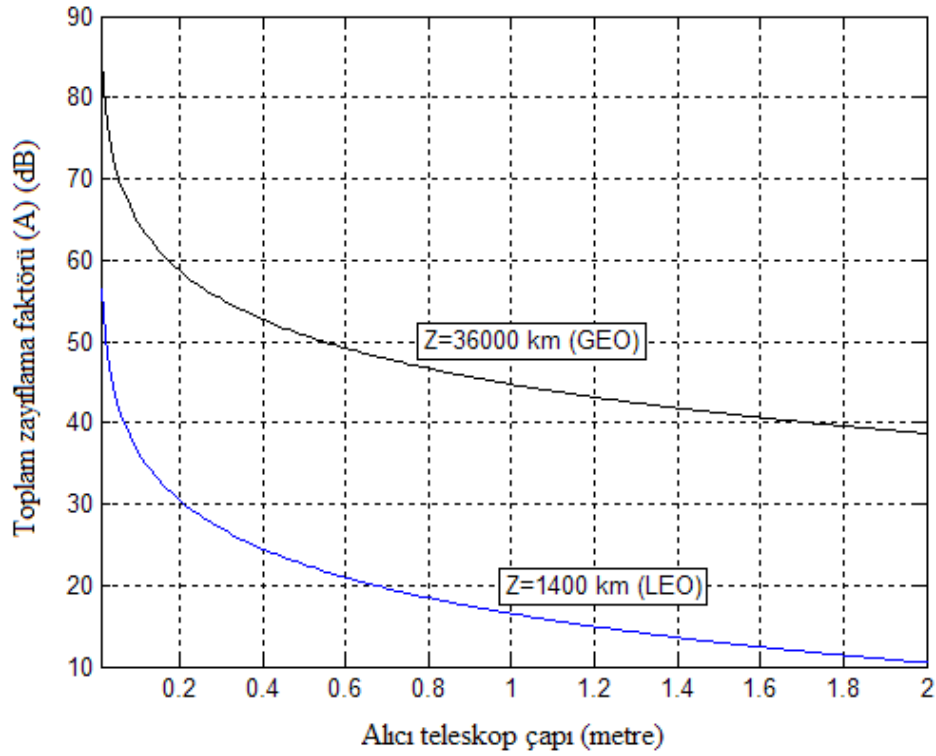
Teorik çalışmalarda uydu-yer bağlantısı için $r_0 = \infty$ alınarak, demet açısında atmosferik türbülansın kaynaklanan bir artış olmadığı kabul edilmektedir (Pfennigbauer *et al.* 2003).

Şekil 3.15'te uydudan yere iletişim için farklı atmosferik zayıflamalar altında zayıflama faktörünün uzaklığa (500-38000 km) göre değişimi görülmektedir. Atmosfer etkisi arttıkça, zayıflama faktörü de artmaktadır.



Şekil 3.15 Uydudan yere iletişimde zayıflama faktörünün uzaklığa göre değişimi ($\lambda = 850$ nm, $D_T = 25$ cm, $D_R = 1$ metre, $T_T = T_R = 0.8$, $r_0 = \infty$)

Şekil 3.16’da ise bir LEO ve bir GEO uydusundan yere iletişimde zayıflama faktörünün alıcı teleskop çapına göre değişimi verilmiştir. Zayıflama faktörünün teleskop çapı arttıkça azaldığı görülmektedir. Bunun bir sonucu olarak, iletişimde istenen BER’in elde edilebilmesi için yeterli sayıda fotonun toplanabilmesi açısından alıcı teleskop çapı önemli bir parametredir.

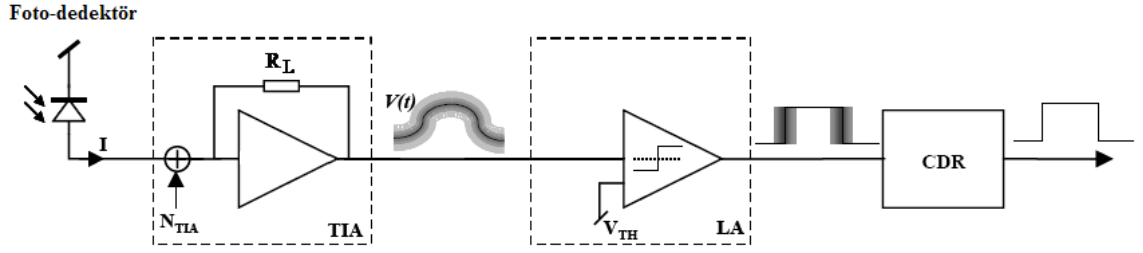


Şekil 3.16 Uydudan yere iletişimde zayıflama faktörünün alıcı teleskop çapına göre değişimi ($\lambda = 850 \text{ nm}$, $D_T = 25 \text{ cm}$, $T_T = T_R = 0.8$, $A_{\text{atm}} = 1 \text{ dB}$, $r_0 = \infty$)

Ayrıca LEO uydusundan yere iletişimin, GEO uydusu ile karşılaştırıldığında, alınan güç açısından daha avantajlı olduğu açıktır.

3.4 Alıcı

Şekil 3.17’de temel bir alıcı yapısı görülmektedir. Alıcı teleskobu tarafından alınan modüle edilmiş sinyal, filtreleme işleminden geçirilir ve foto-dedektör yardımıyla foto-akıma dönüştürülür.



Şekil 3.17 Temel alıcı yapısının basitleştirilmiş blok diyagramı

TIA, foto-dedektörden gelen akımı yükselterek gerilime çevirir.

Karar devresi olarak çalışan LA (*Limiting Amplifier*), TIA çıkışındaki sinyali karar eşiği (V_{TH}) ile karşılaştırmaktadır. Buna göre bir bitin ‘mantık 0’ mı yoksa ‘mantık 1’ mi olduğuna karar vermektedir.

CDR (*Clock Data Recovery*) ise sinyali bit hızına eşit frekansta ayırır ve böylece bit karar sürecini senkronize etmek için kullanılır (Anonymous 2003).

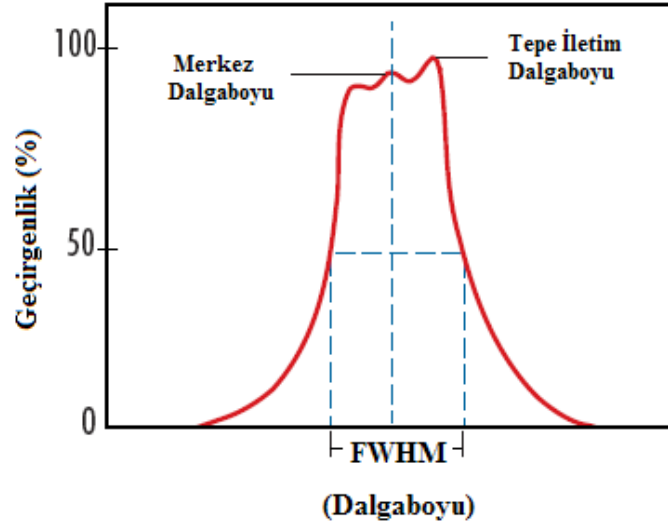
3.4.1 Filtreler

Gökyüzünde güneş, ay ve yıldızlardan kaynaklanan çevre ışıması (*background radiation*) iletişim sistemi için bir gürültü kaynağıdır ve sinyal gürültü oranını (SNR) azaltmaktadır. Sistem performansını belirleyen SNR’nin iyileştirilmesi için tek yol, gürültünün azaltılmasıdır. Bu amaçla, dedektörden önce optik filtre kullanılmaktadır (Er-long *et al.* 2005).

Optik filtre istenmeyen dalgalı boylarındaki ışımların dedektör üzerine düşmesini engeller, istenen değerdekileri ise belirli bir yüzde ile geçirir. Çok dar bir dalgalı boyu bandındaki ışımayı geçiren, diğer bütün ışımları geri yansıtarak engelleyen filtreler dar band geçiren girişim filtreleri (*narrow bandpass interference filters*) olarak adlandırılır. Şekil 3.18’de böyle bir girişim filtresinin spektral karakteristiği görülmektedir.

Filtrenin bandgenişliği (*Full Width at Half Maximum, FWHM*), geçirgenliğin tepe değerinin % 50’sine eşit olduğu iki dalgalı boyu arasındaki farktır. Bu iki dalgalı boyu

arasındaki orta değer ise merkez dalgaboyu olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.18 Dar band geçiren girişim filtresi

Dar band geçiren girişim filtreleri tipik olarak 10 nm ya da daha az bandgenişliğine sahiptir. Tepe iletim seviyeleri % 60'tan daha fazladır. Geçirme bandının dışında ise zayıflatma seviyeleri tipik olarak % 0.1'den daha azdır.

3.4.2 Dedektörler

Foto-dedektör (FD) UV, GI veya IR ışıma gibi optiksel girişi ölçülebilir elektriksel çıkışa çeviren bir '*transducer*' dir.

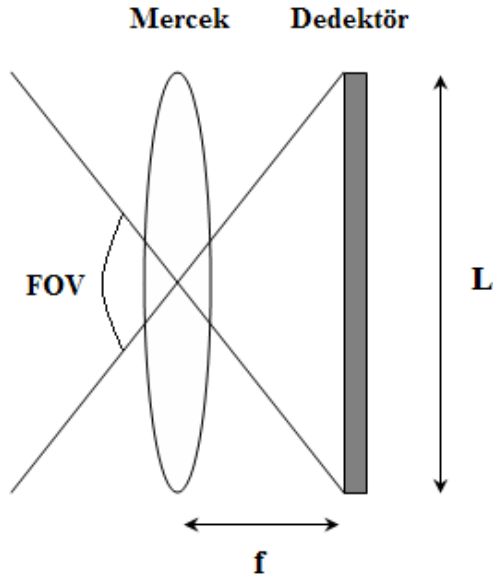
Işıma girişi birimleri Lux (GI için), Watt veya mWatt/m² olabilir. Elektriksel çıkış birimleri ise Amper veya Volt'tur.

FD girişine ışıma düşmediğinde de çıkış gözlenebilir. Gerektiği gibi soğutulmayan dedektörlerde ısı etkisi ile oluşan bu akım karanlık akım (*dark current*) olarak adlandırılmaktadır ve sistem için bir gürültü kaynağıdır (Özek 1995).

Görüş Açısı (*Field of view, FOV*)

Şekil 3.19'da, dedektörün mercek odak uzaklığına yerleştirilmesi durumunda, alıcı

görüş açısının oluşumu görülmektedir.



Şekil 3.19 Alıcının görüş açısı

Alıcı görüş açısı, dedektörün boyutuna ve mercek odak uzaklığına bağlı olarak Eşitlik 3.25 ile hesaplanmaktadır (Özek 1995):

$$\text{FOV} = 2 \tan^{-1} \left(\frac{L}{2f} \right) \approx \frac{L}{f} \quad (\text{radyan}) \quad (3.25)$$

Dedektör Parametreleri

- **Kuantum verimi (*Quantum efficiency*) (η):** Işımadaki fotonların dedektörde oluşturduğu foto-elektron sayısının giriş foton sayısına oranıdır:

$$\eta = \frac{I_{\text{ÇIKIŞ}}/q}{P_{\text{GİRİŞ}}/h \cdot f_{\text{opt}}} = \frac{I_{\text{ÇIKIŞ}}}{q} \cdot \frac{h \cdot f_{\text{opt}}}{P_{\text{GİRİŞ}}} \quad (3.26)$$

Burada,

$P_{\text{GİRİŞ}}$: Dedektör girişindeki optiksel güç

$I_{\text{ÇIKIŞ}}$: Dedektör çıkışındaki foto-akım

h : Planck sabiti (6.63×10^{-34} Joule.sn)

q : Elektron yükü (1.6×10^{-19} Coulomb)

f_{opt} : Sinyal frekansı

- **Dedektör tepkisi (*Responsivity*) (R):** Birim ışıma girişine karşılık dedektör çıkışıdır:

$$R = \frac{I_{\text{ÇIKIŞ}}}{P_{\text{GİRİŞ}}} = \frac{\eta \cdot q}{h \cdot f_{opt}} = \frac{\eta \cdot q \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad (\text{A/W}) \quad (3.27)$$

- **Gürültü eşdeğeri güç (*Noise equivalent power*) (NEP):** Gürültüye eşit sinyal çıkışına neden olan ışıma girişidir. Başka bir ifade ile dedektör girişi NEP kadar ise dedektör çıkışı rms (*root-mean-square*) gürültüye eşittir.

$$NEP = \frac{\text{rms_gürültü_seviyesi}}{\text{dedektör_tepkisi}} = \frac{N_{rms}}{R} \quad (3.28)$$

Ölçülebilir bir sinyal için giriş ışıma miktarı NEP 'ten büyük olmalıdır. Bu durumda, $SNR > 1$ olacaktır (Özek 1995).

- **Yükselme süresi (*Rise time*) (t_r):** Dedektör çıkış akımının maksimum değerinin %10'undan %90'ına yükselmesi için geçen süredir. Sinyal değişimlerine dedektörün ne kadar hızla cevap verebildiğinin ölçüsüdür (Chen 2003):

$$t_r = \frac{0.35}{\Delta f} \quad (3.29)$$

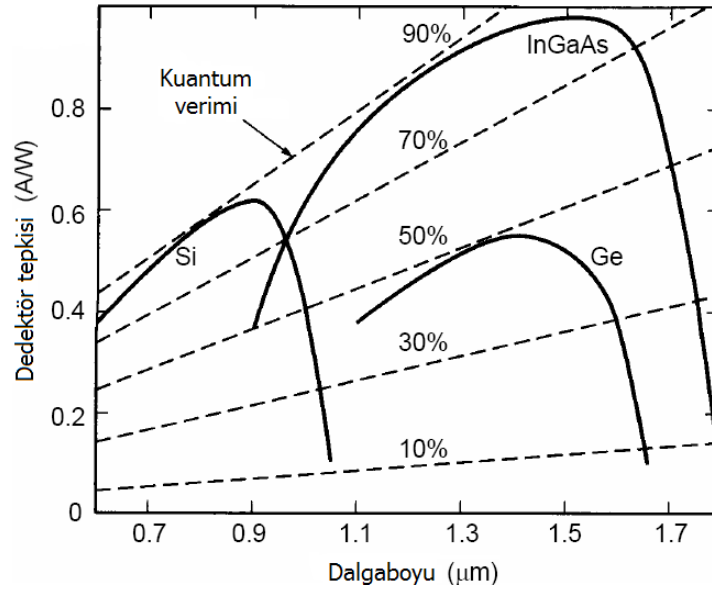
Burada,

Δf : Dedektörün frekans bandgenişliği

Çizelge 3.2’de farklı malzemelerden yapılan yarı-iletken dedektörler için tipik parametre değerleri, Şekil 3.20’de ise dedektör tepkisinin dalgaboyuna göre değişimi verilmiştir.

Çizelge 3.2 Yarı-iletken dedektörler için tipik parametre değerleri

Parametre	Si	Ge	InGaAs
Dalgaboyu (nm)	300-1100	500-1800	1000-1700
Karanlık Akımı (nA)	1	200	10
Yükselme Süresi (ps)	500	100	300



Şekil 3.20 Yarı-iletken dedektörler için dedektör tepkisinin dalgaboyuna göre değişimi

Ge tabanlı yarı-iletkenlerin en büyük dezavantajı, karanlık akımlarının yüksek olmasıdır.

Si tabanlı yarı-iletkenlerin fiyatları InGaAs tabanlılara göre daha uygundur, ancak yükselme süreleri daha uzundur.

Dedektör Türleri

Günümüzde optiksel telsiz sistemlerinde yaygın olarak iki tip dedektör

kullanılmaktadır:

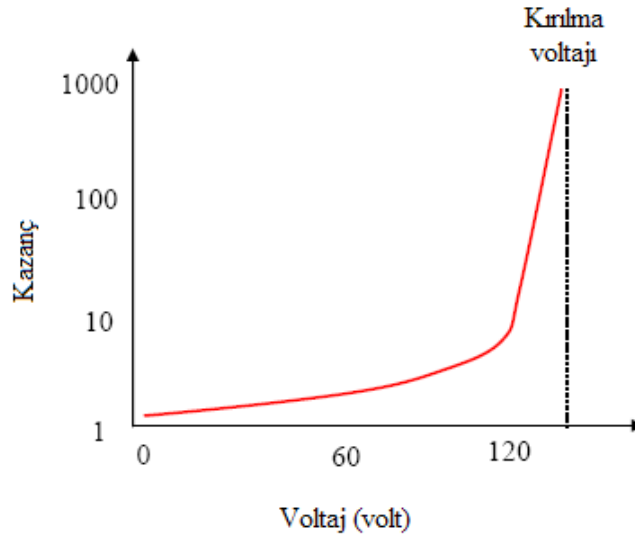
- PIN (*Positive-Intrinsic-Negative*) foto-diyot
- APD (*Avalanche Photodiode*)

APD'lerin PIN foto-diyotlara göre üstünlüğü, iç kazanca (*internal multiplication*) (M) sahip olmalarıdır. Bunun bir sonucu olarak dedektör tepkileri daha yüksektir (Chen 2003):

$$R_{\text{apd}} = M \cdot \frac{\eta \cdot q \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad (3.30)$$

Uydu uygulamalarında olduğu gibi büyük uzaklıklar üzerinden optiksel iletimde, yüksek dedektör tepkileri nedeniyle APD'ler tercih edilmektedir. Ancak yüksek kutuplama voltajına ihtiyaç duymaları ve PIN foto-diyotlara göre pahalı olmaları birer dezavantajdır.

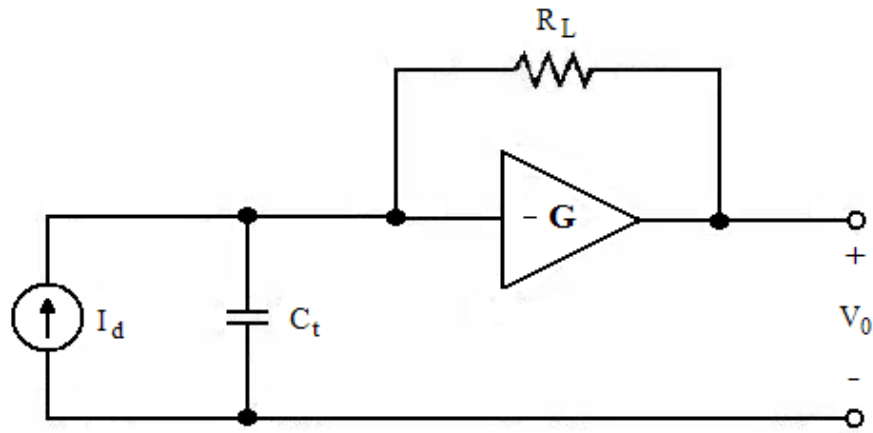
Şekil 3.21'de görüldüğü gibi, bir APD'de yüksek kazancın sağlanabilmesi için ters kutuplama voltajının kırılma voltajına yakın değerde olması gerekmektedir.



Şekil 3.21 APD kazancının ters kutuplama voltajına göre değişimi

3.4.3 Trans-empedans yükselteç

Alıcıya gelen sinyal bir çok etkenden dolayı zayıflamaya uğramıştır. Foto-dedektör tarafından oluşturulan akımın diğer işlemlerde kullanılabilmesi için yükseltilmesi gerekmektedir. Bu amaçla Şekil 3.22’de görülen trans-empedans yükselteç kullanılmaktadır.



Şekil 3.22 Trans-empedans yükselteç

Yükselteç, yüksek alıcı duyarlılığının elde edilebilmesi için, alınan sinyale mümkün olduğunca az gürültü eklemek zorundadır. Devrede yük direncinin büyük tutulması, gürültü akımı katkısını minimum yapmaktadır.

Yükseltecin girişindeki direnç değeri, yük direnci (R_L) ve yükselteç kazancı (G) kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$R_{in} \approx \frac{R_L}{G} \quad (3.31)$$

Giriş direncine paralel kapasitans değeri (C_t), dedektör ve yükselteç kapasitanslarının toplamına eşittir. Buna göre alıcının frekans bandgenişiği Eşitlik 3.32 ile verilmektedir:

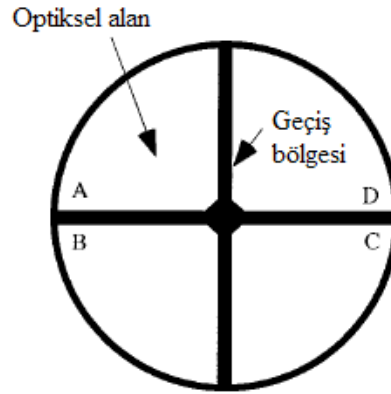
$$\Delta f = \frac{1}{2\pi R_{in} C_t} = \frac{G}{2\pi R_L C_t} \quad (3.32)$$

Elektriksel ön-yükselteç olarak trans-empedans yükselteçlerin kullanılması, $R_{in} C_t$ sabitinin küçük olmasından dolayı alıcı bandgenişliğinin büyük olmasını sağlamaktadır (Chang-Hasnain 2002).

3.4.4 4-kadran dedektör (Four-Quadrant Detector)

Dairesel ya da karesel yapıda olabilen 4-kadran dedektörün her bir kadranında diğerlerinden izole edilmiş bir dedektör bulunmaktadır. Dört dedektör aynı özellikte ve yapıdadır. Şekil 3.23'te daireSEL yapı için dedektörün optikSEL alanı ve geçiş bölgesi (*transition region*) görülmektedir.

Kadranlar arasındaki geçiş bölgesi ışığa duyarlı değildir ve ölü bölge (*dead zone*) olarak da adlandırılmaktadır. Dolayısıyla sistem, bu bölgeye düşen ışığı kaybetmektedir.

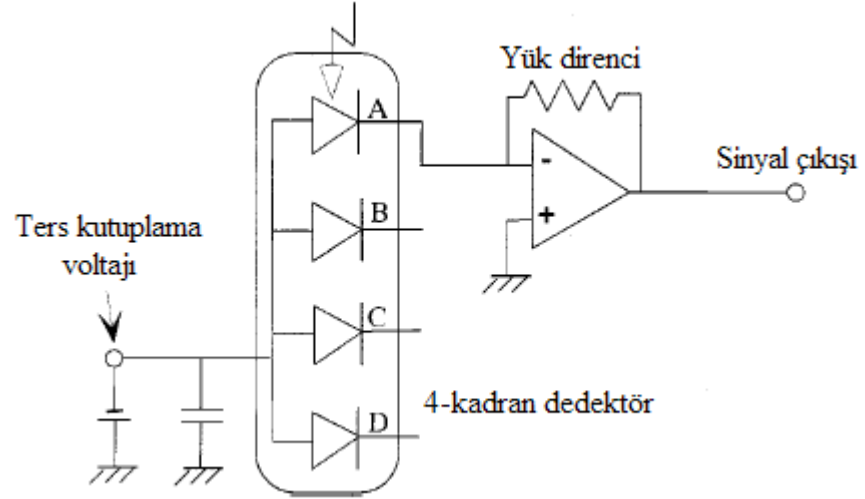


Şekil 3.23 Dairesel 4-kadran dedektör

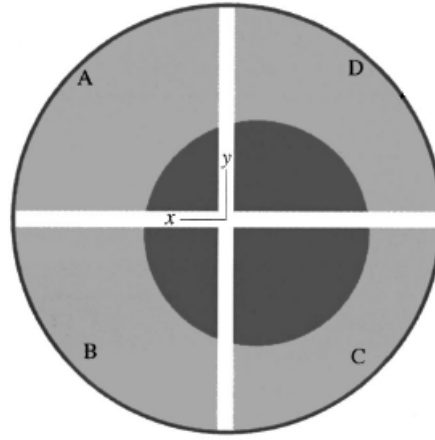
Şekil 3.24'te kadran çıkışlarının yükseltilerek gerilime dönüştürüldüğü basit bir yapı görülmektedir (Toyoda *et al.* 2002).

Göndericiden gelen laser demeti, mercek odak noktasına yakın bir noktaya yerleştirilen dedektör üzerine yoğunlaştırılır. Dedektörün tam olarak mercek odak uzaklığına

yerleştirilmemesi, optiksel bir spotun oluşmasını sağlamaktadır (Şekil 3.25). Geçiş bölgesinin genişliğinin, oluşan spotun büyüklüğü üzerinde sınırlayıcı bir faktör olduğu açıktır.



Şekil 3.24 Kadran çıkışlarının yükseltilerek gerilime dönüştürülmesi



Şekil 3.25 Dedektör üzerinde oluşan spot

Herbir kadranın çıkış gerilimi, üzerindeki spot parçasının enerjisi ile orantılıdır. A, B, C ve D kadrانlarının çıkışları V_a , V_b , V_c ve V_d ise, dedektör tarafından alınan toplam sinyal Eşitlik 3.33 ile verilmektedir:

$$\Sigma V = V_a + V_b + V_c + V_d \quad (3.33)$$

Spotun pozisyonundaki değişimi temsil eden izleme sinyalleri ise Eşitlik 3.34 ve Eşitlik 3.35 ile hesaplanmaktadır:

$$E_x = \frac{V_a + V_b - V_c - V_d}{V_a + V_b + V_c + V_d} \quad (\text{x yönündeki değişim}) \quad (3.34)$$

$$E_y = \frac{V_a + V_d - V_c - V_b}{V_a + V_b + V_c + V_d} \quad (\text{y yönündeki değişim}) \quad (3.35)$$

Eğer gönderici ve alıcı aynı görüş ekseni üzerinde ise, optiksel spot dedektörün merkezinde oluşmaktadır. Bu durumda, herbir kadran tarafından alınan laser enerjileri eşittir ve dolayısıyla da $E_x = E_y = 0$ 'dır.

Optiksel Spotun Büyüklüğü ve Eğim Faktörü

4-kadran dedektör üzerinde oluşan spotun yarıçapı, spotun uniform dağılıma sahip olduğu varsayılarak, Eşitlik 3.36 ile verilmektedir (Barbaric and Manojlovic 2003):

$$r_0 = \frac{D_R \cdot |f - d|}{2 \cdot f} \quad (3.36)$$

Burada,

d: Mercek ve dedektör arasındaki uzaklık ($d < f$)

Eğer spot 4-kadran dedektörün merkez noktasının tamamen sağında ise E_x değeri -1, tamamen solunda ise E_x değeri 1 'dir (şekil 3.26).

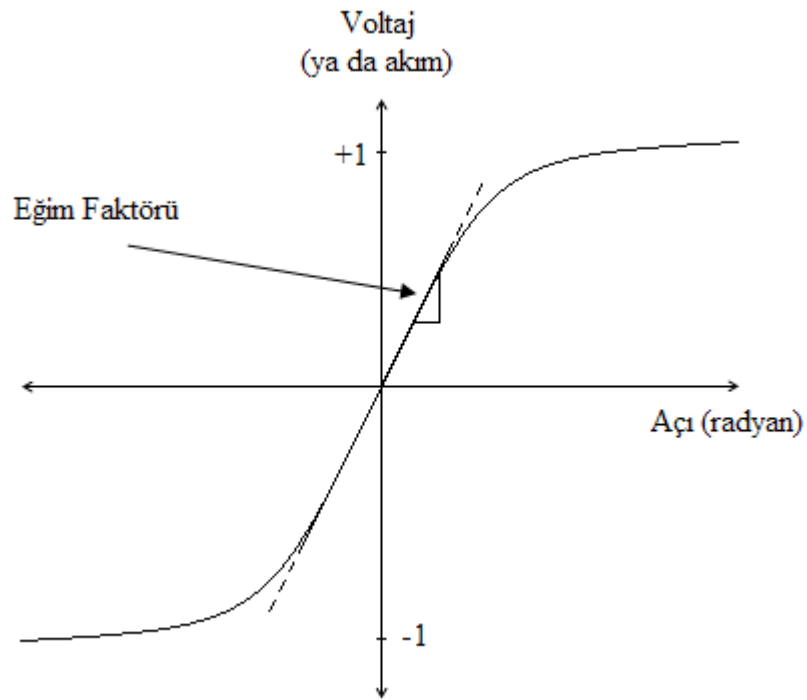
Eğim faktörü (*Slope Factor, SF*), şekil 3.26'da görülen eğriye çizilen teğetin eğimini temsil etmektedir. Spotun çapı ne kadar küçük olursa, eğim faktörü o kadar büyük olmaktadır. Büyük eğim faktörü, dedektörün spot hareketine çok duyarlı olduğuna ve spotun hareketini çok hassas bir şekilde izlediğine işaret etmektedir.

Uniform dağılıma sahip spot için eğim faktörü Eşitlik 3.37 ile hesaplanmaktadır:

$$SF = \frac{1.27}{\theta_A} \quad (3.37)$$

Burada,

θ_A : Spot çapı (radyan)



Şekil 3.26 Eğim faktörü

4-kadran dedektörü kullanan izleme sisteminin performansının temel ölçüsü ise, gürültü eşdeğeri açıdır (*Noise Equivalent Angle, NEA*). Bu açı, konum belirleyici dedektörde gürültünün varlığından dolayı oluşan izleme hata açısıdır ve Eşitlik 3.38 ile bulunmaktadır:

$$NEA = \frac{1}{SF \cdot \sqrt{SNR}} \quad (3.38)$$

Sistemde SNR'nin azalması, NEA'nın artmasına neden olmaktadır. Genellikle izleme sisteminin 1 µradyandan daha küçük bir NEA'yı sağlaması gerekmektedir (Leeb 2000).

4. UYDULARARASI İLETİŞİM İÇİN SNR HESAPLAMALARI

4.1 Arkaplan Gürültüsü

Uydu uygulamalarında çevre ışığından dolayı alıcı girişinde oluşan gürültü gücü Eşitlik 4.1 ile hesaplanmaktadır:

$$P_{bg} = H_b \cdot \Omega_{FOV} \cdot A_R \cdot B_{filter} \cdot T_R \quad (4.1)$$

Burada,

H_b : Gökyüzü ışıması ($W/m^2/sr/\mu m$)

Ω_{FOV} : Alıcının görüş açısı (sr)

B_{filter} : Filtrenin dalgaboyu bandgenişliği

Eşitlik 3.25'te radyan cinsinden verilen alıcı görüş açısı, katı açı olarak steradyan cinsinden Eşitlik 4.2 ile verilmektedir:

$$\Omega_{FOV} \approx \frac{A_d}{f^2} \quad (sr) \quad (4.2)$$

Burada,

A_d : Dedektör alanı

Eşitlik 4.1'den anlaşılacağı gibi, gürültü gücünün azaltılabilmesi için alıcı görüş açısının dar olması ve dar band geçiren filtrelerin kullanılması gerekmektedir. Ancak çok küçük alanlı dedektörlerin kullanılması, çok daha hassas PAT sistemleri gerektireceğinden SNR'yi artırmak için iyi bir yol değildir (Er-long *et al.* 2005).

Gökyüzü ışıması, atmosfer şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Ek 4'te uydu uygulamaları için farklı şartlarda ışımanın tipik değerleri verilmiştir.

4.2 APD’li Sistem İçin SNR

APD tarafından oluşturulan akım, alınan optiksel sinyalin gücü ile orantılı olarak, Eşitlik 4.3 ile hesaplanmaktadır:

$$i_{\text{apd}}^2 = (R \cdot P_R \cdot M)^2 \quad (4.3)$$

Alıcı gürültüsüne katkısı olan temel gürültüler, P-N eklemi boyunca akan akım içindeki rastgele dalgalanmalar nedeni ile meydana gelen yük boşalımı gürültüsü (*shot noise*) ve direnç üzerinde oluşan ısı gürültüdür (*thermal noise, Johnson noise*).

APD’li sistemde oluşan gürültüler şöyle verilmektedir (Toyoshima *et al.* 2005):

- Yük boşalımı gürültüsü:

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = 2 \cdot q \cdot (R \cdot P_R) \cdot F(M) \cdot M^2 \cdot B \quad (4.4)$$

- Yüzey sızıntı akımı gürültüsü (*Surface leakage current noise*):

$$\sigma_{\text{surf}}^2 = 2 \cdot q \cdot I_L \cdot B \quad (4.5)$$

- Karanlık akımı gürültüsü (*Dark current noise*):

$$\sigma_{\text{dark}}^2 = 2 \cdot q \cdot I_D \cdot F(M) \cdot M^2 \cdot B \quad (4.6)$$

- Isıl gürültü:

$$\sigma_{\text{johnson}}^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T \cdot B}{R_L} \cdot F_T \quad (4.7)$$

- Arkaplan gürültüsü:

$$\sigma_{\text{bg}}^2 = 2 \cdot q \cdot (R \cdot P_{\text{bg}}) \cdot F(M) \cdot M^2 \cdot B \quad (4.8)$$

Burada,

$F(M)$: Varolan gürültü faktörü (*Excess noise factor*)

B : Alıcı bandgenişliği (Hz)

I_L : Yüzey sızıntı akımı (A)

I_D : Karanlık akım (A)

k : Boltzman sabiti (1.38×10^{-23} J/K)

T : Sistem sıcaklığı (K)

F_T : Elektriksel ön-yükseltecin gürültü faktörü (tipik olarak 3-5 dB)

Varolan gürültü faktörü, dedektör materyaline bağlıdır ve Eşitlik 4.9 ile hesaplanmaktadır:

$$F(M) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot M + \left(1 - \frac{\beta}{\alpha}\right) \cdot \left(2 - \frac{1}{M}\right) \quad (4.9)$$

Ek 5'te APD'de kullanılan yarı-iletkenler için elektrik alanının bir fonksiyonu olarak hole ve elektronların iyonizasyon katsayıları (sırasıyla β ve α) görülmektedir.

Varolan gürültü faktörü yaklaşık olarak Eşitlik 4.10 ile de hesaplanabilmektedir:

$$F(M) \approx M^x \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (4.10)$$

Bu kısımda, SNR hesaplamalarında kolaylık sağlaması açısından, alıcıda çevre ışığının neden olduğu gürültü ihmal edilmiştir.

Bu durumda SNR, Eşitlik 4.11 ile verilmektedir:

$$SNR_{apd} = \frac{i_{apd}^2}{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{surf}^2 + \sigma_{dark}^2 + \sigma_{johnson}^2} \quad (4.11)$$

Eşitlik 4.11'de Eşitlik 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7'nin yerine konması ile Eşitlik 4.12 elde edilmektedir:

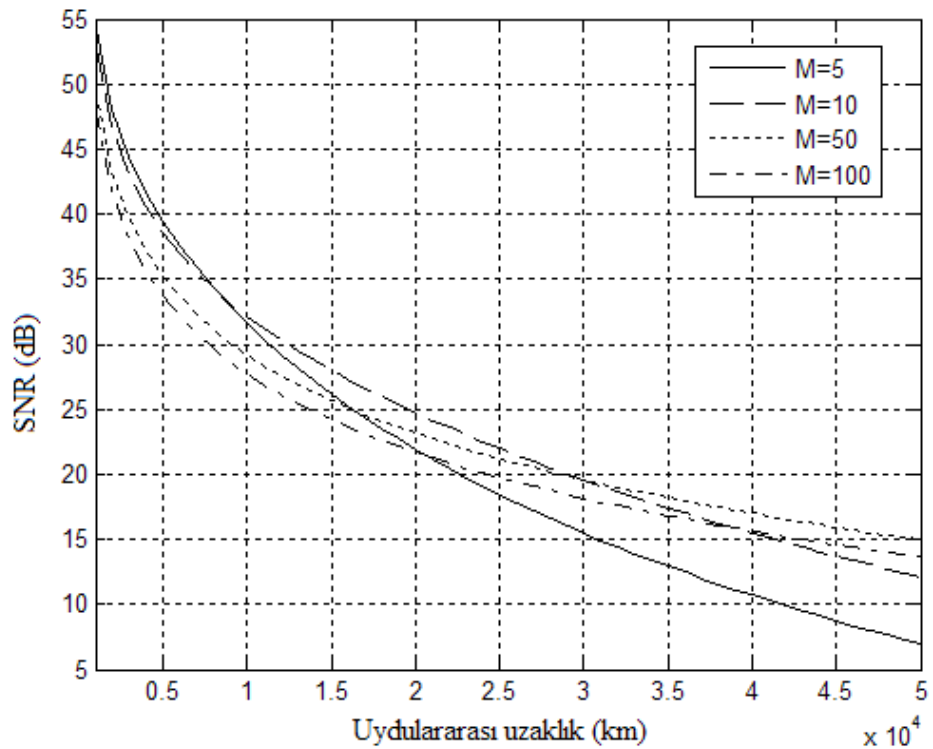
$$\text{SNR}_{\text{apd}} = \frac{(R \cdot P_R \cdot M)^2}{2 \cdot q \cdot (R \cdot P_R + I_D) \cdot F(M) \cdot M^2 \cdot B + 2 \cdot q \cdot I_L \cdot B + 4 \cdot k \cdot T \cdot B \cdot F_T / R_L} \quad (4.12)$$

Yük boşalımı gürültüsünün ve ısı gürültüsünün baskın olduğu durumlarda SNR, Eşitlik 4.12'nin düzenlenmesi ile, Eşitlik 4.13 ve Eşitlik 4.14 kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$\text{SNR}_{\text{apd}} = \frac{R \cdot P_R}{2 \cdot q \cdot F(M) \cdot B} \quad (\text{Yük boşalımı gürültüsü baskın}) \quad (4.13)$$

$$\text{SNR}_{\text{apd}} = \frac{(R \cdot P_R \cdot M)^2 \cdot R_L}{4 \cdot k \cdot T \cdot B \cdot F_T} \quad (\text{Isıl gürültü baskın}) \quad (4.14)$$

Şekil 4.1'de dört farklı APD kazanç değeri için, SNR'nin uydulararası uzaklığa göre değişimi görülmektedir. Kullanılan parametrelerin değerleri Ek 6'da verilmiştir.



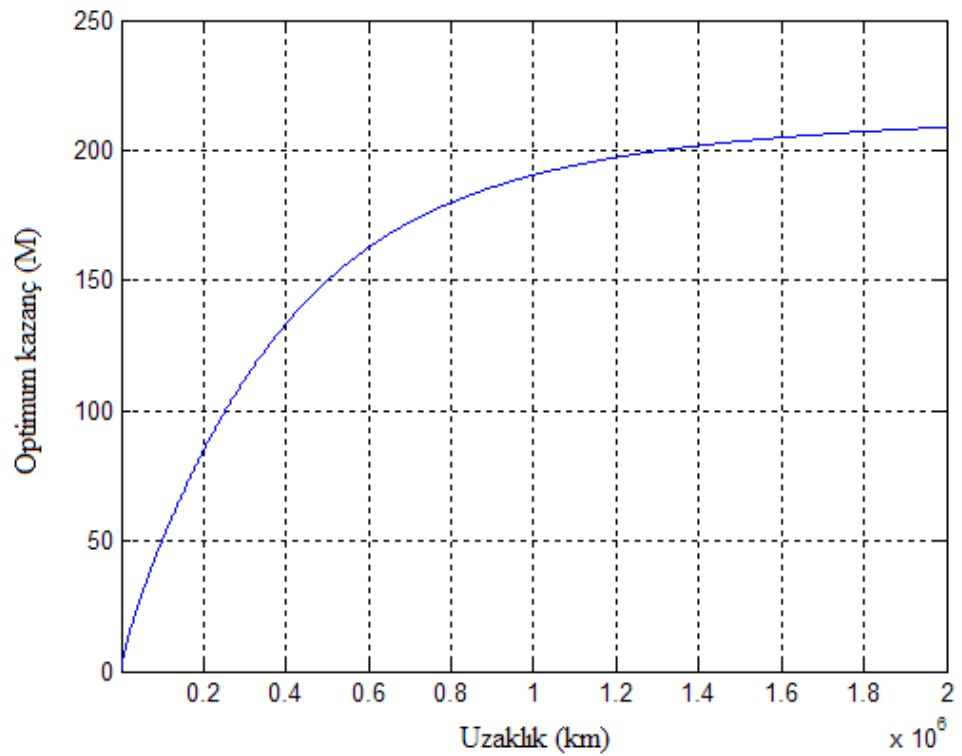
Şekil 4.1 Farklı M değerleri için SNR'nin uzaklığa (1000-50000 km) göre değişimi

Şekil 4.1'e göre en yüksek SNR yaklaşık 1000 ile 8000 km arası uzaklık için $M=5$ 'te, 8000 ile 30000 km arası uzaklık için $M=10$ 'da ve 30000 ile 50000 km arası uzaklık için $M=50$ 'de elde edilmiştir. Bunun bir sonucu olarak, **uydulararası uzaklığa göre optimum bir APD kazanç değerinin** olduğu açıktır.

Optimum kazanç değerini veren Eşitlik 4.15, $\frac{\partial \text{SNR}_{\text{apd}}}{\partial M} = 0$ eşitliği kullanılarak elde edilmektedir:

$$M_{\text{opt}} = \left(\frac{2 \cdot q \cdot I_L + (4 \cdot k \cdot T \cdot F_T / R_L)}{x \cdot q \cdot (R \cdot P_R + I_D)} \right)^{\frac{1}{x+2}} \quad (4.15)$$

Şekil 4.2'de optimum kazanç değerinin uzaklığa göre değişimi görülmektedir. Çok büyük uzaklıklar için kazanç değeri 210'a yaklaşmaktadır.



Şekil 4.2 Optimum APD kazancının uzaklığa (1000-20000000 km) göre değişimi

APD’li Alıcı Duyarlılığı (*Receiver Sensitivity*)

Her iletişim sisteminde olduğu gibi, SOOI sistemlerde de iletişim sırasında hatalar meydana gelmektedir. İletişimin istenen kalitede gerçekleşmesi için belirlenmesi gereken en önemli kriter, BER’dir (algılanan hatalı bit sayısı/iletilecek toplam bit sayısı). Bit hataları, sayısal sinyal üzerinde gürültünün varlığından dolayı alıcıda yanlış kararların verilmesinin bir sonucudur. Tez çalışmasında, $BER = 10^{-12}$ olarak dikkate alınmıştır.

Alıcı duyarlılığı ise, iletişimde istenen BER’i elde etmek için alıcı girişinde gerekli olan minimum güç değeridir. Birimi dBm’dir. Sistemin en iyi performansta çalışabilmesi için, tasarım sırasında duyarlılığın çok iyi belirlenmesi gerekmektedir.

Duyarlılığın bağlı olduğu temel parametreler şunlardır:

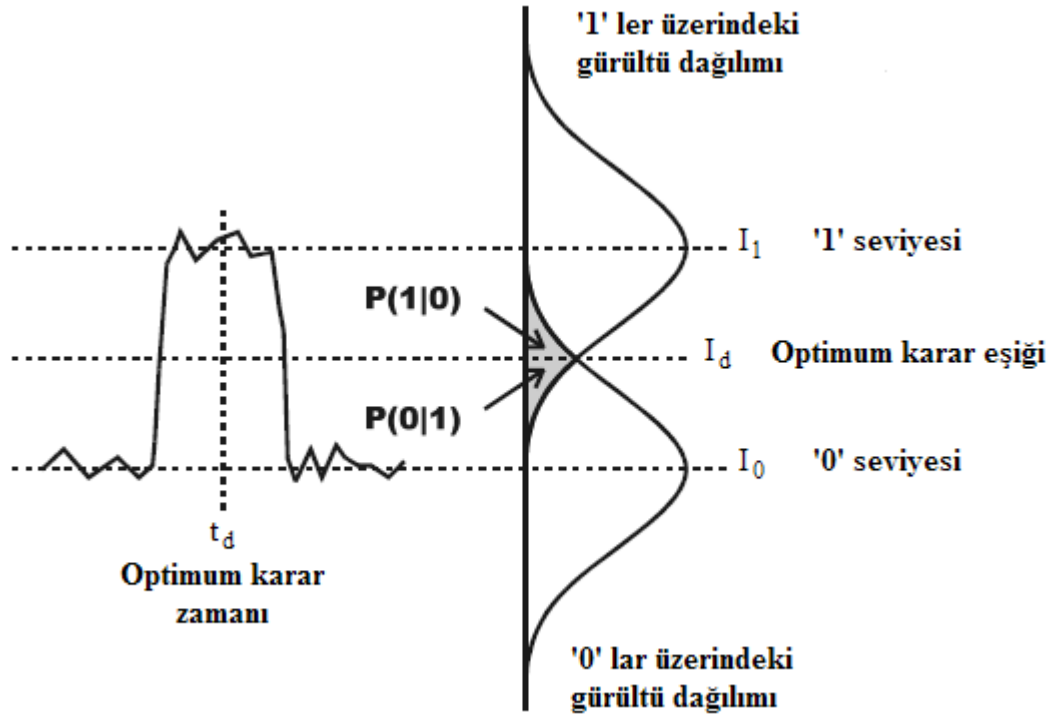
- BER
- Veri hızı
- Sinyal üzerindeki gürültü
- Dedektör karakteristikleri
- Modülasyon türü

Tez çalışmasında, sistemdeki gürültünün Gauss dağılımına sahip olduğu varsayılarak alıcı duyarlılığı hesaplanmaktadır (Şekil 4.3).

BER, Şekil 4.3’e göre, Eşitlik 4.16 ile verilmektedir (Summerfield 1999):

$$BER = P(1) \cdot P(0/1) + P(0) \cdot P(1/0) \quad (4.16)$$

Eşit sayıda ‘1’ ve ‘0’ alınması durumunda ($P(1) = P(0) = \frac{1}{2}$), Eşitlik 4.17 elde edilmektedir:



Şekil 4.3 OOK için hata olasılığı

$$BER = \frac{1}{2} \cdot \{P(0/1) + P(1/0)\} \quad (4.17)$$

Burada,

$$P(0/1) = \frac{1}{2} \cdot \text{erfc} \left(\frac{I_1 - I_d}{\sqrt{2} \cdot \sigma_1} \right), \quad (4.18)$$

$$P(1/0) = \frac{1}{2} \cdot \text{erfc} \left(\frac{I_d - I_0}{\sqrt{2} \cdot \sigma_0} \right) \quad (4.19)$$

σ_0 ve σ_1 standart sapmaları, sırasıyla '0' ve '1' alınması durumunda oluşan gürültüleri temsil etmektedir.

Minimum BER değerini veren optimum karar eşiği, $P(0/1) = P(1/0)$ şartının sağlanması ile bulunmaktadır:

$$I_d = \frac{\sigma_0 \cdot I_1 + \sigma_1 \cdot I_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (4.20)$$

Eşitlik 4.20 kullanılarak BER eşitliği yeniden düzenlenmektedir:

$$BER = \frac{1}{2} \cdot \text{erfc} \left(\frac{I_1 - I_0}{\sqrt{2} \cdot (\sigma_0 + \sigma_1)} \right) = \frac{1}{2} \cdot \text{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (4.21)$$

Burada Q faktörü, sinyalin kalitesinin bir ölçüsüdür. Gürültünün artması Q'nun azalmasına ve BER'in artmasına neden olmaktadır. Ek 7'de farklı BER değerleri için Q faktörünün değişimi verilmiştir ve $BER = 10^{-12}$ için değeri 7'dir (Anonymous 2003).

Mantık '1' güç seviyesi P_1 ve mantık '0' güç seviyesi P_0 olmak üzere gerekli minimum güç seviyesi, $P_0 = 0$ kabul edilerek, Eşitlik 4.22 ile verilmektedir:

$$P_{\min} = \frac{P_0 + P_1}{2} = \frac{P_1}{2} \quad (4.22)$$

$I_1 = P_1 \cdot R \cdot M$, $I_0 = 0$ alınarak ve Eşitlik 4.22 kullanılarak Eşitlik 4.23 elde edilmektedir:

$$P_{\min} = \frac{Q \cdot (\sigma_0 + \sigma_1)}{2 \cdot R \cdot M} \quad (4.23)$$

Burada

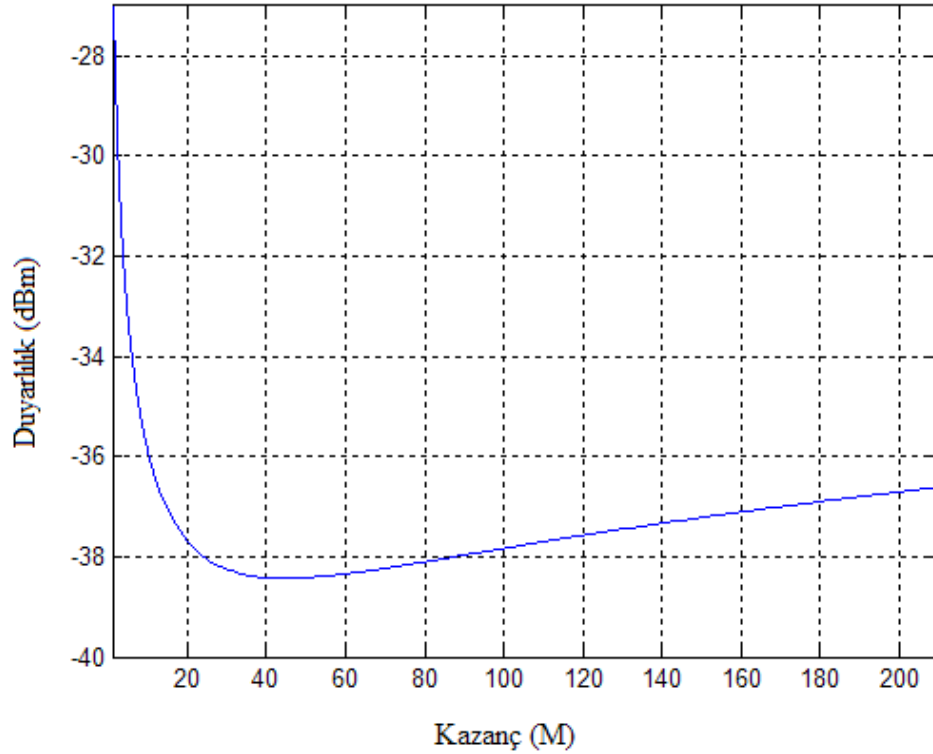
$$\sigma_0^2 \approx \sigma_{\text{johnson}}^2, \quad (4.24)$$

$$\sigma_1^2 \approx \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{johnson}}^2 \quad (4.25)$$

Eşitlik 4.4 ve Eşitlik 4.7, Eşitlik 4.23'te yerine yazıldığında APD'li alıcının duyarlılığı için Eşitlik 4.26 bulunmaktadır:

$$P_{\min} = \frac{Q}{R} \cdot \left\{ q \cdot B \cdot F(M) \cdot Q + \frac{\sigma_{\text{johanson}}}{M} \right\} \quad (4.26)$$

Şekil 4.4'te Si APD'li alıcının duyarlılığının dedektör kazancına göre değişimi görülmektedir. $M \approx 44$ için maksimum duyarlılık (- 38.4349 dBm) elde edilmiştir.

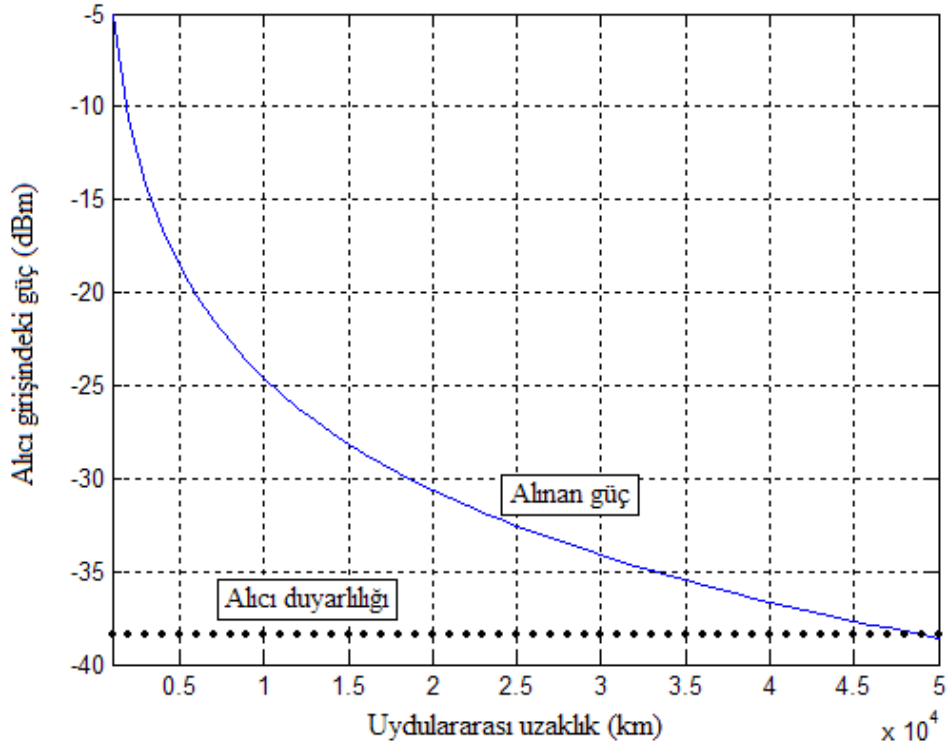


Şekil 4.4 Si APD'li alıcının duyarlılığının dedektör kazancına göre değişimi

Maksimum duyarlılığı veren kazanç değeri, $\frac{\partial P_{\min}}{\partial M} = 0$ eşitliği kullanılarak elde edilen Eşitlik 4.27 ile hesaplanmaktadır:

$$M = \left(\frac{\sigma_{\text{johanson}}}{x \cdot Q \cdot q \cdot B} \right)^{\frac{1}{x+1}} \quad (4.27)$$

Şekil 4.5'te ise alıcı tarafından alınan gücün uzaklığa (1000-50000 km) göre değişimi görülmektedir. Karşılaştırma yapılabilmesi için bu kazanç değerinde ($M=44$) alıcı girişinde gerekli olan minimum güç değeri de aynı şekil üzerinde verilmiştir.



Şekil 4.5 Alıcı girişindeki gücün uzaklığa göre değişimi ve gerekli minimum değeri

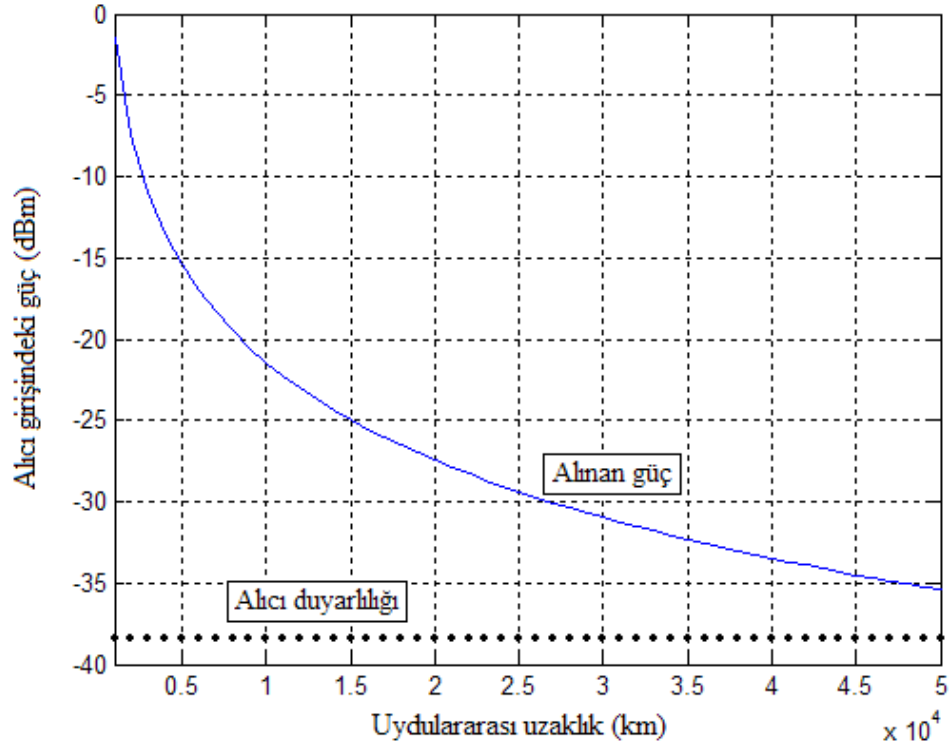
Optiksel iletişimde alınan gücün gerekli minimum güce oranı link toleransını (*link margin*, LM) vermektedir:

$$LM(dB) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_R}{P_{\min}}\right) \quad (4.28)$$

LM 'nin pozitif çıkması ($P_R > P_{\min}$) iletişimin olduğunu, negatif çıkması ($P_R < P_{\min}$) iletişimin olmadığını ve sıfıra eşit çıkması alınan güç ile alıcı duyarlılığının birbirine eşit olduğunu göstermektedir. Uydulararası iletişimde 3 dB ya da daha büyük LM , tipik değer olarak verilmektedir.

Kullanılan parametre değerlerinden sadece teleskop çaplarının değiştirilerek $D_T = D_R = 30$ cm alınması ile, LM daha iyi sonuç vermiş ve iletim uzaklığı artmıştır (Şekil 4.6). Çünkü gönderici teleskop çapının artırılması demet açısının biraz daha

daralmasını sağlamaktadır. Bunun yanısıra alıcı teleskop çapının da artırılması, geometrik kaybı azaltmaktadır.



Şekil 4.6 Gerekli minimum güç ve $D_T = D_R = 30$ cm için alıcı girişindeki gücün uzaklığa göre değişimi

Çizelge 4.1’de uydulararası üç farklı bağlantı için alınan güç (P_R), optimum APD kazancı (M_{opt}), bu kazanç değerinde alıcı girişinde gerekli minimum güç (P_{min}) ve link toleransı değerleri yaklaşık olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1 Uydulararası üç farklı bağlantıda $D_T = D_R = 30$ cm için optimum APD kazancı, alınan güç, gerekli minimum güç ve sistem kazancı

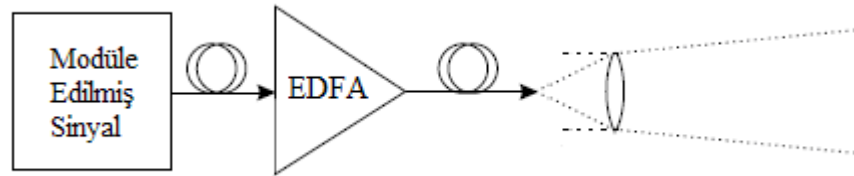
	Z ($\times 10^3$ km)	M_{opt}	P_R (dBm)	P_{min} (dBm)	LM (dB)
LEO - LEO	2	2	-7.5	-30	22.5
LEO - GEO	35	16	-32.3	-37	4.7
GEO - GEO	40	18	-33.5	-37.5	4

Çizelge 4.1'e göre uzaklık arttıkça optimum APD kazancı artmakta, alınan güç azalmakta, duyarlılık artmakta ve link toleransı azalmaktadır.

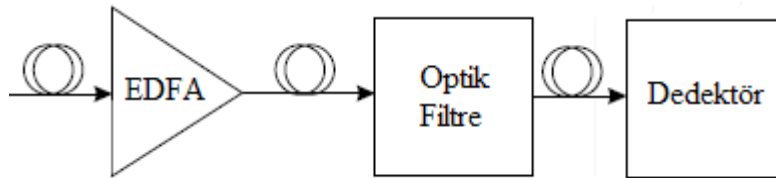
4.3 Optiksel Yükselteçli Sistem İçin SNR

Uydu uygulamalarında gönderici ve alıcı arasındaki büyük uzaklıklar optiksel sinyalde çok büyük kayıplara neden olmaktadır. Bu kayıpların mümkün olduğunca azaltılabilmesi için yüksek kazanç, düşük gürültü, yüksek bandgenişliği ve büyük çıkış gücü karakteristiklerinden dolayı uyarılmış yayınımla (*stimulated emission*) ışığı yükselten optiksel yükselteçlerin sistem tasarımında kullanımı tercih edilebilmektedir (Arı 2006).

Erbium Katkılı Fiber Optik Yükselteç (*Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA*), 1550 nm dalgaboyu civarında 40-50 nm aralıkta çalışabilen ve ticari olarak da tercih edilen optiksel yükselteçtir. Uydu uygulamalarında iletilen sinyalin gücünü artırmak için göndericide (Şekil 4.7) ve alınan zayıflamış sinyalin gücünü artırmak için alıcıda (Şekil 4.8) kullanılmaktadır.

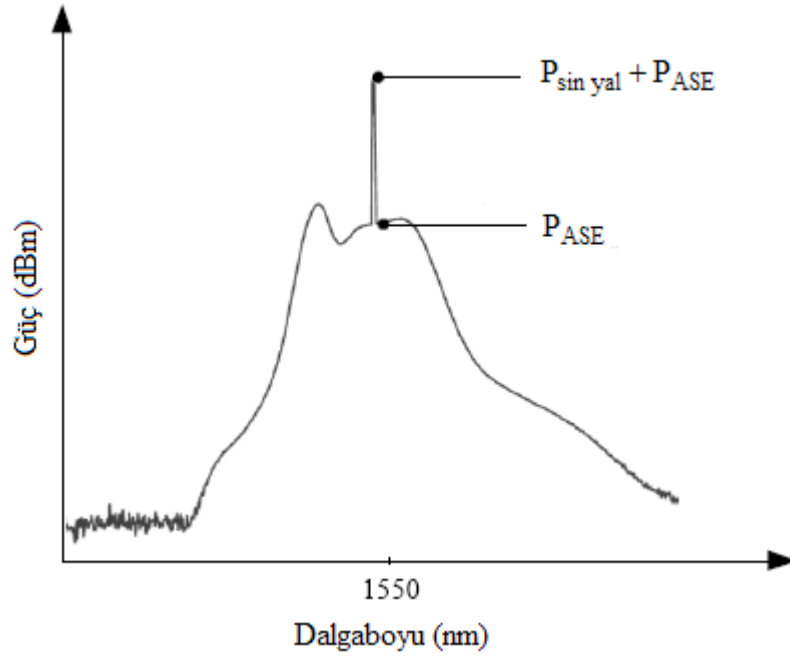


Şekil 4.7 EDFA'nın göndericide kullanılması



Şekil 4.8 EDFA'nın optiksel ön-yükselteç olarak alıcıda kullanılması

EDFA'nın tipik çıkış güç spektrumu Şekil 4.9'da görülmektedir (Tuft 2005).



Şekil 4.9 EDFA'nın tipik çıkış güç spektrumu

EDFA tarafından, yükseltilmiş sinyalin yanısıra yükseltilmiş kendiliğinden yayınım (*amplified spontaneous emission, ASE*) gürültüsü olarak adlandırılan ek bir gürültü yayılmaktadır. Bu nedenle optiksel ön-yükselteç çıkışında bir optik filtrenin kullanılması gerekmektedir. Gürültünün gücü Eşitlik 4.29 ile verilmektedir:

$$P_{ase} = n_{sp} \cdot h \cdot f_{opt} \cdot (G_0 - 1) \cdot B_o \quad (4.29)$$

Burada,

B_o : Optik filtrenin frekans bandgenişliği ($B_o = \frac{c \cdot \Delta\lambda}{\lambda^2}$)

$\Delta\lambda$: Optik filtrenin dalgaboyu bandgenişliği

G_0 : Optiksel ön-yükselteç kazancı

n_{sp} : Kendiliğinden yayınım faktörü (*spontaneous emission factor*)

$G_0 \gg 1$ için kendiliğinden yayınım faktörü Eşitlik 4.30 ile bulunmaktadır:

$$n_{sp} = \frac{F_n}{2} \quad (4.30)$$

Burada,

F_n : Optiksel ön-yükseltecin gürültü faktörü

Göndericideki EDFA tarafından yayılan ASE gürültüsü ise, alıcı için bir arkaplan gürültüsüdür.

Yükseltilmiş kendiliğinden yayınım ile ilişkili gürültü, optiksel yükselteçleri kullanan sistemlerde sınırlayıcı faktördür. Sistemde yük boşalımı gürültüsü, ısı gürültü ve karanlık akımı gürültüsüne ek olarak ASE×ASE (*ASE self-mixing noise*), S×ASE (*ASE noise mixed with the signal*) ve S×back (*background radiation mixed with the signal*) gürültülerinin de oluşması, SNR'nin azalmasına neden olmaktadır.

Alıcıda oluşan baskın gürültüler şöyle verilmektedir (Toyoshima *et al.* 2005):

$$\sigma_{ASE \times ASE}^2 = 2 \cdot \{q \cdot n_{sp} \cdot \eta \cdot (G_0 - 1)\}^2 \cdot B \cdot (2 \cdot B_o - B) \quad (4.31)$$

$$\sigma_{S \times ASE}^2 = 4 \cdot R \cdot q \cdot n_{sp} \cdot \eta \cdot G_0 \cdot (G_0 - 1) \cdot P_R \cdot B \quad (4.32)$$

$$\sigma_{S \times back}^2 = 4 \cdot R^2 \cdot G_0^2 \cdot P_R \cdot N_b \cdot B \quad (4.33)$$

Optiksel ön-yükselteci takip eden foto-diyot tarafından oluşturulan akım ise, alınan güç ile orantılı olarak Eşitlik 4.34 ile hesaplanmaktadır:

$$i_{edfa}^2 = (R \cdot G_0 \cdot P_R)^2 \quad (4.34)$$

Eşitlik 4.33'teki arkaplan ışıması (N_b (W/Hz)), hem göndericide kullanılan EDFA'nın hem de gökyüzü cisimlerinin neden olduğu arkaplan ışımalarının toplamı ile bulunmaktadır:

$$N_b \approx N_{\text{gökyüzü}} + \frac{0.3 \cdot h \cdot c \cdot G_{T_edfa} \cdot F_{T_edfa} \cdot D_T^2 \cdot D_R^2}{Z^2 \cdot \lambda^3} \quad (4.35)$$

Burada,

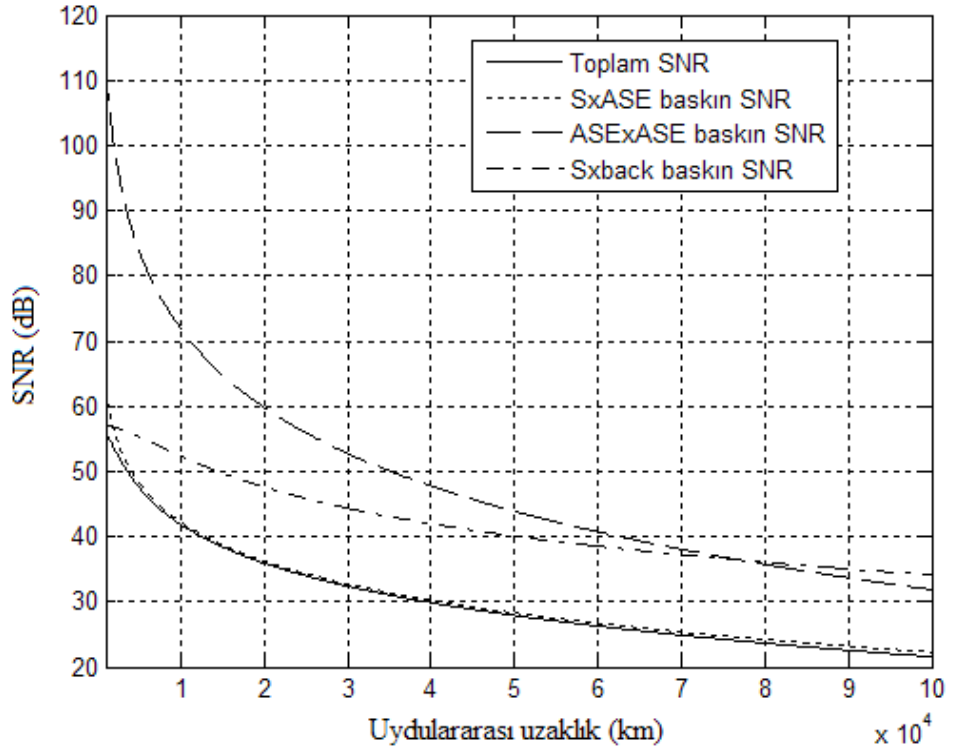
G_{T_edfa} : Göndericideki EDFA'nın kazancı

F_{T_edfa} : Göndericideki EDFA'nın gürültü faktörü

Bu durumda SNR, Eşitlik 4.36 ile hesaplanmaktadır:

$$SNR_{edfa} = \frac{i_{edfa}^2}{\sigma_{ASE \times ASE}^2 + \sigma_{S \times ASE}^2 + \sigma_{S \times back}^2} \quad (4.36)$$

Şekil 4.10'da toplam SNR'nin, $S \times ASE$ baskın SNR'nin, $ASE \times ASE$ baskın SNR'nin ve $S \times back$ baskın SNR'nin uzaklığa (1000-100000 km) göre değişimi görülmektedir. Kullanılan parametrelerin değerleri Ek 8'de verilmiştir.



Şekil 4.10 Optiksel yükselteçli sistem için SNR'nin uzaklığa göre değişimi (B=1 GHz)

Yaklaşık olarak 1000 km'den daha büyük uzaklıklar için toplam SNR ve S×ASE baskın SNR'nin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.

Bu uzaklıklar için, hem S×ASE gürültüsünün baskın olduğu hem de APD'li alıcı duyarlılığı hesaplanırken yapılan işlemler dikkate alınarak, optiksel ön-yükselteçli alıcının duyarlılık hesabı Eşitlik 4.37 ve Eşitlik 4.38 kullanılarak yapılmaktadır:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \approx \frac{I_1}{\sigma_1} \quad (4.37)$$

$$Q = \frac{R \cdot G_0 \cdot P_1}{\sqrt{4 \cdot R \cdot q \cdot n_{sp} \cdot \eta \cdot G_0 \cdot (G_0 - 1) \cdot P_1 \cdot B}} \quad (4.38)$$

$G_0 \gg 1$ için alıcı duyarlılığı Eşitlik 4.39 ile verilmektedir:

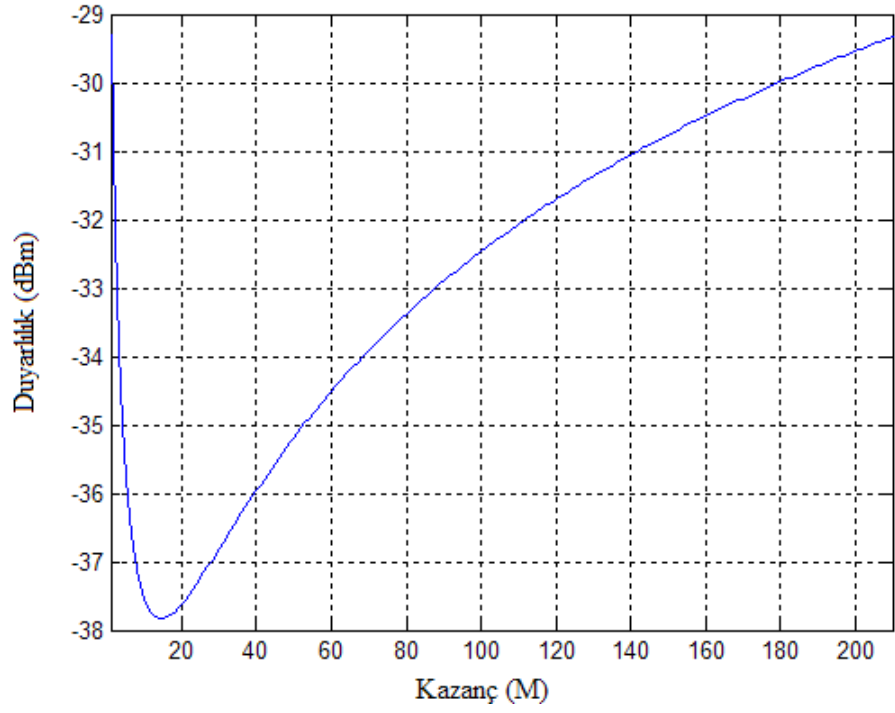
$$P_{\min} = 2 \cdot Q^2 \cdot n_{sp} \cdot h \cdot f_{\text{opt}} \cdot B \quad (4.39)$$

Eşitlik 4.39 kullanılarak, $B=1$ GHz için, optiksel ön-yükselteçli alıcının duyarlılığı $P_{\min} \approx -48$ dBm olarak bulunmuştur.

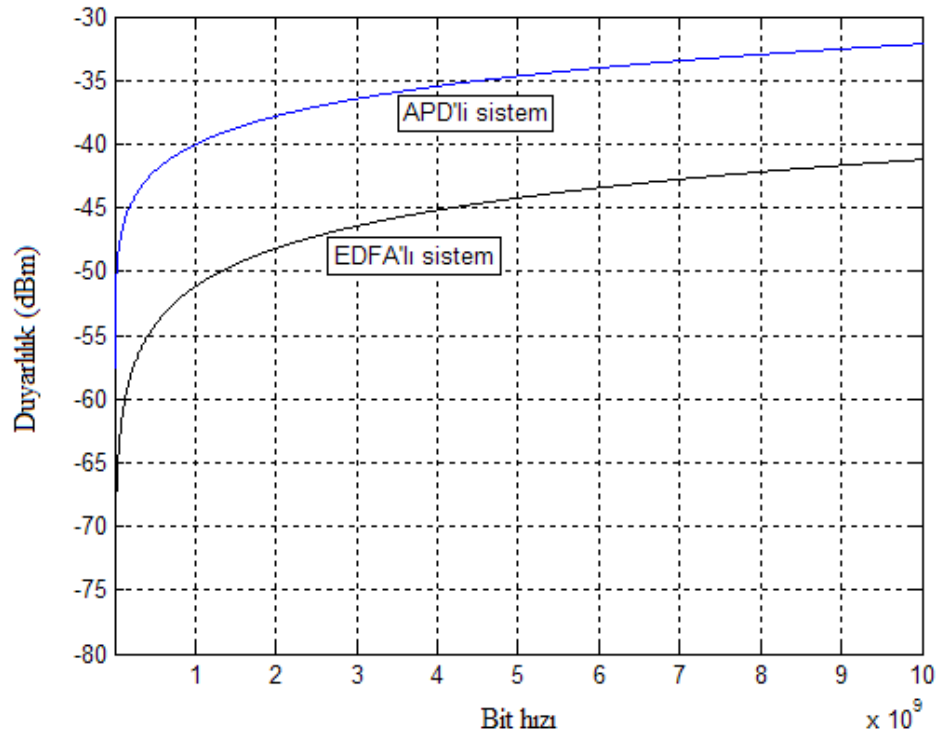
1550 nm dalgaboyunda APD'li alıcı için maksimum duyarlılık, $M=15$ iken -37.83 dBm'dir (Şekil 4.11). InGaAs APD için $\beta/\alpha = 0.7$ alınmıştır. Sonuç olarak, optiksel yükselteçlerin kullanıldığı sistemde daha yüksek alıcı duyarlılığı elde edilmiştir.

Şekil 4.12'de ise APD'li sistem ve optiksel ön-yükselteçli sistem için alıcı duyarlılığının bit hızına (1 Mbps-10 Gbps) göre değişimi görülmektedir. Her iki sistem için de bit hızı arttıkça duyarlılık azalmaktadır.

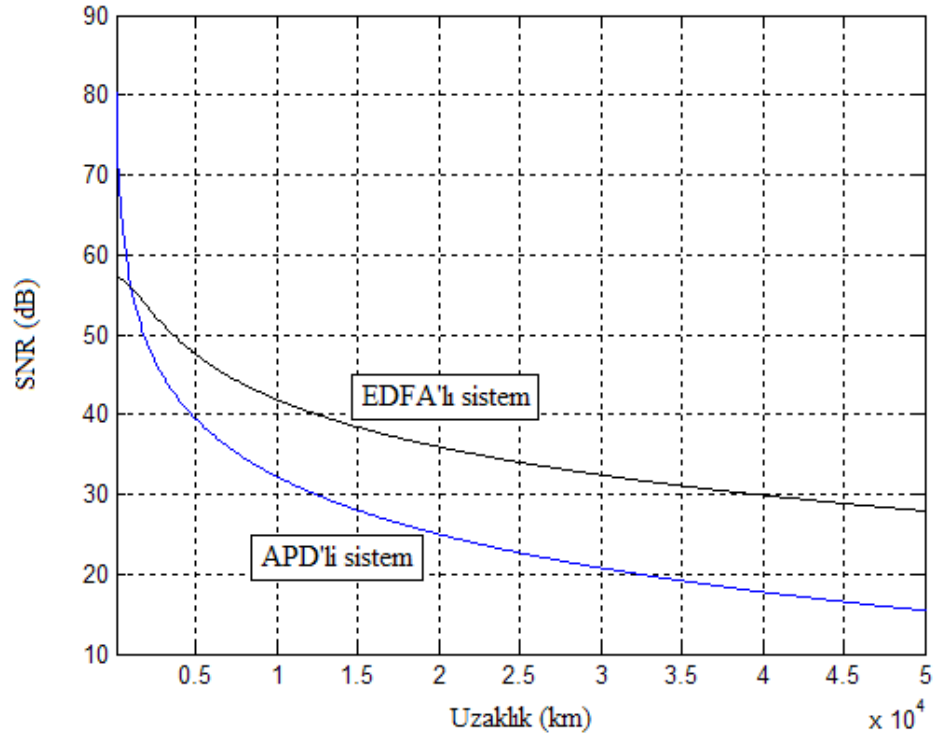
Son olarak Şekil 4.13'te iki farklı sistem yapısı için SNR'nin uzaklığa (100-50000 km) göre değişimi karşılaştırılmıştır. APD'li sistem yapısında kazanç değeri, **uzaklığa göre optimum değerlerine** (M_{opt}) ayarlanmıştır. Buna göre yaklaşık 1000 km'den büyük uzaklıklarda optiksel yükselteçli sistem için daha yüksek SNR elde edilmiştir.



Şekil 4.11 InGaAs APD’li alıcının duyarlılığının dedektör kazancına göre değişimi



Şekil 4.12 APD’li ve EDFA’lı sistem için alıcı duyarlılığının bit hızına göre değişimi



Şekil 4.13 APD’li ve EDFA’lı sistem için SNR’nin uzaklığa göre değişimi

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Optiksel telsiz ile iletişim sisteminin kullanılması, RF ve mikrodalga tabanlı sistemler ile karşılaştırıldığında önemli avantajlar sağlamaktadır. Sistemler arasındaki temel farkı, **çalışma frekansları** arasındaki farklılık oluşturmaktadır. Kullanılan optik ışıma dalgaboyunun daha kısa ve frekansının daha yüksek olması nedeni ile bandgenişliği çok daha büyüktür ve bunun bir sonucu olarak çok daha yüksek veri iletim hızlarına ulaşabilmektedir. Dar açılı ve IR gibi gözle görülmeyen laser ışınlarının kullanılması, gizlilik isteyen uygulamalarda güvenli veri aktarımı için faydalı olmaktadır.

Uzay ve uydu teknolojisinin gelişmesi ile, hem uydulararası hem de yer istasyonları ve uydular arası laser ile iletişim için denemeler başarıyla gerçekleştirilmiştir ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Uzayda optik linkler sayesinde yeryüzünde farklı noktalar arasında yüksek hızlarla iletişimi mümkün hale getirmek, esas amaçtır. Tez çalışmasında, yeryüzündeki gezgin terminaller arası iletişim uygulamaları temel alınarak, uydulararası ve uydudan yere laser ile iletişim için sistem yapısı ve bileşenleri analiz edilmiş (Bölüm 2 ve Bölüm 3), iletişim üzerinde etkisi olan parametreler incelenmiştir.

Uydu uygulamalarında laser ile iletişim, kullanılan terminallerin boyutunda küçülme ve ağırlığında azalma şeklinde ek bir avantaj sağlamaktadır. Bunun başlıca nedeni, optik frekanslarda elde edilen yüksek teleskop kazancıdır.

Teleskop kazancı, **sinyal dalgaboyuna** ve **teleskobun mercek çapına** bağlı bir parametredir (Eşitlik 3.1). Çalışmada, optiksel ve mikrodalga sistemler için kazancın mercek çapına göre değişimi incelenmiş ve optiksel sistemlerde daha küçük mercek çapı ile daha yüksek kazanç elde edilmiştir (Bölüm 3.1). Böylece, iletim uzaklığının artması da sağlanmıştır.

Optiksel telsiz ile iletişimin belirtilen olumlu özelliklerinin yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Yeryüzünde sabit ve gezgin terminaller arasında gerçekleştirilen

uygulamalarda iletişim ortamını oluşturan atmosferin, optik sinyal üzerindeki olumsuz etkileri:

- Soğurma
- Saçılma
- Türbülans

Optik sinyalde güç kaybına neden olan soğurma, özellikle hava içerisindeki su moleküllerinden kaynaklanmaktadır. Temel soğurma moleküllerinin IR ışımlar üzerindeki geçirgenlik miktarı, **dalgaboyuna** göre değişmektedir. Su molekülleri tarafından soğurmanın en az olduğu dalgaboylarında (850 nm ve 1550 nm) işletim daha çok tercih edilmektedir.

Hava koşullarına (pus, sis, bulut, yağmur ve kar) bağlı olan atmosferik zayıflama ise dalgaboyunun yanı sıra **görüş uzaklığı** ile de ilişkilidir (Eşitlik 3.14). Özellikle sis aerosollerinin sinyalde yüksek saçılmaya neden olması, yüksek zayıflamadan dolayı iletim uzaklığını kısaltmaktadır. Çalışmada, 850 nm ve 1550 nm dalgaboylarında zayıflama miktarının görüş uzaklığına göre değişimi incelenmiş ve daha uzun dalgaboyunda iletimin daha iyi olduğu görülmüştür (Bölüm 3.3.1). Ancak yoğun sis altında zayıflama miktarı dalgaboyundan bağımsız olmaktadır.

İletişim ortamının bir diğer etkisi olan **atmosferik türbülans** ise, sıcaklık değişimlerinin bir sonucudur. Bu değişimler sinyalin kırılmasına, dolayısıyla da dalga şeklinin bozulmasına ve demetin genişlemesine yol açmaktadır.

Uydulararası iletişimde atmosfer etkisinin olmaması önemli bir avantajdır. Uydu-yer iletişiminde ise ışın, öncelikle uzaklığın büyük çoğunluğunda boşlukta ilerler ve daha sonra atmosfer tarafından etkilenmeye başlar. İletişim sırasında ışının atmosferik etkilere maruz kaldığı yolun mümkün olduğunca kısa tutulması açısından, yer istasyonunun kurulum yeri önemlidir. Ayrıca çalışmada, **adaptif optik** yaklaşımı analiz edilerek türbülans etkisinin giderilebilmesi için yer istasyonunda kullanılması önerilmiştir (Bölüm 3.3.2).

Uydulararası iletişimde **alıcı uydu tarafından alınan optiksel güç** (P_R) (Eşitlik 3.17), şu parametrelere bağlı olarak hesaplanmaktadır:

- Gönderici çıkışındaki optiksel güç miktarı (P_T)
- Gönderici çıkışındaki laser demet açısı (θ_T)
- Alıcı teleskobunun mercek çapı (D_R)
- Gönderici ve alıcı optiğinin iletim kaybı (T_T, T_R)
- Gönderici ve alıcı arasındaki uzaklık (Z)

Göndericiden yayılan laser demeti, uzaklık arttıkça genişlemektedir. Uydu uygulamalarında olduğu gibi çok büyük uzaklıklar üzerinden iletimde, uzaklığa bağlı güç kaybının azaltılabilmesi için, çok daha dar açılı demetlerin kullanılması gerekmektedir. Çalışmada, 850 nm ve 1550 nm dalga boyları için uzaklığa göre **zayıflamanın** değişimi incelenmiş ve daha kısa dalga boyunda zayıflamanın daha az olduğu görülmüştür (Bölüm 3.3.3).

Uydu-yer iletişimde yer istasyonu tarafından alınan optiksel güç, atmosferik zayıflama ve türbülans etkisi de dikkate alınarak hesaplanmaktadır (Eşitlik 3.23).

Alıcı teleskobunun mercek çapı, iletişimde istenen **BER**'in elde edilebilmesi için yeterli sayıda fotonun toplanabilmesi açısından önemli bir parametredir. Mercek çapının artması, alınan optiksel gücün artmasını sağlamaktadır.

Çalışmada uydulararası iletişim için, uzaklığa bağlı kayıpları azaltmak amacıyla, **APD**'li alıcı yapısı (Bölüm 4.2) ve **optiksel ön-yükselteçli** alıcı yapısı (Bölüm 4.3) ele alınmıştır.

Uzak erişimli iletişimde APD'lerin tercih edilmesinin nedeni, **iç kazanç** sahip olmalarıdır. Sistem performansını belirleyen **SNR**, APD'li yapı için şu parametrelere bağlı olarak hesaplanmaktadır (Eşitlik 4.11):

- Alınan optiksel güç
- Alıcı bandgenişliği (B)
- Dedektör karakteristikleri
- Elektriksel ön-yükselteç gürültüsü
- Arkaplan gürültüsü

Çalışmada, göndericide 850 nm dalgaboyuna ve 100 mW çıkış gücüne sahip bir GaAlAs laser diyot ve alıcıda bir Si APD kullanıldığı varsayılarak, SNR'nin farklı dedektör kazançları için uzaklığa göre değişimi incelenmiştir. Buna göre, maksimum SNR'nin elde edilebilmesi için uzaklığa bağlı **optimum kazanç** değerlerinin (Eşitlik 4.15) olduğu görülmüştür (Bölüm 4.2).

İletişimde istenen BER'i elde etmek için alıcı girişinde gerekli olan minimum optiksel güç şeklinde tanımlanan **alıcı duyarlılığını** (P_{min}) (Eşitlik 4.26) belirleyen parametreler ise:

- BER
- Veri hızı
- Sinyal üzerindeki gürültü
- Dedektör karakteristikleri
- Modülasyon türü

Si APD'li alıcı duyarlılığı hesaplamaları, SOOİ sistemlerde yaygın şekilde kullanılan modülasyon türü olan **OOK** dikkate alınarak ve $BER = 10^{-12}$ olduğu varsayılarak yapılmıştır. Si APD'li alıcı duyarlılığının dedektör kazancına göre değişimi incelenmiş ve **maksimum duyarlılığı** veren kazanç değeri (Eşitlik 4.27) belirlenmiştir (Bölüm 4.2).

Uzaklıktan kaynaklanan kayıpların azaltılabilmesi için bir başka sistem yapısı ise optiksel yükselteçleri içermektedir. Çalışmada, hem iletilen sinyalin gücünü artırmak için gönderici uyduda hem de alınan zayıflamış sinyalin gücünü artırmak için alıcı uyduda bir optiksel yükselteç olan EDFA dikkate alınmıştır. EDFA, 1550 nm

dalgaboyu civarında 40-50 nm aralıkta çalışabilen ve ticari olarak da tercih edilen bir yükselteçtir.

EDFA'ların dahil olmasıyla sistemde oluşan yeni baskın gürültüler analiz edilerek SNR'nin (Eşitlik 4.36) uzaklığa göre değişimi incelenmiş ve buna göre optiksel ön-yükselteçli alıcı duyarlılığı (Eşitlik 4.39) hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, optiksel ön-yükselteçli alıcı duyarlılığının InGaAs APD'li alıcı ile elde edilebilecek maksimum duyarlılıktan daha yüksek olduğunu göstermektedir (Bölüm 4.3). Yüksek alıcı duyarlılığı, **minimum güç tüketerek minimum BER**'in elde edilebilmesi açısından çok önemlidir.

EDFA'lı sistem ve uzaklığa göre optimum kazanç değerli APD'li sistem için SNR'nin uzaklığa göre değişimi karşılaştırıldığında ise maksimum SNR değerlerinin yaklaşık olarak 1000 km'ye kadar APD'li sistemde, daha büyük uzaklıklar için EDFA'lı sistemde elde edildiği görülmüştür.

Çalışma kapsamında elde edilen bilgiler ışığında **geleceğe yönelik çalışmalar** için bazı öneriler şöyle özetlenebilir:

- Farklı **modülasyon türlerinin** iletişim kalitesinde iyileştirme amacıyla karşılaştırmalı analizi
- Optiksel **uydu ağları** için, ağ performansını etkileyen parametrelerin (**uydu sayısı, uyduların titreşim genliği** gibi) incelenmesi

KAYNAKLAR

- Akıncı, M. ve Taşçı, E. 2005. Uydu yörüngeleri ve yapısı. Aselsan Dergisi, Sayı: 69, 10 s.
- Alda, J. 2003. Laser and Gaussian beam propagation and transformation. Encyclopedia of Optical Engineering, New York.
- Alonso, A., Reyes, M. and Sodnik, Z. 2004. Performance of satellite-to-ground communications link between ARTEMIS and the optical ground station. SPIE-The International Society for Optical Engineering, Vol. 5572, 372-383.
- Anonymous. 1994. Guide to understanding Gaussian laser optics. Photon Inc.
- Anonymous. 2002. Gaussian beam propagation. Gaussian Beam Optics, Melles Griot.
- Anonymous. 2003. Application Note - Optical receiver performance evaluation. Maxim High-Frequency/Fiber Communications Group, HFAN-3.0.2.
- Arı, F. 2006. Ses kodlama tekniklerinin serbest ortam optiksel iletişime uygulanması. Doktora Tezi, AÜ.
- Arı, M. 2006. Erbiyum katkılı fiber optik yükselteçlerin (EDFA) kullanıldığı uzun mesafe soliton iletişim sistemlerinin optimizasyonu. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt. 21, No. 2, 213-220.
- Arnon, S., Rotman, S. R. and Kopeika, N. S. 1997. Performance limitations of free-space optical communication satellite networks due to vibrations: direct detection digital mode. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 36, 3148-3157.
- Arnon, S., Rotman, S. and Kopeika, N. S. 1998. Optimum transmitter optics aperture for satellite optical communication. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 34, No. 2, 590-596.
- Arnon, S. 1999. Power versus stabilization for laser satellite communication. Applied Optics, Vol. 38, No. 15, 3229-3233.
- Arnon, S., Kopeika, N. S. and Kedar, D. 2003. Performance limitation of laser satellite communication due to vibrations and atmospheric turbulence: down-link scenario. International Journal of Satellite Communications and Networking, 21, 6, 561-573.
- Arnon, S. 2005. Performance of a laser satellite network with an optical preamplifier. Optical Society of America, Vol. 22, No. 4, 708-715.

- Aspelmeyer, M., Jennewein, T. and Zeilinger, A. 2003. Long-distance quantum communication with entangled photons using satellites. *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 9, 1541-1551.
- Barbaric, Z. P. and Manojlovic, L. M. 2003. Optimization of optical receiver parameters for pulsed laser tracking systems. *Proceedings of the International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service (TELSIKS)*, Vol.1, 192-201.
- Bove, G. 2004/2005. <http://www.corista.unina.it/Docs/lacomunicazioneottica.pdf>. Anno Accademico. Erişim Tarihi: 15.11.2007
- Chang-Hasnain, C. J. 2002. Modulation and demodulation. <http://light.eecs.berkeley.edu/ee233f02/Receiver.PDF>. Erişim tarihi: 15.11.2007
- Chen, M. 2003. Review of free-space optical communications links. <http://hkn.eecs.berkeley.edu/~chenm/>. Erişim Tarihi: 15.11.2007.
- Churnside, J. H. and Shaik, K. 1989. Atmospheric propagation issues relevant to optical communications. Technical Memorandum ERL WPL-159, National Oceanic and Atmospheric Administration, Wave Propagation Laboratory, Boulder, Colorado.
- Dearden, G., Sharp, M. and French, P. W. 1996. Initial studies of laser beam performance monitoring using a novel camera-based in-line beam monitoring system. Spiricon, USA.
- Demir, M., Özek, F. and Efe, M. 2001. Gezgin terminaller arası çift yönlü serbest ortam optiksel iletişimde izleme parametreleri. 9. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı (SIU 2001). <http://www.ee.emu.edu.tr/siu2001/bildiriler/120.pdf>. Erişim Tarihi: 15.11.2007.
- Er-long, M., Zheng-fu, H. and Shun-sheng, G. 2005. Background noise of satellite-to-ground quantum key distribution. *New Journal of Physics*, 7, 215.
- Epple, B. 2005. Development and implementation of a pointing, acquisition and tracking system for optical free-space communication systems on high altitude platforms. Diploma Theses, LMU Munich, Germany.
- Franz, J. H. and Jain, V. K. 2000. Optical communications: components and systems. Alpha Science International Ltd, Narosa Publishing House.
- Kim, I. I., Stieger, R. and Koontz, J. A. 1998. Wireless optical transmission of fast Ethernet, FDDI, ATM, and ESCON protocol data using the TerraLink laser

- communication system. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 37, 3143-3155.
- Kim, I. I. and Korevaar, E. 2001. Availability of free-space optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems. Proc. SPIE, Vol. 4530, November, 84-95.
- Lambert, S. G. and Casey, W. L. 1995. Laser communications in space. Artech House, Boston, London.
- Lee, S., Alexander, J. W. and Jeganathan, M. 2000. Pointing and tracking subsystem design for optical communications link between the international space station and ground. Proceedings of SPIE, Vol. 3932.
- Leeb, W. R. 2000. Space laser communications: systems, technologies, and applications. Review of Laser Engineering, Vol. 28, No. 12, 804-808.
- Leeb, W. R. 2005. Optical amplifiers in space communication links. Proceedings of the OSA Topical Meeting on Optical Amplifiers and their Applications, Budapest, Hungary.
- OICETS (Optical Interorbit Communications Engineering Test Satellite).
<http://directory.eoportal.org/presOICETSOpticalInterorbitCommunicationsEngineeringTestSatellite.html>. Erişim Tarihi: 15.11.2007.
- Özek, F. 1995. Optoelektronik. AÜFF, Ankara.
- Özek, F. 1998. Katıhal elektronığı. AÜFF, Ankara.
- Pfennigbauer, M., Leeb, W. R. and Aspelmeyer, M. 2003. Free-space optical quantum key distribution using intersatellite links. Proceedings of the CNES-Intersatellite Link Workshop.
- Przygodda, F., Blöcker, T. and Weigelt, G. 2000. Computer simulations of interferometric imaging with the VLT interferometer and its AMBER instrument. SPIE Conf., Vol. 4006.
- Seyrafi, K. and Hovanessian S. A. 1993. Introduction to electro-optical imaging and tracking systems. Artech House, Boston, London.
- Summerfield, M. 1999. Bit-error-rate and Q factor measurement: theory and practice.
<http://www.ee.unimelb.edu.au/staff/kaic/PRL-TS/ms1-bnq.pdf>. Erişim tarihi: 15.11.2007.
- şenol, S. ve Güler, M. S. 2005. Uydu teknolojisi. Aselsan Dergisi, Sayı: 69, 6 s.

- Tuft, V. L. 2005. Gain and noise figure of Erbium-Doped Fiber Amplifier. Laboratory exercise TFE4165 Applied Photonics. http://www.iet.ntnu.no/courses/tfe4165/laboppgaver/edfalab_exercise.pdf. Erişim Tarihi: 15.11.2007.
- Toyoda, M., Araki, K. and Suzuki, Y. 2002. Measurement of the characteristics of a quadrant avalanche photodiode and its application to a laser tracking system. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 41, 145-149.
- Toyoshima, M., Leeb, W. R. and Kunimori, H. 2005. Comparison of microwave and light wave communication systems in space applications. SPIE Europe-The International Society for Optical Engineering, International Symposium on Optical Systems Design, Jena, Germany.
- Winzer, P.J., Kalmar, A. and Leeb, W. R. 1999. Role of amplified spontaneous emission in optical free-space communication links with optical amplification-impact on isolation and data transmission; utilization for pointing, acquisition, and tracking. In Proc. Free-Space Laser Communication Technologies XI, Proceedings of the SPIE, 104-114, San Jose, CA, USA.
- Yamaner, D. D. 2004. Laserle yerden uyduya iletişim için tasarım parametreleri. Yüksek Lisans Tezi, A.

EK 1 Uydu Uygulamalarında Laser ile İletişimin Tarihçesi

Bir uydu ve bir yer istasyonu arasında laser ile iletişim ilk defa 1994 ve 1996 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. 1994 yılında fırlatılan Japon test uydusu ETS-VI (*Engineering Test Satellite*), hedeflenen GEO yörüngesi yerine eliptik bir yörüngeye yerleştirilmiştir. ETS-VI ile Tokyo ve California'daki yer istasyonları arasında yaklaşık 35000 km üzerinden çift yönlü olarak başarılı bir şekilde gerçekleştirilen iletişimde, veri hızı 1 Mbps olarak belirtilmiştir.

ESA (*European Space Agency*) tarafından geliştirilen SILEX (*Semiconductor Laser Intersatellite Link Experiment*) programı çerçevesinde uydulararası laser ile iletişim ilk defa Kasım 2001'de gerçekleştirilmiştir. Bir görüntü, LEO'daki Fransız SPOT-IV gözlem uydusundan GEO'daki ESA uydusu ARTEMIS'e (*Advanced Relay and Technology Mission Satellite*) 50 Mbps hızla iletilmiştir.

SILEX programının bir parçası olarak ARTEMIS ve yer arasında çift yönlü iletişim için ESA tarafından 1993'te İspanya Tenerife'de bir optiksel yer istasyonu kurulmaya başlanmış ve istasyonun yapımı 1997'de tamamlanmıştır (Şekil 1.9). İletişim sırasında ışının atmosferik etkilere maruz kaldığı yolun mümkün olduğunca kısa tutulması gerekmektedir. Dağın tepesine ve deniz seviyesinden 2400 m yüksekliğe kurulan optiksel yer istasyonu, bir ESA üyesi ülkede ekvatora en yakın noktadır. Bu nedenle de ayrıcalıklı bir yerdir.

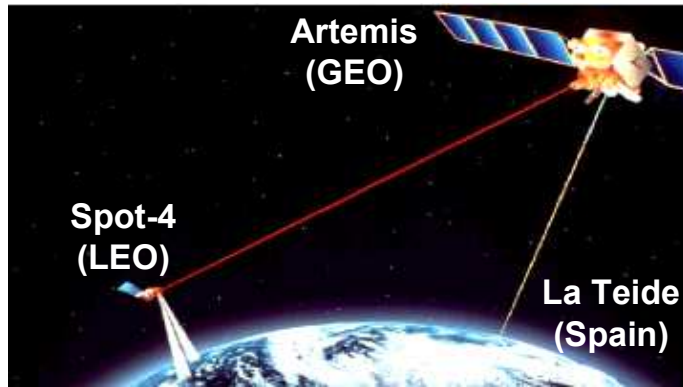


Şekil 1.9 ESA'nın İspanya Tenerife'deki optiksel yer istasyonu

ARTEMIS ve yer istasyonu arasında Kasım 2001’de ilk bağlantının gerçekleştirilmesinden sonra 2004 yılına kadar farklı türbülans ve hava koşullarında 57 aşağı bağlantı (*down-link*) ve 9 yukarı bağlantı (*up-link*) için elde edilen BER ölçümleri şu sonuçları ortaya koymuştur (Alonso *et al.* 2004):

- Aşağı bağlantı için ortalama BER değeri 10^{-6} ’dır. En iyi sonuç yaz döneminde elde edilmiştir ($BER \approx 10^{-10}$).
- Yukarı bağlantı için BER değeri 10^{-6} ’dan aşağı hiç düşmemiştir ve ortalama olarak 10^{-3} ’tür.
- Yer istasyonu-uydu iletişimi üzerinde atmosferin etkisinin daha kuvvetli olması, performansın düşmesine neden olmaktadır.
- Uydudan yer istasyonuna laser ile son derece kararlı ve güvenilir bir iletişim gerçekleştirmek mümkündür.

Şekil 1.10’da SPOT-IV, ARTEMIS ve yer istasyonu arasındaki laser linkleri görülmektedir. Verinin bir LEO uydusundan yere iletimi sırasında bir GEO uydusunun aktarıcı olarak kullanılmasının nedeni, yer istasyonu ile iletişim süresinin daha fazla olmasının istenmesidir.



Şekil 1.10 SPOT-IV, ARTEMIS ve yer istasyonu arasında laser ile iletişim

SILEX programı 100000 saatten daha fazla yaşam süresi ile yüksek güvenilirlik göstermiştir.

Uydulararasında laser ile çift yönlü ilk iletişim ise Aralık 2005'te JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*) tarafından geliştirilen OICETS (*Optical Inter-Orbit Communications Engineering Test Satellite*) uydusu ve ARTEMIS arasında gerçekleştirilmiştir. OICETS uydusu Ağustos 2005'te yeryüzüne uzaklığı 610 km olan bir alçak yörüngeye yerleştirilmiştir. OICETS-ARTEMIS linki için veri hızı 50 Mbps, ARTEMIS-OICETS linki için ise 2 Mbps olarak belirtilmiştir.

EK 2 SILEX Programının Temel Özellikleri

SILEX (Semiconductor Laser Intersatellite Link Experiment)		
Satellites	SPOT-4	ARTEMIS
Mission		
Organization	ESA	
Launch date	1998	2000
Orbit	LEO	GEO
Range	45000 km	
Mission weight	150 kg	
Optical		
Telescope type	Afocal Cassegrain in Zerodur, common to transmission and reception	
Telescope diameter	Transmit: 200 mm Receive: 250 mm	Transmit: 125 mm Receive: 250 mm
FOV	>4000 μ rad	
Laser transmitter		
Communication	GaAlAs diodes @847 nm Single mode	GaAlAs diodes @819 nm Single mode
Output power	60 mW (120 mW peak power)	37 mW (120 mW peak power)
Laser beam divergence	6 μ rad	8 μ rad
Communication		
General scheme	Intensity modulation, direct detection (IM/DD)	
Data rate	50 Mbps	2 Mbps
BER	10^{-9}	
Receiver	None	APD (135 photons/bit)
ATP		
Acquisition sensor	388 x 388 pixels CCD @ 32 Hz	388 x 388 pixels CCD @ 130 Hz
Tracking sensor	17 x 17 pixels CCD @ 1, 4 or 8 kHz	17 x 17 pixels CCD @ 4 or 8 kHz
Point ahead	2 mirrors, piezo actuators, capacitive position sensors	

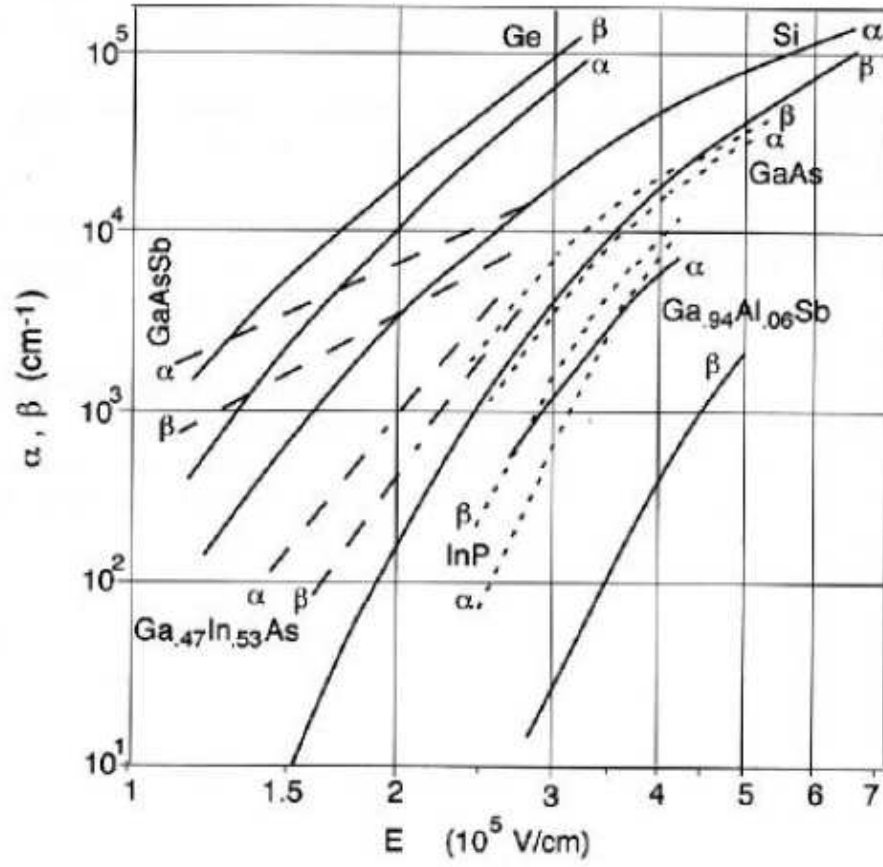
EK 3 Çeşitli Hava Koşulları Altında Görüş Uzaklığı ve Zayıflama Oranları

Hava durumu	Yağış durumu	mm/saat	Görüş uzaklığı	dB/km kayıp (785 nm)
Yoğun sis			0 m	
Koyu sis			50 m	-339.6
Orta sis			200 m	-84.9
Hafif sis			500 m	-34.0
	Sağanak	100	770 m	-20.0
			1 km	-14.2
Seyrek sis	Aşırı yağmur	25	1.9 km	-7.1
			2 km	-6.7
Duman	Orta yağmur	12.5	2.8 km	-4.6
			4 km	-3.0
Hafif duman	Hafif yağmur	2.5	5.9 km	-1.8
			10 km	-1.1
Açık	Çiseleme	0.25	18.1 km	-0.6
			20 km	-0.53
Çok açık			23 km	-0.46
			50 km	-0.21

EK 4 Farklı Şartlarda Gökyüzü Işımasının Tipik Değerleri

Atmosfer Şartları	Gökyüzü Işıması (W/m ² /sr/μm)
Bulutlu (gündüz)	150
Puslu (gündüz)	15
Açık (gündüz)	1.5
Tam Ay (bulutsuz gece)	1.5×10^{-3}
Yeni Ay (bulutsuz gece)	1.5×10^{-4}
Aysız (bulutsuz gece)	1.5×10^{-5}

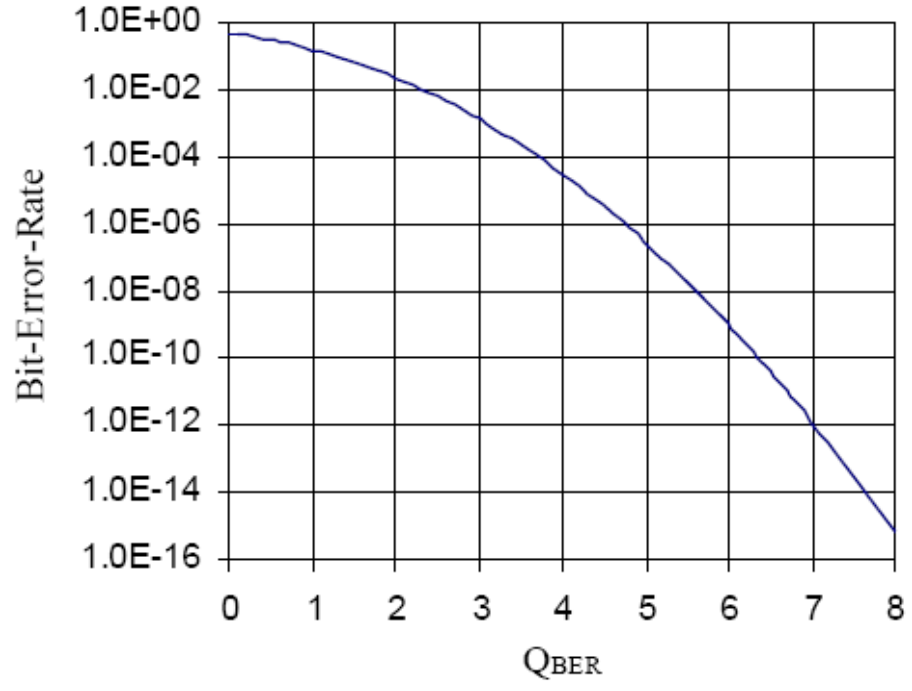
EK 5 Elektrik Alanın Fonksiyonu Olarak Hole ve Elektronların İyonizasyon Katsayıları



EK 6 APD’li Sistem için Kullanılan Parametre Değerleri

Gönderici optiğinin iletim kaybı, T_T	0.8
Alıcı optiğinin iletim kaybı, T_R	0.8
Gönderici teleskop çapı, D_T	25 cm
Alıcı teleskop çapı, D_R	25 cm
Dalgaboyu, λ	850 nm
Gönderici gücü, P_T	100 mW
Kuantum verimi, η	0.8
Varolan gürültü faktörü, x	0.5 (Si APD için $0.2 \leq x \leq 0.5$)
Karanlık akım, I_D	0.5 nA
Yüzey sızıntı akımı, I_L	0 A
Yük direnci, R_L	2 k Ω
Bandgenişliği, B	1 GHz (1 GHz bandgenişliği, 2 Gbit/s veri hızı sağlamaktadır.)
Gürültü faktörü, F_T	3 dB
Sistem sıcaklığı, T	500 K

EK 7 BER ve Q Değeri Arasındaki Değişim



EK 8 Optiksel Yükselteçli Sistem için Kullanılan Parametre Değerleri

Gönderici optiğinin iletim kaybı, T_T	0.8
Alıcı optiğinin iletim kaybı, T_R	0.8
Gönderici teleskop çapı, D_T	25 cm
Alıcı teleskop çapı, D_R	25 cm
Dalgaboyu, λ	1550 nm
Gönderici gücü, P_T	1 W
Kuantum verimi, η	0.8
Göndericideki EDFA'nın kazancı, G_{T_edfa}	33 dB
Göndericideki EDFA'nın gürültü faktörü, F_{T_edfa}	6 dB
Optiksel ön-yükseltecin kazancı, G_0	30 dB
Optiksel ön-yükseltecin gürültü faktörü, F_n	3.8 dB
Kendiliğinden yayınım faktörü, n_{sp}	1.2
Optik filtrenin dalgaboyu bandgenişliği, $\Delta\lambda$	0.6 nm ($B_0 \approx 75$ GHz)
Gökyüzü ışıması, $N_{gökyüzü}$	10^{-20} W/Hz (Güneş, alıcı görüş açısı içinde iken)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Deniz KARAÇOR

Doğum Yeri: Sivas

Doğum Tarihi: 01.11.1981

Medeni Hali: Bekar

Yabancı Dili: İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Kongre Lisesi, Sivas (1999)

Lisans : Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Elektronik Mühendisliği Bölümü (2004)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (Şubat 2005-Ocak 2008)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Ankara Üniversitesi Elektronik Mühendisliği Bölümü (2007- ...)

YAYIN:

- E. Günay, M. Alçı, D. Karaçor, ‘CMOS tabanlı DK-HSA (Durum Kontrollü Hücresel Sinir Ağı) devresi’, ELECO’2004 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, s.127-130, Aralık 2004, Bursa, Türkiye. (Lisans Bitirme Projesi)