ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OPTİKSEL TELSİZ İLE İLETİŞİMDE VERİ TRANSFER KAPASİTESİ ARTIRMA TEKNİKLERİ

Mustafa KÜÇÜKBAL

ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2009

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OPTİKSEL TELSİZ İLE İLETİŞİMDE
VERİ TRANSFER KAPASİTESİ ARTIRMA TEKNİKLERİ

Mustafa KÜÇÜKBAL

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Faruk ÖZEK

Bu tez çalışmasının ilk bölümünde serbest ortamda optiksel telsiz iletişimin tarihçesi, temel prensipleri ve sistem bileşenleri incelenmiş, muhtemel kullanım senaryoları sunulmuş ve özellikle veri transfer kapasitesinin nasıl artırılabileceğini belirlemek için Dalgaboyu Bölmeli Çoklama (*Wavelenght Division Multiplexing, WDM*) tekniğinin pratik kullanımı ve yararı analiz edilmiştir. Son bölümde araştırma konusuna esas teşkil eden sistem modeli için tasarım parametreleri tespit edilmiştir. Belirlenen tasarım parametreleri doğrultusunda optimize edilen örnek sistem modelinde, ulaşılabilecek veri transfer kapasitesi ve iletim kaybı hesaplanmıştır. Böylece optiksel telsiz iletişim sistemlerinin veri transfer kapasitelerinin arttırılabileceği, artan kapasite sayesinde de ağ omurgalarında alternatif iletişim altyapısı olarak kullanılabileceği ve dolayısı ile de uygulama alanlarının artacağı sonucuna varılmıştır.

Mart 2009, 75 sayfa

Anahtar Kelimeler: Optiksel telsiz iletişim sistemi, laser, veri transfer kapasitesi, dalgaboyu bölmeli çoklama

ABSTRACT

Master Thesis

DATA TRANSFER TECHIQUES
FOR CAPACITY INCREASE IN OPTICAL WIRELESS

Mustafa KÜÇÜKBAL

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

Supervisor: Prof. Dr. Faruk ÖZEK

At the first section of this thesis; the history, the basic principles and components of optical wireless communication system in free space are examined, possible application scenarios are presented and especially the practical benefits of the Wavelength Division Multiplexing technique is analyzed to determine how data transfer capacity could be increased. At the last section, the design parameters are determined for the system model which is the basis of this research. Data transfer capacity and link margin are calculated for the sample system model that is optimized by the pre-determined design parameters. Therefore the data transfer capacity of optical wireless communication systems could be improved so as to be used as an alternative or complementary to the communication infrastructure at network backbones and it is therefore concluded that the number of application areas for optical wireless will be more widely in use.

March 2009, 75 pages

Key Words: Optical wireless communication system, laser, data transfer capacity, wavelength division multiplexing (WDM).

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımı yönlendiren, araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Faruk ÖZEK'e (Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi), çalışmalarıma destek veren Araş. Gör. Filiz SARI ve Araş. Gör. Deniz KARAÇOR'a, bu çalışmayı yapmam için imkân sağlayan kurum amirlerim ile personellerine ve birçok fedakârlıklar göstererek beni destekleyen eşime, anne-babama, kardeşime en derin duygularla teşekkür ederim.

Mustafa KÜÇÜKBAL
Ankara, Mart 2009

İÇİNDEKİLER

ÖZET…… i
ABSTRACT…… ii
TEŞEKKÜR…… iii
SİMGELER DİZİNİ…… vi
ŞEKİLLER DİZİNİ…… vii
ÇİZELGELER DİZİNİ…… ix
1. GİRİŞ…… 1
1.1 Optiksel Telsiz İletişim Sistemleri…… 1
1.2 Tarihçe…… 2
1.3 OTİS Yapısı…… 4
1.4 Üstünlükler…… 6
1.5 Yetersizlikler…… 7
1.6 Uygulama Alanları…… 7
2. MATERYAL ve YÖNTEM…… 9
2.1 Sistem Blok Diyagramı…… 9
2.2 Işıma Kaynağı Türleri…… 10
2.3 Dedektörler…… 11
2.4 Dedektör Türleri…… 14
2.5 Trans-Empedans Yükselteç…… 15
2.6 Mercekler…… 16
2.7 Optik Filtreler…… 17
2.8 İletim Kanalı ve Kayıplar…… 17
2.9 Veri Transfer Kapasitesi Artırma Teknikleri…… 24
2.9.1 Dalgaboyu Bölmeli Çoklama…… 24
2.9.2 Zaman Bölmeli Çoklama…… 27
3. ARAŞTIRMA ve BULGULAR…… 29
3.1 Yüksek Veri Transfer Kapasiteli Sistem Tasarımı…… 29
3.2 Sistem Tasarım Parametreleri…… 30
3.3 İki Boyutlu (2D) Anten…… 40
3.4 Optimizasyon…… 41
3.5 Sistem Veri Transfer Kapasitesi…… 42

3.6 Sistem İletim Kaybı……...……...…… 45
3.7 Gürültü Analizi..... 50
3.8 İletim Kaybı Toleransı *(Link Magrin)*..... 58
4. SONUÇ ve TARTIŞMA……..……... 59
KAYNAKLAR…… 62
EKLER……...…….. 64
EK 1 Optiksel Telsiz İletişim Sistemi Fiber Optik Bağlantısı……..…….. 65
EK 2 Alıcı Mercek Teknik Özellikleri……... 66
EK 3 Optik Filtre Teknik Özellikleri……..… 67
EK 4 λ=850 nm için Kullanılan Dedektör Teknik Özellikleri……. 68
EK 5 λ=1550 nm için Kullanılan Dedektör Teknik Özellikleri……...…… 73
ÖZGEÇMİŞ…….. 75

SİMGELER DİZİNİ

APD	*Avalanche Photodiode*
ASK	*Amplitude Shift Keying*
BER	*Bit Error Rate*
BPF	*Band Pass Filter*
Bps	*Bit per Second*
FOV	*Field of View*
FWHM	*Full Width at Half Maximum*
GaAlAs	*Gallium Aluminum Arsenide*
InGaAs	*Indium Gallium Arsenide*
InGaAsP	*Indium Gallium Arsenide Phosphate*
IR	*Infrared*
LAN	*Local Area Network*
LASER	*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
LED	*Light-emitting Diode*
LOS	*Line of Sight*
Nd:YAG	*Neodymium Yttrium Aluminum Garnet*
Nd:YAP	*Neodymium Yttrium Aluminum Phosphate*
Nd:YLF	*Neodymium Yttrium Lithium Fluoride*
NEP	*Noise Equivalent Power*
OTİS	Optiksel Telsiz İletişim Sistemi
OOK	*On-Off Keying*
PIN	*Positive − Intrinsic − Negative*
RF	*Radio Frequency*
Si	*Silicon*
SKB	Sistem Kontrol Birimi
SNR	*Signal to Noise Ratio*
TDM	*Time Division Multiplexing*
TIA	*Trans-Impedance Amplification*
UV	Ultraviyole
WDM	*Wavelength Division Multiplexing*

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Optiksel telsizin tipik uygulama örneği…… 1

Şekil 1.2 Kodlama tabanlı optik iletişim sistemi…….. 2

Şekil 1.3 Claude Chappe ın optiksel semafor telgrafı……..... 3

Şekil 1.4 Elektromanyetik spektrum ve uygulama örnekleri……... 4

Şekil 1.5 OTİS genel yapısı……. 5

Şekil 1.6 Last mile sorunun çözümü…… 7

Şekil 1.7 Gezgin terminal uygulama örnekleri…… 8

Şekil 1.8 Uydular için laser ile optiksel bağlantı senaryoları……... 8

Şekil 2.1 Optiksel telsiz iletişim sistemi blok diyagramı…… 9

Şekil 2.2 Alıcı görüş açısı geometrisi…….. 11

Şekil 2.3 Dedektör temel devresi ve tr/tf sürelerinin açıklanması…….. 13

Şekil 2.4 PIN ve APD yapıları……. 14

Şekil 2.5 Trans-empedans yükselteç…… 15

Şekil 2.6 Alıcıda toplayıcı mercek geometrisi……. 16

Şekil 2.7 Atmosferik iletim çerçeveleri…… 17

Şekil 2.8 Sis nedeniyle meydana gelen zayıflama……... 20

Şekil 2.9 850 nm ve 1550 nm dalga boyları için zayıflamanın görüş uzaklığı ile değişimi……..... 21

Şekil 2.10 Türbülans hücresinin büyüklüğüne göre, demet sapması ve parıldama.…. 22

Şekil 2.11 Geometrik kayıp…….. 23

Şekil 2.12 İki boyutlu anten yapısı……... 25

Şekil 2.13 Dalgaboyu bölmeli çoklama……..... 26

Şekil 2.14 Dalgaboyu bölmeli çoklamanın OTİS'e uygulanması…… 26

Şekil 2.15 Zaman bölmeli çoklama…….. 27

Şekil 2.16 Tezde izlenen yöntemin akış diyagramı…….. 28

Şekil 3.1 Sistem modeli…… 29

Şekil 3.2 Laser diyot ile LED'in sürme akımı ile ışıma güçlerini gösterir bir örnek… 32

Şekil 3.3 Dairesel demetli laser kaynağı için geometri…… 33

Şekil 3.4 Alıcıya ulaşan laser ışıma kesit alanının demet açısı ve iletim uzaklığı ile değişimi..... 35

Şekil 3.5 Band geçiren filtre band genişliği……. 37
Şekil 3.6 Dedektör dalgaboyu-duyarlılık grafikleri……. 39
Şekil 3.7 Örnek sistem modeli iki boyutlu anten yapısı……... 40
Şekil 3.8 Veri transfer kapasitesinin dedektör kapasitansı ile değişimi..... 43
Şekil 3.9 λ=850 nm dedektörü için kapasitansın besleme gerilimi ile değişimi…….. 44
Şekil 3.10 Geometrik kaybın alıcı yüzey alanı ve alıcıya ulaşan ışıma kesit alanı ile değişimi..... 48
Şekil 3.11 Örnek sistem modeli için maksimum iletim kaybı…….....…… 49
Şekil 3.12 1 ve 0 bit değerleri için olasılık yoğunluk fonksiyonu..... 54
Şekil 3.13 Bit Hata Oranının Q parametresi ile değişimi..... 56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 LED − LASER diyot karşılaştırması……. 10
Çizelge 2.2 Laser türleri…… 10
Çizelge 2.3 Çeşitli hava koşulları altında görülebilirlik ve zayıflatma oranları…… 19
Çizelge 3.1 Alıcıya ulaşan ışımanın demet açısı ve iletim uzaklığına göre değişimi... 34
Çizelge 3.2. Alıcı mercek yüzey alanı ve kanal sayısı……. 36
Çizelge 3.3 Dedektörler ve teknik özellikleri……... 38
Çizelge 3.4 Sistem optimizasyonu…… 41
Çizelge 3 5 Çeşitli hava koşulları altında görülebilirlik ve zayıflatma oranları…… 46
Çizelge 3.6 Geometrik kaybın alıcıya ulaşan ışıma kesit alanı-alıcı yüzey alanı ile değişimi……..47

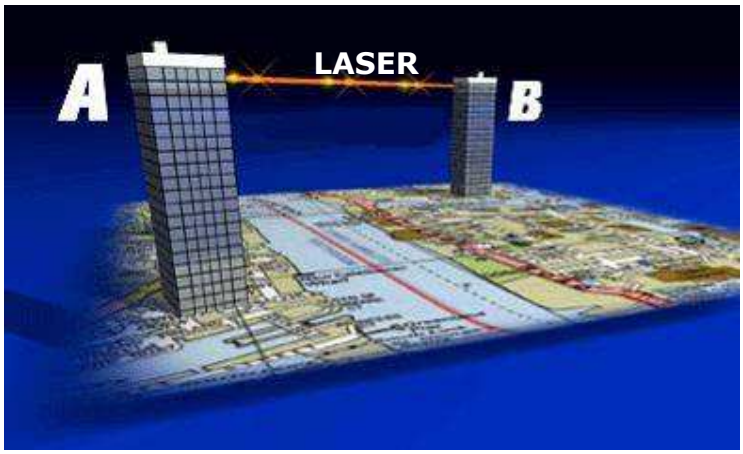
1. GİRİŞ

Kullanıcı sayısının giderek artması, iletişim uygulamalarının değişmesi ve gelişmesi, multimedya ve interaktif uygulamalar iletim kanalındaki band genişliği ihtiyacını üssel olarak artırmaktadır. Eğimi artarak devam eden bu baş döndürücü değişim ve gelişim doğrultusunda yüksek frekanslı taşıyıcı işareti sayesinde bu ihtiyaca cevap verebilecek etkin çözümlerden biri olan optik iletişimin uygulama alanları genişlemiş ve farklı uygulama senaryoları ortaya konmuş, bu senaryolarda karşılaşılan sorunların giderilmesi veya en aza indirilmesi konusunda önemli çalışmalar başlatılmıştır.

Uygulamaların en dikkat çekicilerinden biri olan optik taşıyıcının serbest ortamda kullanılmasının, bir başka deyişle optiksel telsiz uygulamalarının, telsiz iletişimin esnekliğiyle optik haberleşmenin yüksek veri hızlarını birleştirmesi bakımından iletişim kanalı olarak gelecekte daha çok yer alacağı aşikârdır.

1.1 Optiksel telsiz iletişim sistemleri (OTİS)

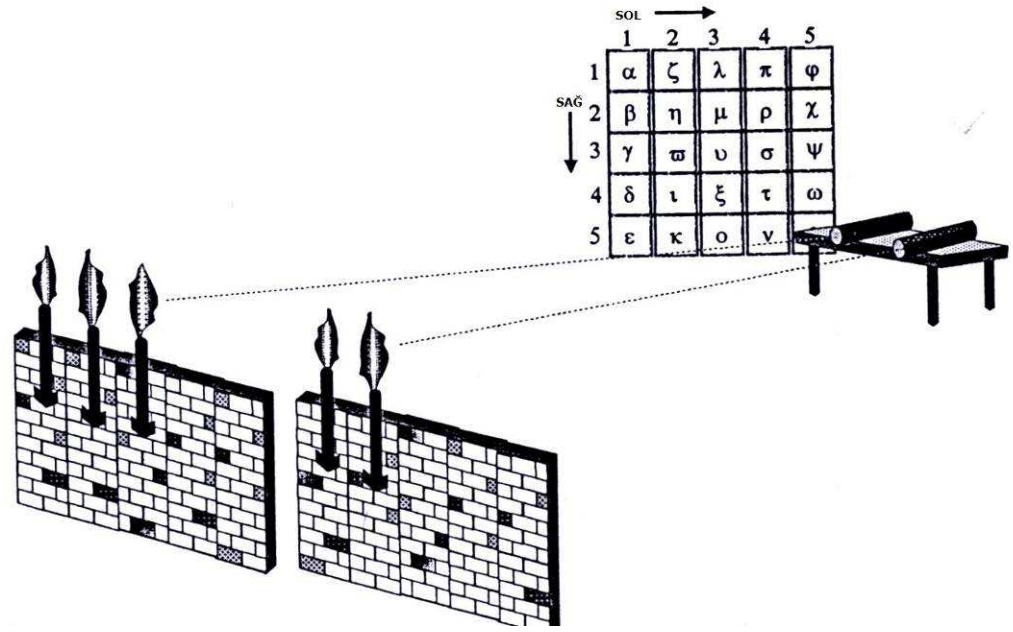
Optiksel telsiz, optik taşıyıcının yüksek veri hızlarıyla telsiz uygulamanın esnekliğini birleştiren bir çözümdür. Şekil 1.1'de tipik uygulama örneği görülmekte olup günümüzde OTİS, fiber optik uygulamaların mümkün olmadığı durumlarda sağladığı yüksek band genişliği imkanıyla etkin bir çözüm olarak kullanılmaktadır (Willebrand and Ghuman 2002, Bouchet *et al* 2006, Majumdar and Ricklin 2008).



Şekil 1.1 Optiksel telsizin tipik uygulama örneği

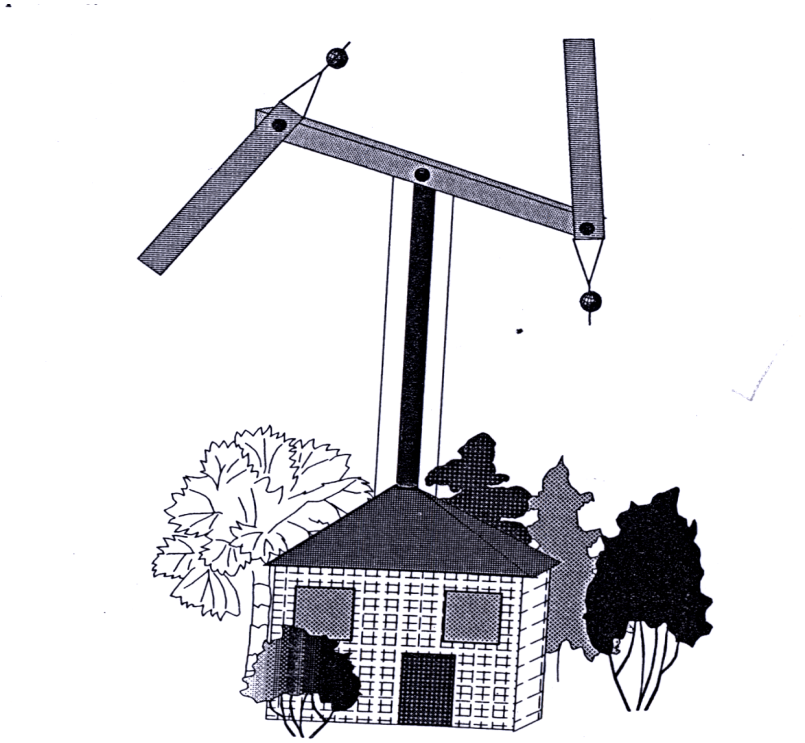
1.2 Tarihçe

Optik sinyalin ya da ışığın iletişim aracı olarak kullanılması yeni bir fikir değildir. Hatta şu an kullandığımız ve bildiğimiz modern iletişim sistem ve alt yapılarında kullanılan konseptin en eskisidir. Güneş ışığı kullanarak aynalar yardımıyla iletişim yöntemleri, denizcilerin lambalarla haberleşmesi düşünüldüğünde çok eski bir mazisinin olduğunu söylemek yanlış olmaz. Yunanlıların meşale ışığı ve kodlama tablolarıyla oluşturdukları harf veya karakter iletimine dayalı haberleşme yöntemleri dönemi itibariyle verimli ve etkin bir iletişim sistemiydi (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 Kodlama tabanlı optik iletişim sistemi (M.Ö. 200) (Franz and Jain 2000)

Şekil 1.3'de görülen, 19 ncu yüzyılın başlarında Claude Chappe ın başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği ve kısa bir zamanda 500 istasyon ve 5000 km haberleşme ağına ulaşan semafor telgraf, optik iletişimin örnek uygulamalarından biridir (Franz and Jain 2000).



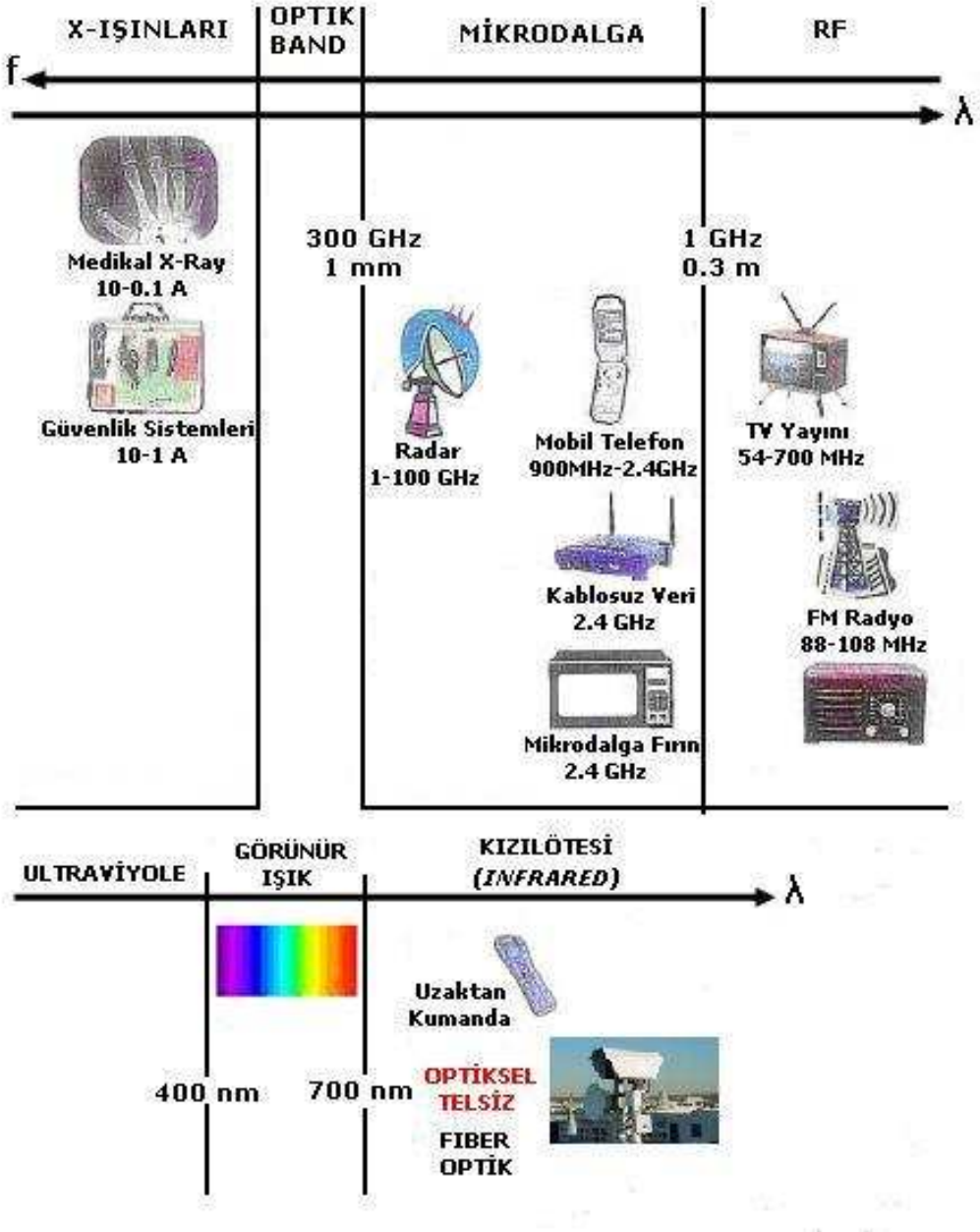
Şekil 1.3 Claude Chappe ın optiksel semafor telgrafı (Franz and Jain 2000)

1876'da Graham Bell'in telefonu icat etmesi, Heinrich Hertz'in deneylerle elektormagnetik dalgaların varlığını ortaya koyması, 1895'de Guglielmo Marchese Marconi nin ilk radyoyu yapması ve iletim kanalı olarak dalga kılavuzuna ihtiyaç duymadan telsiz olarak RF nın taşıyıcı olarak kullanılabileceğini göstermesi iletişimde dönüm noktaları sayılabilir.

Optik dalga boyunun iletim kanalında taşıyıcı işaret olarak kullanılmasıyla ilgili ilk çalışmalar ise 20. yüzyılın ikinci yarısında başladı. İlk laser 1960'da üretildi. 1962'de ilk yarı iletken laser, 1963'de cam ve yüksek zayıflatma oranlarına sahip fiber dalga kılavuzları gerçeklendi (> 1000 dB). Gerçekleştirilemez gözüken optik taşıyıcıyla bilgi modülasyonu 1982 de fiber dalga kılavuzlarındaki zayıflatmanın 0.2 dB'ye düşürülmesiyle günümüzdeki yapısına kavuştu (Franz and Jain 2000).

1.3 OTİS Yapısı

OTİS'de taşıyıcı olarak Şekil 1.4'de sunulan elektromanyetik spektrumun optiksel bölgesinde yer alan yakın kızılötesi *(near infrared)* bandındaki ışımalar kullanılmaktadır. Kısa dalga boyları dolayısıyla artan frekans yüksek band genişliği ve teorik olarak gigabit (Gbps) veri hızında iletim kapasitesi sağlar.



Şekil 1.4 Elektromanyetik spektrum ve uygulama örnekleri

OTİS tüm iletişim yapıları gibi Şekil 1.5 de görülen gönderici, alıcı ve bir iletim kanalından oluşmaktadır. Optik sinyal, analog veya sayısal bilgi kullanılarak, modüle edilir. Modüleli işaret diğer iletişim sistemlerinde kullanılan modüleli işaretlere benzer yapıda ve merkez frekansı f_c olan işarettir. Dalga boyu ise eşitlik (1.1)'den bulunur.

$$\lambda = c / f \qquad (1.1)$$

burada

λ : Optik sinyal dalga boyu nm

c : Işık hızı = $3x10^{17}$ nm/sn

f : Optik sinyal frekansı 1/sn



Şekil 1.5 OTİS genel yapısı

Göndericideki optik sinyal kaynağı LED veya laser diyottur. Kullanılan tipik dalga boyları 780–850 nm ve 1520–1600 nm optiksel bandlarındadır. Serbest ortam (atmosfer/hava) dan geçen modüle edilmiş optik sinyal mercek ile alıcı dedektöre odaklanır ve buradan elektriksel sinyale dönüştürülür.

OTİS'de iletim kanalı serbest ortam (hava/atmosfer) dır ve gönderici-alıcı arasında görüş çizgisinin *(LOS: Line of Sight)* var olması şarttır.

Tez çalışmasında optiksel kaynak olarak laser diyot, λ_1= 850 nm ve λ_2=1550 nm dalga boyları, alıcı dedektörü olarak da PIN foton dedektörleri dikkate alınmıştır.

1.4 Üstünlükler

RF ile iletişime göre üstünlükleri:

- Yüksek veri transfer kapasitesi: RF linklerdeki 10 mega bitler mertebesindeki veri hızlarına karşılık OTİS'de 100 mega bit mertebesinde veri hızlarına ulaşmak mümkündür.

- *Karmaşık devre ve anten dizaynı ihtiyacının olmaması:* RF devre ve anten kullanılan RF bandına özgün olarak tasarlanmalıdır.

Laserin doğrusal ve dar demet olması sonucu:

- *Lisans gerektirmemesi*: Band tahsisine ihtiyaç yoktur. Bürokratik işlemler azalır. İşletmede çabukluk sağlanır.

- *Girişim sorununun olmaması:* RF sistemlerde başka kaynaklardan gelen ve çoklu yol etkisinden kaynaklanan girişim problemi mevcuttur.

- *Gizli, güvenilir ve karıştırmaya karşı dirençli olması:* RF sistemlerde gizlilik karmaşık kriptolama teknikleri ile sağlanmak zorunda olup RF sistemler karıştırmaya *(jamming)* açıktır.

Fiber optik iletim hatları ile karşılaştırıldığında;

- Kurulum çabukluğu ve bakım kolaylığı
- Taşınabilirliği
- Telsiz esnekliği ön plana çıkmaktadır. Bu yönleriyle OTİS ağ omurgalarında fiber optik sistemlere alternatif olabilmektedir.

1.5 Yetersizlikler

- *Atmosfer şartlarından daha fazla etkilenme:* Özellikle sis ve yoğun kar gibi olumsuz atmosfer şartlarından RF sistemlere oranla daha fazla etkilenmektedir.

- *Daha kısa iletim uzaklığı*: Tipik 3-5 km

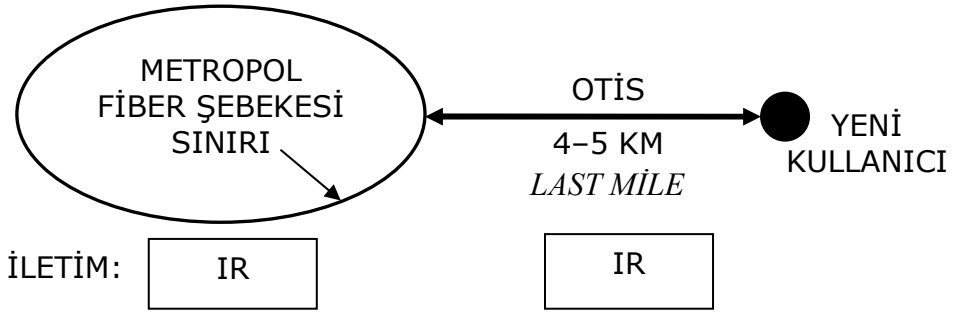
- *Diğer ışıma kaynaklarından etkilenme:* Gündüz şartlarında güneşten kaynaklanan ışımalar ve diğer çevre ışımaları sistem performansını olumsuz etkiler.

1.6 Uygulama alanları

- Yüksek hızlı yerel alan ağı *(Local Area Network: LAN)* sistemleri (İç Ortam *Indoor)*

- LAN grupları arasında bağlantılar

- *Last mile* sorunun çözümü (Şekil 1.6)

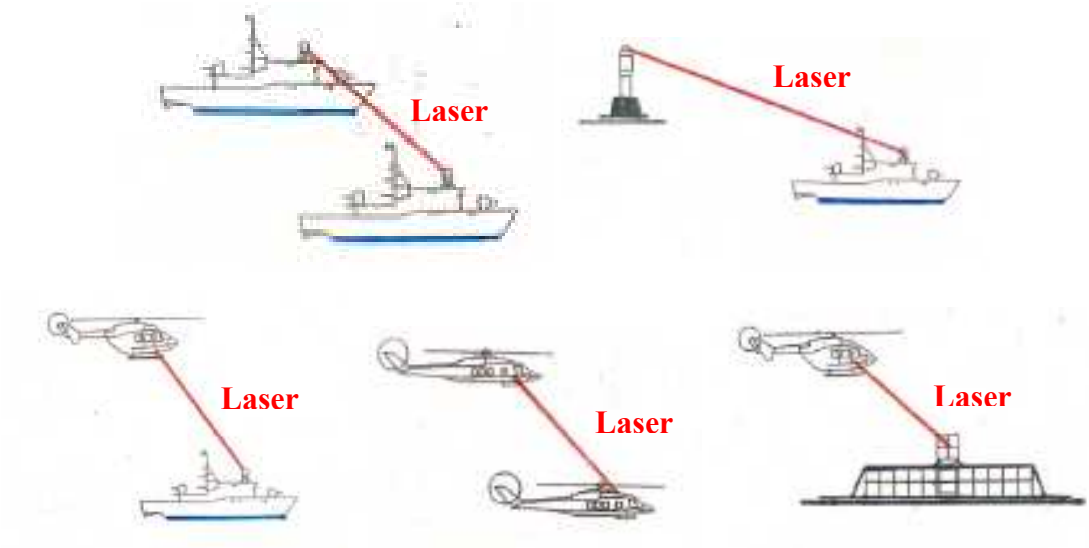


Şekil 1.6 *Last mile* sorunun çözümü (EK 1)

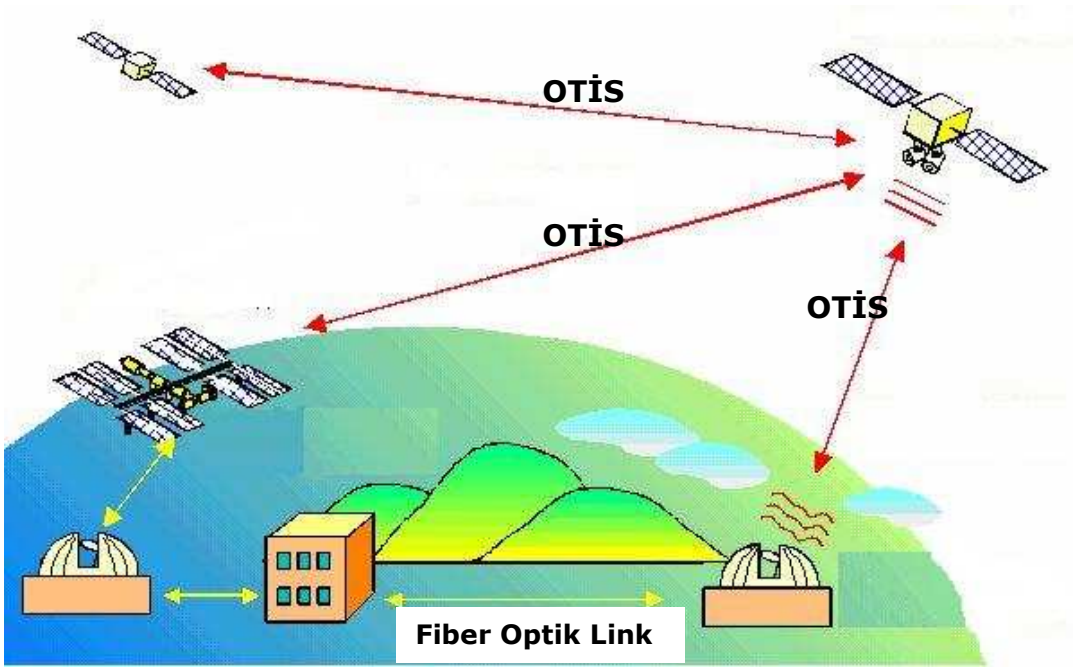
- Fiber optik alt yapının kurulmasındaki çevre şartları, yüksek maliyet, kurulum zorluğu gibi kısıtlayıcı nedenler sonucu oluşan ağ *(network)* boşlukları arasında iletişimin optik olarak sağlanması

- Gemiden-gemiye gibi gezgin *(mobile)* terminaller arasında potansiyel kullanım: Şekil 1.7

- Uydu uygulamaları: Şekil 1.8



Şekil 1.7 Gezgin terminal uygulama örnekleri



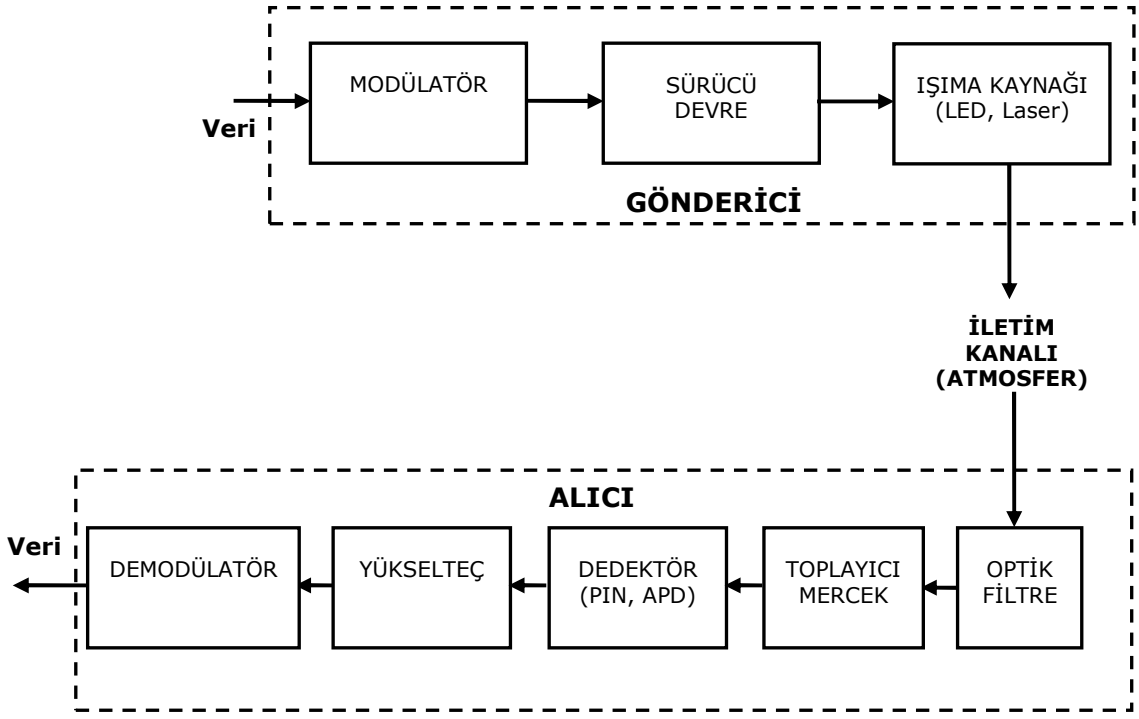
Şekil 1.8 Uydular için laser ile optiksel bağlantı senaryoları

2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1 Sistem Blok Diyagramı

Blok diyagramı Şekil 2.1'de verilen optiksel telsiz iletişim sistemi (OTİS), esas olarak gönderici *(transmitter/sender)* ve alıcı *(receiver)* olmak üzere iki alt sistemden oluşur:

- GÖNDERİCİ : Temel bileşen; LED veya laser
- ALICI : Temel bileşenler; dedektör, toplayıcı mercek ve optik filtre



Şekil 2.1 Optiksel telsiz iletişim sistemi blok diyagramı

2.2 Işıma Kaynağı Türleri

OTİS'de kullanılan ışıma kaynakları LED ve laser diyot olmak olarak ikiye ayrılmaktadır. Karşılaştırmaları Çizelge 2.1'de belirtilmiş olup belirtilen özelliklerinden dolayı dış ortam *(outdoor)* optiksel telsiz uygulamalarında ışıma kaynağı olarak laser diyot tercih edilmelidir. Laser türleri Çizelge 2.2'de verilmiştir. OTİS'de yarı iletken laserler kullanılmaktadır.

Çizelge 2.1 LED − LASER diyot karşılaştırması

ÖZELLİK	LED	LASER
Demet Açısı	Geniş	Dar
Işıma Bandgenişliği	Geniş	Dar
Sağlayabileceği Veri Hızı	Düşük	Yüksek
Işıma Gücü	Düşük	Yüksek
İletim Uzaklığı	Kısa	Uzun
Maliyet	Düşük	Yüksek

Çizelge 2.2 Laser türleri

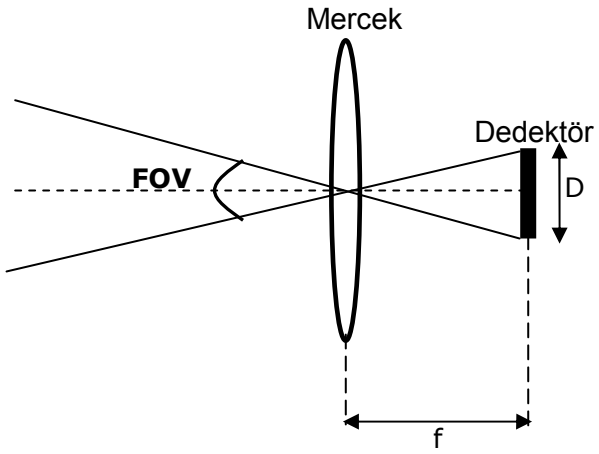
LASER TÜRLERİ	MATERYAL
Yarı iletken	GaAlAs, InGaAs, InGaAsP
Katıhal	Nd:YAG, Nd:YLF, Nd:YAP
Gaz	CO_2, HeNe, Argon

2.3 Dedektörler

Alıcıda dedektör olarak fotodiyot ve fototransistörler kullanılabilir. OTİS'de üstünlüklerinden dolayı fotodiyotlar seçilmektedir. Dedektörler temelde üstüne düşen optik sinyali elektriksel sinyale dönüştüren fiziksel yapıya sahiptirler.

Dedektörler için belirleyici parametreler:

- Görüş Açısı *(Field of View, FOV):* Merceğin odak uzaklığı ve dedektör boyutunun belirlediği alıcı görüş açısıdır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Alıcı görüş açısı geometrisi

$$FOV = 2 \arctan (D/2f) \qquad (2.1)$$

burada

D: Dedektör boyutu

f: Mercek odak uzaklığı

- Kuantum Verimi *(Quantum Efficiency,* η): Işımadaki foton başına dedektördeoluşan elektron sayısının oranıdır.

- Duyarlılık *(Responsivity,* R): Bir dedektör için optik sinyali elektriksel sinyale çevirebilme etkinliliğinin ölçütüdür. Birimi A/W cinsinden verilir. Dedektörün ürettiği elektriksel akımın, dedektöre gelen ışıma gücünü oranıdır.

$$R = \frac{I_{Çıkış}}{P_{Giriş}} = \frac{\eta \cdot q}{h \cdot f_{opt}} \quad (A/W) \qquad (2.2)$$

burada

$I_{Çıkış}$: Dedektör çıkışındaki foto-akım (A)

$P_{Giriş}$: Dedektör girişindeki optiksel güç (W)

η: Dedektör kuantum verimi

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

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

f_{opt}: Optik sinyal frekansı (Hz)

- Gürültü Eşdeğer Gücü *(Noise Equivalent Power,* NEP): Dedektörde gürültüye eşit güçte sinyal üretebilecek minimum ışıma gücünün ölçütüdür. Ölçülebilir bir sinyal giriş ışıma miktarı NEP'ten büyük olmalıdır. Bu durumda SNR ≥ 1 olur. Birimi $W/\sqrt{Hz}$ olarak tanımlanır.

$$NEP = \frac{N_{rms}}{R} \quad (W/\sqrt{Hz}) \qquad (2.3)$$

burada N_{rms}: Gürültü rms seviyesi

- Algılayabilirlik *(Detectivity,* D): Dedektörün algılama yeteneğinin ölçütüdür. Birimi $cm\sqrt{Hz}/W$ olarak tanımlanır.

- Aktif Yüzey *(Active Area)*: Işımayı algılayan yüzeydir. Aktif yüzey ne kadar geniş ise kapasitans o kadar büyük olur, kesme frekansı azalır.

- Kapasitans *(Capacitance,* C): Dedektörün yarı iletken yapısındaki kapasitanstır. Kesme frekansını *(cut-off frequency)* belirleyen faktörlerden biridir. (Diğeri:R_L)

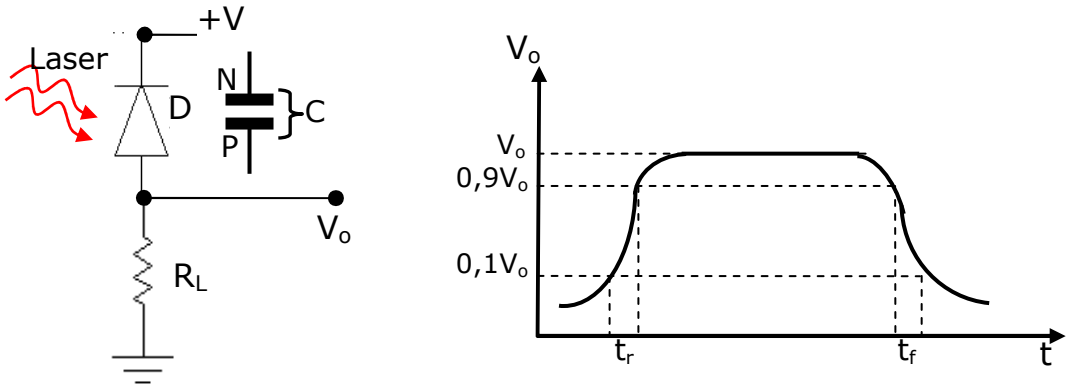
- Kesme Frekansı *(Cut-off frequency,* f_c): Dedektörün elektronik bandgenişliğinin, sinyal değişimlerine ne kadar cevap verebileceğinin ölçüsüdür.

$$f_c = \Delta f = 1 / (2 \pi R_L C) \approx 0{,}35/ t_r \qquad (2.4)$$

burada

R_L: Yük direnci (Şekil 2.3)

t_r: Yükselme süresi



Şekil 2.3 Dedektör temel devresi (solda) ve t_r/t_f sürelerinin açıklanması

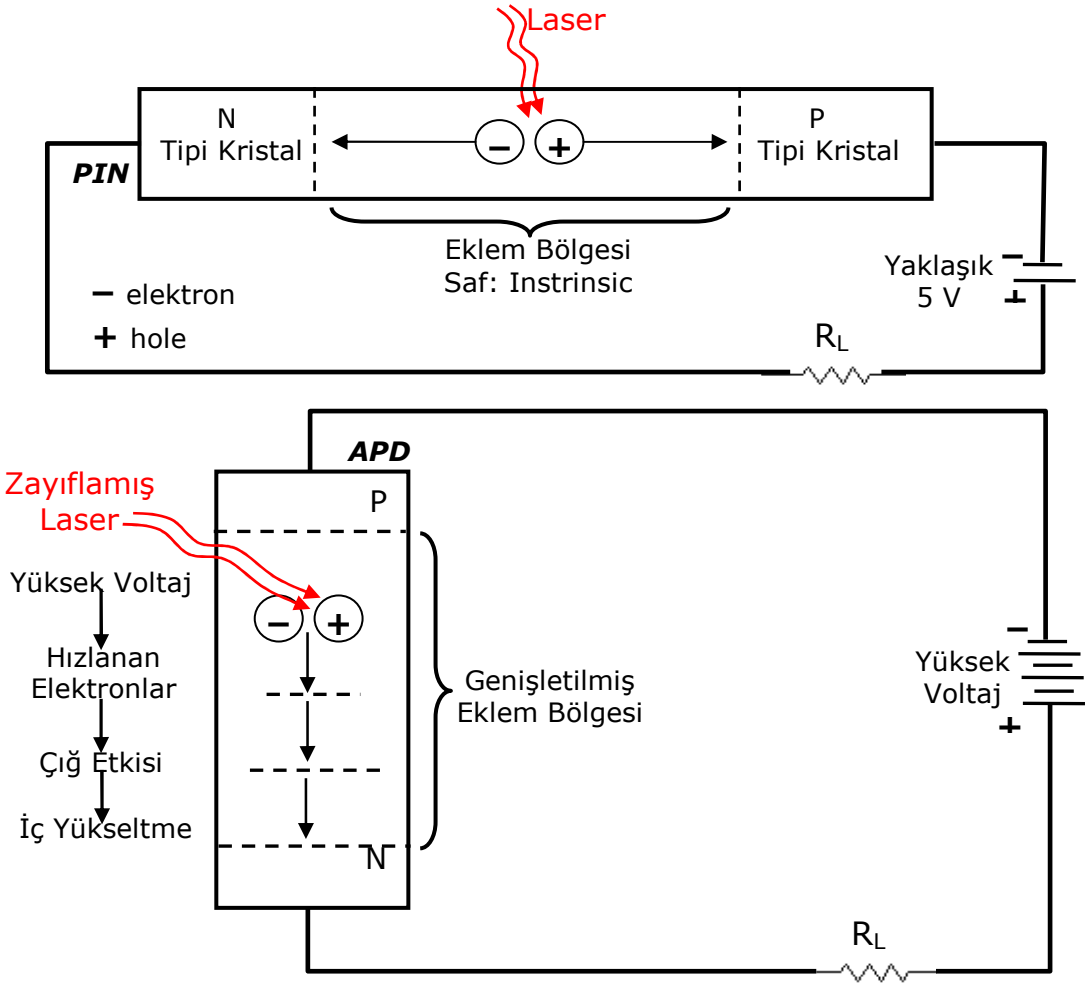
- *Yükselme/Düşme Süreleri (Rise/Fall Time,* t_r/t_f)): Yükselme ve düşme süreleri Şekil- 2.3 de görülmekte olup dedektör çıkış geriliminin %10 undan %90 ına yükselme ve düşme süreleri olarak tanımlanır.

- *Karanlık Akımı (Dark Current,* I_d): Dedektöre ışıma düşmediğinde dahi çevre sıcaklığı nedeni ile her zaman vardır. Oluşturduğu voltaj, sinyal (çıkış) voltajı için eşik değeri teşkil eder.

2.4 Dedektör Türleri

PIN fotodiyot

OTİS'de en çok kullanılan PIN (P-Instrinsic-N) fotodiyotların, band genişliği ve duyarlılığı yüksektir. Laserin atomlardan kopardığı elektron ve oluşan hole'ler, eklem bölgesi son derece saf olduğundan hiçbir engel ile karşılaşmadan hızla PIN dışına çekilirler. Dolayısı ile t_r ve t_f süreleri kısadır. Böylece yüksek frekansta gelen laser darbelerini ayırt edebilir. Besleme kolaylığı vardır. Yapısı Şekil 2.4'de görülmektedir (Wilson and Hawkes 1989, Majumdar and Ricklin 2008).



Şekil 2.4 PIN ve APD yapıları

Çığ tipi foto diyot (Avalanche photo diode, APD)

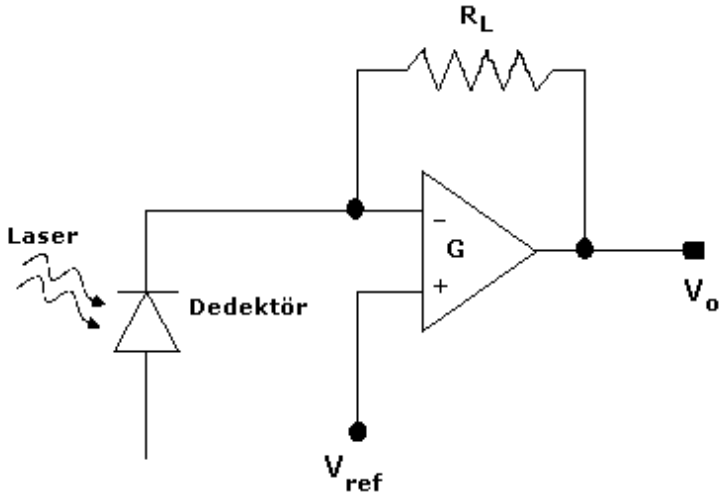
OTİS'de sıkça kullanılan APD'nin PIN fotodiyota göre üstünlüğü iç kazanca sahip olmasıdır. Bu özelliği sayesinde atmosfer etkileri sonucu ve artan iletim uzaklığı dolayı zayıflamış çok düşük seviyedeki sinyalleri yükseltebilmektedir (Şekil 2.4).

APD geniş eklem bölgesine sahiptir. Uçlarına kırılma gerilimine yakın yüksek voltaj uygulanır. Üzerine düşen ışıma şiddeti düşük olsa da yüksek voltajdan dolayı başka elektronların kopmasına ve iletime neden olur ve bu reaksiyon çığ şeklinde büyür. Bununla birlikte dezavantaj olarak yüksek besleme gerilimi gereksinimi vardır ve maliyeti yüksektir (Franz and Jain 2000).

Tez çalışmasında dikkate alınan iki dalga boyu, λ_1=850 nm , λ_2=1550 nm, için de kısa tepki süreleri, besleme kolaylığı ve düşük maliyetinden dolayı PIN fotodiyot seçilmiştir.

2.5 Trans-empedans Yükselteç

Alıcıya gelen optik sinyal fotodedektör tarafından akım değişimine dönüştürüldükten sonucunda oluşturulan çıkış geriliminin kullanılabilmesi için yükseltilmesi gerekmektedir. Bu maksatla Şekil 2.5'de yer alan trans-empedans yükselteçler kullanılır.



Şekil 2.5 Trans-empedans yükselteç

Yükselteç kendi başına bir gürültü kaynağı olduğu için düşük gürültülü olmalıdır. Yük direncinin büyük tutulması gürültü akımı katkısını azaltır. Yükseltecin girişindeki direnç değeri yükseltecin yük direnci ve kazancı ile orantılı olup Eşitlik 2.5 ile bulunur.

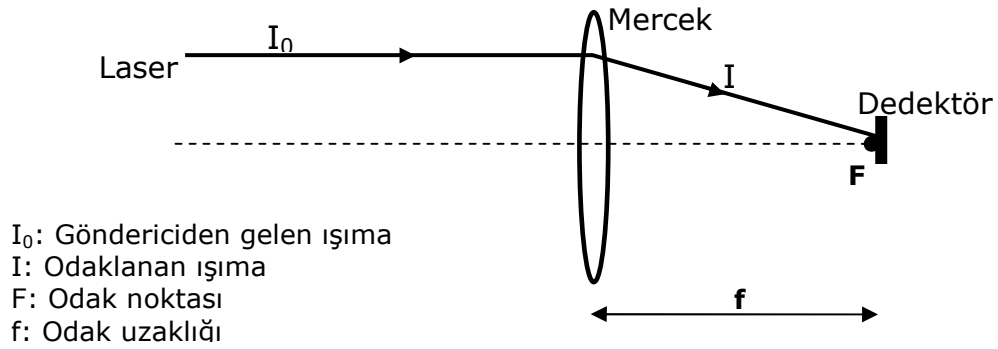
$$R_{in} = R_L / G \tag{2.5}$$

R_{in} giriş direncine paralel kapasitans değeri (C_t), dedektör ve yükselteç kapasitanslarının toplamına eşittir. Böylece yükselteç olarak trans-empedans yükselteçlerin kullanılması $R_{in}C_t$ sabitinin küçük olmasından dolayı alıcı elektronik band genişliğinin büyük olmasını sağlar (Eşitlik 2.6) (Karaçor 2008).

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi R_{in} C_t} = \frac{G}{2\pi R_L C_t} \tag{2.6}$$

2.6 Mercekler

OTİS'de mercekler, gönderici tarafında ışımanın demet açısını genişletme veya daraltma, alıcı tarafında ise ışımayı dedektörün üzerine odaklama işlevini yapar. Mercekler kullanılacak dalga boyuna göre seçilmelidir. Önemli mercek parametreleri odak uzaklığı, çap ve geçirgenliktir (Şekil 2.6). Laser demet açısı dar ise, göndericide mercek kullanılmayabilir. Ancak alıcıda kullanımı şarttır.



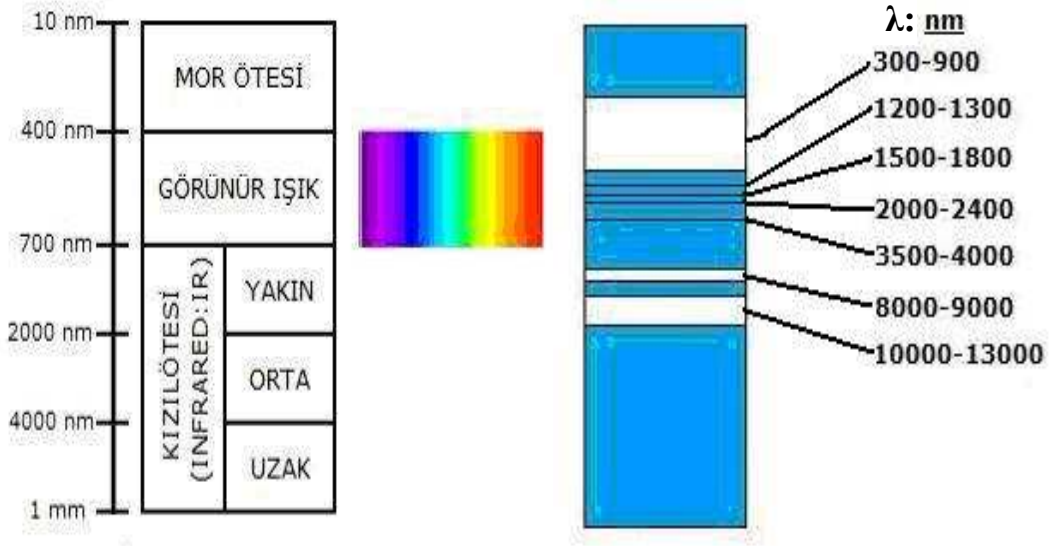
Şekil 2.6 Alıcıda toplayıcı mercek geometrisi

2.7 Optik Filtreler

Alıcıda, dedektöre ulaşması istenmeyen ışımalar optik filtreler yardımıyla süzülürler. Optik filtreler farklı tiplerdedirler ve uygulamaya özgün olarak seçilmelidirler. Band geçiren, band söndüren ve spesifik frekanslara duyarlı dar bandlı (çentik *notch*), bazı optik bandlara duyarlı IR, UV ve renk filtreleri OTİS'de kullanılmaktadır.

2.8 İletim Kanalı ve Kayıplar

OTİS' de iletim kanalı atmosferdir. Atmosfer görünür ve yakın IR için yüksek oranda geçirgen olmakla birlikte bu bölgede yer alan bazı bandlarda moleküler içeriği sebebiyle soğurma etkisi göstermektedir. 700 nm–10 μm dalgaboyu aralığında havanın tamamen geçirgen kabul edilebileceği iletim çerçeveleri bulunmaktadır (Şekil 2.7). Kullanılacak dalgaboyu bu çerçeveler içinde olmalıdır. OTİS'de kullanılan iletim çerçeveleri ise daha öncede belirtildiği üzere 780–850 nm ve 1520–1600 nm bandlarıdır (Arı 2006).



Şekil 2.7 Atmosferik iletim çerçeveleri

Kayıplar

OTİS'de sinyal kayıplarını üç ana başlık altında toplamak mümkündür:

- Atmosferik kayıplar
- Geometrik kayıp
- Optik ve odaklama kayıpları

Atmosferik kayıplar

Zayıflatma

Atmosferik zayıflama, soğurma ve saçılmadan *(absorption and scattering)* kaynaklanmaktadır. Bu etki atmosferde yer alan küçük aerosol ve gazların moleküler yapısından kaynaklanmaktadır. Zayıflama optik sinyalin dalga boyu ile orantılıdır. Havadaki parçacık çapları, d, dalgaboyuna yaklaşık eşit olduğunda zayıflatma en yüksek değerdedir.

Optik sinyalin dalga boyu boyutundaki partiküllerle etkileşimi sonucunda gelen yayılım enerjisinin yayılımın görüldüğü yönlerden dağılımına neden olur. Olması gereken yönde yayılan enerji azalır (Santamarina 1994).

Atmosferi oluşturan CO, CH_4, CO_2, H gibi gazlar farklı dalga boyundaki optik sinyallere farklı saçılım yaparlar. Saçılımın şiddeti bu gaz moleküllerinin sayılarına ve kırılma indeksleri ile dalga boyu, dalga polarizasyonu ve saçınım açısına bağlıdır.

Zayıflama hava koşullarına bağlıdır ve geniş bir aralıkta değişmektedir. Açık havada bu değer 0.2 dB/km, çok yoğun sis altında 350 dB/km'dir. OTİS için en olumsuz şart olan sisli havadır. Sis parçacıklarının çapı ortalama 1000 nm'dir ve OTİS'de kullanılan dalgaboyları ile karşılaştırılabilecek boyuttadır.

Farklı hava koşulları için görüş uzaklığı ve zayıflatma oranı çeşitli çizelgeler ile verilir. **Uluslar Arası Görünebilirlik Kodu Çizelgesi** (*International Visibility Code*) Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3 Çeşitli hava koşulları altında görülebilirlik ve zayıflatma oranları

Hava durumu	**Yağış**	mm/saat	**Görüş uzaklığı**	**dB/km kayıp**
Yoğun sis			0 m	
			50 m	-339.6
Koyu sis			200 m	-84.9
Orta sis			500 m	-34.0
Hafif sis	Sağanak	100	770 m	-20.0
			1 km	-14.2
Seyrek sis	Aşırı yağmur	25	1.9 km	-7.1
			2 km	-6.7
Pus	Orta yağmur	12.5	2.8 km	-4.6
			4 km	-3.0
Hafif Pus	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

KAR



Şekil 2.8 Sis nedeniyle meydana gelen zayıflama

Sis nedeniyle meydana gelen zayıflama örneği Şekil 2.8'de görülmektedir. Atmosferde ilerleyen optik sinyaldeki zayıflama (soğurma ve saçılım) Beer Bağıntısı ile verilir (Eşitlik 2.7).

$$\tau = \frac{P(L)}{P(0)} = e^{-\sigma L} \qquad A_{atm} = 10\log(e^{-\sigma L}) \quad dB \qquad (2.7)$$

burada

P(L): L iletim uzaklığındaki ışıma gücü	W
P(0): Göndericideki ışıma gücü	W
σ: Birim iletim uzaklığındaki zayıflatma katsayısı	1/km
L: İletim uzaklığı	km
τ: İletim	%
A_{atm}= Atmosferik zayıflatma	dB

Birim iletim uzaklığındaki zayıflatma katsayısının (σ) bağlı olduğu değişkenler ise:

$$\sigma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a \qquad (2.8)$$

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 katsyısı

İletim çerçevelerindeki dalgaboylarında moleküler soğurma, aerosol soğurma ve moleküler saçılım; aerosol (Mie) saçılıma göre oldukça küçüktür ve ihmal edilebilir (Kim *et al*. 1998). Mie saçılımı ise;

$$\sigma = \beta_a = \frac{3.91}{V}\left(\frac{\lambda}{550nm}\right)^{-q} \qquad (2.9)$$

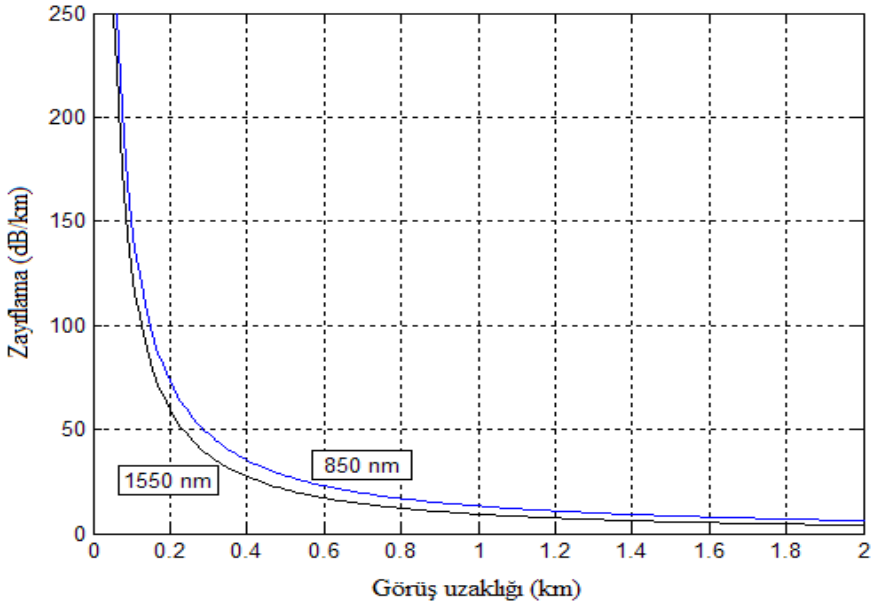
burada

V: Görüş uzaklığı, km

q: Saçılmaya neden olan parçacıkların büyüklük dağılımı katsayısı

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

Tez çalışmasında tasarlanan örnek sistem modelinde seçilen iki dalga boyunda zayıflama miktarının, görüş uzaklığına göre değişimi Şekil 2.9'de sunulmuştur.

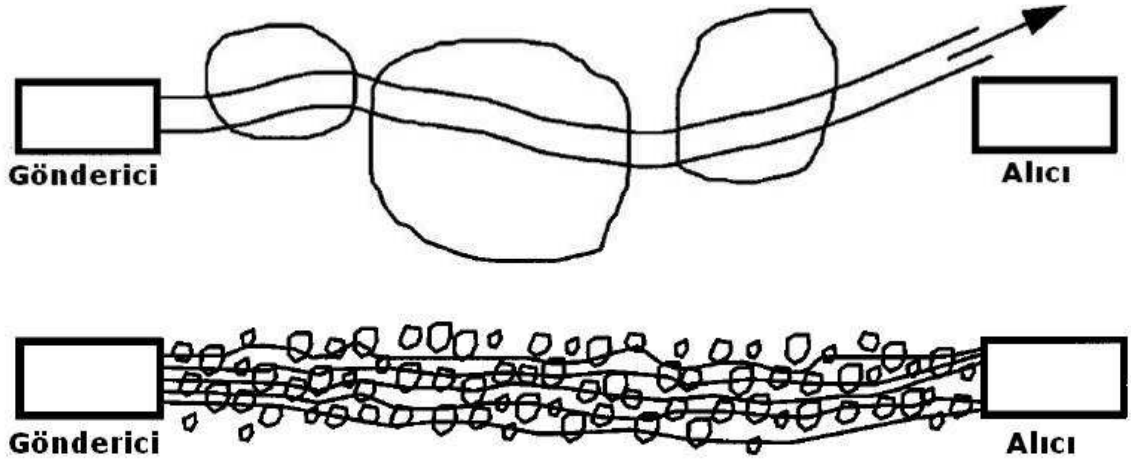


Şekil 2.9 850 nm ve 1550 nm dalga boyları için zayıflamanın görüş uzaklığı ile değişimi

Türbülans

Optik sinyalin yayılımını olumsuz etkileyen atmosferik bir faktör de türbülanstır. Türbülans atmosferdeki sıcaklık ve basınç farklılıkları sonucunda oluşan hava akımıdır. Yeryüzünden yükselen ısınmış hava farklı hava paketleri arasında sıcaklık değişimleri oluşturur. Bu sıcaklık değişimleri yansıtma katsayısını etkiler ve değiştirir. Bu değişim sonucunda yansıma katsayıları birbirinden farklı türbülans hücreleri oluşur. Türbülans hücreleri optik sinyalin istikametini değiştirmesine veya bozulmasına neden olur.

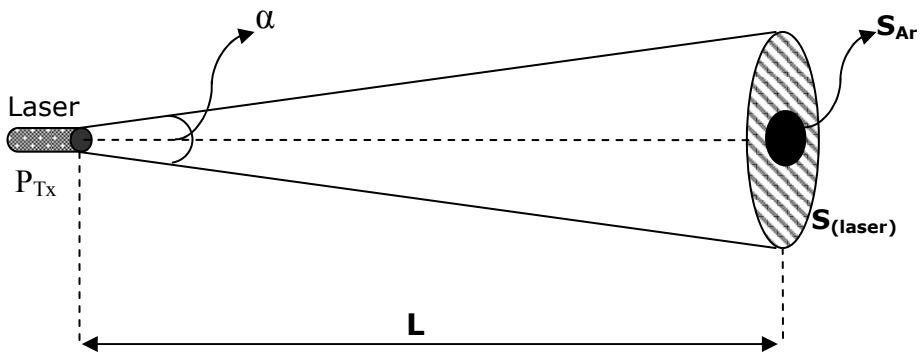
Demet çapından büyük türbülans hücreleri yön değişimine, demet çapından küçük türbülans hücreleri demet genişlemesine ve parıldamaya (*scintillation*) neden olur (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Türbülans hücresinin büyüklüğüne göre, demet sapması ve parıldama

Geometrik kayıp

Göndericide yer alan ışıma kaynağından yayılan optik sinyal demet açısı (α) ve iletim uzaklığı (L) ile orantılı olarak genişler ve alıcıya ulaşır (Şekil 2.11). Alıcıya ulaşan ışımanın kesit alanı (S_{Laser}), alıcı kesit alanından (S_{Ar}) büyük olursa, alanlarla orantılı güç kaybı oluşur ve geometrik kayıp olarak adlandırılır.



Şekil 2.11 Geometrik kayıp

$$L_{Geo} = 10\log\left[\frac{S_{Ar}}{S_{Laser}}\right] \quad (2.10)$$

burada

L_{Geo}: Geometrik kayıp dB

S_{Ar}: Alıcı (toplayıcı mercek) yüzey alanı cm^2

S_{Laser}: Alıcıya ulaşan ışımanın kesit alanı cm^2

Optik ve odaklama kayıpları

OTİS'de kullanılan mercek ve filtre gibi optik bileşenlerin kullanılan dalga boyları ile belirlenen bir geçirgenlikleri vardır. Bir optik bileşenin geçirgenliği, optik bileşenden geçen ışımanın, gelen ışımaya oranıyla belirlenir. Optik bileşenler kullanılacak dalgaboyuna göre seçilmekle birlikte her zaman geçirgenlikleri <1'dir. Işıma gücünde azaltan bu etki optik kayıp olarak adlandırılır ve seçilen optik bileşenin belirleyici parametresidir.

Odaklama kaybı OTİS'in kurulduğu platformların (bina, kule v.b) salınım ve esnemelerinden kaynaklanmaktadır. Salınım küçük olsa da gönderici-alıcı arasındaki görüş çizgisinin bozulmasına neden olur. Bozulmanın yarattığı kayıp odaklama kaybı olarak nitelenmektedir. Kaybı azaltmak için sistemlere otomatik izleme mekanizmaları

entegre edilmektedir. Mekanizmalar görüş çizgisini sürekli kılmak için tasarlanmaktadır.

Sistem tasarımı açısından değerlendirildiğinde, odaklama kaybı seçilecek dedektör için belirleyici parametredir. Şöyle ki; dedektör aktif yüzeyi (S), dedektörün kapasitansını (C), dolayısı ile elektronik band genişliğini (Δf) belirleyen parametredir (Eşitlik 2.4). Aktif yüzeyin küçük olması dedektör elektronik band genişliğini, sistem veri transfer kapasitesini artıracaktır. Ancak seçilecek dedektör aktif yüzeyin, odaklama toleransından büyük olması gerekmektedir.

2.9 Veri Transfer Kapasitesi Artırma Teknikleri

OTİS belirtilen üstünlüklerinden dolayı radyolinklere alternatif olmakla birlikte ağ omurgalarında optik sinyalin dalga kılavuzu ile taşınması olan fiber optik uygulamalarına alternatif olabilmesi için fiber optiğin ulaştığı veri transfer kapasitelerine ulaşılması gerekmektedir.

OTİS'de veri transfer kapasitesi, Dalgaboyu Bölmeli Çoklama *(Wavelenght Division Multiplexing)* veya Zaman Bölmeli Çoklama *(Time Division Multiplexing)* teknikleri ile artırılabilir.

2.9.1 Dalgaboyu Bölmeli Çoklama (Wavelenght Division Multiplexing, WDM)

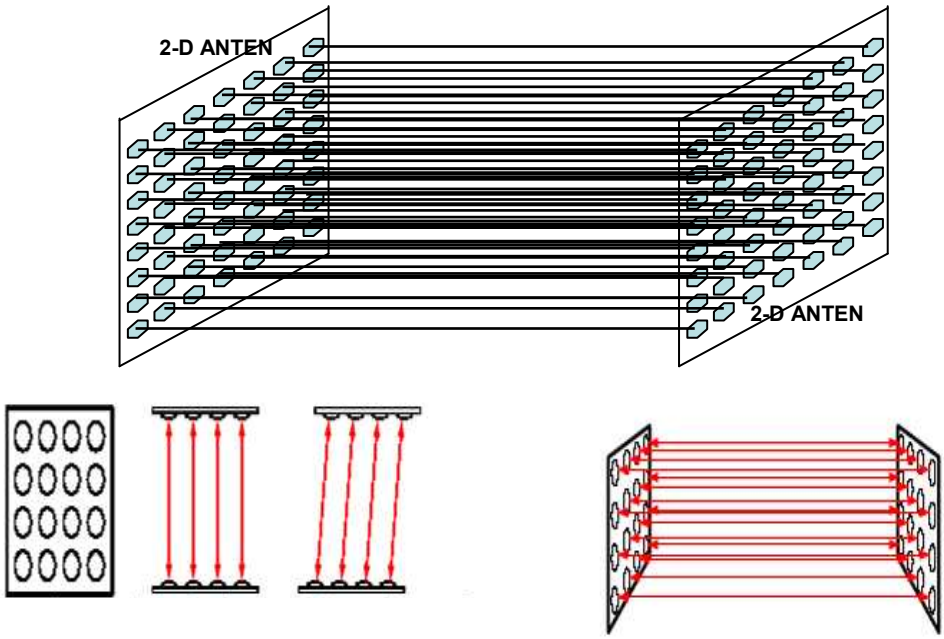
Dalga boyu bölmeli çoklama birden çok, ayrık ve bağımsız optik kanalın aynı ortamda aynı anda iletim tekniğidir. Tekniğin OTİS'ne iki farklı modelde uygulanabileceği değerlendirilmiştir.

İlk model optik sinyalin yüksek frekansı ve dar demet açısı ile sıkışık uzaysal kullanılabilirlik özelliğinden faydalanılarak oluşturulan mimari yaklaşım modelidir. Bu modelde iletim hattındaki transfer kapasitesi sabit tutulup gönderici-alıcı mimarisi çoklanmaktadır. Böylece birbirinden bağımsız optiksel telsiz kanaları oluşacak ve veri transfer kapasitesi oluşacak kanal sayısı ile doğru orantılı olarak artacaktır. Çok damarlı

fiber optiğin OTİS'e uygulaması olarak da düşünülebilir. Modelinin ana elamanı çok boyutlu anten formlarıdır.

Çok boyutlu (2-3 boyut) anten yapısında birbirine paralel optiksel telsiz kanalları *(Free Space Optic Channel)* bulunmaktadır. Çok kanallı bu tip anten yapıları sayesinde veri transfer kapasitesi de teorik olarak kanal sayısı ile doğru orantılı artacaktır. Bu yapı birbirine paralel, uzaysal konum farklılığı bulunan, açısal fark bulunmayan optik telsiz kanallarından oluşan 2 boyutlu düzlemsel bir yapı olabileceği gibi, aralarında açısal farklılık da bulunan 3 boyutlu bir yapı da olabilir.

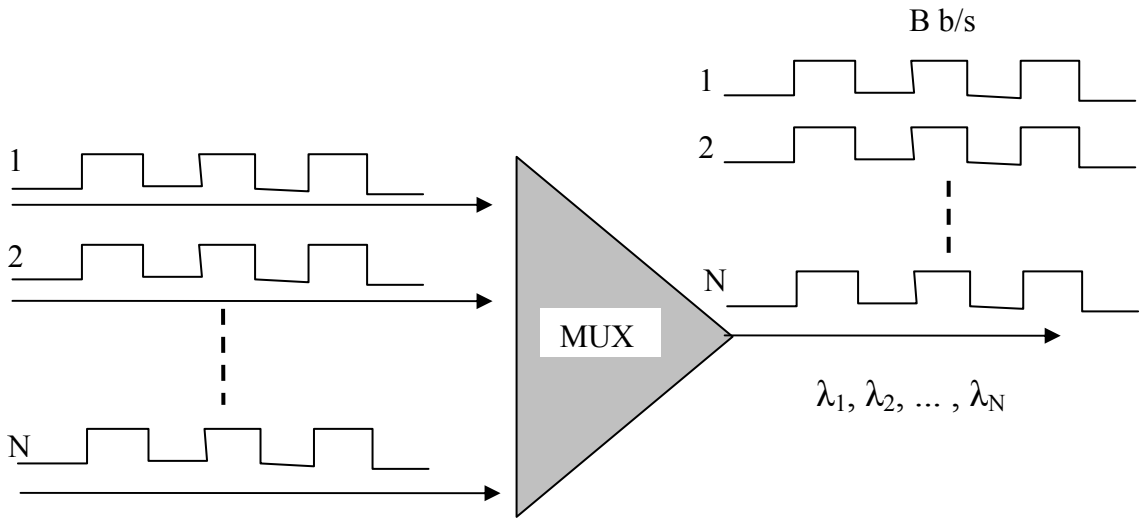
2 boyutlu anten yapısı Şekil 2.12'de görülmektedir. Yapı, dedektör ve ışıma kaynağı ile optik bileşenlerden oluşan optiksel telsiz hücrelerinden meydana gelmektedir.



Şekil 2.12 İki boyutlu anten yapısı (http://www.poisson.ecse.rpi.edu, 2005)

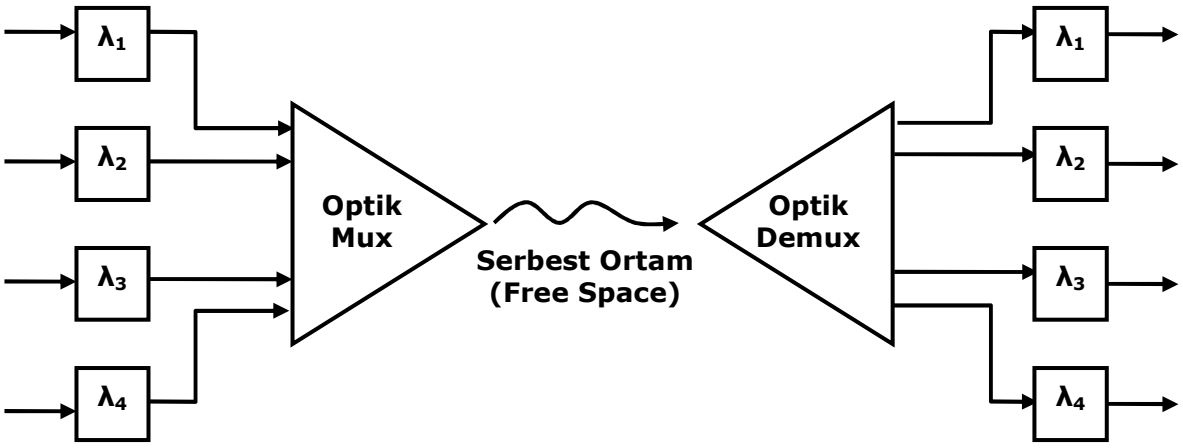
2-D anten tasarımında en önemli problem eş kanalların yol açabileceği girişim problemidir. Dolayısıyla tasarım parametrelerinin girişimi engelleyecek şekilde seçilmesi gerekmektedir.

İkinci model ise fiber optikte başarı ile uygulanan farklı dalga boylarındaki ışımaların birleştirilerek iletilmesi modelidir. İlk uygulaması 1980 lerin başında 850 ve 1300 nm dalga boylarındaki iki farklı taşıyıcıyla yapılan yöntem, temel olarak birden çok dalgaboyundaki ışımanın aynı ortamda iletilmesi konseptine dayanmaktadır (Şekil 2.13). Beyaz ışığın prizmadan geçirilerek farklı renkteki ışık dalga boylarındaki bileşenlere ayrılması konunun anlaşılması açısından örnek olarak gösterilebilir.



Şekil 2.13 Dalgaboyu bölmeli çoklama (Ramaswami 1998)

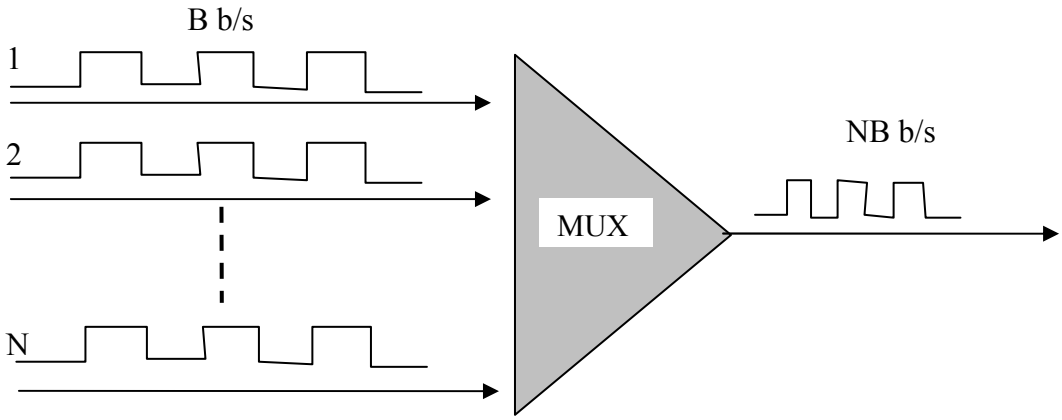
Bu modelde veri transfer kapasitesi, kullanılan dalga boyu sayısıyla aynı oranda artacaktır. Modelin OTİS'ne Şekil 2.14'deki gibi uygulanabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 2.14 Dalgaboyu bölmeli çoklamanın OTİS'e uygulanması

2.9.2 Zaman Bölmeli Çoklama (Time Division Multiplexing, TDM)

Bilinen zaman bölmeli çoklama algoritmasından farklı olarak optik taşıyıcı için zaman bölmeli çoklama yönteminde iletim kanalında iletilen veri oranı arttırılır. İletim kanalı sabittir. Birden çok düşük bit oranlarındaki veri katarı, daha yüksek bit oranındaki veri katarının içinde çoklanır (Şekil 2.15). Tekrar oluşturma güçlüğü veri oranının arttırabileceği seviyeyi kısıtlamaktadır. Sinyali tekrar üretme ihtiyacı oluşur (Ramaswami 1998).



Şekil 2.15 Zaman bölmeli çoklama (Ramaswami 1998)

Bu modelin OTİS'ne uygulanması veri transfer kapasitesini kısıtlayan dedektör band genişliğinin optoelektronik yöntemler ile iyileştirilmesi ile mümkün olacaktır.

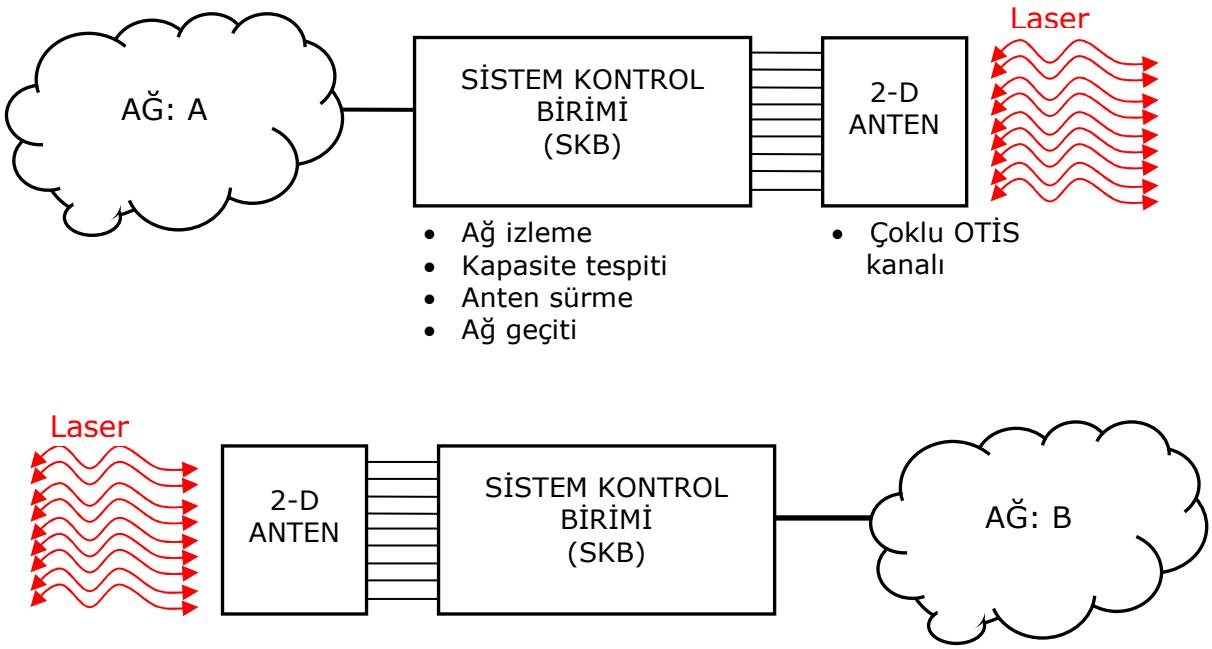
Tez çalışmasında dalgaboyu bölmeli çoklama tekniği mimari yaklaşım modeli ile gerçeklenmiştir. Modelde 2-D anten kullanılmıştır. Model için tasarım parametreleri ortaya konmuş ve model örnek bir sistem üzerinde gerçeklenmiştir. Tespit edilen optimum parametreler ile optimum veri transfer kapasitesine ulaşılmıştır. Tezde izlenen yöntem Şekil 2.16 da sunulmuştur.



Şekil 2.16 Tezde izlenen yöntemin akış diyagramı

3. ARAŞTIRMA ve BULGULAR

3.1 Yüksek Veri Transfer Kapasiteli Sistem Tasarımı



Şekil 3.1 Sistem modeli

Tasarlanan sistem modeli Şekil 3.1'de görülmektedir. Ultra yüksek veri transfer kapasitesi ihtiyacı olan iki ağ omurgası arasında oluşmuş boşluğu doldurabilecek bu model;

- Sistem kontrol birimi ve
- 2 Boyutlu Anten olmak üzere iki ana alt sistemden oluşmaktadır.

Sistem kontrol birimi, ağı izleyen, ihtiyaç duyulan veri transfer kapasitesini tespit eden ve bu doğrultuda optiksel telsiz kanallarını süren birim olarak değerlendirilmiştir. Böylece SKB, ağ izleme yazılım ve donanımları ve OTİS' de yer alan, enkoder-dekoder, modülatör-demodülatör ve ışıma kaynağı sürücü devreleri ile data ağı-optiksel telsiz ağı arasında ağ geçitliği *(gateway)* yapacaktır.

Tasarım modelinde sistem kanalları transparan yapısı sayesinde birbirlerinden bağımsızdır. Her bir kanalda ayrı bir transfer protokolü uygulanabilecektir. Böylece sistem veri transfer kapasitesi tüm kanalların transfer kapasitelerinin toplamına eşit olacaktır.

Sistem, 9 optiksel telsiz kanalı ve 2 farklı dalga boyundaki optik taşıyıcı için optimize edilmiştir. Optimizasyon; uygulanabilir anten boyutları, kullanılabilecek optik sinyal dalga boyları, aynı dalga boylarındaki sinyallerin girişim sorunları, dedektör ve optik bileşenler dikkate alınarak yapılmıştır.

3.2 Sistem tasarım parametreleri

Sistem tasarımı için belirleyici parametreleri sırasıyla;

- Vericilerdeki ışıma kaynaklarının dalga boyları ($\boldsymbol{\lambda_1}$, $\boldsymbol{\lambda_2}$, **…**)
- Kullanılacak ışıma kaynaklarının tipleri (LED&LASER)
- Işıma kaynağının demet açısı α
- Işıma kaynağının gücü P_{Tx}
- İletim uzaklığı L
- Alıcıda kullanılacak merceklerin yüzey alanları (S_{Rx})
- Alıcıdaki filtrelerin tipleri (BPF, NF v.b.)
- Alıcı dedektörlerin tipleri (PIN&APD)
- Alıcı dedektörlerin spesifikasyonları (Duyarlılık, kapasitans, aktif yüzey v.b.)

olarak belirlenmiştir.

Işıma dalga boyları

Sistemde kullanılabilecek dalga boyları ve sayıları seçilirken şu kriterler dikkate alınmıştır:

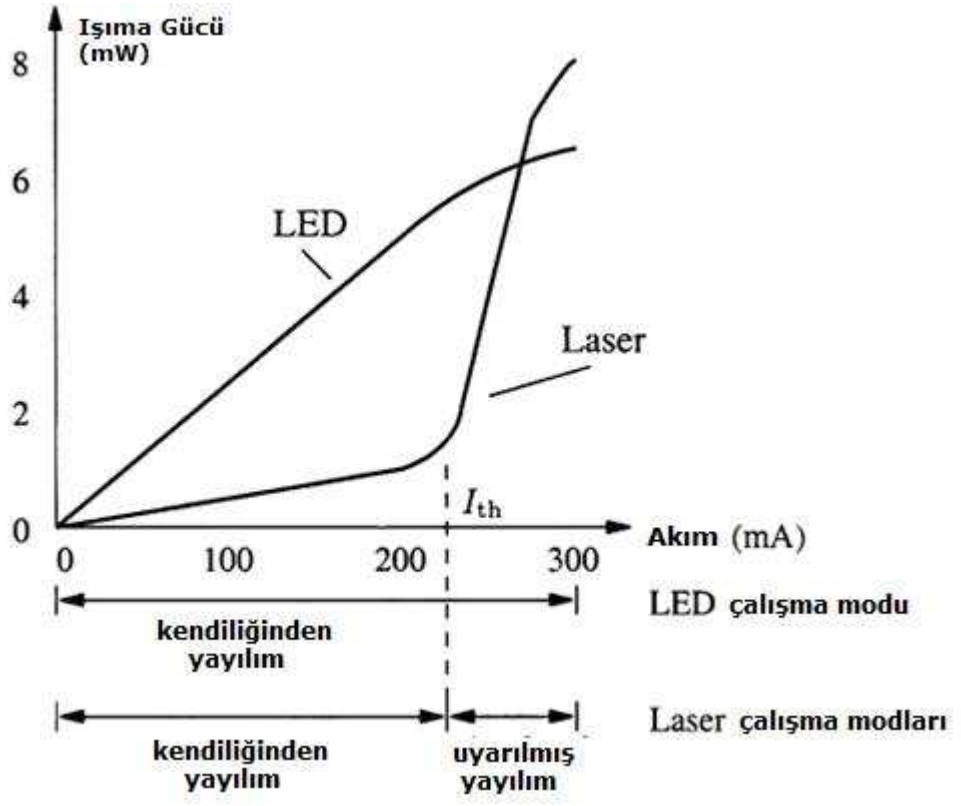
- Atmosferik iletim pencereleri
- OTİS'de kullanılan 780–850 nm ve 1520–1600 nm IR bandları
- Kolay temin edilebilirlik
- Optoelektronik bileşen
- Maliyet

Bu kriterler doğrultusunda tasarım modelinde, her band için bir dalga boyu olmak üzere OTİS'de yaygın olarak kullanılan λ_1=850 nm, λ_2=1550 nm boylarının kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Bu bandlar içinde 2'den fazla dalgaboyu seçmek mümkün olmakla birlikte, birbirine yakın dalgaboyları için kullanılacak filtreler dikkate alındığında 2'den fazla dalga boyu, mekanik ve sistem geometrisi açısından kolay uygulanabilir görülmemiştir.

İlk band aralığında birçok ticari firma tarafından laser kaynakları üretilmektedir. 850 nm de ucuz, yüksek verimli ve güvenilir gönderici/alıcı tedariki mümkündür. Bu bandda kısıtlayıcı etken göz güvenliğidir ve gücün belli bir seviyede tutulması gerekmektedir. 850 nm için belirlenen maksimum ışıma gücü 160 mW olarak belirlenmiştir. İkinci band aralığı ise, yüksek kaliteli gönderici ve uygun dedektör yapımı sonucunda OTİS'de kullanılmaya başlamıştır. Bununla birlikte bu bandda çalışan optoelektronik bileşenler genellikle daha pahalı, optik dedektörler daha az hassas ve daha küçük aktif yüzeye sahiptirler. Seçilen 1550 nm dalgaboyu insan gözünde kornea bölgesinde yansıtıldığı için sağlık açısından daha az zararlıdır ve dolayısı ile kullanılabilecek güç daha yüksek olabilir. 1550 nm için belirlenen maksimum ışıma gücü 8 W olarak belirlenmiştir (Arı 2006).

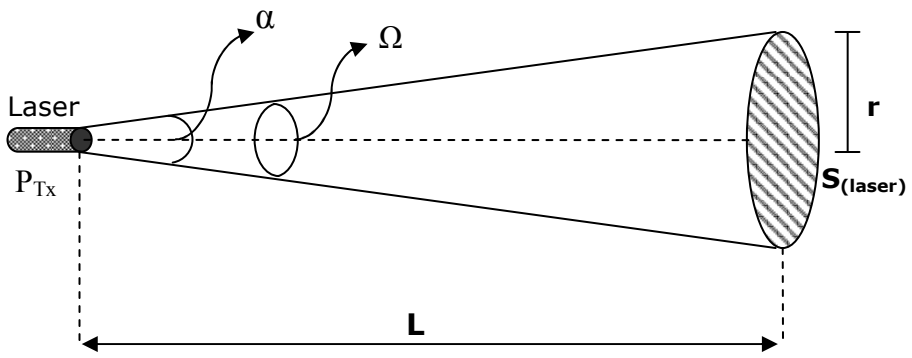
Işıma kaynağı tipi

Seçimde demet açısı, en belirleyici etken olarak ortaya çıkmaktadır. Aynı dalga boyundaki optik sinyali eş kanalda tekrar kullanma zorunluluğu dar demet açısını gerekli kılmıştır. Laser diyotlar LED'lere göre daha dar açılı demet yayılımları yaptıklarından örnek sistem tasarım modelinde laser diyotlar tercih edilmelidir. Sistemde iki dalga boyu içinde ışıma kaynağı olarak dairesel kesitli ışıma yapan laser diyotun kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca Şekil 3.2 de görüldüğü üzere laser diyotların yüksek ışıma güçleri sistem iletim kaybı toleransını *(Link Margin)* iyileştirmek bakımından önemlidir.



Şekil 3.2 Laser diyot ile LED'in sürme akımı ile ışıma güçlerini gösterir bir örnek (Majumdar and Ricklin 2008)

Birbirine yakın eş kanallar arasında girişim olmaması için alıcıya ulaşan ışıma dağılımının mümkün olduğu kadar küçük olma zorunluluğu vardır. Demet kesit şekli dairesel olan bir laser ışıma kaynağı için optik ışıma yapısı Şekil 3.3'de sunulmuştur.



Şekil 3.3 Dairesel demetli laser kaynağı için geometri

Şekilden görüldüğü üzere alıcıya ulaşan ışıma dağılımın girişim olmaması için küçük olması gerekmektedir. Bundan dolayı tasarım modelinde kaynak olarak dar demet açılı Laser diyot kullanılmalıdır ($\alpha \leq 1$ mrad).

Laserin demet açısı (α, radyan) eşitlik 3.1 de verilmiştir.

$$\alpha = \frac{2r}{L} \tag{3.1}$$

Laser ışımanın yayıldığı katı açı (Ω, steradyan) eşitlik 3.2'de görülmektedir.

$$\Omega = \frac{S_{(laser)}}{L^2} = \frac{\pi r^2}{L^2} = \frac{\pi \alpha^2}{4} \qquad S_{(laser)}: \text{Kesit Alanı} \tag{3.2}$$

Işıma kaynağının demet açısı: α

Seçilecek ışıma demet açısı, sistem iletim uzaklığını (menzil), eş kanalların birbirine uzaklığını, 2 boyutlu anten yapısını belirleyeceğinden önemlidir. Laser kaynak için 0,1mrad ile 3 mrad aralığındaki demet açılı ışımalar 100–500 m iletim uzaklığı için incelenmiş ve bulgular Çizelge 3.1'de sunulmuştur. Alıcıya ulaşan laser ışıma kesit alanının iletim uzaklığı ve laser demet açısına göre değişimi Şekil–3.4'de verilmiştir. Hesaplama yapılırken 1 mrad demet açılı ışımanın 1 km iletim uzaklığındaki kesit alanı referans alınmıştır.

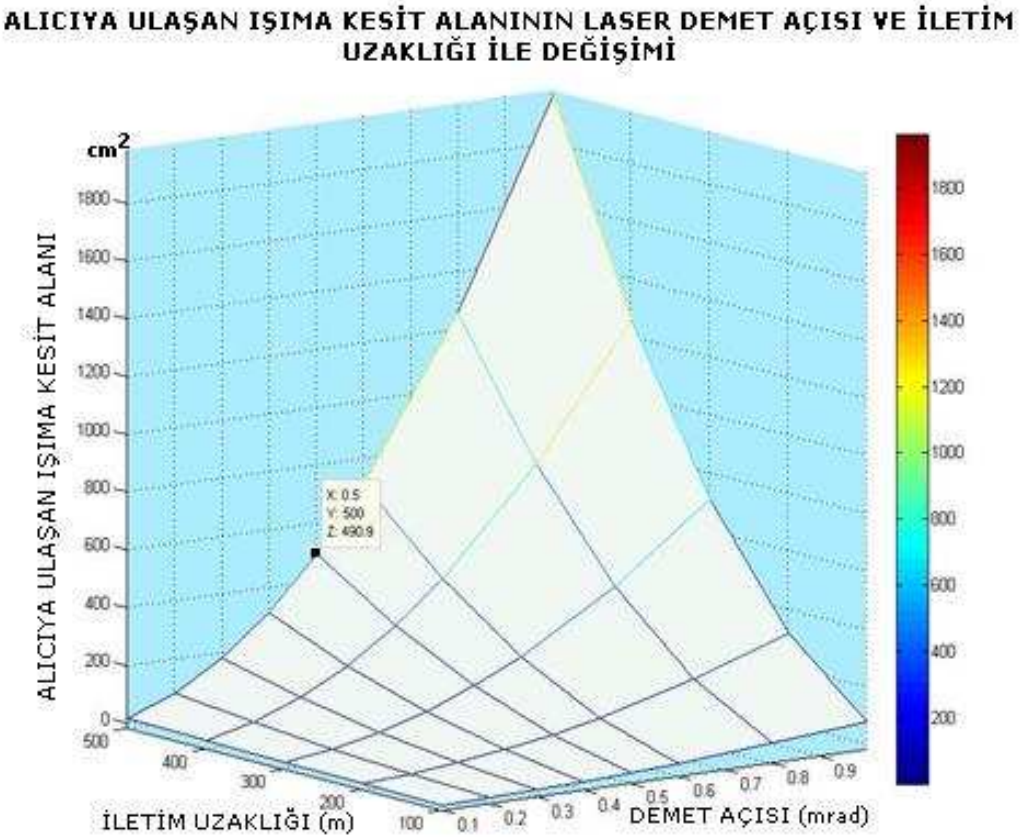
Çizelge 3.1 Alıcıya ulaşan ışımanın demet açısı ve iletim uzaklığına göre değişimi

Demet Açısı (mrad)		İletim Uzaklığı (L) (m)	Verici Dağılım Çapı (D_{Tx}) (cm)	Alıcıya Ulaşan Işıma Alanı (S_{AL}) (cm²)	Demet Açısı (mrad)		İletim Uzaklığı (L) (m)	Verici Dağılım Çapı (D_{Tx}) (cm)	Alıcıya Ulaşan Işıma Alanı (S_{AL}) (cm²)
(α)	(α/2)				(α)	(α/2)			
1 mrad	**0,5 mrad**	**1.000**	**100**	**7.854**	**1 mrad**	**0,5 mrad**	**1.000**	**100**	**7.854**
3 mrad	1,5 mrad	100	30	706,9	0,5 mrad	0,25 mrad	100	5	19,6
		200	60	2.827,4			200	10	78,5
		300	90	6.361,7			300	15	176,7
		400	120	11.309,8			400	20	314,2
		500	150	17.671,5			500	25	490,9
2 mrad	1 mrad	100	20	314,2	0,4 mrad	0,2 mrad	100	4	12,6
		200	40	1.256,6			200	8	50,3
		300	60	2.827,4			300	12	113,1
		400	80	5.026,6			400	16	201,1
		500	100	7.854,0			500	20	314,2
1 mrad	0,5 mrad	100	10	78,5	0,3 mrad	0,15 mrad	100	3	7,1
		200	20	314,2			200	6	28,3
		300	30	706,9			300	9	63,6
		400	40	1.256,6			400	12	113,1
		500	50	1.963,5			500	15	176,7
0,8 mrad	0,4 mrad	100	8	50,3	0,2 mrad	0,1 mrad	100	2	3,1
		200	16	201,1			200	4	12,6
		300	24	452,4			300	6	28,3
		400	32	804,2			400	8	50,3
		500	40	1.256,6			500	10	78,5
0,6 mrad	0,3 mrad	100	6	28,3	0,1 mrad	0,05 mrad	100	1	0,8
		200	12	113,1			200	2	3,1
		300	18	254,5			300	3	7,1
		400	24	452,4			400	4	12,6
		500	30	706,9			500	5	19,6

Işıma kaynağının gücü: P_{TK}

Işıma gücünün aşağıdaki kriterler doğrultusunda λ_1=850 nm λ_2=1550 nm için 50 mW (17 dBm) ile sınırlı tutulmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Işıma gücü seçiminde aşağıdaki kriterler dikkate alınmalıdır:

- İletim kaybı toleransı *(link margin)*
- İletim uzaklığı ≤ 500 m
- Göz güvenliği ≤100 mW
- Maliyet



Şekil 3.4 Alıcıya ulaşan laser ışıma kesit alanının demet açısı ve iletim uzaklığı ile değişimi

İletim uzaklığı: L

500 m mesafenin üzerindeki iletim uzaklıkları alıcıya ulaşan ışıma alanı (S_{At}) uygulanabilir demet açıları için (3–0,1 mrad) tasarlanabilecek anten yapıları açısından büyük olacağından dikkate alınmamalıdır. Dolayısıyla iletim uzaklığı (L) 500 m ile sınırlı tutulması tasarım modeli için uygundur. Örnek sistem modeli kampüs uygulamaları için kullanılabilir yapıdadır. Modelde atmosferik kayıplar belirtilen iletim uzaklığı için düşük olacaktır.

Alıcı mercek

Tasarım modeli için kullanılabilecek alıcı mercekler EK 2'de belirtilmiş olup, tasarım dalgaboyları için geçirgenlikleri (≥%70) yüksektir. Mercek yüzey alanı (S_{Rx}) ise eş kanalların girişim durumları, kayıplar dikkate alınarak seçilmelidir.

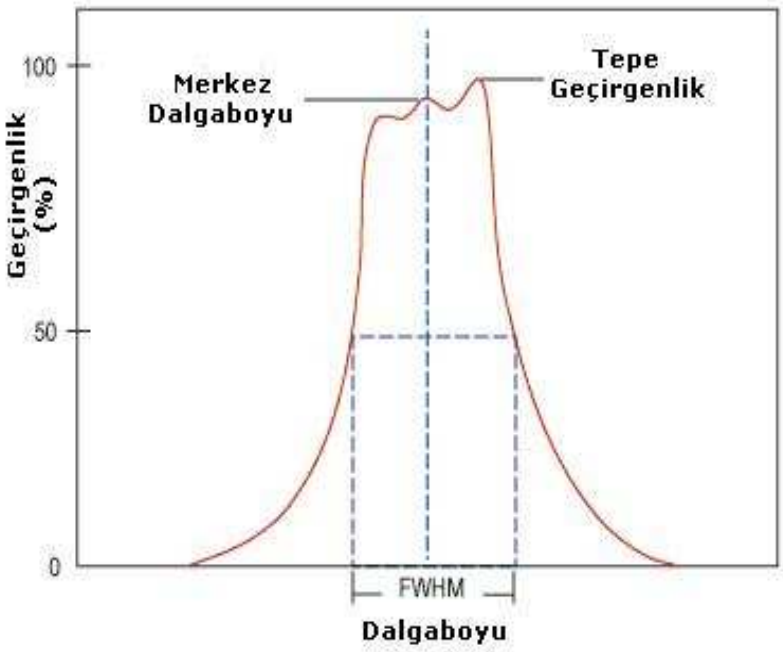
Yüzey alanının büyük olması geometrik, türbülans parıldama (*scintillation)* kayıplarını azaltacağı gibi anten boyutlarını ve eş kanal girişimini artıracaktır. Bu doğrultuda uygulanabilecek alıcı mercek yüzey alanları Çizelge 3.2'de incelenmiştir. Çizelgede verilen kanal sayıları Şekil 3.7'de sunulan 2-boyutlu anten yapısı dikkate alınarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.2. Alıcı mercek yüzey alanı ve kanal sayısı

Alıcı Mercek			Kanal Sayısı (En Fazla)
Çapı (D_{Rx}) cm	Yarıçapı ($D_{Rx}/2$) cm	Yüzey Alanı (S_{Rx}) cm^2	
1	0,5	0,8	625
2	1,0	3,1	156
3	1,5	7,1	69
4	2,0	12,6	39
5	2,5	19,6	25
6	3,0	28,3	17
7	3,5	38,5	13
8	4,0	50,3	10
9	4,5	63,6	8
10	5,0	78,5	6

Optik filtre

2 dalgaboyu kullanılarak tasarlanan örnek sistem modelinde her iki dalga boyu için 2 ayrı optik filtrenin uygulanabileceği değerlendirilmiştir. Teknik özellikleri EK 3'de verilen optik filtreler band geçiren filtrelerdir. Optik filtrenin band genişliği *(Full Width at Half Maximum, FWHM)* geçirgenliğin tepe değerinin %50'sine düştüğü dalgaboyları arasındaki band olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.5). Optik filtrelerin 850 nm için band genişliği 70nm, 1550 nm için ise 30 nm ve geçirgenlik ise her iki dalgaboyu için >%70'dir.



Şekil 3.5 Band geçiren filtre band genişliği

Dedektör tipi ve özellikleri

Örnek sistem tasarım modelinde seçilen 850 nm ve 1550 nm dalgaboyları için kullanılabilecek dedektörler Çizelge 3.3'de incelenmiştir. Kısa mesafede yüksek veri transfer kapasitesi erişimi öncelikli sistem gereksinimi olarak değerlendirilmelidir. Uygulanabilir aktif yüzey dikkate alınmalıdır. İletim kaybı toleransı dolayısıyla dedektör gürültü akımı ve algılayabilirlik ikinci öncelik olacaktır. Kolay temin edilebilirlik, besleme gerilimi ile maliyet etkenleri ve yukarıdaki değerlendirmeler doğrultusunda 850 nm için Siemens BP34 W, 1550 nm için ThorLabs FGA10 dedektörlerin tasarım modelinde kullanımın uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.3 Dedektörler ve teknik özellikleri

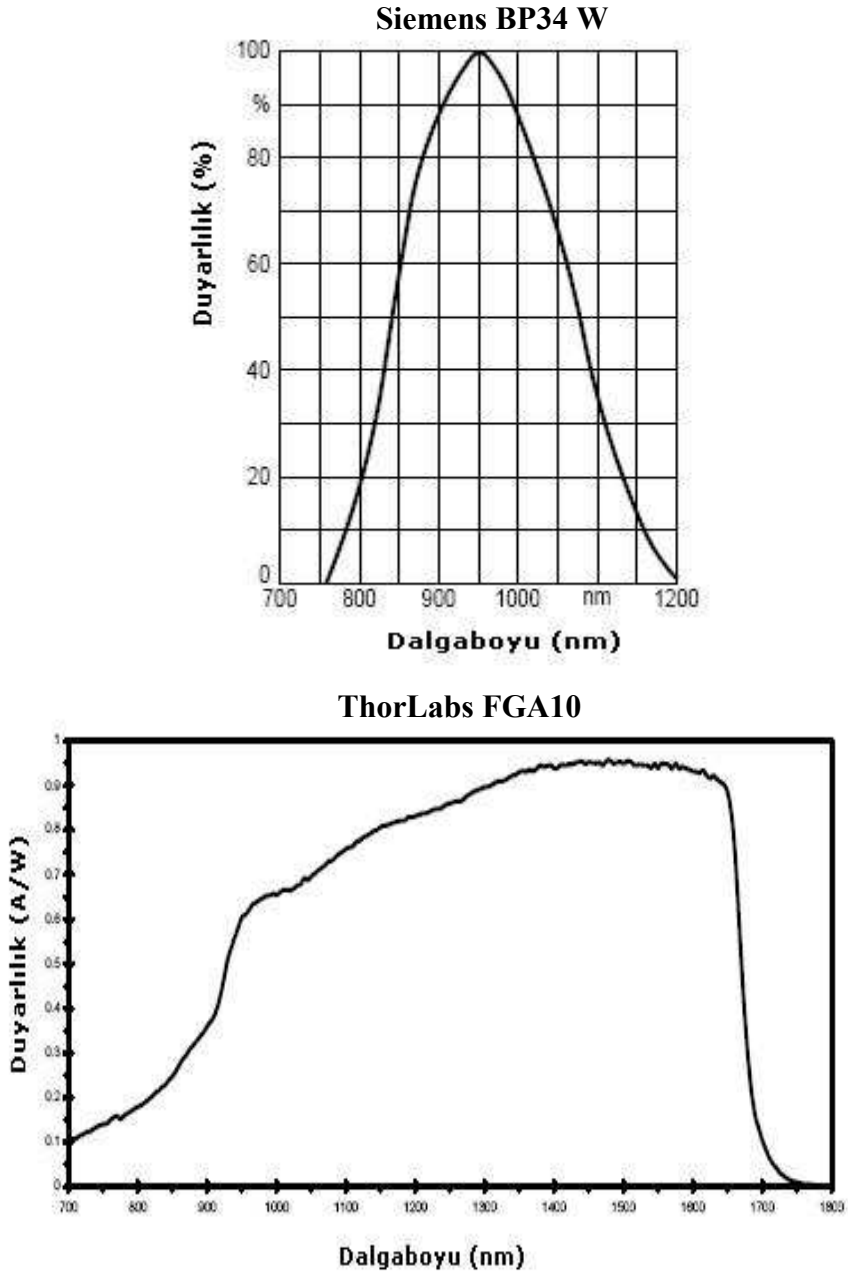
λ_{M}=850 nm

Tipi	Üretici	Tanım	Spektral Duyarlılık λ (nm)	Duyarlılık R (A/W) 850 nm	Besleme Gerilimi (V)	Aktif Çapı (mm)	Aktif Yüzey (mm^2)	Kapasitans C (pF)	Bangenişliği f_{MAX} (MHz) R_L:50Ω	Veri Transfer Kapasitesi (Mbps)
Si PIN	HAMAMATSU	S9055	320-1000	0,25	2	0,2	0,03	0,8	3979	7958
Si PIN	THORLABS	FDS02	400-1100	0,35	5	0,25	0,05	0,94	3386	6773
Si PIN	THORLABS	FDS010	200-1100	0,35	10	1,02	0,8	2	1592	3183
Si PIN	HAMAMATSU	S10783	330-1040	0,45	2,5	0,8	0,5	4,5	707	1415
Si PIN	HAMAMATSU	S10784	340-1040	0,45	2,5	3	7,1	4,5	707	1415
Si PIN	HAMAMATSU	S3883	320-1000	0,6	20	3	7,1	6	531	1061
Si PIN	HAMAMATSU	S3072	320-1060	0,57	24	3	7,1	7	455	909
Si PIN	HAMAMATSU	S1722-02	190-1100	0,45	100	4,1	13,2	10	318	637
Si PIN	HAMAMATSU	S2506	320-1100	0,53	12	---	7,7	15	212	424
Si PIN	HAMAMATSU	S3071	320-1060	0,57	24	5	19,6	18	177	354
Si PIN	SIEMENS	BP34W	780-1100	0,55	5	---	7	18	177	354
Si PIN	HAMAMATSU	S3399	320-1000	0,6	10	3	7,1	20	159	318
Si PIN	HAMAMATSU	S6775	320-1100	0,6	10	---	26,4	40	79,6	159
Si PIN	HAMAMATSU	S3590	320-1100	0,6	70	---	100	40	80	159
Si PIN	HAMAMATSU	S6967	320-1060	0,63	10	---	26,4	50	64	127
Si PIN	HAMAMATSU	S9195	320-1000	0,47	10	---	25	60	53	106
Si PIN	THORLABS	FDS1010	400-1100	0,6	5	---	94	375	8,5	17

λ_{M}=1550 nm

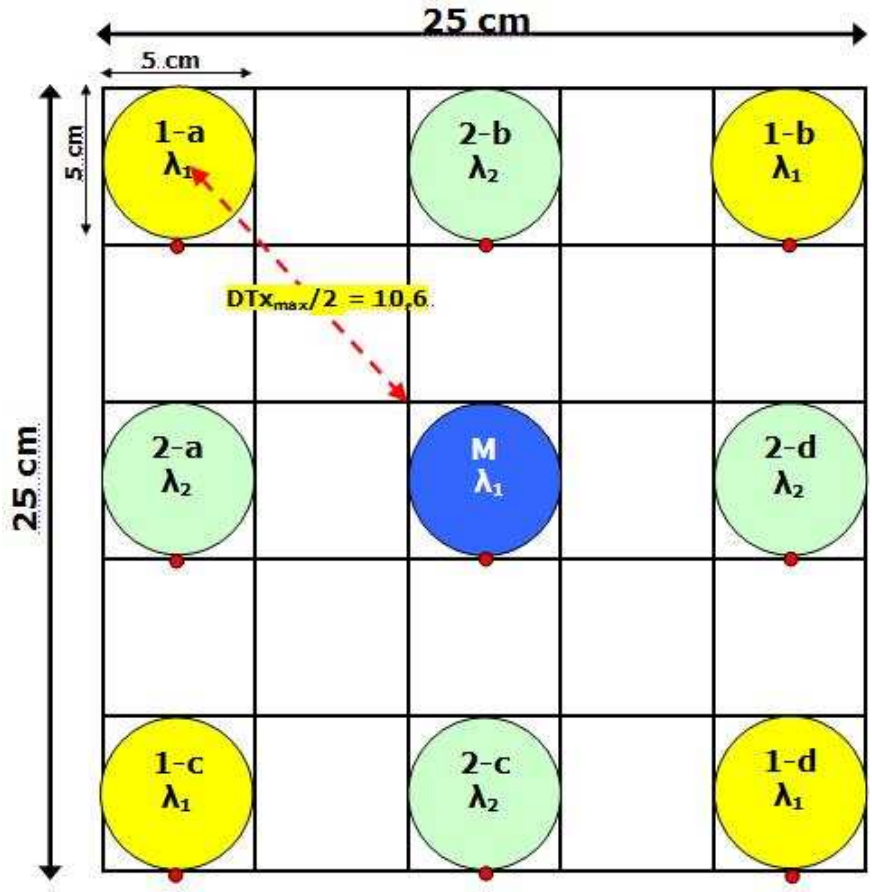
Tipi	Üretici	Tanım	Spektral Duyarlılık λ (nm)	Duyarlılık R (A/W) 1550 nm	Besleme Gerilimi (V)	Aktif Çapı (mm)	Aktif Yüzey (mm^2)	Kapasitans C (pF)	Bangenişliği f_{MAX} (MHz) R_L:50Ω	Veri Transfer Kapasitesi (Mbps)
InGaAs PIN	THORLABS	FGA04	800-1800	0,9	5	0,1	0,01	0,7	4547	9095
InGaAs PIN	HAMAMATSU	G8195	900-1700	0,95	5	0,9	0,6	1	3183	6366
InGaAs PIN	HAMAMATSU	G9801	900-1700	0,95	5	0,9	0,6	1	3183	6366
InGaAs APD	HAMAMATSU	G8931-20	900-1700	0,9	10	0,2	0,03	5	637	1273
InGaAs PIN	THORLABS	FGA10	700-1800	0,9	5	1	0,8	40	80	159
InGaAs PIN	PerkinElmer	C30641G	900-1700	0,95	2	1	0,8	40	80	159
InGaAs PIN	HAMAMATSU	G10889-01K	500-1700	1	5	1	0,8	50	64	127
InGaAs PIN	THORLABS	FGA20	1200-2600	0,5	1	1	0,8	200	16	32
InGaAs PIN	HAMAMATSU	G10889-02K	500-1700	1	2	2	3,14	250	13	25
InGaAs PIN	HAMAMATSU	G10889-03K	500-1700	1	2	3	7,1	500	6	13
Ge PIN	THORLABS	FDG05	800-1800	0,8	5	5	19,6	3000	1	2

EK 4−5'de teknik özellikler dokümanları verilen dedektörlerin dalgaboyu-duyarlılık grafikleri Şekil 3.6'da sunulmuştur.



Şekil 3.6 Dedektör dalgaboyu-duyarlılık grafikleri

3.3 İki Boyutlu (2D) Anten



Şekil 3.7 Örnek sistem modeli iki boyutlu anten yapısı

Tasarlanan sistemde kullanılabilecek 2 boyutlu anten Şekil 3.7'de görülmektedir. Bu yapı, 9 optiksel telsiz kanalı ve 2 farklı dalga boyu ile modellenmiştir. Anten boyutlarının 25x25 cm olarak uygulanabilir bir yapıda olmak üzere toplam 625 cm^2 lik bir yüzey alanında olmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Toplam anten yüzeyi 5x5 cm lik (25 cm^2 lik) toplam 25 optiksel telsiz kanal hücresine ayrılabilecektir. Amaç bu yüzeye olabildiğince çok hücre yerleştirmek olmakla birlikte, kullanılacak ışıma kaynaklarının demet açıları, iletim uzaklığı, merceklerin çapları ve aynı dalga boylarını kullanan hücrelerde girişim durumları dikkate alındığında 25 olan hücre sayısı 9'a indirilmesi uygun olacaktır. Bu formda iki eş kanal hücresi arası minimum aralık $3/2(5\sqrt{2})$ = 10,6 cm olarak gerçekleşmiştir. Bu parametre eş kanal girişimi için önemli bir parametredir. Bu doğrultuda seçilecek demet açısına göre girişim olmadan ulaşılabilecek maksimum iletim uzaklığı Çizelge 3.1'de görülmektedir.

Sistem kontrol birimi optiksel telsiz kanallarını sırasıyla λ_1 dalgaboyunda çalışan merkez kanal, λ_2 dalgaboyunda çalışan 2-a, 2-b, 2-c, 2-d kanallarını ve son olarak yine λ_1 dalgaboyunda çalışan 1-a, 1-b, 1-c, 1-d kanallarını sürecektir Böylece sistemin uyarlanabilir bir yapıya kavuşması hedeflenmiştir.

Antende yer alan merceklerin çapı hücre yapısına uygun olarak 5 cm belirlenmiştir. Verici ışıma kaynağı dar demet açısı gereksiniminden dolayı noktasal olarak alınmalıdır. Dolayısıyla vericide herhangi bir optik bileşen kullanılmaması uygun olacaktır.

3.4 Optimizasyon

Belirlenen tasarım parametreleri ve seçim kriterleri doğrultusunda elde edilebilecek optimum sistem Çizelge 3.4'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.4 Sistem optimizasyonu

SİSTEM TASARIM PARAMETRELERİ			
Uygulama Alanı		Kampüs (Dış-İç ortam)	
İletim Uzaklığı (Maks.)		500 m	
GÖNDERİCİ	**Tipi**	Yarıiletken Laser	
	Işıma Gücü	50 mW (17 dBm)	
	Demet Açısı	0,5 mrad	
	Dalga Boyu	λ_1	850 nm
		λ_2	1550 nm
ALICI	**Dedektör**	Silicon PIN	780-1100 nm
		InGaAs PIN	700-1800 nm
	Toplayıcı Mercek	Geçirgenlik ≥%90	Çap:5 cm
	Filtre	BPF: 850nm	70nm
		BPF: 1550nm	30nm
2-D Anten Yüzey Alanı		625 cm^2	
Optiksel Telsiz Kanalı		9	

3.5 Sistem Veri Transfer Kapasitesi

Sistemde ulaşılabilecek maksimum veri transfer kapasitesi Eşitlik 3.3'de verilmiştir.

$$B = C_1T_1 + C_2T_2 \tag{3.3}$$

burada

C_1: λ_1 dalgaboyu için kanal sayısı

T_1: λ_1 dalgaboyu kanal başına veri transfer kapasitesi (bps)

C_2: λ_2 dalgaboyu için kanal sayısı

T_1: λ_2 dalgaboyu kanal başına veri transfer kapasitesi (bps)

Optiksel telsiz kanallarında kanal başına ulaşılabilecek veri transfer kapasitesini etkileyen en önemli faktör dedektör elektronik band genişliğidir (Eşitlik 3.4).

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi R_L C} \qquad T=2 \text{ x } \Delta f \tag{3.4}$$

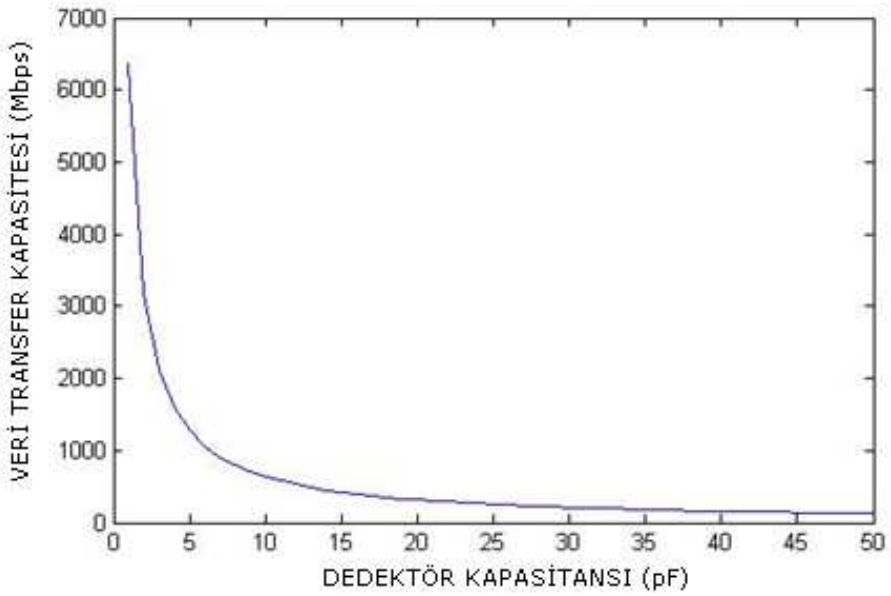
burada

C: Kapasitans (F)

T: Veri transfer kapasitesi (bps)

R_L: Yük direnci (ohm)

Elektronik band genişliği kapasitansın indirgenmesiyle arttırılabilir. Eşitlik 3.5 incelendiğinde bunun dedektör aktif yüzeyinin (A) indirgenmesiyle veya ters besleme geriliminin (V) artırılmasıyla elde edilebileceği görülmektedir. Dedektör kapasitansı ne kadar küçük olursa dedektör elektronik band genişliği (Δf) o kadar büyük olacaktır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Veri transfer kapasitesinin dedektör kapasitansı ile değişimi

$$C = \frac{A}{2} (2.e.\varepsilon_r.\varepsilon_0.N_d)^{1/2} V^{-1/2} \qquad (3.5)$$

burada

A: Dedektör aktif yüzeyi

e: Elektron yükü (1.602×10^{-19} Coulomb)

ε_0: Boşluğun elektrik geçirgenliği (8.854×10^{-12} Fm^{-1})

ε_r: Nispi geçirgenlik

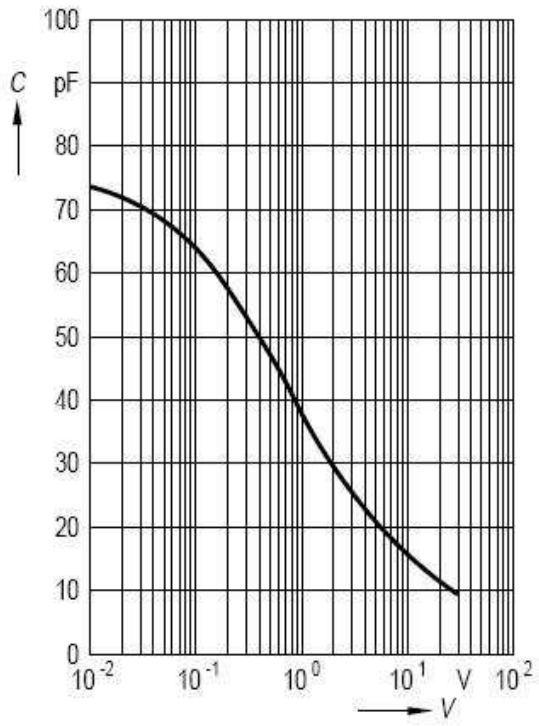
N_d: Zenginleştirme seviyesi

Bu iki yöntemin de optiksel telsiz uygulamaları açısından sınırlamaları bulunmaktadır. Aktif yüzeyin küçük tutulması alıcıda odaklama zorluğuna yol açacak ve odaklama kayıpları artacaktır. Besleme geriliminin artırılması ise ayrılma bölgesinin tabaka kalınlığını artırdığından elektronik bir limiti vardır. Dedektörler için besleme gerilimi kapasitans değişimi eğriler halinde teknik özelliklerinde belirtilir. Ayrıca yüksek besleme gerilimleri uygulama açısından zorluk yaratmaktadır. Dedektör seçimi bu kriterler dikkate alınarak yapılmalıdır.

λ_1 850 nm için seçilen Siemens BPW34 dedektörü besleme gerilimi Şekil 3.9'da gösterilmiş olup elektronik band genişliği ve veri transfer kapasitesi Eşitlik 3.6'da verilmiştir. Besleme gerilimi için 5 V Şekil 3.8 'den kapasitans 18 pF olarak alınmıştır.

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi R_L C} = \frac{1}{2\pi(50)(18x10^{-12})} = 177 \text{ MHz} \quad (3.6)$$

$$T=2x\Delta f = 2x177 = 354 \text{ Mbps}$$



Şekil 3.9 λ:850 nm dedektörü için kapasitansın besleme gerilimi ile değişimi

λ_2 1550 nm için seçilen ThorLabs FGA10 dedektörü için 5 V besleme gerilimi için kapasitans değeri 40 pF olarak verilmiş olup (EK 5) elektronik band genişliği ve veri transfer kapasitesi Eşitlik 3.7'de hesaplanmıştır.

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi R_L C} = \frac{1}{2\pi(50)(40x10^{-12})} = 80 \text{ MHz} \quad (3.7)$$

$$T=2\Delta f = 2x80 = 160 \text{ Mbps}$$

Eşitlik 3.3, 3.6 ve 3.7'den faydalanarak örnek sistem maksimum veri transfer kapasitesi (B) Eşitlik 3.8'de hesaplanmıştır.

$$B = C_1T_1 + C_2.T_2 = (5x354) + (4x160) = 2.4 \text{ Gbps} \quad (3.8)$$

3.6 Sistem İletim Kaybı

Sistem iletim kayıpları;

- Atmosferik kayıplar (zayıflatma, türbülans)
- Geometrik kayıp
- Optik ve odaklama kayıpları

olarak 3 ana başlık altında toplanmıştır. Kayıplar en kötü durum senaryosuna göre değerlendirilmiştir.

Sistem maksimum iletim uzaklığı 500 m olarak belirlendiğinden atmosferik zayıflatma, Çizelge 3.5 uyarınca görüş mesafesinin 500 m'ye düştüğü durum en kötü durum olarak değerlendirilmiş ve 17 dB olarak alınmıştır.

Türbülans etkisiyle olan maksimum iletim kaybı alıcı mercek yüzey alanı ve iletim uzaklığı ile değişmekle birlikte ticari bir ürün için Isaac Kim v.d. tarafından ampirik olarak yapılan bir çalışma esas alınarak 14 dB alınmıştır. Yine aynı çalışma esas alınarak maksimum odaklama kaybı ise 3 dB olarak belirlenmiştir (Kim *et al.* 1998).

Çizelge 3 5 Çeşitli hava koşulları altında görülebilirlik ve zayıflatma oranları

Hava durumu	Yağış	mm/saat	Görüş uzaklığı	dB/km kayıp
Yoğun sis			0 m	
			50 m	-339.6
Koyu sis			200 m	-84.9
Orta sis			500 m	-34.0
Hafif sis	Sağanak	100	770 m	-20.0
			1 km	-14.2
Seyrek sis	Aşırı yağmur	25	1.9 km	-7.1
			2 km	-6.7
Pus	Orta yağmur	12.5	2.8 km	-4.6
			4 km	-3.0

KAR

Örnek sistem modelinde kullanılan optik bileşenler (mercek ve filtre) için toplam maksimum optik kayıp %60 olarak belirlenmiştir (EK 2-3). Bu durumda maksimum optik kayıplar Eşitlik 3.9'da hesaplanmıştır.

$$Lo = 10 \log \frac{P}{P_0} = 10 \log (0.4) = 4 \text{ dB} \qquad (3.9)$$

burada

Lo: Optik kayıplar

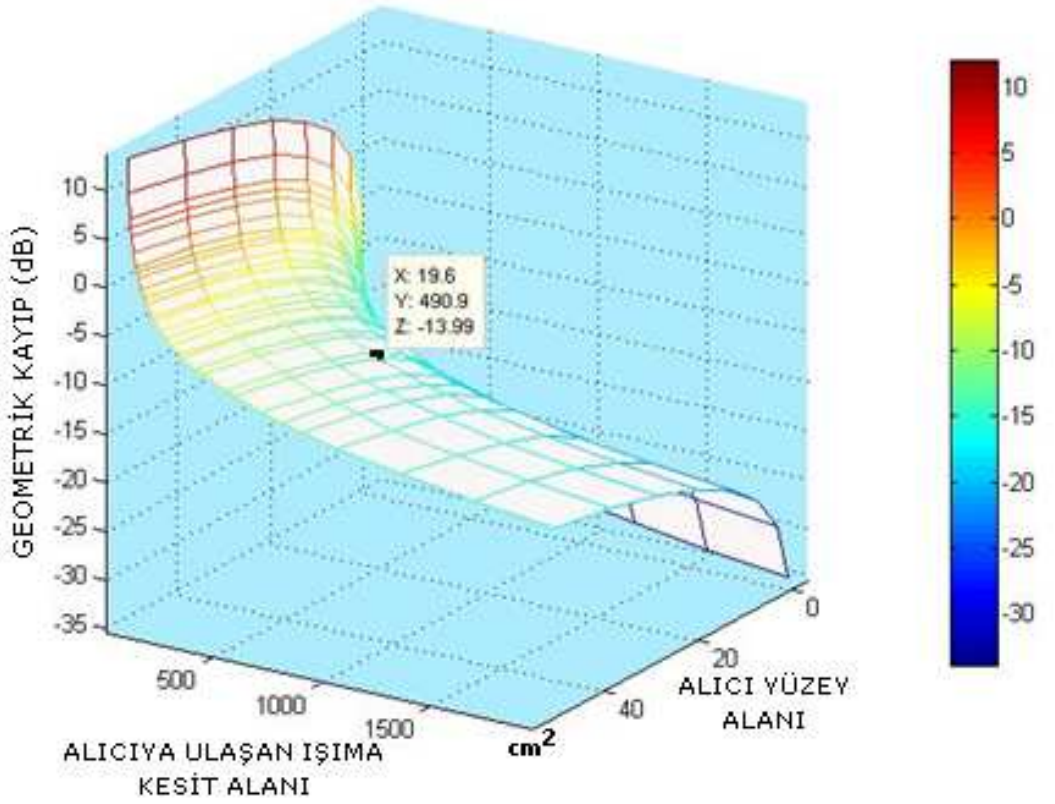
P_0: Gelen ışıma gücü

P: Optik bileşenlerden geçen ışıma gücü

Çizelge 3.6'da gönderici laser demet açıları ve alıcı mercek yüzey alanları için geometrik kayıp incelenmiştir. 0.5 mrad demet açısı, 500 m maksimum iletim uzaklığı ve 5 cm alıcı mercek çapı için tasarlanan örnek sistem modelinde, maksimum geometrik kayıp çizelgeden görüldüğü üzere Eşitlik 2.10 gereği 14 dB olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 3.6 Geometrik kaybın alıcıya ulaşan ışıma kesit alanı-alıcı yüzey alanı ile değişimi

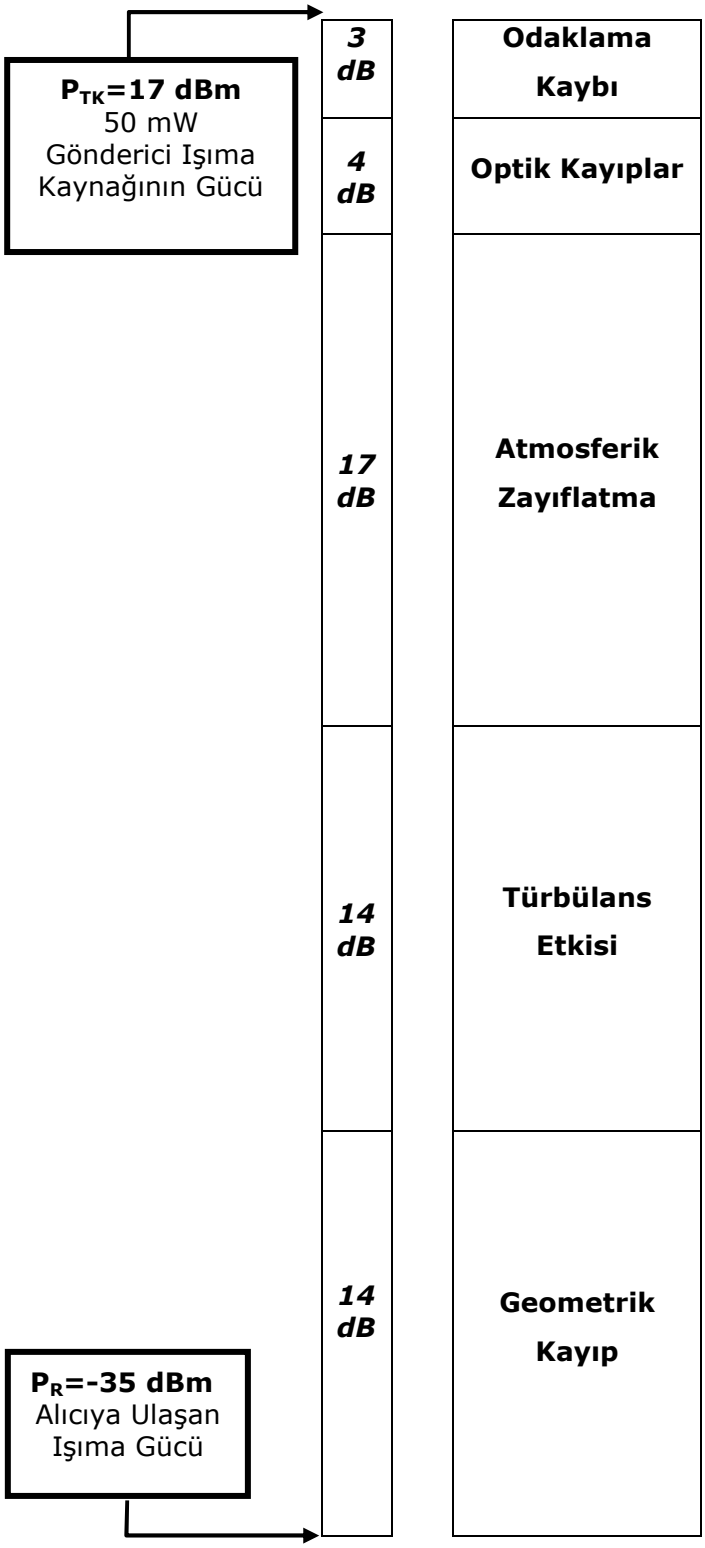
GEOMETRİK KAYIP (L_{GEO}) (dB)								
Alıcıya Ulaşan Işıma Kesit Alanı (cm^2)	Alıcı Yüzey Alanı (S_{AR})							
								cm^2
	0,8	*3,1*	*7,1*	*12,6*	*19,6*	*28,3*	*38,5*	*50,3*
								dB
3,1	-6,0	0,0	3,5	6,0	8,0	9,5	10,9	12,0
7,1	-9,5	-3,5	0,0	2,5	4,4	6,0	7,4	8,5
12,6	-12,0	-6,0	-2,5	0,0	1,9	3,5	4,9	6,0
15,9	-13,1	-7,0	-3,5	-1,0	0,9	2,5	3,8	5,0
19,6	-14,0	-8,0	-4,4	-1,9	0,0	1,6	2,9	4,1
28,3	-15,6	-9,5	-6,0	-3,5	-1,6	0,0	1,3	2,5
38,5	-16,9	-10,9	-7,4	-4,9	-2,9	-1,3	0,0	1,2
44,2	-17,5	-11,5	-8,0	-5,5	-3,5	-1,9	-0,6	0,6
50,3	-18,1	-12,0	-8,5	-6,0	-4,1	-2,5	-1,2	0,0
63,6	-19,1	-13,1	-9,5	-7,0	-5,1	-3,5	-2,2	-1,0
78,5	-20,0	-14,0	-10,5	-8,0	-6,0	-4,4	-3,1	-1,9
86,6	-20,4	-14,4	-10,9	-8,4	-6,4	-4,9	-3,5	-2,4
113,1	-21,6	-15,6	-12,0	-9,5	-7,6	-6,0	-4,7	-3,5
122,7	-21,9	-15,9	-12,4	-9,9	-8,0	-6,4	-5,0	-3,9
153,9	-22,9	-16,9	-13,4	-10,9	-8,9	-7,4	-6,0	-4,9
176,7	-23,5	-17,5	-14,0	-11,5	-9,5	-8,0	-6,6	-5,5
201,1	-24,1	-18,1	-14,5	-12,0	-10,1	-8,5	-7,2	-6,0
240,5	-24,9	-18,8	-15,3	-12,8	-10,9	-9,3	-8,0	-6,8
254,5	-25,1	-19,1	-15,6	-13,1	-11,1	-9,5	-8,2	-7,0
314,2	-26,0	-20,0	-16,5	-14,0	-12,0	-10,5	-9,1	-8,0
346,4	-26,4	-20,4	-16,9	-14,4	-12,5	-10,9	-9,5	-8,4
452,4	-27,6	-21,6	-18,1	-15,6	-13,6	-12,0	-10,7	-9,5
490,9	-28,0	-21,9	-18,4	-15,9	**-14,0**	-12,4	-11,1	-9,9
615,8	-28,9	-22,9	-19,4	-16,9	-15,0	-13,4	-12,0	-10,9
706,9	-29,5	-23,5	-20,0	-17,5	-15,6	-14,0	-12,6	-11,5
804,2	-30,1	-24,1	-20,6	-18,1	-16,1	-14,5	-13,2	-12,0
962,1	-30,9	-24,9	-21,3	-18,8	-16,9	-15,3	-14,0	-12,8
1256,6	-32,0	-26,0	-22,5	-20,0	-18,1	-16,5	-15,1	-14,0
1590,4	-33,1	-27,0	-23,5	-21,0	-19,1	-17,5	-16,2	-15,0
1963,5	-34,0	-28,0	-24,4	-21,9	-20,0	-18,4	-17,1	-15,9



Şekil 3.10 Geometrik kaybın alıcı yüzey alanı ve alıcıya ulaşan ışıma kesit alanı ile değişimi

Geometrik kaybın alıcı yüzey alanı ve alıcıya ulaşan ışıma kesit alanı ile değişimi Şekil 3.10'da sunulmuştur.

Örnek sistem modeli için maksimum iletim kaybı ve alıcıya ulaşan minimum ışıma gücü Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.11 Örnek sistem modeli için maksimum iletim kaybı

3.7 Gürültü Analizi

Optiksel alıcılarda akım dalgalanmalarına neden olan temel iki gürültü kaynağı vardır. Bunlar direnç üzerinde oluşan ısıl gürültü i_t (*termal noise, Johnson noise*), yük boşalımı gürültüsü i_{sh} (*shot noise*) dür. Bu gürültüler birbirinden bağımsızdır ve dedektör çıkışındaki toplam gürültü i_n bu gürültülerin toplamı ile hesaplanır (Eşitlik 3.10).

$$i_n^2 = i_t^2 + i_{sh}^2 \tag{3.10}$$

Isıl gürültü, frekanstan bağımsız olduğu için beyaz gürültü olarak nitelendirilir ve Eşitlik 3.11'den hesaplanır.

$$i_t^2 = \frac{4kT\Delta f}{R_L} \tag{3.11}$$

burada

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

T: Sıcaklık (K)

Δf: Elektronik band genişliği (Hz)

R_L: Yük direnci (ohm)

Yük boşalımı gürültüsü i_{sh}, P-N eklemi boyunca akan akım içindeki rasgele dalgalanmalar nedeni ile meydana gelir ve karanlık akımı (*dark current*, I_d) ile dedektör sinyal akımından (I_s) kaynaklanır (Eşitlik 3.12–3.13).

$$i_{sh}^2 = i_d^2 + i_s^2 = 2qI_d\Delta f + 2qI_s\Delta f \tag{3.12}$$

$$i_{sh}^2 = 2q\Delta f\,(I_d + I_s) \tag{3.13}$$

burada

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

I_d: Dedektör karanlık akımı

I_s: Dedektör sinyal akımı

Dedektör sinyal akımı ise Eşitlik 3.14'de verilmiştir.

$$I_s = R.P_R \tag{3.14}$$

burada

R: Dedektör duyarlılığı

P_R: Dedektöre gelen ışıma gücü

Dedektör için bu iki temel gürültü akımını incelediğimizde benzerlik olarak ikisinin de dedektör elektronik band genişliğine bağlı olduğunu söyleyebiliriz. Optik sinyalin frekansına bağlı olmadığından beyaz gürültü olarak da tanımlanabilirler. Farklılık olarak ise termal gürültünün alıcıya ulaşan ışımaya bağlı olmadığını, buna karşılık yük boşalımı gürültüsünün (*shot noise*) dedektöre ulaşan optik ışımanın gücü ile orantılı olduğunu görmekteyiz. Toplam gürültü akımı Eşitlik 3.11 ve Eşitlik 3.13'den;

$$i_n^2 = i_t^2 + i_{sh}^2 = (4kT\Delta f / R_L) + 2q\Delta f\,(I_d + I_s) \tag{3.15}$$

Sinyal Gürültü Oranı (SNR)

PİN fotodedektör için SNR;

$$SNR = \frac{\text{Sinyal Ortalama gücü}}{\text{Gürültü gücü}} = \frac{I_s^2 R_L}{i_n^2 R_L} \tag{3.16}$$

burada

I_s: Dedektör sinyal akımı

i_n: Dedektör gürültü akımı

Eşitlik 3.14 – 3.16'dan;

$$SNR= \frac{(R.P_R)^2}{(4kT\Delta f / R_L) + 2q\Delta f\,(I_d+R.P_R)} \tag{3.17}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Yük boşalımı gürültüsü (shot noise) baskın SNR

Alıcıya ulaşan ışıma gücü yüksek olduğunda yük boşalımı gürültüsü *(shot noise)* termal gürültüye oranla çok büyük olur. Bu durumda yük boşalımı gürültüsü *(shot noise)* baskındır ($\dot{i}_{sh} \gg \dot{i}_t$)ve termal gürültü ihmal edilebilir. Dedektör sinyal akımı da dedektör karanlık akımından ($I_s \gg I_d$) çok büyüktür ve I_d ihmal edilebilir. Bu durumda SNR (Eşitlik 3.18);

$$SNR= \frac{(R.P_R)^2}{2q\Delta f.R.P_R} = \frac{R.P_R}{2q\Delta f} \tag{3.18}$$

Termal gürültü baskın SNR

Alıcıya ulaşan ışıma gücü düşük olduğunda termal gürültü baskındır ($\dot{i}_t \gg \dot{i}_{sh}$) ve yük boşalımı gürültüsü ihmal edilebilir. Bu durumda SNR (Eşitlik 3.19);

$$SNR= \frac{(R.P_R)^2}{(4kT\Delta f / R_L)} = \frac{R^2.P_R{}^2.R_L}{4kT\Delta f} \tag{3.19}$$

Alıcı hassasiyeti

IrDA (Infrared Data Association) tarafından OTİS için belirlenen bit hata oranı (BER) 10^{-8} dir. Pratik uygulamalarda ise istenen minimum BER değeri 10^{-9} dur. Seçilecek modülasyon türüne göre bu BER değeri için minimum SNR belirlenmelidir. Belirlenen SNR alıcı hassasiyetidir. Örnek sistem modelinde seçilebilecek olan OOK için SNR tespit edilmiştir.

Bit Hata Oranı (Bit-Error Rate)

Haberleşme sistemlerinde bit hata oranı Eşitlik 3.20 ile tanımlanmaktadır;

Bit Hata Oranı = Hatalı bit sayısı / Toplam bit sayısı

$$BER = P(1).P(0/1) + P(0).P(1/0) \tag{3.20}$$

burada

P(1): 1 gelme olasılığı

P(0): 0 gelme olasılığı

P(0/1): 1 geldiğinde 0 algılanma olasılığı

P(1/0): 0 geldiğinde 1 algılanma olasılığı

1 gelme olasılığı ile 0 gelme olasılığı birbirine eşittir ve 1/2 alınabilir. Bu durumda BER (Eşitlik 3.21);

$$BER = 1/2\ [P(0/1) + P(1/0)] \tag{3.21}$$

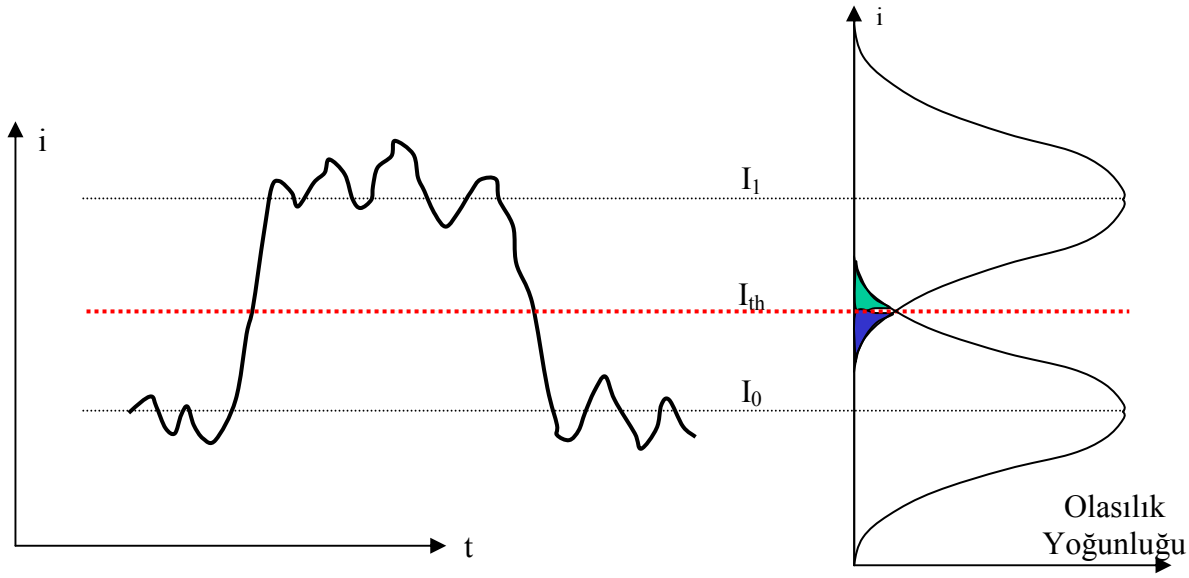
Dedektör sinyal akımının beklenen değeri 1 veya 0, gürültünün katkısından dolayı rasgele dalgalanır. 1 için sinyal akımı ortalama sinyal akımı olan I_1 çevresinde, 0 için sinyal akımı ise ortalama sinyal akımı I_0 çevresinde dalgalanır. Bu iki durum için de olasılık yoğunluk fonksiyonu Şekil 3.12'den görüldüğü üzere Gauss dağılımıdır. Gauss olasılık yoğunluk fonksiyonu ise Eşitlik 3.22'de verilmiştir.

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2} \right] \tag{3.19}$$

burada

x_0: ortalama değer

σ : sapma



Şekil 3.12 1 ve 0 bit değerleri için olasılık yoğunluk fonksiyonu

1 için birleştirilmiş gürültü (Eşitlik 3.20);

$$i_{n1}^2 = i_{t1}^2 + i_{sh1}^2 \tag{3.20}$$

0 için birleştirilmiş gürültü (Eşitlik 3.21);

$$i_{n0}^2 = i_{t0}^2 + i_{sh0}^2 \tag{3.21}$$

Termal gürültü dedektör sinyal akımına bağlı olmadığından $i_{t0}^2 = i_{t1}^2$ olacaktır. Buradan iki hata durumu için bağıntı Eşitlik 3.22-3.23'deki şeklini alır;

$$P(0/1) = \frac{1}{i_{N1}\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{I_{th}} \exp\left[-\frac{(i - I_1)^2}{2i_{N1}^2} \right] di = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{I_1 - I_{th}}{i_{N1}\sqrt{2}} \right) \tag{3.22}$$

$$P(1/0) = \frac{1}{i_{N0}\sqrt{2\pi}} \int_{I_{th}}^{\infty} \exp\left[-\frac{(i - I_0)^2}{2i_{N0}^2} \right] di = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{I_{th} - I_0}{i_{N0}\sqrt{2}} \right) \tag{3.23}$$

Burada tamamlayıcı hata fonksiyonu ise Eşitlik 24'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$erfc\ (x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp\ (-\ y^2)dy \tag{3.24}$$

Eşitlik 3.22 – 3.23'den BER (Eşitlik 3.25);

$$BER\ = \frac{1}{2}\left[P(0/1) + P(1/0)\right] = \frac{1}{4}\left[erfc\left(\frac{I_1 - I_{th}}{i_{N1}\sqrt{2}}\right) + erfc\left(\frac{I_{th} - I_0}{i_{N0}\sqrt{2}}\right)\right] \tag{3.25}$$

Eşitlik 3.25'den anlaşıldığı üzere BER karar verme eşik değeri olan I_{th} akım değerine bağlıdır ve BER I_{th}'ın Eşitlik 3.26'yı sağladığı durumda minimum olur.

$$(I_1 - I_{th})/\ i_{n1} = (I_{th} - I_0)/\ i_{n0} \equiv Q \tag{3.26}$$

Bu bağıntıdan eşik değeri I_{th}'in optimum değeri (Eşitlik 3.27);

$$I_{th} = (I_1.\ i_{n0} - I_0.\ i_{n1}) / (i_{n0} + i_{n1}) \tag{3.27}$$

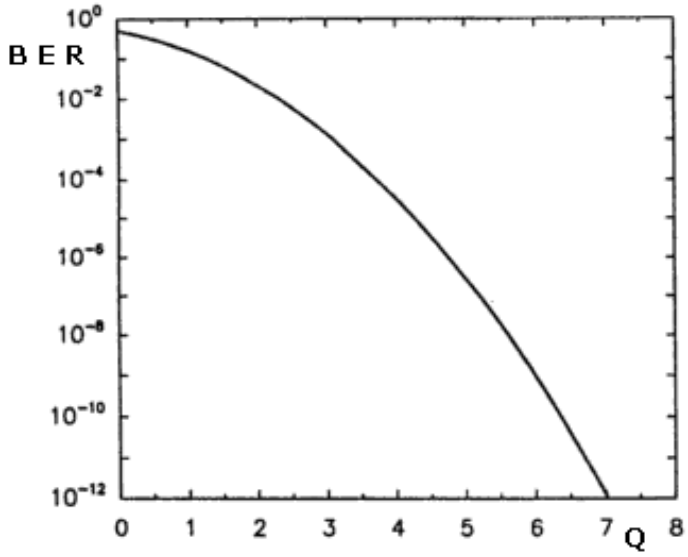
Eşitlik 3.26 - 3.27'den Q;

$$Q = (\ I_1 - I_0\ ) / (i_{n0} + i_{n1}) \tag{3.28}$$

Bu durumda BER Eşitlik 3.25 – 3.28'den aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$BER\ \ = \frac{1}{2} erfc\ \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \tag{3.29}$$

BER değeri erfc(Q/2) fonksiyonunun asimptotik büyümesinden elde edilebilir. BER'in Q parametresine göre değişimi Şekil 3.13'de verilmiştir. Haberleşme için istenen ve örnek sistem modelinde önerdiğimiz minimum BER değeri olan 10^{-9} için Şekil 3.13'den görüldüğü üzere Q=6'dır.



Şekil 3.13 Bit Hata Oranının Q parametresi ile değişimi

Minimum ışıma gücü

Yapılan gürültü analizi doğrultusunda sistemde kullanılması önerilen iki dedektör için minimum ışıma güçleri tespit edilmelidir. Seçilen iki dedektör de PIN fotodiyottur ve PIN fotodiyotlarda termal gürültü baskındır. Termal gürültünün baskın olduğu durumda ise (Eşitlik 3.30);

$i_{n0} = i_{n1} = i_t$

$$Q = (I_1 - I_0) / (i_{n0} + i_{n1}) = I_1 / 2\, i_t \qquad (3.30)$$

Bit 0 için OOK'da I_0=0 alınmıştır. Bu durumda SNR;

$$SNR = \frac{i_s^2}{i_n^2} = \frac{I_1^2}{i_t^2} \qquad (3.31)$$

Termal gürültünün baskın olduğu durumda SNR Eşitlik.3.30 – 3.31'den;

$$SNR = 4\left(\frac{I_1}{2i_t}\right)^2 = 4.Q^2 \qquad (3.32)$$

Şekil 3.13'den BER=10^{-9} için Q=6 idi. O halde;

$SNR = 4 \times 6^2 = 144$

λ=850 nm için kullanılan dedektör minimum ışıma gücü (Hassasiyeti)

Termal gürültü baskın olduğu halde SNR Eşitlik3.33'den,

$$SNR = \frac{(R.P_R)^2}{(4kT\Delta f / R_L)} = \frac{R^2.P_R^2.R_L}{4kT\Delta f} \qquad (3.33)$$

Buradan minimum ışıma gücü P_R ;

$P_R^2 = [SNR \times (4kT\Delta f)]/[R^2 x R_L] = [144 \times (4 \times 1.38x10^{-23} \times 300 \times 177x10^6)] / [0.55^2 x50]$

$P_R = 5\ \mu W = -53$ dBm

λ=1550 nm için kullanılan dedektör minimum ışıma gücü (Hassasiyeti)

$P_R^2 = [SNR \times (4kT\Delta f)]/[R^2 x R_L] = [144 \times (4x\ 1.38x10^{-23} \times 300 \times 80x10^6)] / [0.9^2 x50]$

$P_R = 2\ \mu W = -57$ dBm

İki ayrı dedektör için hesaplanan minimum ışıma güçlerinin en kötü durum senaryosuna göre hesaplanan alıcıya ulaşan ışıma gücü olan -35 dBm'den çok yüksek olduğu görülmektedir.

3.8 İletim Kaybı Toleransı *(Link Magrin)*

Laser kaynak ışıma gücü (P_{TK}) ve odaklama, optik, geometrik ve türbülans etkilerinden kaynaklanan kayıplar dikkate alınarak sistem için iletim kaybı toleransı (*Link Magrin)* Eşitlik 3.34−3.35'den hesaplanabilir.

$$P_R = P_{TK} - (L_O + L_{GEO} + L_S + L_{ATM}) \quad (3.34)$$

$$L_{ATM} = P_{TK} - (L_O + L_{GEO} + L_S + P_R) \quad (3.35)$$

burada

P_R: Dedektörün girişine gelen ışıma gücü	dBm
P_{TK}: Gönderici laser kaynak ışıma gücü	dBm
L_O: Optik ve odaklama kaybı	dB
L_{GEO}: Geometrik kayıp	dB
L_S: Türbülans (*scintillation*) etkisi kaybı	dB
L_{ATM}: Atmosferik kayıp	dB

λ=850 nm için iletim kaybı toleransı

$$L_{ATM} = P_{TK} - (L_O + L_{GEO} + L_S + P_R) = 17 - [7 + 14 + 14 + (-53)] = 35 \text{ dB}$$

λ=1550 nm için iletim kaybı toleransı

$$L_{ATM} = P_{TK} - (L_O + L_{GEO} + L_S + P_R) = 17 - [7 + 14 + 14 + (-57)] = 39 \text{ dB}$$

Buradan elde edilen ve iletim kaybı toleransı olarak tanımlanan atmosferik kayıp sistem için bir kullanılabilirlik ölçütüdür ve sistemin hangi atmosferik şartlarda hangi iletim uzaklıklarında kullanılabileceğini belirler (Eşitlik 3.36). Çünkü atmosferik kayıp (zayıflatma, saçınım) hava koşullarına bağlıdır ve değişiklik gösterir (Çizelge 2.3).

$$\text{İletim Uzaklığı } L = \frac{\text{İletim Kaybı Toleransı (}\textit{Link Margin,}\ L_{ATM}\text{ , dB)}}{\text{Atmosferik Zayıflatma (dB/km)}} \quad \text{km} \quad (3.36)$$

4. SONUÇ ve TARTIŞMA

Artan veri transfer kapasitesi gereksinimi, beraberinde, optik iletişimde daha esnek, kolay ve hızlı kurulan çözümler arayışını getirmiş ve optiksel telsiz uygulamalarındaki araştırmaların artmasına neden olmuştur.

Optiksel telsiz iletişim sistemlerindeki (OTİS) araştırmalar, uygulamada karşılaşılan zorlukların iyileştirmeleri üzerine yoğunlaşmış ve atmosferik etkiler, görüş çizgisi izleme sistemleri ve gezginlik, öncelikli ilgi alanları olmuştur. Tez çalışmasında; bu araştırmalara paralel olarak OTİS'in ağ omurgalarında alternatif ve tamamlayıcı olarak kullanılabilmesi için yapılması gereken veri transfer kapasitesi iyileştirmesi incelenmiştir.

OTİS için veri transfer kapasitesi alıcı parametrelerine bağımlı bir değişkendir (Eşitlik. 3.7). OTİS' de tek dalgaboyu kullanıldığında ulaşılabilecek veri transfer kapasitesinin alıcı yapısından kaynaklanan bir sınırlaması vardır. Fiber optik uygulamalarda olduğu gibi küçük aktif yüzeyli (<1 mm), düşük kapasitanslı (≤1 pF) ve dolayısıyla yüksek veri transfer kapasiteli dedektör kullanımı teorik olarak mümkün olmakla birlikte, pratik OTİS uygulamaları için oldukça güçtür. Bu güçlüğün ana nedeni alıcıda elde edilmek istenen ışıma değişiminin dedektöre odaklanma zorunluluğudur. Çok küçük aktif yüzeyli dedektörler kullanımı durumunda odaklama kaybı artacak ve kullanılabilirlik azalacaktır.

OTİS'de bu sınırlamalardan dolayı veri transfer kapasitesinin artırımı ancak çoklama tekniklerinin uygulanması ile gerçeklenebilecektir. OTİS'e uygulanabilecek çoklama teknikleri ise fiber optik iletişime paralel olarak dalgaboyu bölmeli çoklama ve zaman bölmeli çoklamadır. Çalışmada dalgaboyu bölmeli çoklama tekniği mimari tasarım yaklaşımı ile örnek sistem modeli için önerilmiştir.

Dar demet açısı, eş dalga boylu optik taşıyıcıların aynı anten platformu üzerinde kullanılabilmesine imkân tanımaktadır. Bu noktadan yola çıkarak yapılan çalışmada örnek sistem modeli, iki farklı dalgaboyu (850nm, 1550 nm), 9 optiksel telsiz kanalı,

625 cm^2 2-D anten boyutu, 500m iletim uzaklığı için optimize edilmiştir. Optimizasyon sonucunda teorik olarak 2,4 Gbps bir iletim kapasitesine ulaşılabileceği tahmin edilmiştir.

Öneriler

Çalışmaya paralel olarak geleceğe yönelik çalışmalar şu başlıklar altında toplanabilir:

Sistem modelinde kullanılan aynı dalgaboylu optik kanallar oluşacak eş kanal girişiminden dolayı iletim uzaklığını (<500 m) sınırlandırılmıştır. Daha büyük iletim uzaklıkları için olası çözümler gönderici laser demet açısının daha dar seçilmesi, anten boyutlarının büyütülmesi veya farklı dalga boyunda optik taşıyıcıların kullanılmasıdır.

İlk iki çözüm pratik uygulamada sınırlandırmalar yaratacağından, optiksel telsiz kanalları için farklı dalgaboylarında taşıyıcının kullanımı etkin çözüm olarak değerlendirilmektedir. Ancak optiksel taşıyıcı olarak kullanılabilecek optik bandlar sınırlı olmakla birlikte (780–850 nm ve 1520–1600 nm), bu bandlarda farklı dalgaboylarında laser kaynak ve dedektör temini de güç olmaktadır. Laser ve dedektörler bu bandlarda yer alan belli dalgaboyları için üretilmekte olup dalgaboyları birbirine yakındır (<50nm). Dolayısıyla her kanal için farklı dalgaboyu kullanımında kullanılacak dalgaboyları temin edilebilirlik ve maliyet göz önüne alınarak seçilmelidir.

Tasarımda kullanılacak optik bileşenler de dikkate alınmalıdır. Yakın dalgaboylarında optik taşıyıcı kullanımı için daha dar bandlı (<10nm) optik girişim filtreleri veya bazı dalgaboylarına duyarlı çentik (*notch*) filtreler tercih edilmelidir. Bu tür özel optik bileşenlerin kullanımının iletim uzaklığını, kanal sayısını ve veri transfer kapasitesini arttıracağı gibi maliyeti de yükselteceği unutulmamalıdır. Değerlendirme bit başına düşen maliyetle yapılmalıdır.

İkinci bir çalışma olarak dalgaboyu bölmeli çoklama tekniğinin, ikinci model olan aynı iletim kanalında tek alıcı-verici mimarisinde birden çok bağımsız farklı dalga boyundaki taşıyıcılar ile iletiminin OTİS'ne uygulanmasıdır. Bu model için tasarım modeli ortaya

konmalı, ortaya konan sistem modeli için tasarım parametreleri tespit edilmeli, belirlenen tasarım parametreleri doğrultusunda örnek model optimize edilerek fiber optik yapılarda başarı ile uygulanan bu tekniğin OTİS'ne uygulanması değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

Akella J., Liu C., Kalyanaraman S., Dutta P. and Yuksel M. 2005. Towards terabit/s adhoc and last-mile wireless networks with free space optics. Vyjayanthi Prasad. Department of Electrical, Computer and Systems Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, 1-6 pp., NewYork.

Anonymous. 2008. Laserbit Inc, Web Sitesi: http://www.laserbit.net/, Erişim Tarihi: 01.06.2008

Anonymous. 2008. Lightpointe Inc, Web Sitesi: http://www.lightpointe.com/, Erişim Tarihi: 10.05.2008

Anonymous. 2005. Mrv Inc, Web Sitesi: http://www.mrv.com/, Erişim Tarihi: 01.03.2006

Anonymous. 2008. SONA Inc, Web Sitesi: http://www.fsona.net/ Erişim Tarihi: 03.06.2008

Anonymous. 2008. Terabeam Inc, Web Sitesi: http://www.terabeam.net/, Erişim Tarihi: 01.06.2008

Arı, F. 2006. Ses Kodlama tekniklerinin serbest ortam optiksel iletişimine uygulanması. Doktora Tezi, AÜ.

Arnon, S. 2003. Optical wireless communications. Ben-Gurion University of the Negev, 21 p., Beer-Sheva, Israel.

Bloom, S. 2002. The physics of free-space optics. Airfiber Inc, 22 p.

Bloom, S., Korevaar E., Schuster J. and Heinz W. 2003. Understanding the performance of free-space optics. Optical Society of America, 178-200

Bouchet, O. 2006. Free-space optics: Propagation and communication. ISTE Ltd., 219 s., London.

Dutta, A. K., Dutta, N. K.,Fujiwara, M. 2004. WDM technologıes: optıcal Networks. Elsevier Acedemic Pres, 336 p., London.

Franz, J.H. and Jain, V.K. 2000. Optical communications components and systems. Alpha Science International Ltd., 717 s., Pang Bourne.

Haim, M and Shlomi A. 2003. Performance of an optical wireless communication system as a function of wavelenght. Optical Society of America, 4285-4293

Harry, J.R. 1998. Understanding optical communications. IBM corporation, International Technical Support Organization 638 s., New York

Jeganathan, M. and Ionov, P. 2000. Multi-Gigabits-per-second Optical Wireless Communications. Optical Crossing.1-9

Kalyanaraman, S.K. and Dutta, P. and Yuksel M. 2005. Web Sitesi: http://www.poisson.ecse.rpi.edu, Erişim tarihi 01.04.2005

Karaçor, D. 2008. Uydulararası ve uydudan yere laser ile iletişim için tasarım parametreleri. Yüksek Lisans Tezi, AÜ.

Kim, I.I., Stieger, R., Koontz, J.A., Schuster J., Moursund C., Riley B., Hakakha H., Barclay M., Adhikari P., and Korevaar E. 1998. Portable high-data-rate lasercom system. AstroTerra Corporation, 1-5 pp., San Diego, CA.

Kim, I.I., Stieger, R., Koontz, J.A., Schuster J., Moursund C., Riley B., Hakakha H., Barclay M., Adhikari P., and Korevaar E. 1998.Measurement of scintillation and link magrin for the Terralink laser communication system. AstroTerra Corporation, 100-118 pp., San Diego, CA.

Kim, I.I., Stieger, R., Koontz, J.A., Schuster J., Moursund C., Barclay M., Adhikari P., and Korevaar E. 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

Lambert S.G. and Casey W.L. 1995. Laser communications in space. Artech House 377 s., London

Lin, C. 1989. Optoelectronic technology and lightwave communications systems. Van Nostrand Reinhold, 765 s., New York.

Majumdar, A.K. and Ricklin J.C. 2008. Free-space laser communications principles and advances. Springer, 417 s., New York

Ramaswami, R. and Sivirajan K.N. 1998. Optical networks: A practical perspective. Morgan Kaufman Publishers Inc., 630 s., San Francisco, California

Regis, J.B. 1990. Optical switching and networking. Macmillan Education Ltd, Hong Kong.

Santamaria, A. and Lopez F.J. 1994. Wireless LAN systems. Artech House, 251 s., Boston, London.

Sibley, M.J.N. 1990. Optical communications. Macmillan Education Ltd, 152 s., Hong Kong.

Thomas, E.S. and Bala K. 1999. Multiwavelenght optical networks. Addison Wesley Longman

Willebrand, H. and Ghuman, B.S. 2002. Free space optics: Enabling optical connectivity in today's networks. SAMS, 259 s., Indiana.

Wilson, J. and Hawkes, J.F.B. 1989. Optoelectronics. Prentice Hall, 363 s., New York

EKLER

EK 1 Optiksel Telsiz İletişim Sistemi Fiber Optik Bağlantısı

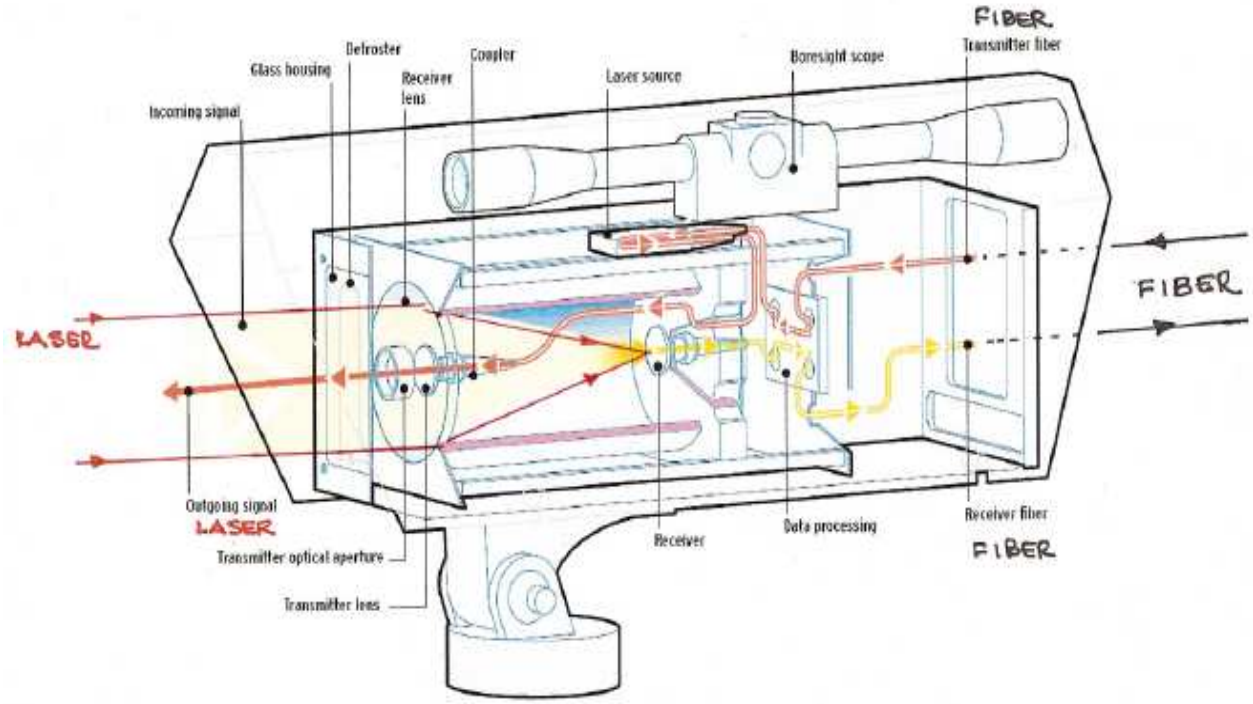
EK 2 Alıcı Mercek Teknik Özellikleri

EK 3 Optik Filtre Teknik Özellikleri

EK 4 λ=850 nm için Kullanılan Dedektör Teknik Özellikleri

EK 5 λ=1550 nm için Kullanılan Dedektör Teknik Özellikleri

EK 1 Optiksel Telsiz İletişim Sistemi Fiber Optik Bağlantısı



EK 2 Alıcı Mercek Teknik Özellikleri

TECHSPEC® Near Infrared Achromats

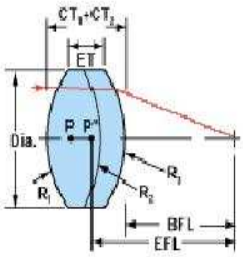


- Designed to Give Increased Resolution and Smaller Spot Sizes for NIR Wavelengths
- Decreased Spherical Aberration for Monochromatic Sources Out to 2µm
- Broadband AR Coating has <1% Reflectivity Between 750–1550nm

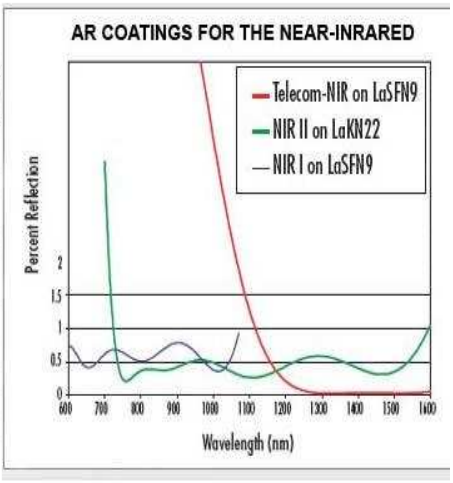
Our new TECHSPEC® Near IR doublets are designed to provide the smallest spot size possible for polychromatic light between 750 and 1100nm. By utilizing our NIR doublets instead of standard doublets designed for the visible, RMS spot diameter can be reduced from 43µm to 22.5µm, for example, when using polychromatic light. Spot size will be smaller when focusing monochromatic sources. Near-IR doublets also reduce spherical aberration and have superior performance when used with a monochromatic source up to 2µm in wavelength. Typical applications for these doublets include: CCD imaging lenses for the near infrared, focusing and expanding of NIR lasers, and focusing/collimating lenses for fiber optics and NIR LEDs.

⊟ NIR Achromatic Lens 50mm Dia. x 150mm FL, NIR-II Coating — NT47-318

Dia. (mm)	50.00
E.F.L. (mm)	150.00
Back F.L. (mm)	139.87
C.T.1 (mm)	11.00
C.T.2 (mm)	5.50
E.T. (mm)	12.47
Radius R1 (mm)	86.84
Radius R2 (mm)	-86.84
Radius R3 (mm)	-894.70



Diameter	Surface Quality	Dia. Tolerance	C.T. Tolerance	Centering Tolerance
3.00	40-20	+0.0/-0.05	±0.2	3 - 5 arc min.
6.00 - 25.00	40-20	+0.0/-0.10	±0.2	3 - 5 arc min.
50.00	60-40	+0.0/-0.10	±0.2	3 - 5 arc min.
Notes	Bevel	If the diameter >= 0.85 x (radius of curvature), then no bevel is required.		
		3.00mm dia.:	Max Bevel = 0.1mm x 45°	
		6.00 - 25.00mm dia.:	Max Bevel = 0.25mm x 45°	
		50.00mm dia.:	Max Bevel = 0.3mm x 45°	
	Clear Aperture	3.00 - 10.00mm dia.:	CA >= 90% of diameter	
		10.1 - 50.00mm dia.:	CA = diameter - 1.00mm	
	Glass Type	LaKN22-SFL6		
	Focal Length	Defined at 880nm; focal length tolerance ±2%		
	Coating	NIR II AR		
	E.T. Tolerance	Reference		



EK 3 Optik Filtre Teknik Özellikleri

Broadband Diode Interference Filters



- Available Mounted in 12.7mm or 25.4mm Diameter Rings
- >70% Transmission
- Blocking >OD4

These broadband interference filters are ideal for use with NIR laser diodes. Each filter is mounted in a 12.7mm or 25.4mm diameter metal ring. These filters can be easily integrated using our C-mount optic mounts.

⊟ 880nm Broadband Diode Interference Filter 25.4mm Dia Mtd NT62-862

Size	25.4mm
Center Wavelength (CWL)	880nm
CWL Tolerance	±10nm
Bandwidth	70nm±8nm
Minimum transmission	70%
Blocking > OD 4	200-1150nm

Diameter Tolerance	±0.05mm
Thickness	9.6mm
Surface Quality	60-40
Clear Aperture	>9.2mm (12.7mm Dia) >21.4mm (25.4mm Dia.)
Operating Temp	-20°C to +75°C

⊟ 1550nm Broadband Diode Interference Filter 25.4mm Dia Mtd NT62-864

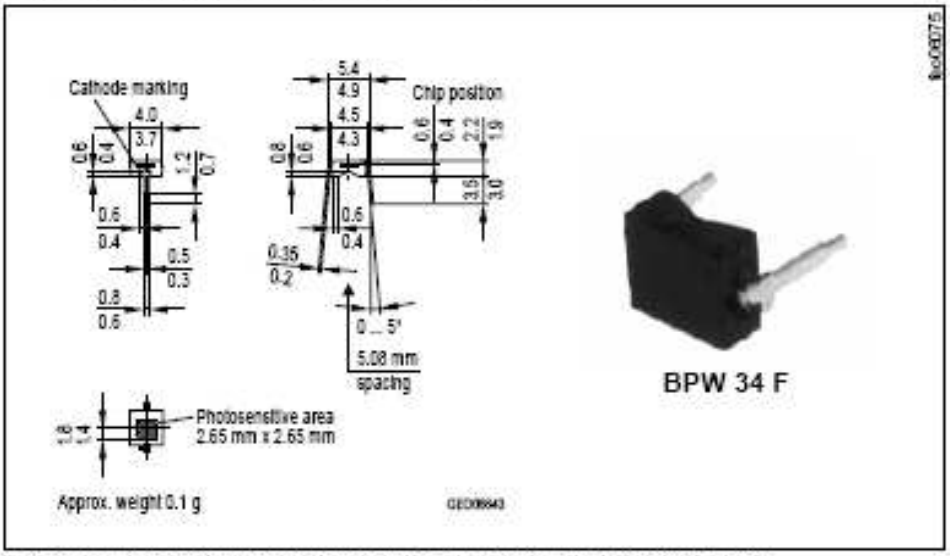
Size	25.4mm
Center Wavelength (CWL)	1550nm
CWL Tolerance	±6nm
Bandwidth	30nm±6nm
Minimum transmission	70%
Blocking > OD 4	200-1850nm

Diameter Tolerance	±0.05mm
Thickness	9.6mm
Surface Quality	60-40
Clear Aperture	>9.2mm (12.7mm Dia) >21.4mm (25.4mm Dia.)
Operating Temp	-20°C to +75°C

EK 4 λ=850 nm için Kullanılan Dedektör Teknik Özellikleri

SIEMENS

Silizium-PIN-Fotodiode mit Tageslichtsperrfilter	**BPW 34 F**
NEU: in SMT und als Reverse Gullwing	**BPW 34 FS**
Silicon PIN Photodiode with Daylight Filter	**BPW 34 FS (E9087)**
NEW: in SMT and as Reverse Gullwing	



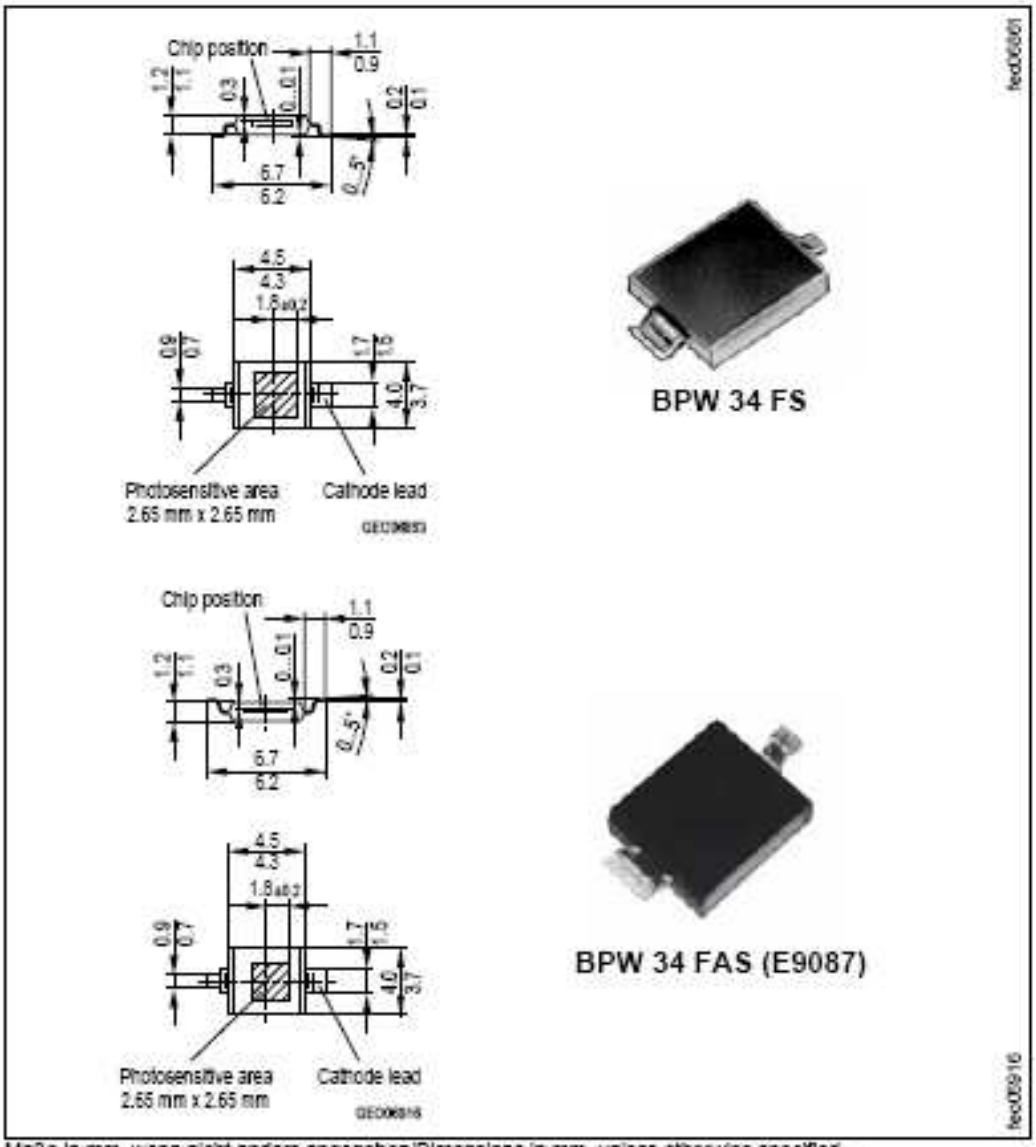
Maße in mm, wenn nicht anders angegeben/Dimensions in mm, unless otherwise specified.

Wesentliche Merkmale
- Speziell geeignet für Anwendungen bei 950 nm
- kurze Schaltzeit (typ. 20 ns)
- DIL-Plastikbauform mit hoher Packungsdichte
- BPW 34 FS/(E9087); geeignet für Vapor-Phase Löten und IR-Reflow Löten

Anwendungen
- IR-Fernsteuerung von Fernseh- und Rundfunkgeräten, Videorecordern, Gerätefernsteuerungen
- Lichtschranken für Gleich- und Wechsellichtbetrieb

Features
- Especially suitable for applications of 950 nm
- Short switching time (typ. 20 ns)
- DIL plastic package with high packing density
- BPW 34 FS/(E9087); suitable for vapor-phase and IR-reflow soldering

Applications
- IR remote control of hi-fi and TV sets, video tape recorders, remote controls of various equipment
- Photointerrupters



Maße in mm, wenn nicht anders angegeben/Dimensions in mm, unless otherwise specified.

Typ Type	Bestellnummer Ordering Code
BPW 34 F	Q62702-P929
BPW 34 FS	Q62702-P1604
BPW 34 FS (E9087)	Q62702-P1826

Grenzwerte
Maximum Ratings

Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Betriebs- und Lagertemperatur Operating and storage temperature range	T_{op}; T_{stg}	– 40 ... + 85	°C
Sperrspannung Reverse voltage	V_R	32	V
Verlustleistung, T_A = 25 °C Total power dissipation	P_{tot}	150	mW

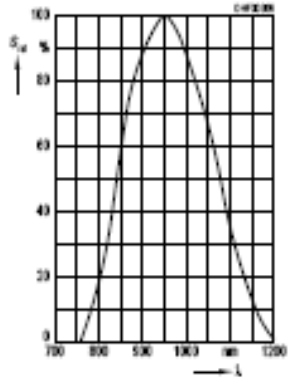
Kennwerte (T_A = 25 °C, λ = 950 nm)
Characteristics

Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Fotoempfindlichkeit Spectral sensitivity V_R = 5 V, E_e = 1 mW/cm²	S	50 (≥ 40)	µA
Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit Wavelength of max. sensitivity	$\lambda_{S\,max}$	950	nm
Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit S = 10 % von S_{max} Spectral range of sensitivity S = 10 % of S_{max}	λ	780 ... 1100	nm
Bestrahlungsempfindliche Fläche Radiant sensitive area	A	7.00	mm²
Abmessung der bestrahlungsempfindlichen Fläche Dimensions of radiant sensitive area	$L \times B$ $L \times W$	2.65 × 2.65	mm × mm
Halbwinkel Half angle	φ	± 60	Grad deg.
Dunkelstrom, V_R = 10 V Dark current	I_R	2 (≤ 30)	nA
Spektrale Fotoempfindlichkeit Spectral sensitivity	S_λ	0.59	A/W
Quantenausbeute Quantum yield	η	0.77	Electrons Photon
Leerlaufspannung, E_e = 0.5 mW/cm² Open-circuit voltage	V_O	330 (≥ 275)	mV

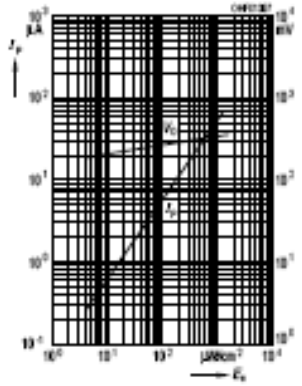
Kennwerte (T_A = 25 °C, λ = 950 nm)
Characteristics (cont'd)

Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Kurzschlußstrom, E_e = 0.5 mW/cm² Short-circuit current	I_{SC}	25	µA
Anstiegs- und Abfallzeit des Fotostromes Rise and fall time of the photocurrent R_L = 50 Ω; V_R = 5 V; λ = 850 nm; I_p = 800 µA	t_r, t_f	20	ns
Durchlaßspannung, I_F = 100 mA, E = 0 Forward voltage	V_F	1.3	V
Kapazität, V_R = 0 V, f = 1 MHz, E = 0 Capacitance	C_0	72	pF
Temperaturkoeffizient von V_O Temperature coefficient of V_O	TC_V	– 2.6	mV/K
Temperaturkoeffizient von I_{SC} Temperature coefficient of I_{SC}	TC_I	0.18	%/K
Rauschäquivalente Strahlungsleistung Noise equivalent power V_R = 10 V	NEP	4.3×10^{-14}	$\frac{W}{\sqrt{Hz}}$
Nachweisgrenze, V_R = 10 V Detection limit	D^*	6.2×10^{12}	$\frac{cm \cdot \sqrt{Hz}}{W}$

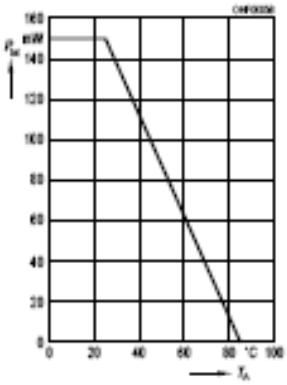
Relative spectral sensitivity
$S_{rel} = f(\lambda)$



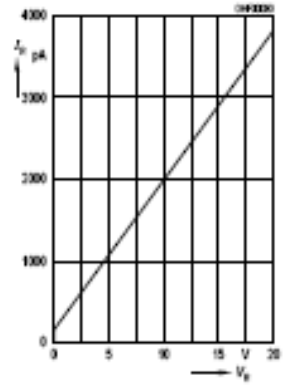
Photocurrent $I_P = f(E_e)$, V_R = 5 V
Open-circuit voltage $V_O = f(E_e)$



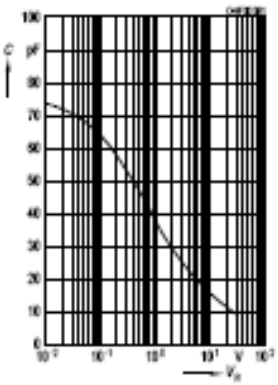
Total power dissipation
$P_{tot} = f(T_A)$



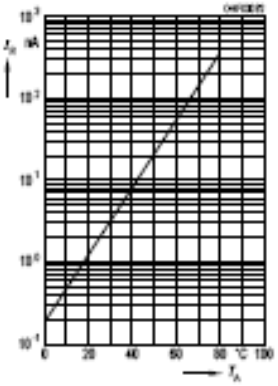
Dark current
$I_R = f(V_R)$, $E = 0$



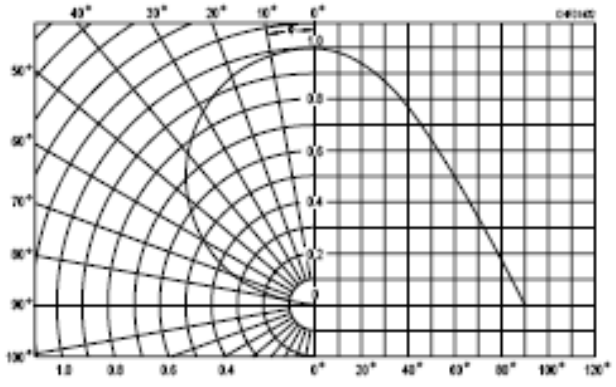
Capacitance
$C = f(V_R)$, f = 1 MHz, $E = 0$



Dark current
$I_R = f(T_A)$, V_R = 10 V, $E = 0$



Directional characteristics $S_{rel} = f(\varphi)$



EK 5 λ=1550 nm için Kullanılan Dedektör Teknik Özellikleri

THORLABS INC
435 Route 206 • P.O. Box 366
Newton, NJ 07860-0366
Ph. 973-579-7227
FAX 973-300-3600

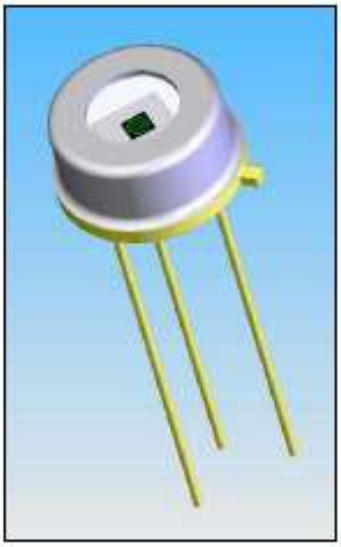
FGA10 InGaAs Photodiode

High Speed

The FGA10 is a high-speed InGaAs photodiode with a spectral response from 700nm to 1800nm. This photodiode has a PIN structure that provides fast rise and fall times with a bias of 5V.

Electrical Characteristics

Spectral Response:	700-1800nm
Active Diameter:	ϕ1.0mm
Active Area:	0.81mm²
Rise/Fall Time:	7ns (typ)
(RL=50Ω, 5V bias)	10ns (max)
NEP@900nm:	2.5 x 10^{-14} W/√Hz (@2V bias)
Dark Current:	100nA max (5V) 25nA (typ)
Junction Capacitance (typ):	80pF @ $0V_{bias}$ 40pF @ $-5V_{bias}$
Package:	T05, 0.36" can



Maximum Ratings

Damage Threshold CW:	100 mW/cm²
Damage 10ns Pulse:	500mJ/cm²
Max Bias Voltage:	5V

The Thorlabs FGA10 photodiode is ideal for measuring both pulsed and CW light sources, by converting the optical power to an electrical current. The InGaAs detector is housed in a T05 can, with an anode, cathode and case connection. The photodiode anode produces a current, which is a function of the incident light power and the wavelength. The responsivity $\Re(\lambda)$, can be read from Figure 1 to estimate the amount of photocurrent to expect. This can be converted to a voltage by placing a load resistor (R_{LOAD}) from the photodiode anode to the circuit ground. The output voltage is derived as:

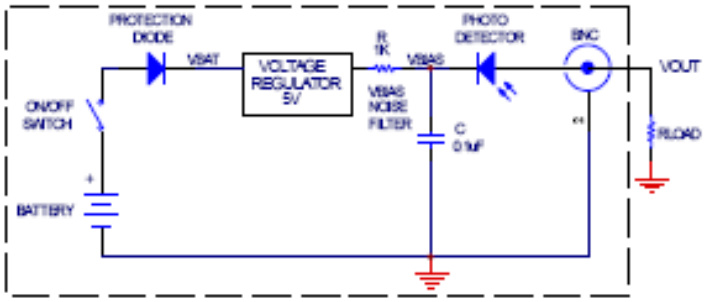
$$Vo = P * \Re(\lambda) * R_{LOAD}$$

The bandwidth, f_{BW}, and the rise time response, t_R, are determined from the diode capacitance, C_J, and the load resistance, R_{LOAD}, as shown below. Placing a bias voltage from the photo diode cathode to the circuit ground can lower the photo diode capacitance.

$$f_{BW} = 1/(2\pi * R_{LOAD} * CJ),\ t_R = 0.35/f_{BW}$$

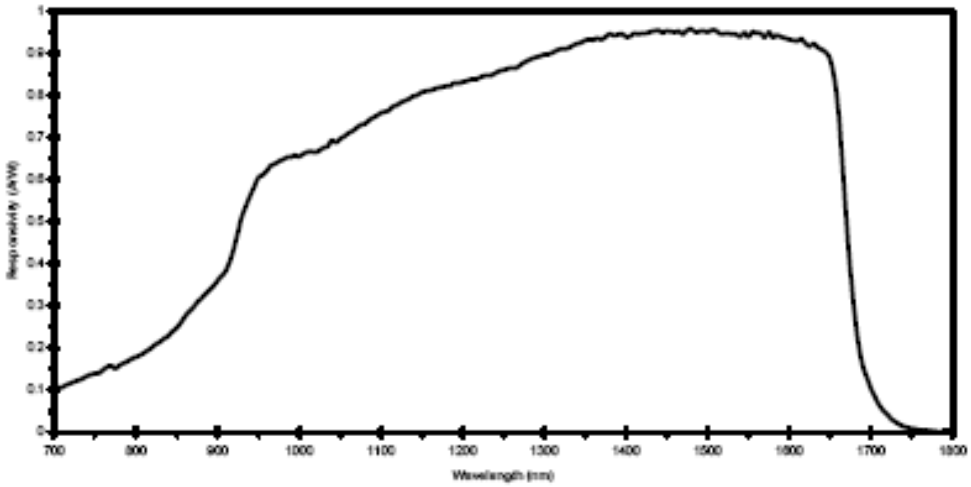
2234-S01 Rev B 4/17/06

Typical Circuit Diagram



Typical Plots

Figure 1 - FGA10 Spectral Responsivity Curve



Typical Responsivity Curve using Thorlabs calibration services.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mustafa KÜÇÜKBAL
Doğum Yeri : Çorum
Doğum Tarihi : 08.05.1980
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Kuleli Askeri Lisesi (1998)
Lisans : İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik−Elektronik Mühendisliği (2002)
Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (Şubat 2006−Mart 2009)

Çalıştığı Kurum

Jandarma Genel Komutanlığı (2002–...)