

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AÇIK-DÖNGÜ VE KAPALI-DÖNGÜ
İNTERFEROMETRİK FİBER OPTİK JİROSKOP
(İFOJ) PROTOTİPİNİN TASARIMI VE
OPTOELEKTRONİK KARAKTERİZASYONU

OĞUZ ÇELİKEL
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2008

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AÇIK-DÖNGÜ VE KAPALI-DÖNGÜ
İNTERFEROMETRİK FİBER OPTİK JİROSKOP
(İFOJ) PROTOTİPİNİN TASARIMI VE
OPTOELEKTRONİK KARAKTERİZASYONU

OĞUZ ÇELİKEL
DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
Doç. Dr. S.EREN SAN

GEBZE
2008

 GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ	MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ JÜRİ ONAY FORMU
---	--

JÜRİ

ÜYE (BAŞKAN) :

ÜYE :

ÜYE :

ÜYE :

ÜYE :

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı ile yukarıdaki öğretim elemanlarından oluşmuş jüri tarafından düzenlenen/...../..... tarihli Tez Savunma Tutanağı neticesinde Doktora öğrencisi Oğuz ÇELİKEL'in çalışması GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Yönetim Kurulu/...../..... tarih ve/..../..... sayılı kararıyla FİZİK Anabilim Dalında Doktora tezi olarak onaylanmıştır.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: Açık-Döngü ve Kapalı-Döngü İnterferometrik Fiber Optik Jiroskop (İFOJ) Prototipinin Tasarımı ve Optoelektronik Karakterizasyonu

YAZAR ADI: Oğuz Çelikel

Optik interferometri esaslı olarak çalışan fiber optik jiroskoplar, yüksek kesinlikli frekans üreteçleri, ivmeölçerler ve yazılım destekleri ile seyrüsefer bilgisinin ihtiyaç duyulduğu her uygulamada toplam yer değiştirmeyi ölçme imkanı sağlayan kritik sensör elemanlarıdır. Günümüzde pek çok silah sistemi, uydu ile gezgin tip füzelerde yön tayini için kullanılan, hiçbir mekanik harekete sahip parçası bulunmadığından üstün sağlamlık özelliğine sahip, yüksek dereceli tekrarlanabilir ve kesinlikli açısal hız ölçüm sonuçları veren sensör sistemleri olarak geniş kullanım alanlarına sahiptir.

Bu Doktora Tezi, tasarımını TÜBİTAK UME Optik Laboratuvarı Fiber Optik Metroloji Bölümünde gerçekleştirdiğim ve prototipini oluşturduğum “Açık-Döngü ve Kapalı Döngü İnterferometrik Fiber Optik Jiroskop (Open-Loop and Closed-Loop IFOG)”’un tasarım detayları ile tasarımda algılama sarımı olarak kullanılan optik fiberin temel optik karakteristiklerinin metrolojik doğruluk ve kesinlikle belirlenmesine dair deneysel detayları kapsar.

Temel optik fiber karakteristiklerinin incelenmesinin ardından İFOJ’un matematiksel esasından bahsedilerek kurgulanacak prototipin optik tasarım detayları ortaya koyulmuş ve yine bu matematiksel esaslar ışığında İFOJ’un ürettiği faz bilgisinin nasıl doğrusal voltaj çıkısına dönüştürüleceği esasları irdelenmiştir. Bu irdelemelerin sonucunda oluşturulan “Dinamik Faz İzleme Devresi” ’nin detayları verilmiş, prototipte kullanılan iki tip optik kaynak için (EDFA ve SLD) yapılan Ölçek Faktörü (Scale Factor) ve Sabit Kayma Kararlılığı (Bias Stability) ölçümleri hakkında bilgi sunularak, deney sonuçları değerlendirilmiştir.

SUMMARY

TEZİN BAŞLIĞI: Design and Optoelectronic Characterization of Open-Loop and Closed-Loop Interferometric Fiber Optic Gyroscope (IFOG) Prototype

YAZAR ADI: Oğuz Çelikel

Interferometric Fiber Optic Gyroscopes (IFOG), Ring Laser Gyroscopes, based on optical interferometry and MEMS (Microelectromechanical Systems) Gyroscopes, which sense Coriolis Force, are the absolute angular rate sensors. They are critical sensor elements, enabling to measure the total displacement, in all the applications in which the navigation information is required together with accelerometers, frequency generators with high precision and the software supports. Currently, gyroscopes used to determine the position in many types of weapon systems, satellites and cruise type missiles have wide application areas due to the fact that they are robust configuration, caused by their having no moving parts, and give the angular rate measurements highly precisely and repetitively.

This Doctorate Thesis covers both the design details of Open-Loop and Closed-Loop IFOG, constructed and prototyped and the experimental details subjected to determining the fundamental optical characteristics of the optical fiber engaged as sensing fiber in the design, which has metrological accuracy and precision, in Fiber Optic Metrology Division of TUBITAK UME Optics Laboratory.

After completion of examining the fundamental optical fiber parameters, the design details of the IFOG Prototype are presented by describing the mathematical basis of the IFOG Prototype to be configured and by using the same mathematical basis, the principles of how the phase shift generated by IFOG Prototype is converted into linear voltage readout are investigated. The information on Scale Factor and Bias Stability (Drift) measurements results of IFOG Prototype for two optical sources, called EDFA and SLD are presented and the experiment results are assessed.

TEŞEKKÜR

Bu Doktora Tez Çalışması'nın gerçekleştirilmesinde; ortaya koyduğu bilimsel tartışmalar ile tezin zenginleşmesini, gelişmesinin ve daha doğru bir anlatıma sahip olmasını sağlayan, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümü öğretim üyesi, tez danışmanım Sayın Doç. Dr. S.Eren SAN'a ve çalışan olmaktan mutluluk duyduğum, çalışmalarında teknik alt yapısını kullandığım, TÜBİTAK UME'nin yöneticilerine teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ	1
2.OPTİK FİBER	3
2.1. Optik Fiberlerin Sınıflandırılması	6
2.2. Işığın Optik Fiber İçersinde Yayılması ve İçten Tam Yansıma	7
2.3. Optik Fiber İçindeki Elektromagnetik Modlar	12
2.3.1. Boyuna Alan Çözümleri	17
2.3.2.Radyal Alan Çözümleri	21
2.3.3.Enine Alan Çözümleri	25
2.3.3.1. Enine Elektrik Alan Çözümleri	25
2.3.3.2. Enine Magnetik Alan Çözümleri	28
2.3.4. Enine Elektrik ve Magnetik Alanlar İçin Kesim Şartı	31
2.4. Kesim Dalga Boyu	40
2.4.1. Kesim Dalga Boyu Ölçümü	41
2.5. Mod Alan Çapı	45
2.5.1. Mod Alan Çapı Ölçümü	48
2.6. Optik Fiberin Tayfsal Zayıflatma Sabiti	52
2.6.1.Tayfsal Zayıflatma Sabitinin Belirlenmesi	55
2.6.1.1.ToplamTayfsal Zayıflatma Ölçümü	55
2.6.1.2. Fiber Geçiş Zamanı Ölçümü ve Tayfsal Zayıflatma Sabitinin Belirlenmesi	59
2.7. Polarizasyon Mod Dağınımı	60
3. ÇİFT DEMET İNTERFEROMETRİSİ VE GEÇİCİ UYUMLULUK (TEMPORAL COHERENCE)	64
3.1. Elektromagnetik Dalganın İnterferansı	64

4. SAGNAG ETKİSİ	79
5. AÇIK-DÖNGÜ İNTERFEROMETRİK FİBER OPTİK JİROSKOP	84
5.1. İnterferometrik Fiber Optik Jiroskopta Simetrik Optik Yol SOY - Kavramı	85
5.2. İnterferometrik Fiber Optik Jiroskobun Matematiksel Esası ve Faz Modülasyonu	87
5.3. Dinamik Faz İzleme Yöntemi ile Sagnac Fazının Türetilmesi	95
5.3.1. Dinamik Faz İzleme Devresi	96
6. AÇIK-DÖNGÜ İFOJ PROTOTİPİNİN TASARIM DETAYLARI	105
7. İNTERFEROMETRİK FİBER OPTİK JİROSKOP İÇİN PERFORMANS PARAMETRELERİ	110
7.1. Ölçek Faktörü	110
7.2. Gürültü	111
7.2.1. Termal Gürültü	111
7.2.2. Foton-Shot Gürültüsü	112
7.2.3. Fazlalık Gürültü	114
7.3. Sabit Kayma Kararlılığı	115
7.3.1. Doğrusal Olmayan Kerr Etkisi	116
7.3.2. Magnetoptik Faraday Etkisi	117
7.3.3. Shupe Etkisi	119
8. AÇIK-DÖNGÜ İFOJ PROTOTİPİNİN ÖLÇEK FAKTÖRÜ VE SABİT KAYMA KARARLILIĞI ÖLÇÜMLERİ İLE SONUÇLAR	121
8.1. Açık-Döngü İFOJ Prototipinin Ölçek Faktörünün Belirlenmesi	121
8.2. Açık-Döngü İFOJ Prototipi Sabit Kayma Kararlılığı Ölçümü	126
9. KAPALI-DÖNGÜ İNTERFEROMETRİK FİBER OPTİK JİROSKOP (İFOJ) PROTOTİPİ	133
9.1. Kapalı-Döngü İFOJ Prototipinin Tasarım Detayları	134
9.1.1 Bütünüyle Sayısal Kapalı-Döngü (BSKD) İFOJ Prototipinin Çalışma Prensibi	136

10. BSKD-İFOJ PROTOTİPİNİN ÖLÇEK FAKTÖRÜ VE SABİT KAYMA KARARLILIĞI ÖLÇÜMLERİ İLE SONUÇLAR	143
10.1. BSKD-İFOJ Prototipinin Ölçek Faktörünün Belirlenmesi	143
10.2. BSKD-İFOJ Prototipinin Sabit Kayma Kararlılığının Ölçülmesi	147
11. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	151
11.1. Sonuçlar	151
11.2. Öneriler	157
12. KAYNAKLAR	159
13. ÖZGEÇMİŞ	163

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

μm : mikrometre, 10^{-6} m

nm : nanometre, 10^{-9} m

EDFA: Erbium Katkılı Fiber Yükselteç (Erbium Doped Fiber Amplifier)

PDFFA:Praseodmiyum Katkılı Florid Fiber Yükselteç (Praseodymium Doped Fluorid Fiber Amplifier)

HDFFA:Holmiyum Katkılı Florid Fiber Yükselteç (Holmium Doped Fluorid Fiber Amplifier)

TDFFA: Tülyum Katkılı Florid Fiber Yükselteç (Tulium Doped Fluorid Fiber Amplifier)

İFOJ: İnterferometrik Fiber Optik Jiroskop

NA: Nümerik Açıklık (Numerical Aperture)

KA: Kabul Açısı (Acceptance Angle)

V: Normalize frekans, dalga kılavuzu parametresi

TE: Enine Elektrik (Transverse Electric)

TM: Enine Magnetik (Transverse Magnetic)

EH : Sanki Enine Magnetik (Quasi Transverse Magnetic)

HE : Sanki Enine Elektrik (Quasi Transverse Electric)

LP : Doğrusal Polarize (Linearly Polarized)

IR : Kırmızı Altı (Infrared)

pW: Pikowatt ($1 \text{ pW}=10^{-12} \text{ W}$)

NEP : Gürültü Eşdeğer Güç (Noise Equivalent Power)

PIN : Positive / Intrinsic / Negative

CCD: Charge Coupled Device

MFD: Mod Alan Çapı (Mode Field Diameter)

TIA: Telecommunication Industry Association

DFB : Distributed Feedback

μW : Mikrowatt ($1 \text{ pW}=10^{-6} \text{ W}$)

UV: Morötesi (Ultraviolet)

ADC : Analog to Digital Converter

OTDR : Optical Time Domain Reflectometer

MHz : Mega Hertz (10^6 Hz)

GHz : Giga Hertz (10^9 Hz)
SLD : Superluminescent Light Emitting Diode
PMD: Polarizasyon Mod Dağılımı (Polarization Mode Dispersion)
Gb/s : Saniyede 10^9 bit
PBK : Polarizasyon Bağımlı Kayıp (Polarization Dependent Loss-PDL)
PK : Polarizasyon Koruyan (Polarization Maintaining)
PZT : Piezoelectric Transduser
DC: Doğru Akım (Direct Current)
KHz: Kilo Hertz (10^3 Hz)
MHz: Mega Hertz (10^6 Hz)
SOY: Simetrik Optik Yol (Reciprocity)
AC: Alternatif Akım (Alternative Current)
CW: Clockwise (Saat istikametinde)
CCW: Counter Clockwise (Saat istikametinin tersi yönde)
PGC: Phase Generated Carrier
DCM : Differential-Cross-Multiplier
FWHM : Full Width at Half Maximum (Yarı maksimumdaki tam genişlik)
ASE: Amplified Spontaneous Emission
TEC: Thermo-Electric Cooler
NTC: Negative Temperature Coefficient
EPROM: Erasable Programmable Read Only Memory
DAC: Digital to Analog Converter
BSKD-İFOJ: Bütünüyle Sayısal Kapalı-Döngü İFOJ

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. (a) Haberleşmede kullanılan Standard tek modlu optik fiber öz ve yansıtıcı katman yapısı (b) Panda tipi polarizasyon koruyan tek modlu optik fiberler için merkezde öz yer almaktadır. Yansıtıcı katmanda özün sağ ve solunda kırılma indisi farkı ile oluşturulmuş mekanik baskı elemanları. Mekanik baskı elemanları enine modda ilerleyen elektromagnetik dalga için hızlı ve yavaş eksenli fiber boyunca oluşturur. (c) Papyon (Bow-tie) tipi polarizasyon koruyan tek modlu optik fiber (d) Eliptik baskı elemanına sahip tek modlu polarizasyon koruyan optik fiber (e) Boş-Özlü Fotonik Band Aralıklı Optik Fiber (f) Fotonik Band Aralıklı Polarizasyon koruyan optik fiber.	5
2.2. İnterferometrik Fiber Optik Jiroskop'un tasarımında kullanılan tek modlu optik fiberin kesit detayı ve CCD kamerada alınmış görüntüsü.	6
2.3. İçten tam yansıma için sınır şartı.	7
2.4. Optik fiber için kritik açı (θ_{kr}) ve kabul açısı (θ_{ka}).	10
2.5. Fiber içersine ancak $2\theta_{ka}$ konisi içersinde kalan ışık kısmı girer.	11
2.6. Elektromagnetik mod çözümü elektromagnetik dalganın ilerlediği dalga kılavuzunun ara yüzeyindeki sınır şartlarına uyan dalga vektörü ile ilerler, $\vec{K}_1$.	12
2.7. Silindirik dielektrik dalga kılavuzu optik fiber için r radyal, θ açısal (azimutal) ve z boyuna koordinat eksenleri.	14
2.8a. Optik fiber içersinde elektromagnetik alan mod çözümleri.	36
2.8b. Optik fiber içersinde yayılım gösteren Sanki-Enine Elektrik Modun (Temel Mod) radyal ve açısal dağılımı.	37

2.9. Optik fiberlerin sınıflandırılması: Kırılma indisi profili ve mod dağılımına göre çıkıştaki optik güç dağılımı.	38
2.10. Optik fiber içerisinde ve çıkışında çeşitli LP mod şekillenimleri.	39
2.11. İFOJ prototipinde algılama sarımı olarak kullanılacak optik fiber için kesilim dalga boyu ölçüm düzeneği [Çelikel, 2005].	40
2.12. İFOJ prototipinde algılama sarımı olarak kullanılan optik fiberin kesilim dalga boyu ölçümünde elde edilen filtreli ve filtresiz optik güç seviyelerindeki değişim.	43
2.13. Logaritmik optik güç oranından kesilim dalga boyu değerinin belirlenmesi.	43
2.14. Tek modlu optik fiberin desteklediği LP ₀₁ modunun optik fiber çıkışında oluşturduğu optik akının radyal ve eksenel şekillenimi.	45
2.15. İFOJ prototipi algılama sarımında kullanılan tek modlu optik fiberin mod alan çapı ölçüm düzeneği. Uzak alan tarama yöntemi için, TÜBİTAK UME Optik Laboratuvarında oluşturularak ilgili optik fiberin 1306,7 nm ve 1550 nm dalgaboylarında mod alan çapı ölçümleri gerçekleştirilmiştir.	48
2.16. Uzak alan tarama metoduna göre açısal alan taraması başlamadan önce CCD kamera ile alınmış test fiberinin uç durumunu gösteren fotoğraf.	49
2.17. Mod alan çapı ölçümü sonucunda İFOJ prototipi algılama sarımında kullanılacak olan tek modlu optik fiberin uzak alandaki elektromagnetik alan dağılımı, $\pm 40^\circ$ 'lik bir açısal tarama için elde edilmiştir.	50

2.18. Tek modlu optik fiberin toplam tayfsal zayıflatmasının belirlendiği “Cut-Back” ölçüm düzeneği [Çelikel et al, 2005].	55
2.19. “Cut-Back” ölçümünde çıkış gücü $P_{\text{çıkış}}$ değerinin elde edildiği optik fiber çıkış ucunun uç düzgünlüğü.	56
2.20. “Cut-Back” ölçümünde çıkış gücü $P_{\text{giriş}}$ değerinin elde edildiği optik fiber çıkış ucunun uç düzgünlüğü.	57
2.21. Optik fiber geçiş zamanı ölçüm konfigürasyonu [Çelikel et al, 2005].	58
2.22. Tek modlu optik fiber içerisinde z-boyunca ilerleyen birbirine dik iki alan bileşeninden oluşan temel mod için polarizasyon mod dağılımından kaynaklanan Fark Grup Hızı $\Delta\tau$.	61
2.23. Çeşitli PK fiber tipleri. a) En yaygın kullanımda bulunan panda tipi PK tek modlu optik fiberdir b) oval baskı elemanına sahip PK fiber c) oval öz katmanına sahip PK fiber ve d) papyon tipi mekanik baskı elemanına sahip PK fiber.	62
3.1. Hava ortamında Sagnac Etkisinin gözlemlendiği çift demet interferometresi [Culshaw, 2006].	63
3.2. Monokromatik kaynağa sahip bir çift demet interferometresinin tepkisi. İki ışık demeti arasındaki faz ilişkisine bağlı aydınlık ve karanlık olarak elde edilen interferans saçakları ve buna karşılık gelen fotodiyot akım tepkisi.	65
3.3. Monokromatik ışınlam için Fourier dönüşümü.	66
3.4. Polikromatik ışınlam için Zaman ve Frekans domenleri arasındaki dönüşüm.	67

3.5. Polikromatik ışınımında faz uyumu ancak τ_0 uyum süresi kadardır. Yani kaynak bu süre esnasında uyumlu kalır.	68
3.6. Faz uyum süresine bağlı elektromagnetik ışınımların frekans domeni değişimleri.	70
3.7. Elektromagnetik bir ışınımın frekans tayfı interferogramın Fourier Dönüşümü uygulanmış halidir.	71
3.8. Michelson interferometresi. İki demet arasındaki faz farkı $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2h .$	72
3.9. Polikromatik ışınım demeti için çift demet interferometresinin tepkisi.	75
3.10. İFOJ prototipinde yer alan PZT'nin sinüs biçimli voltaj ile modüle edilmesi sonucunda oluşan interferans saçaklarının 500 MHz osiloskopta elde edilen görüntüsü.	77
4.1. Sagnac Etkisi.	79
5.1. Açık-döngü interferometrik fiber optik jiroskop için minimum Konfigürasyon.	83
5.2. İnterferometrik fiber optik jiroskobun algılama sarımında oluşan duran dalgalar [Lefevre, 1993].	84
5.3. Dönme hareketi varken ve yokken faz modülasyonlu fiber optik jiroskopta (Sagnac İnterferometresi) oluşan fotoakım şekillenimi.	91

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.4. Tasarımı gerçekleştirilen faz modülasyonlu Açık-Döngü İFOJ prototipinin durgunken ürettiği fotoakımının zaman bağımlılığı (Denklem (4.8)'deki çift frekans bileşenleri görülmekte).	92
5.5a. İFOJ prototipi saat istikametinde (CW) dönerken elde edilen tepki.	93
5.5b. İFOJ prototipi saatin aksi istikamette (CCW) dönerken elde edilen tepki.	93
5.6. Operasyonel yükselteç kullanarak oluşturulan tipik akım-gerilim-dönüştürücüsü devre kurguları.	96
5.7. Band geçiren filtre devresi. f_m merkez frekansına sahip Sagnac Fazını taşıyan tek frekans bileşenlerini geçirir.	98
5.8. 180° faz çeviren doğrusal yükselteç devresi.	99
5.9. AD630 dengeli modülatör/demodülatör entegresi ile referans faz modülasyon sinyali ve Sagnac Fazı'nı taşıyan sinyalin analog çarpımı.	100
5.10. Dinamik faz izleme devresinin çıkış katını oluşturan alçak frekans geçiren filtre ve gerilim takipçisi katı.	102
6.1. İFOJ prototipinin optik ve elektronik bileşenler ile bazı elemanların dinamik faz izleme devresi üzerindeki yerleşimleri. OP27 ve OPA111 ilgili elektronik devre katında kullanılan operasyonel yükselteçlerin kodudur [Çelikel, 2007].	104
6.2. İlk kurgulanan İFOJ prototipi. Dinamik Faz İzleme Devresi tasarımının tamamlanmamış olduğu durum.	105

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.3. Dinamik faz izleme devresi oluşturulmuş halde Açık-Döngü İFOJ prototipi ve 10 cm çapa sahip Dinamik Faz İzleme Devresi'nin baskılı devreye aktarılmış hali.	106
6.4. İFOJ prototipinde optik ışıma kaynağı olarak kullanılan EDFA'nın genişbandlı ASE tayfı.	107
7.1. İnterferometrik jiroskopta Gürültü (Noise) ve Sabit Kayma Kararlılığı (Bias Stability / Bias Drift).	114
8.1. Algılama sarımının açısız hıza duyarlı ve duyarsız yüzeyleri.	120
8.2. Ölçek Faktörü ve Sabit Kayma Kararlılığı ölçümlerinden önce yeryüzü açısız hızından dolayı İFOJ Prototipi üzerinde uyarılan ofset Sagnac Fazı'nın ortadan kaldırılması için algılama sarımının, yeryüzü dönüş eksenine dik şekilde konumlandırılması [Çelikel, 2007].	121
8.3. Açık-Döngü İFOJ Prototipinin açısız hıza verdiği tepki.	124
8.4. İFOJ Prototipinin Sabit Kayma Kararlılığı.	128
8.5. Açık-Döngü (ve Kapalı-Döngü) İFOJ Prototipi için yazılımsal ve donanımsal tasarımı gerçekleştirilen mikroişlemci esaslı akım ve sıcaklık kontrolüne sahip SLD Besleme Kartı.	129
8.6. SLD optik ışıyım kaynağına sahip Açık-Döngü (ve Kapalı Döngü) İFOJ Prototipi'nin son hali.	130
9.1. Kapalı-döngü İFOJ prototipinin tasarım detayı.	134

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
9.2a. BSKD-İFOJ'un CW yönünde dönmesi sonucu oluşan Sagnac Fazının faz modülatörüne dc dış kutuplama uygulanması ile sıfırlanması işlemi.	138
9.2b. BSKD-İFOJ'un CCW yönünde dönmesi sonucu oluşan Sagnac Fazının faz modülatörüne dc dış kutuplama uygulanması ile sıfırlanması işlemi.	138
9.3. BSKD-İFOJ'un zamanlama diyagramı ve yazılımın akış şeması.	143
10.1. BSKD-İFOJ Prototipinin uygulanan açısal hıza karşı verdiği tepki olarak belirlenen Ölçek Faktörü'ndeki (SF) değişim.	145
10.2. BSKD-İFOJ Prototipinin Sabit Kayma Kararlılığı ölçüm sonucu.	147

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
8.1. Açık-Döngü İFOJ Prototipi Ölçek Faktörünün belirlenmesine dair ölçüm sonuçları.	123
8.2. Açık-Döngü İFOJ Prototipi için Sabit Kayma Kararlılığı ölçüm sonuçları.	126
10.1. BSKD-İFOJ prototipinin Ölçek Faktörü ölçüm sonuçları.	146
10.2. BSKD-İFOJ Prototipi Sabit Kayma Kararlılığı ölçüm sonuçları.	148

1. GİRİŞ

Kara, deniz ve bilhassa hava araçları, taktik ve stratejik amaçlı füze sistemleri ile uydular gibi çok hassas konum bilgisinin gerekli olduğu bütün platform ve uygulamalarda, Ataletsel Seyrüsefer Sistemleri (Inertial Navigation Systems – INS)’ne ihtiyaç duyulur. Kısaca INS olarak adlandırılan bu sistemler bağlı oldukları platformun konumlama bilgisini, sahip oldukları jiroskop ve ivmeölçerler sayesinde elde eder. INS sahip olduğu jiroskop ve ivme ölçerler sayesinde bağlı bulunduğu platformun, üç boyutlu gerçek uzayda ve gerçek zamanlı bir vektör olarak tanımlanmasına olanak verir. Bu vektörün ilgili eksene izdüşüm yapan büyüklüğü ivme ölçerler ile belirlenirken vektörün doğrultu ve dolayısıyla da yönelim bilgisi jiroskoplar ile elde edilir. Bu nedenledir ki, Micro Electro Mechanical Systems “MEMS” ve Mikro-Opto-Electro-Mechanical-Systems “MOEMS” jiroskoplara nazaran çok daha yüksek performans kriterleri sağlayan, hareketli kısımlar içermediğinden daha uzun kullanım ömrü ve doğrusal ivmelenmeye karşı duyarsız olan interferometrik esaslı Halka-Lazer “Ring Laser” ve Fiber Optik Jiroskoplar “Fiber Optic Gyroscope”, imâl edildikleri ülke adına stratejik anlam taşırlar.

Bu Doktora Tezi Çalışması’nın amacı Türkiye’de ilk kez, Ataletsel Seyrüsefer (Inertial Navigation Systems-INS) sistemlerinde mutlak açısal hız algılama sensörü olarak yer alan Açık-Döngü ve Kapalı-Döngü interferometrik fiber optik jiroskop (İFOJ) prototiplerinin tasarımının yurt içindeki mevcut imkanlarla gerçekleştirilmesi, gerçekleştirilen prototiplerin performans kriterlerinin ortaya koyulması ve prototiplerin karakterizasyon çalışmalarıdır. Bu bağlamda oluşturacak İFOJ prototiplerinde algılama elemanı olarak kullanılması planlanan optik fiberin, tasarımın performansını etkileyecek temel optik karakteristiklerinin belirlenip bu karakteristiklerin metrolojik doğruluk ve kesinlik seviyelerinde ölçülebilmesi için uygulanan ölçüm metotları da bu Doktora Tez Çalışmasında yer alacaktır.

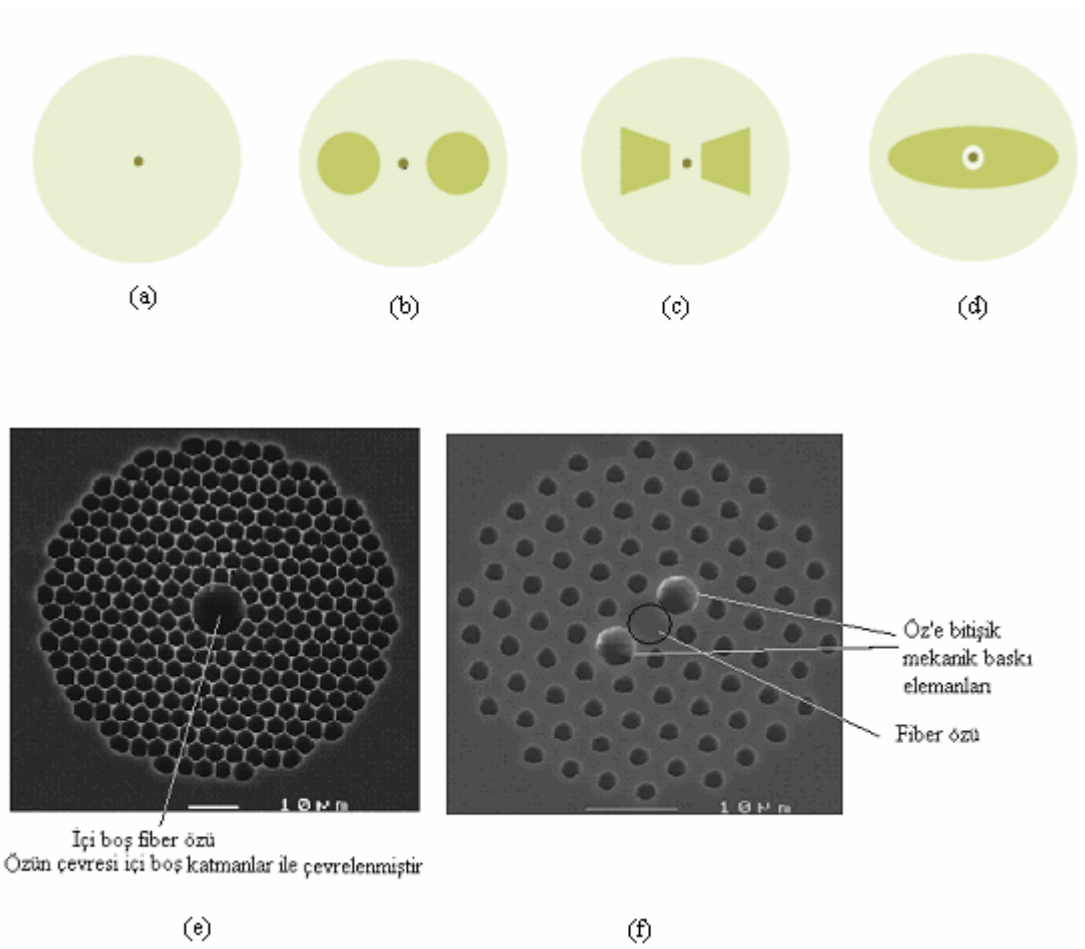
TÜBİTAK tarafından 10 Mart 2005 tarihinde düzenlenen 11. Bilim Teknoloji Yüksek Kurulu Toplantısının değerlendirme metninde yer alan “2005 yılında başlayıp 2011 yılının sonuna kadar uzanan bir periyot içerisinde jiroskop teknolojisinin geliştirilmesine” yönelik oluşturulan ulusal hedef için, bu Doktora

Tezi önemli bir temel teşkil edecek ve belirlenen hedefe ulaşılmasında katkılarda bulunacaktır.

2. OPTİK FİBER

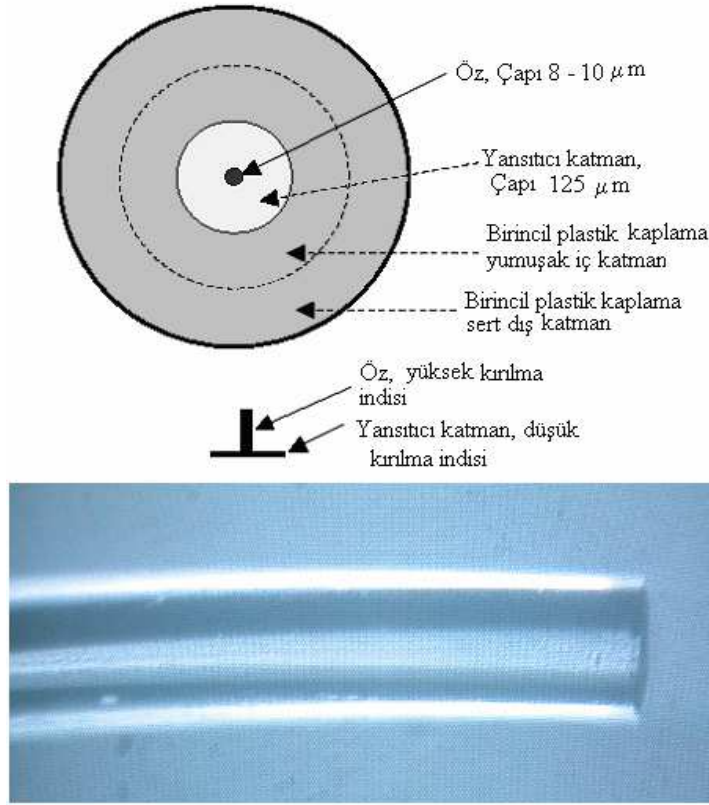
Optik fiber silikadan (SiO_2) yapılmış, geometrik yapısı itibarıyla silindirik, eş merkezli dielektrik dalga kılavuzudur. Optik fiberde, kırılma indeksi farklılığı yaratarak İçten Tam Yansıma (Total Internal Reflection) prensibine dayalı olarak ışığın iletilebilmesi için, öz (core) olarak adlandırılan ve iletilen optik gücün ortalama %90'lık kısmının grup hızıyla dalga paketi olarak ilerlediği iç kısım Ge ve Al gibi elementler ile katkılandırılır. Bu sayede öz kırılma indisi değeri yansıtıcı katman (cladding) kırılma indisi değerinden yaklaşık %0,1 oranında daha yüksek duruma getirilir. Optik haberleşmede kullanılan optik fiberlerin yansıtıcı katman (cladding) olarak adlandırılan kısımlarının çapı 80 μm ilâ 125 μm arasında değişirken, tek modlu fiberler için öz katmanının çapı 8 μm -10 μm arasında değişiklik göstermektedir. Ancak sensör ve optik yükselteç olarak kullanılan optik fiberlerde bu katman çapları uygulamadan uygulamaya değişiklik göstermektedir. Örneğin 1550 nm bandındaki Erbium Katkılı Fiber Yükselteç (Erbium Doped Fiber Amplifier – EDFA), 1300 nm bandındaki Praseodimyum Katkılı Florid Fiber Yükselteç (Praseodymium Doped Fluorid Fiber Amplifier – PDFFA), 2900 nm bandındaki Holmiyum Katkılı Florid Fiber Yükselteç (Holmium Doped Fluorid Fiber Amplifier - HDFFA) ile 1470 nm ve 800 nm bandındaki Tülyum Katkılı Florid Fiber Yükselteç (Tulium Doped Fluorid Fiber Amplifier - TDFFA) fiber lazerler için öz çapları uygulama ve optik pompalama mekanizmalarının çeşitliliğine göre 4 μm 'den 95 μm 'ye kadar değişimler göstermektedir. Bu tip fiber lazer veya sensör uygulamalarında kullanılan optik fiberlerin öz profilleri de haberleşmede kullanılan standard optik fiberleri öz profillerinden farklılık gösterebilmektedir. [Soares,1994], [Derickson, 1997] ve [Fiber Core Limited Official Internet Site, 2008]. Optik fiberlerin taşıdıkları ışığın yüksek hızda doğrudan genlik, frekans veya faz modülasyonuna izin vermesi, tayfsal zayıflatmasının düşük olması [Grattan at al, 1995], fiziksel olarak esnek olmaları, ayrıca özellikle bu çalışmanın da konusu olan interferometrik düzenek oluşturmada pek çok avantajlar sağlaması nedeniyle sensör tasarımcıları tarafından en gözde algılama elemanları olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Optik fiberlerin haberleşme dışında sensör elemanları olarak kullanılması, fiber üreticilerini klasik haberleşme fiberlerinin dışında farklı geometrik ve optik özellikleri sahip optik fiber imalatına yönlendirmiştir. Özellikle

optik fiber içerisinde iletilen güç seviyesine doğrudan bağlı, silikanın doğasında mevcut doğrusal olmayan (nonlinear effect) Uyarılmış Brillouin Saçılması, Uyarılmış Raman Saçılması ve optik Kerr Etkisi'nin indirgenmesi yani doğrusal olmayan etki için eşik optik güç seviyesinin yükseltilebilmesi için Boş-Özlü Fotonik Band Aralıklı Fiber (Hollow –Core Photonic Band Gap Fiber) imlâtları söz konusu olmuştur. Bu tip fiberlerde yukarıda belirtilen tarzda İçten Tam Yansıma ile optik güç iletimi söz konusu olmayıp ışığın kılavuzlanması temelde farklı bir mekanizma olan Fotonik Band Aralığı mekanizmasıyla gerçekleşmektedir [Soares,1994] ve [Crystal Fibre A/S Official Internet Site]. Bu tip fiber yapılarına ilave olarak bir de öz katmanında Sanki Enine Elektrik Modda (quasi-transverse electric mode) yayılmakta olan elektromagnetik dalganın polarizasyon durumunu koruyan fiber geometrileri de mevcuttur. Bu tip fiberler Polarizasyon Koruyan PK (Polarization Maintaining Fiber) fiberler olarak adlandırılır. Enine elektromagnetik moddaki ışık dalgasının giriş ile çıkıştaki polarizasyon durumlarının korunabilmesi için öz katmanı boyunca kırılma indeks farklılığı ile meydana getirilen mekanik baskı (stress elements) elemanları imalat esnasında oluşturulur. Bu mekanik baskı elemanları öz katmanına göre ya yüksek kırılma indisi ya da düşük kırılma indisine sahip olabilmektedir. Mekanik baskı elemanları fiberin öz katmanı boyunca ilerleyen elektromagnetik dalga için hızlı ve yavaş geçiren eksenlerini meydana getirerek, girişte yavaş ve hızlı eksenlere bölüşürülen optik güç miktarının çıkışta da aynı yavaş ve hızlı eksenlerde mevcut kalmasını sağlar. Dolayısıyla bu baskı elemanları ile sanki enine elektromagnetik moddaki dalganın polarizasyon durumu, optik fiber boyunca sabit tutularak dış çevresel faktörlerin değişmesi ile fiber özünde oluşacak geliş güzel kırılma indisi değişimlerinin meydana getirebileceği ve önceden kestirilemeyen nitelikteki optik güç değişimleri ortadan kaldırmaktadır. Bir başka deyişle, elektrik alan vektörünün dairesel (uygulamada eliptik polarize) olarak fiber içinde dönmesi engellenir ve birbirine dik iki çiftlenimsiz polarizasyon bileşeninde bölüşülen enerjinin iletim hattı boyunca korunması sağlanır.



Şekil 2.1. (a) Haberleşmede kullanılan Standard tek modlu optik fiber öz ve yansıtıcı katman yapısı (b) Panda tipi polarizasyon koruyan tek modlu optik fiberler için merkezde öz yer almaktadır. Yansıtıcı katmanda özün sağ ve solunda kırılma indisi farkı ile oluşturulmuş mekanik baskı elemanları. Mekanik baskı elemanları enine modda ilerleyen elektromagnetik dalga için hızlı ve yavaş eksenini fiber boyunca oluşturur. (c) Papyon (Bow-tie) tipi polarizasyon koruyan tek modlu optik fiber (d) Eliptik baskı elemanına sahip tek modlu polarizasyon koruyan optik fiber (e) Boş-Özlü Fotonik Band Aralıklı Optik Fiber (f) Fotonik Band Aralıklı Polarizasyon koruyan optik fiber

Bu Doktora Tezi'nin konusu olan İnterferometrik Fiber Optik Jiroskop (İFOJ) Prototipi'nin tasarımında kullanılan tek modlu optik fiberin enine kesiti ve geometrik bilgileri Şekil 2.2'de verilmektedir.



Şekil 2.2. İnterferometrik Fiber Optik Jiroskop'un tasarımında kullanılan tek modlu optik fiberin kesit detayı ve CCD kamerada alınmış görüntüsü.

2.1. Optik Fiberlerin Sınıflandırılması

Optik Fiberler kırılma indisi profillerine göre ikiye ayrılır;

- a- Basamak indisli optik fiber
- b- Dereceli indisli optik fiber

Optik fiberler, içersinde yayılan elektromagnetik dalganın sahip olduğu mod sayısını destekleme bakımından da iki gruba ayrılırlar;

- a- Tek modlu optik fiber
- b- Çok modlu optik fiber

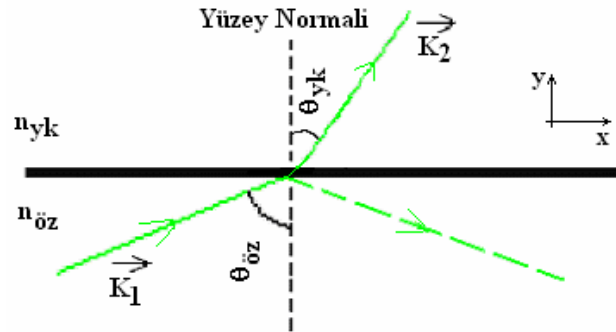
Kırılma indisi profili ve destekledikleri moda göre yapılan sınıflandırmaları göz önünde bulundurarak optik fiber teknolojisinde kullanılan en genel sınıflandırma biçimi bu her iki özelliği de içerecek şekilde;

- a- Basamak indisli çok modlu fiber
- b- Dereceli indisli çok modlu fiber
- c- Tek modlu fiber

şeklinde verilir. En son verilen “Tek modlu fiber” sınıfı, tek modlu iletimin doğasında var olan basamak türü kırılma indisine sahip optik fiberler ile başarılabildiğinden, bu sınıflandırma türü için tekrardan bir kırılma indisi profili tanımlamasına gidilmemiştir.

2.2. Işığın Optik Fiber İçerisinde Yayılması ve İçten Tam Yansıma (Total Internal Reflection)

Boş-Özlü Fotonik Band Aralıklı Fiberler hariç, haberleşmede ve sensör uygulamalarında kullanılan geleneksel tarzda imâl edilmiş optik fiberlerde, ışığın bir uçtan diğer uca iletilmesi, İçten Tam Yansıma prensibine uygun olarak gerçekleşir. Fiber özü olarak belirtilen yüksek kırılma indisli ilerleyen ışık dalgası, kritik açı θ_{kr} ve daha büyük bir açı ile yansıtıcı katman olarak belirtilen düşük kırılma indisli ara yüzeye geldiğinde, yansıtıcı katmana sızma yapmadan bütünüyle geldiği öz ortamına geri dönerek yayılma doğrultusunda ilerleyecektir. Dolayısıyla θ_{kr} ve daha büyük açılar için içten tam yansıma sınır şartı optik fiber içersinde sağlanmış olur, $n_{öz} > n_{yk}$



Şekil 2.3. İçten tam yansıma için sınır şartı.

Şekil 2.3'te $\theta_{öz}$, ara yüzeye gelen ışık dalgasının geliş açısı ve θ_{yk} 'da normale göre Snell Yasasına uygun şekilde kırılarak yansıtıcı katman dışına çıkan ışık dalgasının çıkış açılarıdır. İçten tam yansıma olabilmesi için gerekli olan sınır şartımız K_2 vektörü ile gösterilen dalga vektörünün bulunmamasını sağlayacak $\theta_{öz}$ açı değerini

elde etmek olacaktır. Bu durumda $\vec{K}_1$ ve $\vec{K}_2$ açıs al dalg a vektörlerini vektörel bileşenleri cinsinden yazalım;

$$\vec{K}_1 = k_{1x}\hat{x} + k_{1y}\hat{y} \quad \vec{K}_2 = k_{2x}\hat{x} + k_{2y}\hat{y} \quad (2.1)$$

Vakum ortamda ilerleyen elektromagnetik dalganın açıs al dalg a vektörünün büyüklüğü;

$$|\vec{K}| = \omega / c \quad (2.2)$$

Burada ω açıs al frekans ve c 'de vakum ortamdaki ışık hızıdır. $n_{öz}$ ve n_{yk} ortamlarında ilerleyen ışık dalgaları için $\vec{K}_1$ ve $\vec{K}_2$ vektörlerinin büyüklükleri;

$$|\vec{K}_1| = n_{öz} \cdot (\omega / c) \quad |\vec{K}_2| = n_{yk} \cdot (\omega / c) \quad (2.3)$$

olarak yazılır. Denklem (2.1) ve Denklem (2.3)'te verilen açıs al dalg a vektörlerinin büyüklüklerini birbirlerine eşitleyerek;

$$|\vec{K}_1|^2 = n_{öz}^2 \cdot (\omega / c)^2 = k_{1x}^2 + k_{1y}^2 \quad (2.4)$$

$$|\vec{K}_2|^2 = n_{yk}^2 \cdot (\omega / c)^2 = k_{2x}^2 + k_{2y}^2 \quad (2.5)$$

Öz ile yansıtıcı katman ara yüzeyindeki açıs al dalg a vektörü bileşeni yani x bileşeni sürekliliğe sahiptir. Bu Snell Yasası olarak bilinir $k_{1x} = k_{2x}$;

$$|\vec{K}_1| \cdot \sin \theta_{öz} = |\vec{K}_2| \cdot \sin \theta_{yk} \quad n_{öz} \cdot \frac{\omega}{c} \cdot \sin \theta_{öz} = n_{yk} \cdot \frac{\omega}{c} \cdot \sin \theta_{yk} \quad (2.6)$$

Bu son denklemden de;

$$n_{\text{öz}} \cdot \sin \theta_{\text{öz}} = n_{\text{yk}} \cdot \sin \theta_{\text{yk}} \quad (2.7)$$

ifadesi elde edilmiş olur. $\vec{K}_2$ açısall dalga vektörünün y-bileşeninin sıfır olması içten tam yansıma mekanizması için sınır şartını oluşturacaktır. Denklem (2.5)'te süreklilik şartından k_{2x} yerine $k_{1x} = n_{\text{öz}} \cdot \frac{\omega}{c} \cdot \sin \theta_{\text{öz}}$ yazarak;

$$k_{2y} = \frac{\omega}{c} \cdot (n_{\text{yk}}^2 - n_{\text{öz}}^2 \cdot \sin^2 \theta_{\text{öz}})^{1/2} \quad (2.8)$$

$\vec{K}_2$ açısall dalga vektörünün y-bileşeni elde edilir. İçten tam yansıma için k_{2y} bileşeninin sıfır olması şartını getirirsek, Denklem (2.8)'deki parantezin içi sıfır olmalıdır;

$$\sin \theta_{\text{kr}} = \frac{n_{\text{yk}}}{n_{\text{öz}}} \quad (2.9)$$

kritik açı ifadesi elde edilir. Haberleşme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakta olan tipik tek modlu optik fiberler için, öz ve yansıtıcı katman arasındaki kırılma indis farkı yaklaşık % 0,1 ilâ % 0,4 arasında değişim gösterir. Bu değişime karşılık gelen kritik açı değeri ise sırasıyla 87,44° ilâ 84,88° arasındadır. Yani ışık öz/yansıtıcı katman ara yüzeyine neredeyse paralele yakın bir yansıma ile yayılım gösterir.

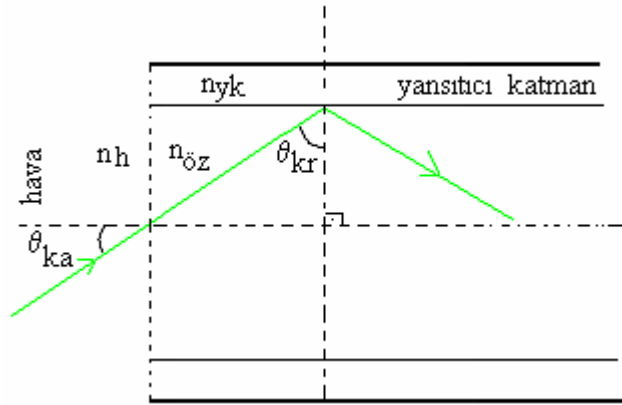
Optik fiber içersinde x-yönünde ilerleyen ışık dalgasının yayılımına iki boyutta bakacak olursak, x-yönünde üstel azalan ve y-yönünde ilerleyen dalga denklemi benzeşimi bu yayılım davranışı için anlamlı olacaktır.

$$\psi(x, y, t) = A \cdot e^{-k_x x} \cdot \cos(\omega t - k_y y) \quad (2.10)$$

Dolayısıyla bu dalga denklemi incelendiğinde, ışığın A genliğinin yayılımın mevcut olduğu x-ekseni boyunca, k_x ve x ile orantılı olarak azalması söz konusudur. Burada k_x öz katmanında ilerleyen ışığın öz katmanı içersindeki açısall dalga sabiti ve x,

ışığın optik fiber içerisinde yayılım göstererek katettiği optik mesafedir. k_x açisal dalga vektörü içerisinde yer alan ve öz katmanına ait kırılma indisi parametresi, Rayleigh Saçılma Etkisi ile Optik Soğurulma Etkilerinden meydana gelen ve dB/km cinsinden verilen tayfsal zayıflatma parametresini izah etmede kullanılan bir parametre olacaktır.

Fiber içerisinde ışığın içten tam yansıma ile ilerleyebilmesi için ışığı öz/yansıtıcı katman ara yüzeyine kritik açı veya kritik açıdan daha büyük açıda düşürmek gereklidir. Dolayısıyla fiber ucuna bağlanacak ışık kaynağının fiberin nümerik açıklığına (Numerical Aperture-NA) uygun geometride odaklamaya sahip olması aşîkârdır. Optik fiber teknolojisinde kritik açıdan ziyade daha çok Kabul Açısı (Acceptance Angle) terimi kullanılır.



Şekil 2.4. Optik fiber için kritik açı (θ_{kr}) ve kabul açısı (θ_{ka}).

Kabul açısının (θ_{ka}) radyan cinsinden sinüs değeri, ilgili optik fiberin nümerik açıklığı (NA) olarak tanımlanır. Şekil 2.4'ü dikkate alarak hava/öz ara yüzeyi için süreklilik şartı olan Snell Eşitliğini yazarak;

$$n_h \cdot \sin \theta_{ka} = n_{öz} \cdot \sin(90 - \theta_{öz}) \quad (2.11)$$

$$n_h \cdot \sin \theta_{ka} = n_{öz} \cdot (\sin 90 \cdot \cos \theta_{öz} - \cos 90 \cdot \sin \theta_{öz})$$

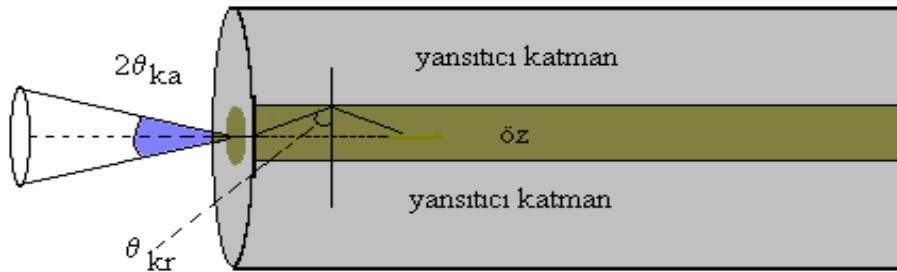
$$n_h \cdot \sin \theta_{ka} = n_{öz} \cdot (1 - \sin^2 \theta_{öz})^{1/2}$$

İçten tam yansıma olması için öz/yansıtıcı katman arasındaki kritik açının değerini kullanarak $\sin\theta_{öz} = \sin\theta_{kr}$ ve Denklem (2.9)'u kullanarak;

$$\text{Numerik Açıklık} = \sin\theta_{ka} = \left(n_{öz}^2 - n_{yk}^2\right)^{1/2} \quad (\text{rad}) \quad (2.12)$$

Nümerik açıklık (NA) değeri optik fiber için elde edilir. Havanın mutlak kırılma indisi 1,0008'dir. Bu ifadenin hesaplanmasında havanın kırılma indisi 1,0000 kabul edilmiştir. Optik fiber içinde içten tam yansıma ile yayılan elektromanyetik dalganın belli bir derinlikte daha düşük kırılma indisine sahip yansıtıcı katman içine girmesi ve üstel azalan formda davranış sergilemesi gözlenir (Evanescent wave). Üstel azalan formdaki bu elektromanyetik alan genellikle fiberden fibere elektromanyetik ışıyım çiftlenimi için kullanılır.

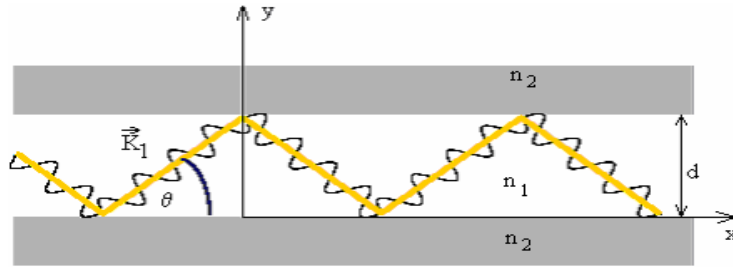
Bu Doktora Tezinin konusu olan İnterferometrik Fiber Optik Jiroskop (İFOG) Prototipi'nde algılama elemanları olarak kullanılan optik fiberler, Corning ve FUJIKURA Ltd. firmalarının imâl ettiği tek modlu optik fiberlerdir. Corning imâlâtı SMF-28 tipi fiber 0,14 rad'lık NA değeri ve 8,2 μm öz çapına sahiptir. Belirtilen NA değeri, tepe açıklığı 16° 'lik bir koni şeklinde ışığın öz merkezine odaklanması ile en verimli içten tam yansıma sağlanır. Corning INC. Firması tarafından imâl edilen SMF-28 tek modlu optik fiber için öz kırılma indisi değeri 1550 nm'de 1,4682 ve 1310 nm'de ise 1,4677'dir [Corning Incorporated SMF-28 Technical Data Sheet, 2008].



Şekil 2.5. Fiber içersine ancak $2\theta_{ka}$ konisi içersinde kalan ışık kısmı girer.

2.3. Optik Fiber İçerisindeki Elektromagnetik Modlar

Bir elektromagnetik mod, elektromagnetik dalganın içinde ilerlediği kılavuz ortamın, fiziksel özelliklerinin meydana getirdiği sınır şartlarıyla elde edilen özel çözümlere karşılık gelir. Optik fiber için bu fiziksel şartlar öz kırılma indisi, yansıtıcı katman kırılma indisi, elektromagnetik dalganın dalga boyu ve ışığın içerisinde ilerlediği optik fiberin çapı olarak verilir. Optik fiber içerisinde elektromagnetik dalganın mod çözümlerine ulaşmak ve dielektrik dalga kılavuzu olan optik fiber boyunca yayılım gösteren bu modların yayılım sabitini elde etmek için Şekil 2.6'yı dikkate alalım.



Şekil 2.6. Metalik dalga kılavuzu.

Fiber özü içerisinde $\vec{K}_1$ açısıl dalga vektörü ile ilerleyen elektromagnetik dalganın dalga denklemini, optik fiberi ilk önce iki boyutta düzlemsel metalik bir dalga kılavuzu şeklinde ele alarak yazalım;

$$\psi(x, y, t) = (A \cdot \sin k_{1y} y + B \cdot \cos k_{1y} y) \cdot \cos(\omega t - k_{1x} x) \quad (2.13)$$

Mod çözümüne ve yayılım sabitine ulaşmak için $\vec{K}_1$ vektörünün x ve y bileşenlerini yazarak sınır şartlarını oluşturmak gereklidir.

$$\vec{K}_1 = k_{1x} \hat{x} + k_{1y} \hat{y} \quad (2.14)$$

ve sınır şartı da, $\psi(x, 0, t) = \psi(x, d, t) = 0$ (mükemmel iletken);

$$k_{1x} = |\vec{K}_1| \cos \theta \quad (2.15)$$

$$k_{1y} = |\vec{K}_1| \sin \theta \quad (2.16)$$

$$|\vec{K}_1| = n_1 \frac{\omega}{c} \quad (2.17)$$

$$k_{1y} = n_1 \frac{\omega}{c} \sin \theta \quad (2.18)$$

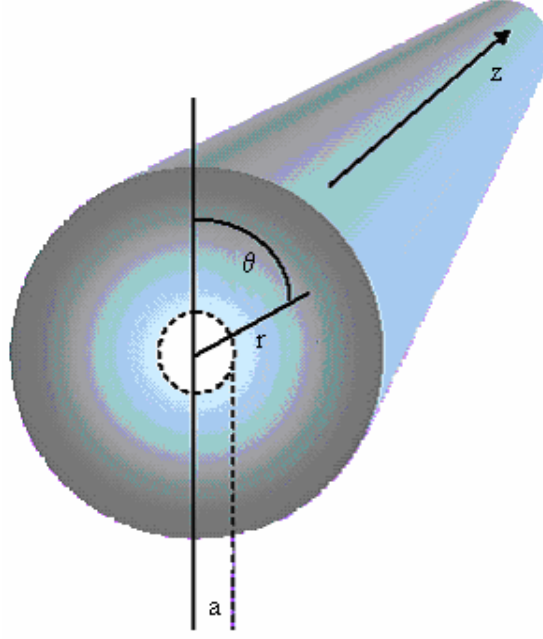
Sınır şartından $B=0$ elde edilirken;

$$k_{1y}d = 2\pi N \quad (N \in \mathbb{Z}) \quad (2.19)$$

Denklem (2.18) ve Denklem (2.19)'u kullanarak;

$$\sin \theta = \frac{N\lambda}{d n_1} \quad (2.20)$$

ifadesi metalik düzlemsel dalga kılavuzu için elde edilir. Burada N mod sayısıdır. Denklem (2.15) ise yayılım sabiti olarak adlandırılır. Metalik dalga kılavuzuna göre yapılan bu çözümü dielektrik ortam için ele alınırsa örneğin optik fiber için, $\sin \theta < \sin \theta_{kr}$ olacaktır. Aslında mod çözümleri ve buna bağlı olarak optik fiber içerisinde ilerleyen ışığın elektromagnetik alan dağılımını daha doğru bir şekilde etmek gereklidir. Bunu başarmak için, yukarıda verilen sınır şartının, optik fiberi geometrik olarak çok daha iyi şekilde modelleyen silindirik dalga kılavuzları için uygulanması ve bu şekilde mod çözümlerinin elde edilmesi gereklidir. Maxwell denklemleri ile elektrik ve magnetik alan için Helmholtz eşitliklerinin enine yayılım modlarını oluşturan radyal/açısal ve boyuna kısımlara ayrılarak çözülmesi sonucunda öz ve yansıtıcı katman için tam mod çözümlerine ulaşılır [Soares 1994], [Çelikel, 2005] ve [Cantrell and Hollenbeck, 2001].



Şekil 2.7. Silindirik dielektrik dalga kılavuzu optik fiber için r radyal, θ açısall (azimutal) ve z boyuna koordinat eksenleri.

Dielektrik öz içerisinde ilerleyen elektromagnetik dalganın Maxwell denklemlerini sağlayan elektrik ve magnetik alan bileşeni çözümleri;

$$E(r, \theta, z, t) = e(r, \theta) \cdot e^{i(\beta z - \omega t)} \quad (2.21)$$

$$H(r, \theta, z, t) = h(r, \theta) \cdot e^{i(\beta z - \omega t)} \quad (2.22)$$

Burada β yayılım sabiti (yani açısall dalga vektörünün boyuna eksen üzerindeki izdüşümü) ve $\omega = ck_0 = c \frac{2\pi}{\lambda_{\text{vakum}}}$ olarak tek frekanslı monokromatik dalgayı temsil etmektedir. Her iki alanın da hem enine ve hem de boyuna bileşenleri söz konusudur. Dolayısıyla izotropik olarak varsayacağımız dielektrik ortamdaki enine ve boyuna alan bileşen türetmek için enine $e_T(r, \theta)$ ile $h_T(r, \theta)$ ve boyuna $e_z(t, \theta)$ ve $h_z(t, \theta)$ alan bileşenlerini temsil edecek şekilde aşağıdaki formda yazılmalıdır.

$$E(r, \theta, z, t) = [e_T(r, \theta) + \hat{z}e_z(t, \theta)]e^{i(\beta z - \omega t)} \quad (2.23)$$

$$H(r, \theta, z, t) = [h_T(r, \theta) + \hat{z}h_z(t, \theta)]e^{i(\beta z - \omega t)} \quad (2.24)$$

Dolayısıyla silindirik koordinatlarda z-yönünde ilerleyen elektromagnetik dalga için e_T ve h_T enine alan bileşenlerini temsil ederken, e_z ve h_z 'de boyuna alan bileşenlerini temsil eder. İzotropik dielektrik malzeme içerisinde ilerleyen elektromagnetik dalga;

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{i\omega}{c} \vec{H} \quad (2.25)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{\epsilon}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{i\omega\epsilon}{c} \vec{E} \quad (2.26)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{ve} \quad E = E_0 e^{-i\omega t} \quad (2.27)$$

Maxwell denklemlerini sağlar (CGS Gauss Birim sistemi). Denklem (2.25) ve Denklem (2.26)'daki $i\omega$ alanların harmonik zaman bağımlılığını gösterir. D dielektrik malzeme içerisindeki elektrik alanı gösterirken ϵ , fiber ortamı silikanın (SiO_2) dielektrik sabitidir. Denklem (2.25)'te, silika ferromagnetik malzeme olmadığından $\vec{B}$ yerine doğrudan $\vec{H}$ yazılmıştır (bağıl magnetik geçirgenlik, $\mu \approx 1$) [Cantrell and Hollenbeck, 2001].

Gradient operatörünün silindirik koordinatlardaki formunu $\left(\nabla = \hat{r} \frac{\partial}{\partial r} + \hat{\theta} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z} \right)$ hesaba katarak yapılan ara işlemler sonucunda, enine ve boyuna magnetik alan bileşenlerinin enine ve boyuna elektrik alan bileşenleri ile çiftlenim içerisinde olduğu görülür.

$$e_z = \frac{i}{k_0 \epsilon} \hat{z} (\vec{\nabla}_T \times \vec{h}_T) \quad (2.28)$$

$$e_T = -\frac{1}{k_0 \epsilon} \hat{z} \times [\beta \vec{h}_T + i \vec{\nabla}_T \vec{h}_z] \quad (2.29)$$

$$h_Z = -\frac{i}{k_0} \hat{z} (\vec{\nabla}_T \times \vec{e}_T) \quad (2.30)$$

$$h_T = \frac{1}{k_0} \hat{z} \times [\beta \vec{e}_T + i \vec{\nabla}_T \vec{e}_Z] \quad (2.31)$$

Burada $\nabla_T = \hat{r} \frac{\partial}{\partial r} + \hat{\theta} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}$ şeklindedir. ∇_T , buradaki hesaplamalarda kullanılan gradyent operatörünün silindirik koordinatlarda enine bileşenini ifade eder ve elektrik ile magnetik alanların radyal (r) ve açısal (θ) bağımlı kısımları üzerinde işlem yapar [Cantrell and Hollenbeck, 2001]. Denklem (2.31)'i Denklem (2.29)'da yerine yazarsak;

$$\vec{e}_T = \frac{i}{k_0^2 \epsilon - \beta^2} [\beta \vec{\nabla}_T \vec{e}_Z - k_0 \hat{z} \times (\vec{\nabla}_T h_Z)] \quad (2.32)$$

ifadesi elde edilir. Gradyent operatörünün radyal ve açısal bileşenleri olduğundan enine elektrik alanının radyal ve açısal bileşenleri de;

$$\vec{e}_r = \frac{i}{k_0^2 \epsilon - \beta^2} \left[\beta \frac{\partial \vec{e}_Z}{\partial r} + \frac{k_0}{r} \frac{\partial \vec{h}_Z}{\partial \theta} \right] \quad (2.33)$$

$$\vec{e}_\theta = \frac{i}{k_0^2 \epsilon - \beta^2} \left[\beta \frac{\partial \vec{e}_Z}{\partial \theta} - k_0 \frac{\partial \vec{h}_Z}{\partial r} \right] \quad (2.34)$$

şeklinde yazılır. Benzer şekilde Denklem (2.29), Denklem (2.31)'de yerine yazılırsa, Denklem (2.33) ve Denklem (2.34)'e benzer şekilde enine magnetik alanının radyal ve açısal kısımlarında elektrik ve magnetik alanları arasındaki çiftlenimden faydalanarak aşağıdaki şekilde oluşturulabilir;

$$\vec{h}_r = \frac{i}{k_0^2 \epsilon - \beta^2} \left[\beta \frac{\partial \vec{h}_Z}{\partial r} - \frac{k_0}{r} \frac{\partial \vec{e}_Z}{\partial \theta} \right] \quad (2.35)$$

$$\vec{h}_\theta = \frac{i}{k_0^2 \epsilon - \beta^2} \left[\frac{\beta}{r} \frac{\partial \vec{h}_z}{\partial \theta} + k_0 \epsilon \frac{\partial \vec{e}_z}{\partial r} \right] \quad (2.36)$$

2.3.1. Boyuna Alan Çözümleri

Optik fiber içersindeki elektrik alan (veya magnetik) dağılımını yani mod çözümünü bulmak için e_z ve h_z boyuna alan bileşenlerinin dalga fonksiyonlarını elde etmek gerekliliği Denklem (2.33), (2.34), (2.35) ve (2.36)'dan görülmektedir. Dielektrik dalga kılavuzu silikadan yapılmış optik fiberin hiçbir elektriksel yük içermediğini kabul ederek aşağıdaki Maxwell denklemleri optik fiber içersindeki ortam için geçerlidir;

$$\vec{\nabla} \cdot (\epsilon \vec{E}) = 0 \quad \text{ve} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.37)$$

Bu denklemleri silindirik koordinatlarda ve yayılımın söz konusu olduğu dielektrik ortamın kırılma indisinin yayılma doğrultusu boyunca %1'den daha az değişim gösterdiği (zayıf kılavuzlu mod - weakly guided mode) yaklaşımında düzenirse, boyuna elektrik ve magnetik alanlar cinsinden Helmholtz eşitliği elde edilir[Cantrell and Hollenbeck, 2001];

$$(\nabla_T^2 + k_0^2 \epsilon - \beta^2) e_z = 0 \quad (2.38)$$

$$(\nabla_T^2 + k_0^2 \epsilon - \beta^2) h_z = 0 \quad (2.39)$$

Yukarıdaki Helmholtz denklemleri için $(k_0^2 \epsilon - \beta^2) < 0$ durumunda üstel artan/azalan formda çözümler elde edilirken $(k_0^2 \epsilon - \beta^2) > 0$ durumunda harmonik yada bir başka deyişle ilerleyen düzlem dalga çözümleri elde edilir. Denklem (2.38)

ve (2.39)'da $\nabla_T^2 = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right]$ operatörü yerine yazıldığında oluşan r

ve θ 'ya bağlı diferensiyel denklem için;

$$e_z = f_m(r) \cdot e^{im\theta} \quad (2.40)$$

çözümü denklemde yerine yazılarak;

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial f_m}{\partial r} \right) + \frac{m^2}{r^2} f_m + (k_0^2 - \beta^2) f_m = 0 \quad (2.41)$$

sadece r 'ye bağımlı hale denklem indirgenir. Denklem (2.41)'nin çözümleri m . Dereceden Bessel Fonksiyonlarının doğrusal kombinasyonudur. Optik fiber öz katmanının yarıçapı a olmak üzere, denklemin en genel çözümü Bessel fonksiyonunun doğrusal kombinasyonu şeklinde;

$$f_m(r) = \begin{cases} A \cdot J_m([k_0^2 - \beta^2]^{1/2} \cdot r) + B \cdot Y_m([k_0^2 - \beta^2]^{1/2} \cdot r) & k_0^2 - \beta^2 > 0 \\ C \cdot K_m([\beta^2 - k_0^2]^{1/2} \cdot r) + D \cdot I_m([\beta^2 - k_0^2]^{1/2} \cdot r) & k_0^2 - \beta^2 < 0 \end{cases} \quad (2.42)$$

elde edilir (Modified Bessel Function). J_m orijinde ($r=0$) sonlu bir değere sahiptir ancak Y_m orijinde tekildir. I_m üstel artan kısma karşılık gelirken K_m de üstel azalan kısmı meydana getirir [Cantrell and Hollenbeck, 2001]. Bu çözüm kümesi, boyuna elektrik ve magnetik alanlar öz katmanında kılavuzlu ve rezonant ve yansıtıcı katmanda ise üstel azalan bir formda oluşacak şekilde düzenlenmelidir. İlk çözüm grubunda; fiber özü için $r < a$ için ilerleyen dalga olması gerektiğinden $(k_0^2 - \beta^2) > 0$ olmalıdır. Bu şartın oluşması için $r = 0$ 'da tekil olan Y_m 'nin katsayısı $B = 0$ olmalıdır. Bu durumda öz tabakasında sadece J_m sözkonusudur. İkinci çözüm grubunda ise I_m üstel artan çözümü verirken K_m üstel azalan çözümü oluşturur. Bu durumda $r \rightarrow \infty$ için boyuna alanın sıfıra gitmesi gereklidir. Dolayısıyla I_m 'nin katsayısı $D = 0$ olmak zorundadır ve yansıtıcı katmandaki çözüm $(k_0^2 - \beta^2) < 0$ 'a karşılık gelen üstel azalan formda çözümdür. Bu durumda $k_0 n_2 < \beta < k_0 n_1$ 'i sağlayan çözüm için öz katmanında rezonansta ve yansıtıcı katmanda üstel şekilde sönümlenen e_z (veya h_z) şeklinde elde edilir. Elde edilen çözüm “kılavuzlu mod (guided mode)” olarak adlandırılır.

Alanların kılavuzlu ve rezonant yapıda olmasını 1.tür Bessel Fonksiyonu J_m sağlarken, yansıtıcı katmandaki üstel azalma ise K_m Hankel fonksiyonu ile temsil edilir (K_m , Bessel fonksiyonlarının kompleks uzayda doğrusal bir kombinasyonudur) [Soares, 1994] ve [Cantrell and Hollenbeck, 2001]. Dolayısıyla fiber boyunca oluşan elektrik ve magnetik alanlara ait çözüm kümesi aşağıda, öz ve yansıtıcı katman için verilmiştir.

$r < a$ yani öz içersindeki alanların boyuna bileşenleri;

$$e_z(r, \theta) = \sum_{m=0}^{\infty} c_m^{(1)} J_m(\kappa r) e^{im\theta} \quad (2.43)$$

$$h_z(r, \theta) = \sum_{m=0}^{\infty} d_m^{(1)} J_m(\kappa r) e^{im\theta} \quad (2.44)$$

$r > a$ yani yansıtıcı katman içersindeki alanların boyuna bileşenleri;

$$e_z(r, \theta) = \sum_{m=0}^{\infty} c_m^{(2)} K_m(\gamma r) e^{im\theta} \quad (2.45)$$

$$h_z(r, \theta) = \sum_{m=0}^{\infty} d_m^{(2)} K_m(\gamma r) e^{im\theta} \quad (2.46)$$

$$\kappa = [k_0^2 n_1^2 - \beta^2]^{1/2} \quad (2.47)$$

$$\gamma = [\beta^2 - k_0^2 n_2^2]^{1/2} \quad (2.48)$$

κ boyuna elektrik ve magnetik alanların öz içersindeki radyal yayılım sabiti, γ 'da yansıtıcı katmanda bu alanların sönümlenme sabitidir. Bu denklemlerde yer alan n_1 öz tabakasının kırılma indisine karşılık gelirken, n_2 'de yansıtıcı katmanın kırılma indisine karşılık gelir. Denklem (2.47) ve Denklem (2.48)'yi taraf tarafa toplarsak, öz

ve yansıtıcı katmanlarda ilerleyen boyuna elektrik ve magnetik alanların radyal davranışlarını temsil eden toplam yayılım sabiti;

$$\kappa^2 + \gamma^2 = k_0^2 \cdot (n_1^2 - n_2^2) \quad (2.49)$$

Burada $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ve $(n_1^2 - n_2^2)$ optik fiberin nümerik açıklığıdır. Denklem (2.43),

Denklem (2.44), Denklem (2.45) ve Denklem (2.46) da yer alan c_m ve d_m katsayılarının elde edilmesi için, yansıtıcı katman / öz ara yüzeyinde dalga çözümlerinin sürekli olması gereklidir. Dolayısıyla $r = a$ için Denklem (2.43) ile Denklem (2.45)'i eşitlersek;

$$\sum_m c_m^{(1)} J_m(\kappa a) \cdot e^{im\theta} = \sum_m c_m^{(2)} K_m(\gamma a) \cdot e^{im\theta} \quad (2.50)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (2.44) ve Denklem (2.46)'yı sağlayacak katsayılar ise h_z için yine aynı süreklilik şartı ile;

$$\sum_m d_m^{(1)} J_m(\kappa a) \cdot e^{im\theta} = \sum_m d_m^{(2)} K_m(\gamma a) \cdot e^{im\theta} \quad (2.51)$$

şeklinde bulunur. Denklem (2.50) ve Denklem (2.51)'deki eşitliklerden, öz/yansıtıcı katman ara yüzeyindeki süreklilik şartını sağlayan ($r < a$ ve $r > a$ için boyuna alanlara ait dalga fonksiyonları eşitlenerek) boyuna elektrik ve magnetik alanların katsayıları;

$$c_m^{(1)} J_m(\kappa a) = c_m^{(2)} K_m(\gamma a) \quad (2.52)$$

$$d_m^{(1)} J_m(\kappa a) = d_m^{(2)} K_m(\gamma a) \quad (2.53)$$

Denklem (2.52) ve Denklem (2.53) formunda elde edilir.

K_m , $\gamma = 0$ durumunda tekil [Cantrell and Hollenbeck, 2001] olup $c_m^{(2)}$ ve $d_m^{(2)}$ katsayılarının (yansıtıcı katmanda yayılım gösteren alanların genlikleri) bu sınırlayıcı şart altında sıfır olması gerekliliği ortaya çıkar. Bu, yansıtıcı katmanda elektrik ve magnetik alanların var olamayacağını gösterir (pratikte yansıtıcı katmanda belli derinlikte üstel dalgalar “Evanescent wave” mevcuttur). Dolayısıyla denklemlerin ikinci tarafları sıfıra eşit olduğu için birinci tarafları da sıfıra eşittir yani öz içerisinde de elektrik ve magnetik alan yoktur. İleride bu durumun fiber içerisinde tek mod yayılımı için “kesim şartı – cutoff” olduğunu göreceğiz. ($m=0$ için).

$$\gamma = 0 \Rightarrow c_m^{(1)} J_m(\kappa a) = 0 \quad \text{ve} \quad d_m^{(1)} J_m(\kappa a) = 0 \quad (2.54)$$

$c_m^{(1)} \neq 0$ ve $d_m^{(1)} \neq 0$ olduğundan;

$$J_m(\kappa a) = 0 \quad (2.55)$$

olmalıdır.

2.3.2. Radyal Alan Çözümleri

Öz yarıçapının $a \pm \varepsilon$ komşuluğunda, Bessel ve Hankel fonksiyonları cinsinden elektrik (e_r) ve magnetik (h_r) alanın radyal dağılımını elde etmeye çalışalım. $\varepsilon \rightarrow 0$ limiti ile aşağıdaki limit denklemlerini yazmak yanlış olmaz;

Öz kırılma indisi n_1 , yansıtıcı katman kırılma indisi de n_2 ve silika için optik tayf bölgesi için $\mu \approx 1$, $n^2 \approx \epsilon$ elektrik geçirgenliğe eşit olur. Burada μ ve ϵ sırasıyla silika için, bağıl magnetik ve elektrik geçirgenliklerdir. Paramagnetik ve diamagnetik malzemeler için bağıl magnetik geçirgenlik değeri optik frekanslarda 1'e çok yakın olup vakum ortam (yüksüz boş uzay) için ise elektrik ve magnetik geçirgenlikler cinsinden ışık hızı ve kırılma indisi;

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad \text{ve} \quad n = \sqrt{\mu \epsilon} \quad (2.56)$$

şeklinde verilir. Burada yüksüz uzayın elektriksel geçirgenliği (ya da dielektrik sabiti) $\epsilon_0 = 8,854.10^{-12}$ (coulomb²/Nt.m²) ve magnetik geçirgenliği de, $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ (Nt/A²) değerlerine eşittir. Magnetik alanın radyal bileşeni süreklilik şartı;

$r < a$ (öz içinde) ve $r > a$ (yansıtıcı katman içinde - öz dışında)

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} h_r(a - \epsilon, \theta) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} h_r(a + \epsilon, \theta) \quad (2.57)$$

Elektrik alanın radyal bileşeni süreklilik şartı madde içerisindeki elektrik alanı D olmak üzere $D = \epsilon . E$;

$r < a$ (öz içinde) ve $r > a$ (yansıtıcı katman içinde - öz dışında)

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \epsilon . e_r(a - \epsilon, \theta) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \epsilon . e_r(a + \epsilon, \theta) \quad (2.58)$$

$r < a$ öz içersinde;

$$\bar{h}_r = \frac{i}{\kappa^2} \left[\beta \frac{\partial \bar{h}_z}{\partial r} - \frac{k_0 n_1^2}{r} \frac{\partial \bar{e}_z}{\partial \theta} \right]_{a-\epsilon} \quad (2.59)$$

$r > a$ yansıtıcı katman içerisinde;

$$\bar{h}_r = \frac{i}{-\gamma^2} \left[\beta \frac{\partial \bar{h}_z}{\partial r} - \frac{k_0 n_2^2}{r} \frac{\partial \bar{e}_z}{\partial \theta} \right]_{a+\epsilon} \quad (2.60)$$

Kısmi türevleri elde etmek için $r < a$ için Denklem (2.43) ve Denklem (2.44) ve $r > a$ için de Denklem (2.45) ve Denklem (2.46)'yı kullanarak;

$r < a$ için;

$$\frac{\partial h_z}{\partial r} = d_m^{(1)} \kappa J'_m(\kappa r).e^{im\theta} \quad (2.61)$$

$$\frac{\partial e_z}{\partial \theta} = im c_m^{(1)} J_m(\kappa r).e^{im\theta} \quad (2.62)$$

$r > a$ için;

$$\frac{\partial h_z}{\partial r} = d_m^{(2)} \gamma K'_m(\gamma r).e^{im\theta} \quad (2.63)$$

$$\frac{\partial e_z}{\partial \theta} = im c_m^{(2)} K_m(\gamma r).e^{im\theta} \quad (2.64)$$

Denklem (2.59) ve Denklem (2.60)'ı eşitleyerek(süreklilik şartı) ve $r = a$ için Denklem (2.61) ilâ Denklem (2.64)'ü yerlerine yazarak;

$$\frac{i}{\kappa^2} \left[\beta d_m^{(1)} \kappa J'_m(\kappa a) - \frac{k_0 n_1^2}{a} im c_m^{(1)} J_m(\kappa a) \right] = -\frac{i}{\gamma^2} \left[\beta d_m^{(2)} \gamma K'_m(\gamma a) - \frac{k_0 n_2^2}{a} im c_m^{(2)} K_m(\gamma a) \right] \quad (2.65)$$

eşitliği magnetik alanın radyal bileşeni için yazılır. Aynı süreklilik şartını elektrik alanın radyal bileşeni için uygularsak, Denklem (2.58)'den;

$r < a$ öz içersinde;

$$e_r = \frac{i n_1^2}{\kappa^2} \left[\beta \frac{\partial e_z}{\partial r} + \frac{k_0}{a} \frac{\partial h_z}{\partial \theta} \right]_{a-\epsilon} \quad (2.66)$$

$r > a$ yansıtıcı katman içerisinde;

$$e_r = -\frac{i n_2^2}{\gamma^2} \left[\beta \frac{\partial e_z}{\partial r} + \frac{k_0}{r} \frac{\partial h_z}{\partial \theta} \right]_{a+\varepsilon} \quad (2.67)$$

Kısmi türevleri elde etmek için $r < a$ için Denklem (2.43) ve Denklem (2.44) ve $r > a$ için de Denklem (2.45) ve Denklem (2.46)'yı kullanarak;

$r < a$ için;

$$\frac{\partial e_z}{\partial r} = c_m^{(1)} \kappa J'_m(\kappa r) e^{im\theta} \quad (2.68)$$

$$\frac{\partial h_z}{\partial \theta} = d_m^{(1)} i m J_m(\kappa r) e^{im\theta} \quad (2.69)$$

$r > a$ için;

$$\frac{\partial e_z}{\partial r} = c_m^{(2)} \gamma K'_m(\gamma r) e^{im\theta} \quad (2.70)$$

$$\frac{\partial h_z}{\partial \theta} = d_m^{(2)} i m K_m(\gamma r) e^{im\theta} \quad (2.71)$$

Denklem (2.66) ve Denklem (2.67)'yi süreklilik şartından dolayı eşitleyerek ve $r = a$ için Denklem (2.68) ilâ Denklem (2.71)'i yerlerine yazarak;

$$\frac{i n_1^2}{\kappa^2} [\beta c_m^{(1)} \kappa J'_m(\kappa a) + \frac{k_0}{a} d_m^{(1)} i m J_m(\kappa a)] = -\frac{i n_2^2}{\gamma^2} [\beta c_m^{(2)} \gamma K'_m(\gamma a) + \frac{k_0}{a} d_m^{(2)} i m K_m(\gamma a)] \quad (2.72)$$

eşitliği de elektrik alanın radyal bileşeni için yazılır.

2.3.3. Enine Alan Çözümleri

Denklemlerde yer alan **m azimutal mod** sayısıdır ve alanın açısal bağımlılığını ifade eder ($e^{im\theta}$). Enine alan bileşenleri radyal ve açısal kısımlardan oluşur. Çözümler açısal alan bağımlılığı ortadan kaldırılarak, radyal ve boyuna alan bileşenlerinin süreklilik şartlarından elde edilir.

2.3.3.1. Enine Elektrik Alan Çözümleri

Enine elektrik alan bileşen çözümlerini elde etmek için $m = 0$ şartı ile alanların açısal bağımlı kısmı ortadan kaldırılıp sadece radyal alan değişimleri için çözüm yapılır. Denklem (2.65) ile verilen ve magnetik alanların radyal sürekliliği gösteren eşitlikte $m = 0$ yazılarak;

$$\frac{i}{\kappa^2} [\beta d_0^{(1)} \kappa J_0'(\kappa a)] = -\frac{i}{\gamma^2} [\beta d_0^{(2)} \gamma K_0'(\gamma a)] \quad (2.73)$$

$$d_0^{(1)} \frac{J_0'(\kappa a)}{\kappa} = -d_0^{(2)} \frac{K_0'(\gamma a)}{\gamma} \quad (2.74)$$

$r = a$, öz / yansıtıcı katman ara yüzeyinde boyuna magnetik alanın sürekliliğinin elde edilmesi için elde edilen Denklem (2.53)'ü kullanarak;

$$d_0^{(2)} = d_0^{(1)} \frac{J_0(\kappa a)}{K_0(\gamma a)} \quad (2.75)$$

Denklem (2.75)'i Denklem (2.73)'te yerine yazarak;

$$d_0^{(1)} \left[\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{J_0'(\kappa a)}{J_0(\kappa a)} + \frac{1}{\gamma} \frac{K_0'(\gamma a)}{K_0(\gamma a)} \right] J_0(\kappa a) = 0 \quad (2.76)$$

Bu eşitlik optik fiber içerisinde enine elektrik mod yayılımını açıklamada oldukça önemlidir. $J_0(\kappa a) = 0$ Denklem (2.55)'te belirtilen ve detayı ileride açıklanacak kesim durumunda sıfır değerini almaktadır. Dolayısıyla bu durumda ya $d_0^{(1)}$ katsayısı ya da köşeli parantez içerisinde sıfır olması gereklidir. Ancak Denklem (2.54)'e bakıldığında $d_0^{(1)} \neq 0$ olduğu görülür. Yani köşeli parantezin içi sıfır olmalıdır.

$$\frac{1}{\kappa} \frac{J'_0(\kappa a)}{J_0(\kappa a)} + \frac{1}{\gamma} \frac{K'_0(\gamma a)}{K_0(\gamma a)} = 0 \quad (2.77)$$

κ ve γ 'nın içinde bulunan β yayılım sabiti için Denklem (2.77) bir öz değer denklemi olup, her bir çözüm kökü pozitif bir tamsayı olan μ ile gösterilir ve **radyal mod sayısı** olarak adlandırılır. μ 'üncü çözüm $TE_{0\mu}$ modunu gösterir [Cantrell and Hollenbeck, 2001].

Denklem (2.65)'ten $m = 0$ için türetilen Denklem (2.73)'ye bakıldığında c_m katsayılarının bulunduğu taraf (Denklem (2.62) ilâ (2.64)) boyuna elektrik alan bileşeni e_z tarafı olup, sadece $e_z = 0$ iken Denklem (2.65) (süreklilik denklemi) Denklem (2.77) formuna girecektir. Bu durumda boyuna elektrik alanı bulunmadığı durumda, Denklem (2.33), Denklem (2.34), Denklem (2.35) ve Denklem (2.36)'dan, elektrik ve magnetik alanların radyal ve açısalları;

$$\text{i) } \vec{e}_r = \frac{i}{k_0^2 \epsilon - \beta^2} \left[\beta \frac{\partial \vec{e}_z}{\partial r} + \frac{k_0}{r} \frac{\partial \vec{h}_z}{\partial \theta} \right] = 0 \quad (2.78)$$

$m = 0$ olduğundan $e^{im\theta} = 1$ olduğundan h_z, h_r, h_θ, e_r ve e_θ alanlarının açısalları bağımlılığı yoktur (zaten enine alan çözümleri bu şart altında radyal bileşenler üzerinden gerçekleştirildi) dolayısıyla $\frac{\partial h_z}{\partial \theta} = 0$ ve $e_z = 0$ olduğundan Denklem (2.78) sıfıra eşittir.

$$\text{ii)} \quad \vec{e}_\theta = \frac{i}{k_0^2 \in -\beta^2} \cdot \left[\beta \frac{\partial \vec{e}_Z}{\partial \theta} + k_0 \frac{\partial \vec{h}_Z}{\partial r} \right] \quad (2.79)$$

$\frac{\partial e_Z}{\partial \theta} = 0$ olup sadece magnetik alanın boyuna bileşeninin radyal bağımlılığı söz konusudur. Bu durumda elektrik alanın açısai bileşeni öz ve yansıtıcı katmanlar için;

$$e_\theta = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{-ik_0}{\kappa^2} \frac{\partial h_Z}{\partial r} & r < a \quad (\text{öz içinde}) \\ \frac{ik_0}{\gamma^2} \frac{\partial h_Z}{\partial r} & r > a \quad (\text{yansıtıcı katmanda}) \end{array} \right\} \quad (2.80)$$

$$\text{iii)} \quad \vec{h}_r = \frac{i}{k_0^2 \in -\beta^2} \cdot \left[\beta \frac{\partial \vec{h}_Z}{\partial r} - \frac{k_0 \in}{r} \frac{\partial \vec{e}_Z}{\partial \theta} \right] \quad (2.81)$$

$\frac{\partial e_Z}{\partial \theta} = 0$ ve sadece magnetik alanın boyuna bileşeninin radyal bağımlılığı söz konusudur. Bu durumda magnetik alanın radyal bileşeni öz ve yansıtıcı katmanlar için;

$$h_r = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{i\beta}{\kappa^2} \cdot \frac{\partial h_Z}{\partial r} & r < a \quad (\text{öz içinde}) \\ \frac{-i\beta}{\gamma^2} \cdot \frac{\partial h_Z}{\partial r} & r > a \quad (\text{yansıtıcı katmanda}) \end{array} \right\} \quad (2.82)$$

$$\text{iv)} \quad \vec{h}_\theta = \frac{i}{k_0^2 \in -\beta^2} \left[\frac{\beta}{r} \frac{\partial \vec{h}_Z}{\partial \theta} + k_0 \in \frac{\partial \vec{e}_Z}{\partial r} \right] = 0 \quad (2.83)$$

$m = 0$ ve $e^{im\theta} = 1$ olduğundan açısai bağımlılık yoktur (zaten enine alan çözümleri bu şart altında radyal bileşenler üzerinden gerçekleştirildi) dolayısıyla $\frac{\partial h_Z}{\partial \theta} = 0$ ve

$e_Z = 0$ olduğundan Denklem (2.83) sıfıra eşittir.

Sonuç olarak “ii” ve “iii” çözümlerine bakıldığında $m = 0$ için Denklem (2.77)’nin sağlanması için $e_z = 0$ olmalıdır. Bu durumda mevcut alan **ii**’de belirtilen elektrik alanın açısall bileşeni ile **iii**’de belirtilen magnetik alanın radyal bileşeninden oluşan **enine elektrik alan mod (Transverse Electrical Mode)** çözümü olup $TE_{0\mu}$ ile sembolize edilir. **Enine elektrik modun magnetik alan bileşeni boyuna ve radyal bileşene sahipken, sadece bir tane açısall elektrik alan bileşenine sahiptir** ($TE_{0\mu} \rightarrow h_r(h_z) + e_\theta(h_z)$).

2.3.3.2. Enine Magnetik Alan Çözümleri

Enine magnetik alan çözümünü türetmek için, elektrik alanın radyal bileşenlerinin sürekliliğini gösteren Denklem (2.72)’de $m = 0$ ve süreklilik şartından $r = a$ yazılarak;

$$\frac{in_1^2}{\kappa^2} [\beta c_0^{(1)} \kappa J_0'(\kappa a)] = -\frac{in_2^2}{\gamma^2} [\beta c_0^{(2)} \gamma K_m'(\gamma a)] \quad (2.84)$$

Öz / yansıtıcı katman ara yüzeyinde boyuna elektrik alanın sürekliliğinin saplanması için türetilen Denklem (2.52)’yi kullanarak;

$$c_0^{(2)} = c_0^{(1)} \frac{J_0(\kappa a)}{K_0(\gamma a)} \quad (2.85)$$

Denklem (2.85)’i Denklem (2.84)’te yerine yazarsak;

$$c_0^{(1)} \left[\frac{n_1^2}{\kappa} \frac{J_0'(\kappa a)}{J_0(\kappa a)} + \frac{n_2^2}{\gamma} \frac{K_0'(\gamma a)}{K_0(\gamma a)} \right] J_0(\kappa a) = 0 \quad (2.86)$$

Bu eşitlik optik fiber içerisinde enine magnetik mod yayılımını açıklamada oldukça önemlidir. $J_0(\kappa a)$, Denklem (2.55)’te belirtilen ve detayı ileride açıklanacak kesim durumunda sıfır değerini almaktadır. Dolayısıyla bu durumda ya $c_0^{(1)}$ katsayısı ya da

köşeli parantez içerisinde sıfır olması gereklidir. Ancak Denklem (2.53)'e bakıldığında $c_0^{(1)} \neq 0$ olduğu görülür. Yani köşeli parantezin içi sıfır olmalıdır;

$$\frac{n_1^2}{\kappa} \frac{J'_0(\kappa a)}{J_0(\kappa a)} + \frac{n_2^2}{\gamma} \frac{K'_0(\gamma a)}{K_0(\gamma a)} = 0 \quad (2.87)$$

Enine elektrik alanının incelenmesinde belirtildiği gibi, Denklem (2.87) β yayılım sabiti için bir özdeğer denklemidir [Cantrell and Hollenbeck, 2001]. Denklem (2.87), Denklem (2.72) radyal elektrik alan süreklilik denkleminden boyuna magnetik alan bileşeni sıfırken elde edilebilir. Yani $h_z = 0$. Bir başka deyişle boyuna magnetik alan yok ise, Denklem (2.33), Denklem (2.34), Denklem (2.35) ve Denklem (2.36)'dan, elektrik ve magnetik alanların radyal ve açısalları;

$$\text{i) } \vec{e}_r = \frac{i}{k_0^2 \in -\beta^2} \left[\beta \frac{\partial \vec{e}_z}{\partial r} + \frac{k_0}{r} \frac{\partial \vec{h}_z}{\partial \theta} \right] \quad (2.88)$$

$h_z = 0$ olduğundan, elektrik alanının radyal bileşeni sadece elektrik alanının boyuna bileşenine bağlıdır. $m = 0$ ve $e^{im\theta} = 1$ olduğundan h_r, h_θ, e_z, e_r ve e_θ alanlarının açısalları yoktur (zaten enine alan çözümleri bu şart altında radyal bileşenler üzerinden gerçekleştirildi). Elektrik alanının radyal bileşeni öz ve yansıtıcı katman içerisinde aşağıdaki şekilde yayılım gösterir;

$$e_r = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{i\beta}{\kappa^2} \frac{\partial e_z}{\partial r} & r < a \quad (\text{öz içinde}) \\ -\frac{i\beta}{\gamma^2} \frac{\partial e_z}{\partial r} & r > a \quad (\text{yansıtıcı katmanda}) \end{array} \right\} \quad (2.89)$$

$$\text{ii) } \vec{e}_\theta = \frac{i}{k_0^2 \in -\beta^2} \left[\beta \frac{\partial \vec{e}_z}{\partial \theta} + k_0 \frac{\partial \vec{h}_z}{\partial r} \right] = 0 \quad (2.90)$$

$m = 0$ ve $e^{im\theta} = 1$ olduğundan açısal bağımlılık yoktur (zaten enine alan çözümleri bu şart altında radyal bileşenler üzerinden gerçekleştirildi) dolayısıyla $\frac{\partial e_z}{\partial \theta} = 0$ ve $h_z = 0$ olduğundan Denklem (2.90) sıfıra eşittir.

$$\text{iii) } \bar{h}_r = \frac{i}{k_0^2 \epsilon - \beta^2} \left[\beta \frac{\partial \bar{h}_z}{\partial r} - \frac{k_0 \epsilon}{r} \frac{\partial \bar{e}_z}{\partial \theta} \right] = 0 \quad (2.91)$$

$h_z = 0$ ve $m = 0$ için h_r, h_θ, e_z, e_r ve e_θ alanlarının açısal bağımlılığı yoktur ve Denklem (2.91) sıfıra eşittir.

$$\text{iv) } \bar{h}_\theta = \frac{i}{k_0^2 \epsilon - \beta^2} \left[\frac{\beta}{r} \frac{\partial \bar{h}_z}{\partial \theta} + k_0 \epsilon \frac{\partial \bar{e}_z}{\partial r} \right] \quad (2.92)$$

$$h_\theta = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{ik_0 n_1^2}{\kappa^2} \frac{\partial e_z}{\partial r} & r < a \quad (\text{öz içinde}) \\ -\frac{ik_0 n_2^2}{\gamma^2} \frac{\partial e_z}{\partial r} & r > a \quad (\text{yansıtıcı katmanda}) \end{array} \right\} \quad (2.93)$$

Sonuç olarak “i” ve “iv” çözümlerine bakıldığında $m = 0$ için Denklem (2.87)’nin sağlanması için $h_z = 0$ olmalıdır. Bu durumda mevcut alan **i**’de belirtilen elektrik alanın radyal bileşeni ile **iv**’de belirtilen magnetik alanın açısal bileşeninden oluşan **enine magnetik alan mod (Transverse Magnetic Mode)** çözümü olup $TM_{0\mu}$ ile sembolize edilir. Denklem (2.87) pek çok çözüme sahip olan bir öz değer denklemdir (tıpkı Denklem (2.77) gibi) ve μ ’üncü çözüm $TM_{0\mu}$ modu olarak belirtilir. **Enine magnetik modun elektrik alan bileşeni boyuna ve radyal bileşene sahipken (e_z ve e_r), sadece bir tane açısal magnetik alan bileşenine (h_θ) (sahiptir ($TM_{0\mu} \rightarrow e_r(e_z) + h_\theta(e_z)$)).**

Enine elektrik ve magnetik alan çözümleri bize, boyuna elektrik ve magnetik alan mevcut olmadığında bütün alan bileşenlerinin yok olacağı sonucu vermiştir [Cantrell and Hollenbeck, 2001].

2.3.4. Enine Elektrik ve Magnetik Alanlar İçin Kesim Şartı

β yayılım sabiti ile ilerleyen enine elektrik ve magnetik alanların özdeğer denklemleri, Denklem (2.77) ve Denklem (2.87)'yi ele alalım;

$$\text{TE}_{0\mu} \text{ için} \quad \frac{1}{\kappa} \frac{J'_0(\kappa a)}{J_0(\kappa a)} + \frac{1}{\gamma} \frac{K'_0(\gamma a)}{K_0(\gamma a)} = 0 \quad (\text{I})$$

$$\text{TM}_{0\mu} \text{ için} \quad \frac{n_1^2}{\kappa} \frac{J'_0(\kappa a)}{J_0(\kappa a)} + \frac{n_2^2}{\gamma} \frac{K'_0(\gamma a)}{K_0(\gamma a)} = 0 \quad (\text{II})$$

$$\frac{1}{\kappa} \frac{J'_0(\kappa a)}{J_0(\kappa a)} = -\frac{1}{\gamma} \frac{K'_0(\gamma a)}{K_0(\gamma a)} \quad (\text{I})$$

$$\frac{1}{\kappa} \frac{J'_0(\kappa a)}{J_0(\kappa a)} = -\frac{n_2^2}{n_1^2} \frac{1}{\gamma} \frac{K'_0(\gamma a)}{K_0(\gamma a)} \quad (\text{II})$$

Denklemlerin 1. tarafları aynı olduğundan;

$$\frac{1}{\kappa} \frac{J'_0(\kappa a)}{J_0(\kappa a)} = \begin{cases} -\frac{1}{\gamma} \frac{K'_0(\gamma a)}{K_0(\gamma a)} & \text{TE}_{0\mu} \text{ için} \\ -\frac{n_2^2}{n_1^2} \frac{1}{\gamma} \frac{K'_0(\gamma a)}{K_0(\gamma a)} & \text{TM}_{0\mu} \text{ için} \end{cases} \quad (2.94)$$

Bizim optik fiber için istediğimiz durum radyal alan yayılımının yansıtıcı katman içinde olmamasıdır. Dolayısıyla yansıtıcı katmandaki yayılım sabiti $\gamma = 0$ olmalıdır. κ ise radyal osilasyon sabitidir. Radyal yayılımın yansıtıcı katmanda olmaması, radyal elektrik ve radyal magnetik alanların üstel azalış ile bu katmanda bozunmalarına karşılık gelir. Buraya kadar olan işlemlerimizin sadece radyal alanlar

üzerinden yapıldığını, bir başka deyişle $m = 0$ durumunun devam ettiğini yani alanların açılal bağımlılığını şu ana kadar hesaba katmadığımızı hatırla tatalım.

Kesim şartını elde etmek için $\gamma \rightarrow 0$ şartı altında Denklem (2.94)'ü inceleyelim. Bessel fonksiyonu tekrarlama bağıntılarından aşağıda verilen bağıntıyı kullanarak [Cantrell and Hollenbeck, 2001];

$$K'_m(x) = K_{m+1}(x) - \frac{m}{x} K_m(x) \quad (2.95)$$

$$K'_0(x) = K_1(x) \quad (2.96)$$

olarak elde edilir. Denklem (2.96), Denklem (2.94)'te yerine yazıldığında, yansıtıcı katmanda hiçbir alanın bulunmaması şartını da $\gamma \rightarrow 0$ olarak tarif ederek aşağıdaki limit denklemi yazılabilir;

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \left(\frac{K'_0(\gamma a)}{\gamma K_0(\gamma a)} = \frac{K_1(\gamma a)}{\gamma K_0(\gamma a)} \right) \rightarrow 0 \quad (2.97)$$

Bu limit ifadesinde yer alan K_m , 1.tür Bessel fonksiyonu J_m 'nin doğrusal bir bileşeni olduğundan J_m 'nin tekrarlama bağıntısını hesaba kattığımızda $\gamma = 0$ için bu ifadenin sıfıra gittiği gözlenir [Cantrell and Hollenbeck, 2001]. Bu durumda Denklem (2.94), yansıtıcı katmanda hiçbir enine alanın bulunmaması şartı altında şu şekli alacaktır;

$$\frac{1}{\kappa} \frac{J'_0(\kappa a)}{J_0(\kappa a)} = 0 \quad (2.98)$$

Bir de Denklem (2.55) $\gamma = 0$ (yani yansıtıcı katmanda hiçbir alan bulunmaması şartı) için elde edilen;

$$J_0(\kappa a) = 0 \quad (2.99)$$

şartı mevcuttur. Dolayısıyla ya Denklem (2.98) ya da Denklem (2.99) kesim şartı için sağlanmalıdır. $z = 0$ 'da $J'_0(z) = 0$ ilk sıfır değerini alırken, ikinci sıfır değerini ise $z = 3,8317$ değerinde alır. J_0 ise ilk sıfıra $z = 2,4048$ değerinde düşmektedir. Kesim frekansı en düşük frekans olarak tanımlandığından;

$$\kappa a = 2,4048 \quad (2.100)$$

eşitliği fiberde enine elektrik ve magnetik alanlar için kesim şartı olarak verilir. Kesim frekansında $\gamma = 0$ (bu aynı zamanda yansıtıcı katmanda hiçbir alan bileşeninin bulunmaması anlamı taşır) olduğundan Denklem (2.49) şu formu alacaktır;

$$\kappa^2 = k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) \quad (2.101)$$

ve Denklem (2.100)'den de;

$$V = \kappa a = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = 2,4048 \quad (2.102)$$

bulunur. Burada V , **normalize frekans** veya **dalga kılavuzu parametresi** olarak adlandırılır ve optik fiberin hiçbir noktasında normalize frekans değerinde enine elektrik ve magnetik alan bileşenlerinin bulunmayacağını gösterir.

Buraya kadar yapılan hesaplamalarda $m=0$ alınarak alanların açısallık bağımlılığı göz ardı edilmiştir. Ancak şimdi radyal magnetik alan bileşeninden elde edilen enine elektrik alanın ve radyal elektrik alan bileşeninden elde edilen enine magnetik alanın açısallık bağımlılığını Denklem (2.65) ve Denklem (2.72) için $m \neq 0$ (azimutal bağımlılık) olarak, kesim frekansı $V=2,4048$ değerinin altında başka düşük dereceli alan yayılımları (modları) olup olmadığına bakalım. Magnetik alanın radyal bileşeninin süreklilik denklemi olan Denklem (2.65)'i tekrar yazalım;

$$\frac{i}{\kappa^2} [\beta d_m^{(1)} \kappa J'_m(\kappa a) - \frac{k_0 n_1^2}{a} \text{im} c_m^{(1)} J_m(\kappa a)] = -\frac{i}{\gamma^2} [\beta d_m^{(2)} \gamma K'_m(\gamma a) - \frac{k_0 n_2^2}{a} \text{im} c_m^{(2)} K_m(\gamma a)] \quad (2.103)$$

$r = a$ ara yüzeyinde boyuna alanların süreklilik şartı olarak yazdığımız Denklem (2.52) ve Denklem (2.53)'ü kullanarak, Denklem (2.103)'ü bu defa $m \neq 0$ için düzenlersek h_r 'nin açısal bağımlılığını elde etmiş oluruz;

$$\begin{aligned} \frac{1}{\kappa^2} [\beta \kappa J'_m(\kappa a) d_m^{(1)} - \frac{k_0 n_1^2}{a} \text{im} J_m(\kappa a) c_m^{(1)}] \\ = -\frac{1}{\gamma^2} [\beta \gamma \frac{J_m(\kappa a)}{K_m(\gamma a)} K'_m(\gamma a) d_m^{(1)} - \frac{k_0 n_2^2}{a} \frac{J_m(\kappa a)}{K_m(\gamma a)} \text{im} K_m(\gamma a) c_m^{(1)}] \end{aligned} \quad (2.104)$$

Burada $c_m^{(1)}$ ve $d_m^{(1)}$ katsayılarını taraf tarafa toplayalım;

$$\beta \left[\frac{J'_m(\kappa a)}{\kappa J_m(\kappa a)} + \frac{K'_m(\gamma a)}{\gamma K_m(\gamma a)} \right] d_m^{(1)} - \text{im} \frac{k_0}{a} \left(\frac{n_1^2}{\kappa^2} + \frac{n_2^2}{\gamma^2} \right) c_m^{(1)} = 0 \quad (2.105)$$

Şimdide elektrik alanın radyal bileşeni süreklilik denklemi olan Denklem (2.72)'yi tekrar yazalım;

$$\frac{i n_1^2}{\kappa^2} [\beta c_m^{(1)} \kappa J'_m(\kappa a) + \frac{k_0}{a} d_m^{(1)} \text{im} J_m(\kappa a)] = -\frac{i n_2^2}{\gamma^2} [\beta c_m^{(2)} \gamma K'_m(\gamma a) + \frac{k_0}{a} d_m^{(2)} \text{im} K_m(\gamma a)] \quad (2.106)$$

$r = a$ ara yüzeyinde boyuna alanların süreklilik şartı olarak yazdığımız Denklem (2.52) ve Denklem (2.53)'ü kullanarak bulunan $c_m^{(2)}$ ve $d_m^{(2)}$ katsayılarını $c_m^{(1)}$ ve $d_m^{(1)}$ cinsinden elde ederek ve Denklem (2.106)'yı bu kez $m \neq 0$ için düzenlersek e_r 'nin açısal bağımlılığı türetilmiş olur;

$$\begin{aligned}
& \frac{i n_1^2}{\kappa^2} \left[\beta \kappa J'_m(\kappa a) + \frac{k_0}{a} \text{im} J_m(\kappa a) d_m^{(1)} \right] \\
& = -\frac{i n_2^2}{\gamma^2} \left[\beta \gamma \frac{J_m(\kappa a)}{K_m(\gamma a)} K'_m(\gamma a) c_m^{(1)} + \frac{k_0}{a} \text{im} \frac{J_m(\kappa a)}{K_m(\gamma a)} K_m(\gamma a) d_m^{(1)} \right]
\end{aligned} \tag{2.107}$$

Burada $c_m^{(1)}$ ve $d_m^{(1)}$ katsayılarını taraf tarafa toplayalım;

$$\text{im} \frac{k_0}{a} \left[\frac{n_1^2}{\kappa^2} + \frac{n_2^2}{\gamma^2} \right] d_m^{(1)} + \beta \left[n_1^2 \frac{J'_m(\kappa a)}{\kappa J_m(\kappa a)} + n_2^2 \frac{K'_m(\gamma a)}{\gamma K_m(\gamma a)} \right] c_m^{(1)} = 0 \tag{2.108}$$

Denklem (2.105) ve Denklem (2.108) iki bilinmeyenli homojen doğrusal iki denklem olup $c_m^{(1)}$ ve $d_m^{(1)}$ katsayılarını bulmak için aşağıdaki determinant oluşturularak β yayılım sabiti için bir özdeğer denklemi oluşturulur, Denklem (2.110) [Cantrell and Hollenbeck, 2001].

$$\begin{vmatrix}
\beta \left[\frac{J'_m(\kappa a)}{\kappa J_m(\kappa a)} + \frac{K'_m(\gamma a)}{\gamma K_m(\gamma a)} \right] & -\text{im} \frac{k_0}{a} \left(\frac{n_1^2}{\kappa^2} + \frac{n_2^2}{\gamma^2} \right) \\
\text{im} \frac{k_0}{a} \left[\frac{n_1^2}{\kappa^2} + \frac{n_2^2}{\gamma^2} \right] & \beta \left[n_1^2 \frac{J'_m(\kappa a)}{\kappa J_m(\kappa a)} + n_2^2 \frac{K'_m(\gamma a)}{\gamma K_m(\gamma a)} \right]
\end{vmatrix} = 0 \tag{2.109}$$

$$\beta^2 \left[\frac{J'_m(\kappa a)}{\kappa J_m(\kappa a)} + \frac{K'_m(\gamma a)}{\gamma K_m(\gamma a)} \right] \left[n_1^2 \frac{J'_m(\kappa a)}{\kappa J_m(\kappa a)} + n_2^2 \frac{K'_m(\gamma a)}{\gamma K_m(\gamma a)} \right] = m^2 \frac{k_0^2}{a^2} \left(\frac{n_1^2}{\kappa^2} + \frac{n_2^2}{\gamma^2} \right)^2 \tag{2.110}$$

Burada;

$$U = \kappa a \tag{2.111}$$

$$W = \gamma a \tag{2.112}$$

dönüşümleri yapılarak Denklem (2.110) özdeğer denklemi aşağıdaki formu alır;

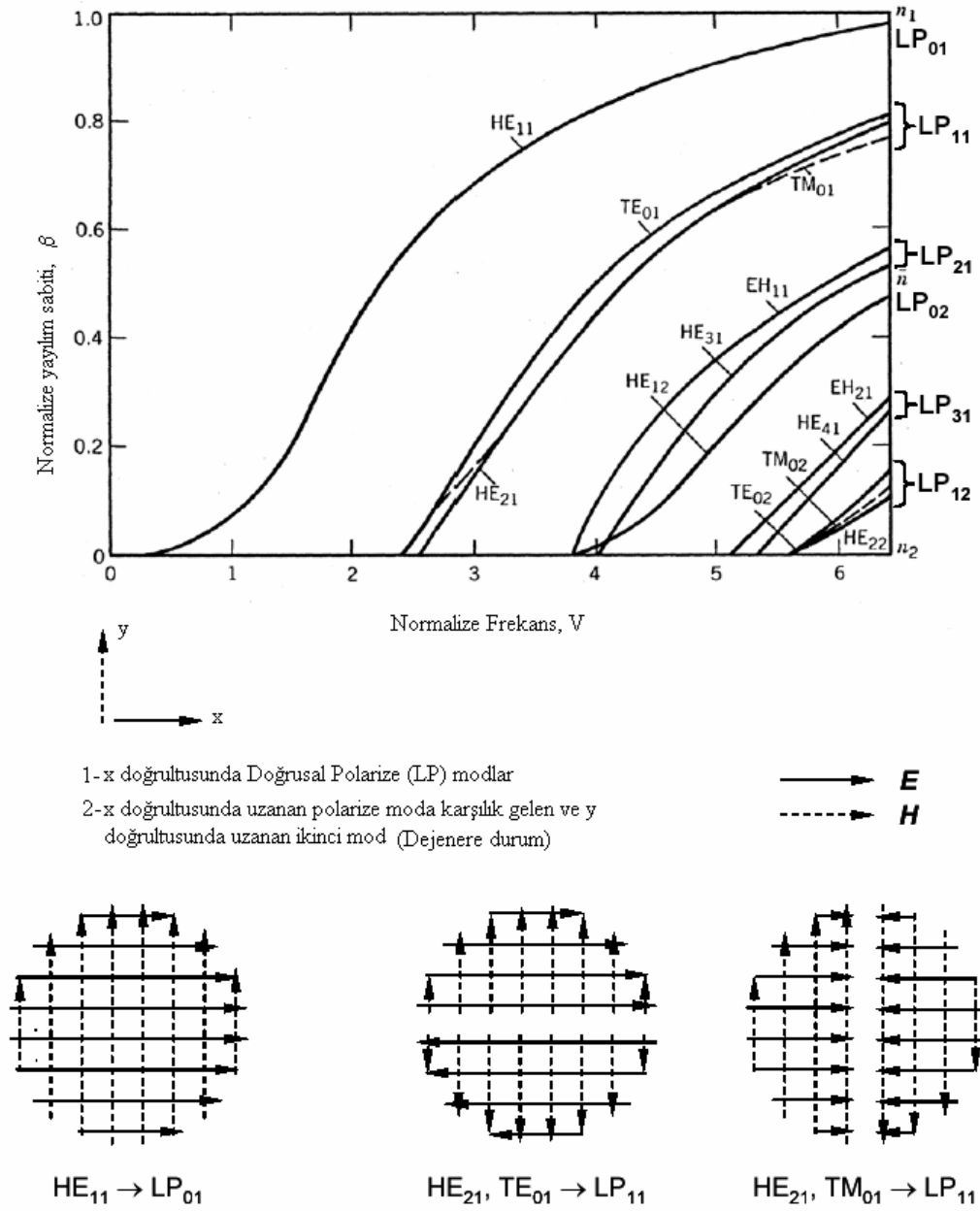
$$\left[\frac{J'_m(U)}{UJ_m(U)} + \frac{K'_m(W)}{WK_m(W)} \right] \left[n_1^2 \frac{J'_m(U)}{UJ_m(U)} + n_2^2 \frac{K'_m(W)}{WK_m(W)} \right] = \left(\frac{m\beta V^2}{k_0 U^2 W^2} \right) \quad (2.113)$$

Denklem (2.113)'te yer alan V normalize frekanstır [Cantrell and Hollenbeck, 2001]. Denklem (2.113)'ün sağ tarafı tamamen pozitifdir. Dolayısıyla Denklem (2.113)'ün sol tarafında yer alan iki kısmın ya her ikisi birden pozitif veya her ikisi birden negatif olmalıdır. Her ikisinin pozitif olduğu durum $EH_{m\mu}$ olarak gösterilir. Bu durumda magnetik alanın boyuna bileşeni h_z büyük olup bu mod Sanki-Enine Magnetik Mod (Quasi-Transverse Magnetic Mode) olarak isimlendirilir. Her ikisinin negatif olduğu durumda ise boyuna elektrik alan bileşeni e_z büyük olup $HE_{m\mu}$ ile gösterilir ve Sanki-Enine Elektrik Mod olarak adlandırılır. $\mu=1$ 'den başlayarak pozitif çözümler için $m \geq 1$ değerlerini alacaktır. Sonuç olarak, $V \leq 2,4048$ eşitsizliğini sağlayan parametreler için sanki-enine elektrik alan, fiber özünde rezonant olup bir Bessel fonksiyonu ile tarif edilirken, yansıtıcı katmanda ise üstel azalan bir yapıdadır ve Hankel fonksiyonu ile tarif edilir [Soares, 1994]. HE_{11} modu Temel Mod olarak adlandırılır. Radyal alanların açısallı bağımlı kısımlarından $m \neq 0$ için elde edilen $EH_{m\mu}$ ve $HE_{m\mu}$ hibrid çözümlerinden, temel mod olarak sınıflandırılan HE_{11} modu, sinüs veya kosinüs formunda harmonik dalga denkleminde sahiptir ($e^{im\theta}$). Dolayısıyla 2π 'lik bir çember üzerinde 2 kere sıfırdan geçtiğinden her bir “m” değeri için 2 tane çözüm elde edilecektir. Yani bir başka deyişle çözüm kusursuz ve izotropik fiber yapısı için 2 kere çok katlıdır (dejeneredir). Bu durumda tek olarak isimlendirilen HE_{11} modunda, aslında 2 tane mod söz konusu olup bu birbirine dik iki alanın mevcut olduğu anlamına gelmektedir ve Doğrusal Polarize Mod (Linearly Polarized – LP) olarak tanımlanır.

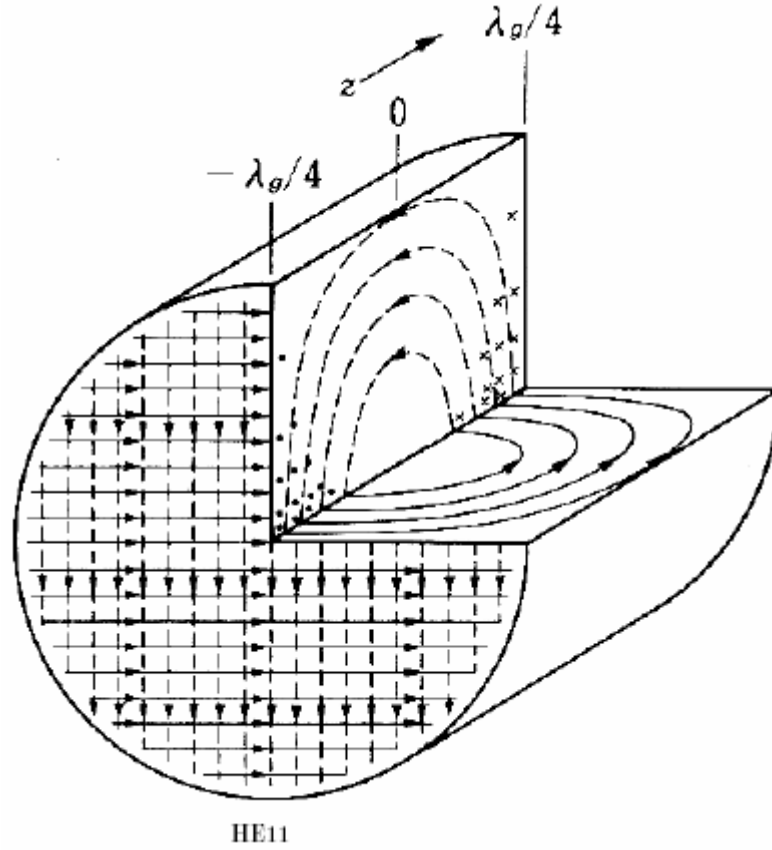
Denklem (2.102)'yi aşağıdaki formda yazmak ileride yapacağımız incelemelerimizde faydalı olacaktır.

$$V = \kappa a = k_0 a (n_{öz}^2 - n_{yk}^2)^{1/2} = \frac{2a\pi NA(\text{rad})}{\lambda} \quad (2.114)$$

Şekil 2.8.'de normalize frekansa karşı β yayılım sabiti ve yukarıda verilen çözümlerden türetilen elektromagnetik alan davranışlarını gösteren grafik verilmiştir [Cantrell and Hollenbeck, 2001].



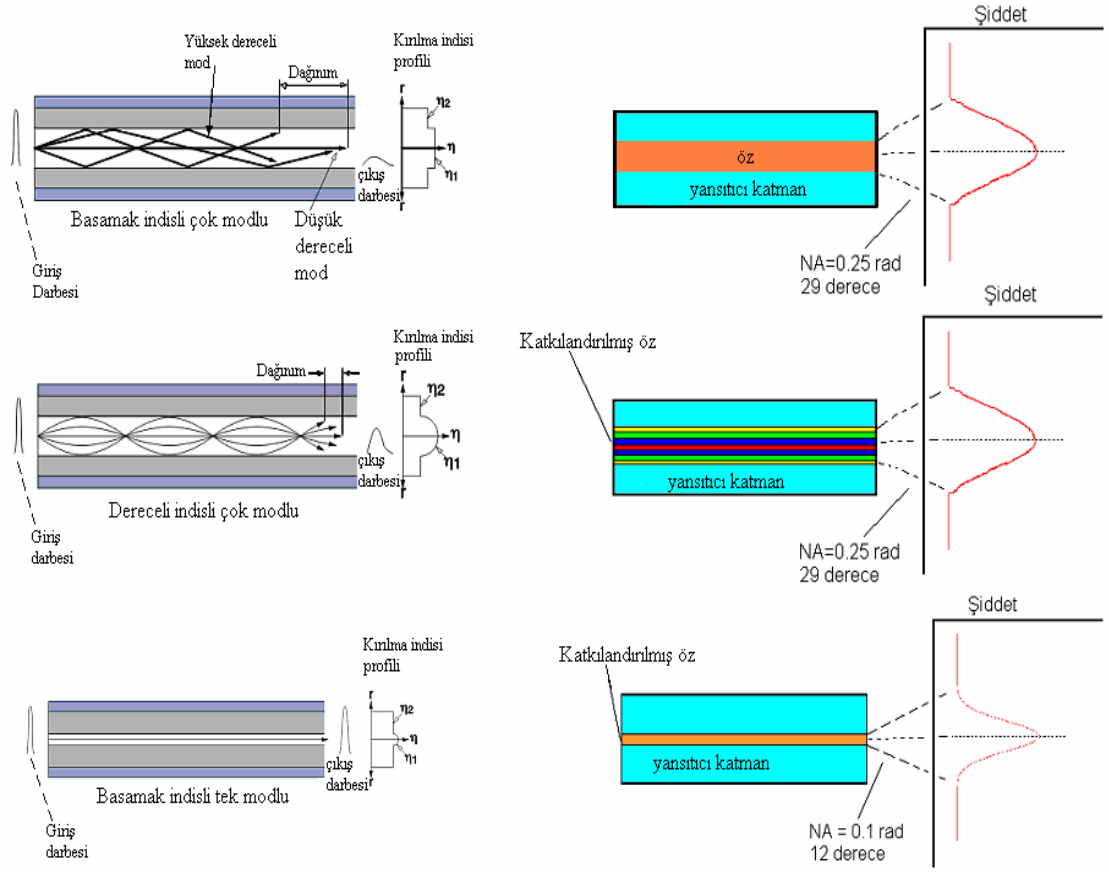
Şekil 2.8a. Optik fiber içerisinde elektromagnetik alan mod çözümleri.



Şekil 2.8b. Optik fiber içerisinde yayılım gösteren Sanki-Enine Elektrik Modun (Temel Mod) radyal ve açısal dağılımı.

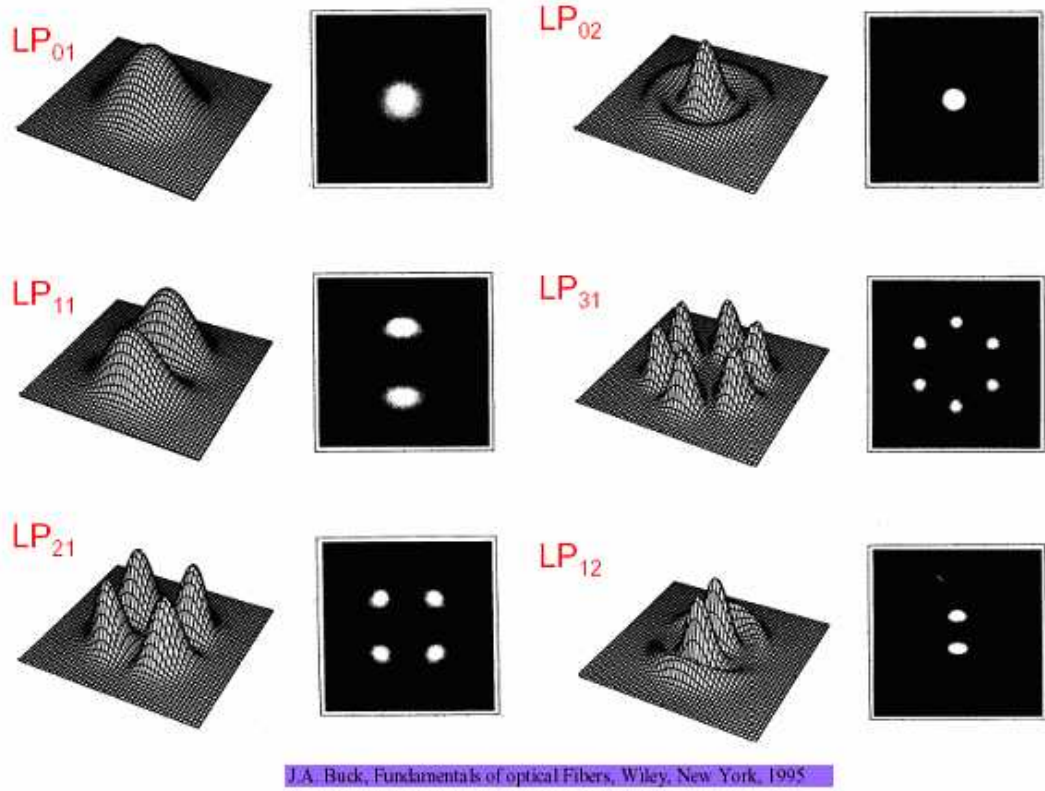
LP_{01} modu temel mod olup en düşük dereceli moddur. Diğer gösterilen iki mod ise yüksek dereceli modlara karşılık gelmektedir. Grafikten görüleceği gibi 2,4048 değerinden hemen sonra optik fiber özü içerisinde HE_{21} / TE_{01} ve HE_{21} / TM_{01} modlarının meydana getirdiği LP_{11} modu görülmektedir. 2,4048 değerinden daha küçük değerlerde ise yüksek dereceli modlar bozunarak, sadece “Tek Mod” olarak adlandırılan HE_{11} sanki-enine elektrik mod öz içerisinde yayılım gösterir.

Bölüm 2.1’de verilen kırılma indisi profili ve destekledikleri mod bakımından için optik fiber çıkışında oluşacak açısal optik akının radyal ve eksenel değişimi Şekil 2.9.’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Optik fiberlerin sınıflandırılması: Kırılma indisli profili ve mod dağılımına göre çıkıştaki optik güç dağılımı.

Yukarıdaki şekilde çok modlu fiberlerde görülen ve mod dağılımından kaynaklanan darbe genişlemesi, lojik olarak kodlanan bilginin uzun mesafeli veri iletimi durumunda birbirine karışmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla çok modlu optik fiberler, uzun mesafeli ve yüksek modülasyon band genişliğine sahip veri iletimi için uygun yapılar değildir.



Şekil 2.10. Optik fiber içerisinde ve çıkışında çeşitli LP mod şekillenimleri.

2.4. Kesim Dalga Boyu

Denklem (2.114)'ü dikkate alarak $V \leq 2,4048$ eşitsizliği, optik fiber 2.a öz çapı ve NA (rad) nümerik açıklığı için özel bir dalga boyu değerinden sonra sürekli sağlanır. Bu özel dalga boyuna kesim dalga boyu (cut-off wavelength) adı verilir ve bu dalga boyundan daha büyük dalga boyu değerleri için söz konusu optik fiber özünde elektromagnetik dalga tek modlu (HE_{11}) yayılım gösterir. Dolayısıyla Denklem (2.114)'ü kullanarak ilgili optik fiber için Kesim Dalga Boyu değeri;

$$\lambda_c = \frac{2\pi a \cdot NA(\text{rad})}{2,4048} \quad (2.115)$$

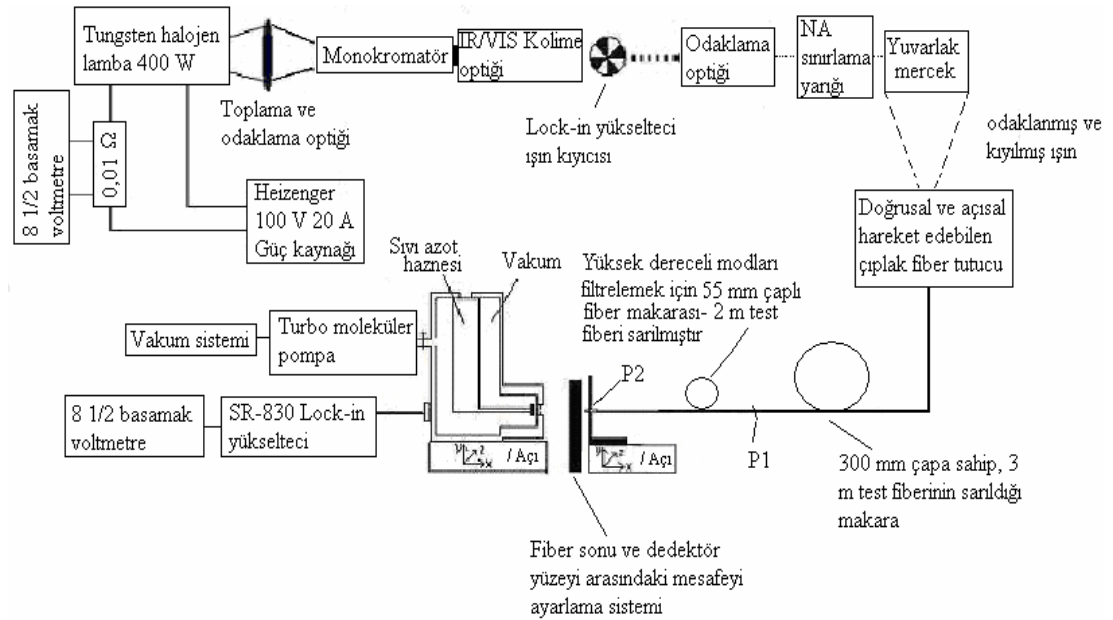
şeklinde yazılır [Çelikel, 2005]. Bu çalışmanın konusu olan İnterferometrik Fiber Optik Jiroskop (İFOJ) prototipinde kullanılan tek modlu ve Corning firması tarafından üretilen optik fiberin kesim dalga boyu değeri TÜBİTAK UME Optik

Laboratuvarı'nda gerçekleştirdiğim ölçümle 1252 nm olarak belirlenmiştir [Çelikel, 2005].

Optik esaslı jiroskoplarda mod dağılımından kaynaklanan “Simetrik Optik Yol” ’un (reciprocity) elde edilememesi sorununun aşılmasında ve bu durumun değerlendirilmesinde tek modlu iletim önemli rol oynar. Dolayısıyla tasarımda kullanılan optik kaynağın dalga boyu ile algılama sarımında kullanılan optik fiberin öz yarı çapı ve NA değeri tek modlu iletimi belirlediğinden, kullanılan fiberin sensör sistemin çalışması esnasında tek modlu iletimde bulunması gerekmektedir.

2.4.1. Kesim Dalga Boyu Ölçümü

İFOJ prototipinde kullanılan Corning imalatı tek modlu optik fiberde, tek modlu iletimin başarıldığı kesim dalga boyu değerini elde etmek için detayları Şekil 2.11.'de verilen ölçüm düzeneği TÜBİTAK UME Optik Laboratuvarında oluşturulmuştur [Çelikel, 2005].



Şekil 2.11. İFOJ prototipinde algılama sarımı olarak kullanılacak optik fiber için kesim dalga boyu ölçüm düzeneği [Çelikel, 2005].

Ölçüm düzeneğinde 400 W tungsten halojen lamba ışınım kaynağı olarak kullanılmış ve yüksek kararlılıklı akım modunda çalışan akım kaynağı ile beslenmiştir.

Ölçümlerden önce lamba en az çalıştırıldığı akımda 100 saat yaşlandırılmış olmalıdır. Lambanın akım kararlılığı, $8 \frac{1}{2}$ çözünürlüklü sayısal voltmetre ile kalibreli $0,1 \Omega$ (15 A, 15 ppm / °C) direnç üzerinden elde edilen voltaj verisi ile ölçüm süresince kontrol edilmiştir. Lamba akımının standard sapma değeri ortalama değeri yaklaşık $2 \cdot 10^{-6}$ olarak elde edilmiştir. Optik fiber içerisinde yayılım gösterecek olan ışınımın dalga boyu seçimleri Bentham çift kasa monokromatör ile gerçekleştirilmiştir. Monokromatör çıkışında ideal veya ideale yakın gauss biçimli bir ışın demeti elde etmek için monokromatörün giriş ve çıkış yarıkları eşit ve 0,5 mm değerine ayarlanmıştır. Monokromatör yarıklarının bu ölçüde küçük olarak ayarlanması monokromatör çıkışındaki optik güç seviyesini düşürmekle birlikte, çıkış ışınımının tayfsal band genişliğinin 2,2 nm'ye ayarlanmasına olanak sağlamıştır. Bu durumda elde edilecek Kesim dalga boyu değerindeki belirsizlik değeride küçültülmüştür. Özellikle kullanılan optik fiber için yakın kırmızı altı (IR) bölgede kesim dalga boyunu arayacağımızdan monokromatör kırınım ağının (grating) bu tayfsal bölgedeki doğrusal dağılım (linear dispersion) değerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu değer Monokromatör teknik özellik dökümanından 4,4 nm/mm olarak elde edilmiştir. Bu değer ile monokromatör giriş/çıkış yarıklarının açıklıkları, çıkıştaki ışınımın tayfsal band genişliğini belirlemektedir.

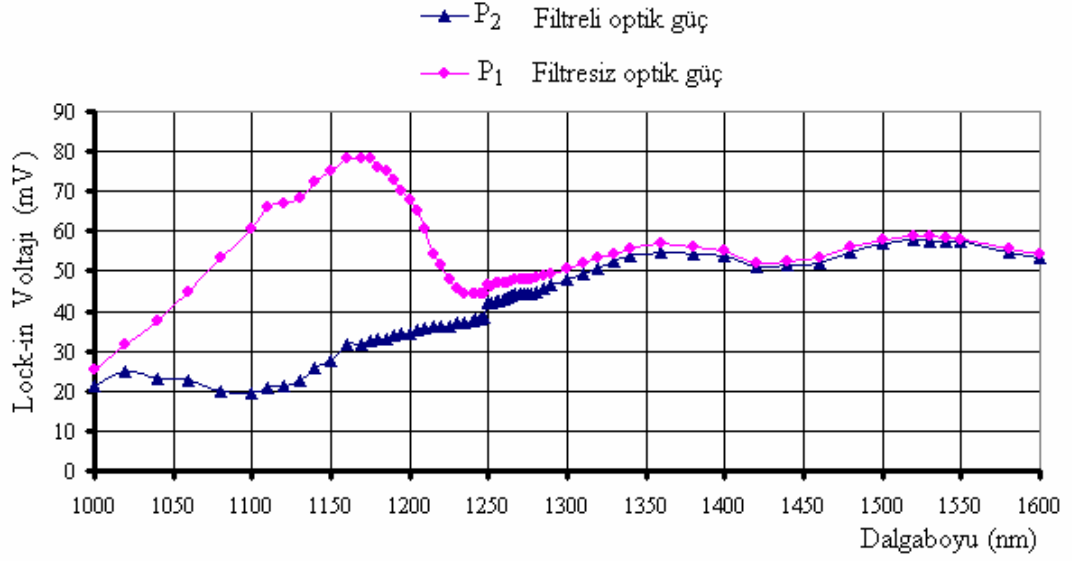
Monokromatör çıkışından elde edilen ışınım kolimatör ve plano konveks mercek kombinasyonu yardımıyla optik fiber içersine gönderilmiştir. Optik fiber çıkışındaki optik güç seviyesi yaklaşık birkaç yüz pW mertebesinde olduğundan NEP seviyesi yaklaşık 10^{-13} W olan InGaAs PIN fotodiyot kullanılmıştır. Sinyal gürültü oranını arttırmak ve ortamdaki termal değişimden fotodiyodu yalıtmak için, sıvı azot soğutmalı bir kryostat içersine fotodiyot yerleştirilmiş ve DC ölçüm yerine Lock-in tekniğiyle AC tarzda ölçümler yapılmıştır [Çelikel, 2005].

Şekil 2.11.'de verilen ölçüm konfigürasyonunda, 55 mm çapa sahip makaraya sarılmış bulunan yaklaşık 3 m uzunluğundaki fiber LP_{11} ve diğer yüksek dereceli modları filtreleme özelliğine sahip bir optogeometrik yapı meydana getirmektedir. 300 mm çapa sahip makaraya da yine 3 m uzunluğunda optik fiber sarılmış. Bu fiber dalga boyuna bağlı olarak LP_{01} temel modun yanında, optogeometrik özelliklerinin destekleyebileceği bütün modların yayılımına olanak sağlayacak geometriyi

oluşturmaktadır. Bu durumda, P_2 (filtreli optik güç) olarak gösterilen ve fotodiyottan dalga boyunun bir fonksiyonu olarak elde edilecek optik güç seviyeleri tamamen $LP_{01}(HE_{11})$ modunun meydana getirdiği güç seviyesidir. Dalga boyuna karşı P_2 optik güç seviyeleri elde edildikten sonra, Şekil 2.11.'de gösterilen, P_1 noktasından optik fiber kesilek uç durumu bir CCD kamera ile kontrol edilir. Uç düzgünlüğü kontrol edildikten sonra yine monokromatör ile seçilen dalga boylarına karşılık P_1 (filtresiz optik güç) optik güç seviyeleri elde edilir. P_1 optik güç seviyeleride LP_{01} temel modun yanında diğer mümkün yüksek dereceli modların oluşturduğu optik güç değerlerini de içermektedir. P_1 ve P_2 ölçümleri sona erdikten sonra;

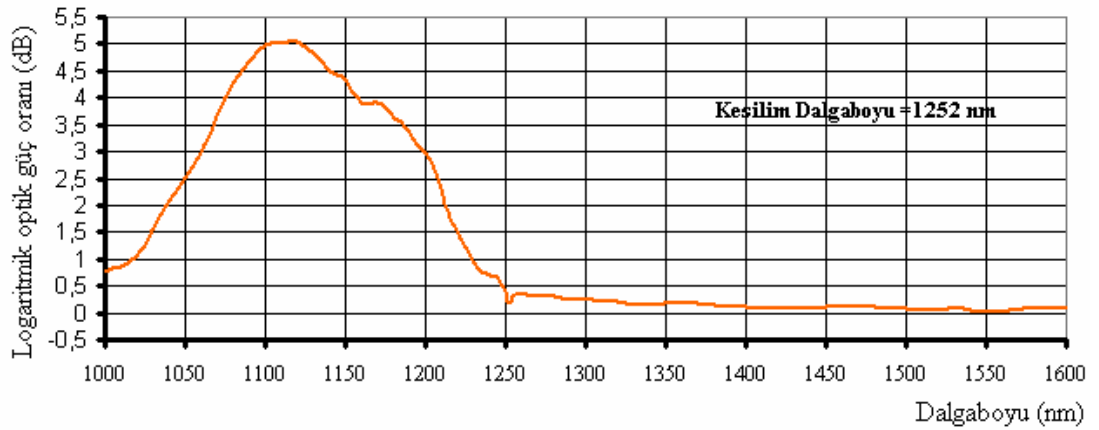
$$R(\lambda) = 10 \text{Log} \left(\frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.116)$$

formülü yardımıyla filtresiz optik gücün birdenbire filtreli optik güç seviyesine düştüğü dalga boyu değeri grafiksel olarak belirlenir. Bu şu anlam taşır, Denklem (2.114)'te verilen optik fiber için NA ve öz çapı değeri değişmemesine rağmen belirli bir dalga boyu değerine kadar test optik fiber LP_{01} ve diğer yüksek dereceli pek çok modu desteklemiştir (P_1 filtresiz güç değeri). Ancak belirli bir dalga boyundan itibaren test optik fiber bir alçak frekans geçiren filtre gibi davranmış, yani Denklem (2.114)'e göre V normalize frekans değeri 2,4048 değerinden daha küçük değerler almaya başlamıştır. Bu durumda LP_{11} ve diğer olası yüksek dereceli modlar filtrelenirken, sadece temel mod $LP_{01} (HE_{11})$ yayılım göstermiştir, yani optik fiber tek modlu ilettime geçmiştir. P_1 ve P_2 optik güç değişimleri Şekil 2.12.'de verilmiştir.



Şekil 2.12. IFOJ prototipinde algılama sarımı olarak kullanılan optik fiberin kesim dalga boyu ölçümünde elde edilen filtreli ve filtresiz optik güç seviyelerindeki değişim.

Şekil 2.13. ise Denklem (2.116)'da verilen filtreli ve filtresiz optik güçlerin logaritmik oranları yardımıyla kesim dalga boyunun belirlendiği sonuç grafiğini göstermektedir.



Şekil 2.13. Logaritmik optik güç oranından kesim dalga boyu değerinin belirlenmesi.

Şekil 2.13.'te verilen grafikten görüldüğü gibi 1252 nm'de filtresiz optik güç seviyesi ile filtreli optik güç seviyesi arasındaki oran birden bire düşerek yaklaşık 0,18 dB seviyesi gelmiştir. Bu durumda test edilen ve İFOJ prototipinde algılama sarımı olarak kullanılacak olan optik fiber için 1252 nm kesim dalga boyu olarak

belirlenmiş olup bu dalga boyundan daha uzun dalgaboyları (yani daha küçük optik frekanslar için) için sadece LP_{01} modu iletilir. Mod dağılımından kaynaklanan ve İFOJ'ta önemli bir sorun oluşturan Simetrik Optik Yol (SOY) (reciprocity) hatasının 1252 nm'den daha uzun dalgaboylu ışınım kaynakları kullanılarak ortadan kaldırılabileceği sonucuna varılmıştır [Çelikel, 2005].

Burada tek modlu optik fiberler için yaklaşık 0,10-0,14 (rad) olarak belirtilen NA değerinin, optik fiber içerisine herhangi bir ışınım kaynağından elde edilen optik ışınımın sokulması için önemli bir sorun yaratacağı sonucunu doğurabilir. Ancak Denklem (2.114) ve Denklem (2.115)'e bakıldığında NA değerinin çok büyütülmesi optik fiberin kesilim dalga boyunu büyütecektir. Bu durumda optik fiber daha uzun dalgaboyları için tek modlu davranacağından, fiberin ana malzemesi silikanın en az tayfsal soğurma verdiği 1310 nm ve bilhassa 1550 nm bölgelerinde çok modlu hale dönüşecektir. Bu durum modülasyon band genişliğini sınırlayan mod dağılımının, tayfsal zayıflatmanın en az olduğu bölgelerde bile uzun mesafeli data iletiminin sınırlanması sorununu ortaya çıkarır.

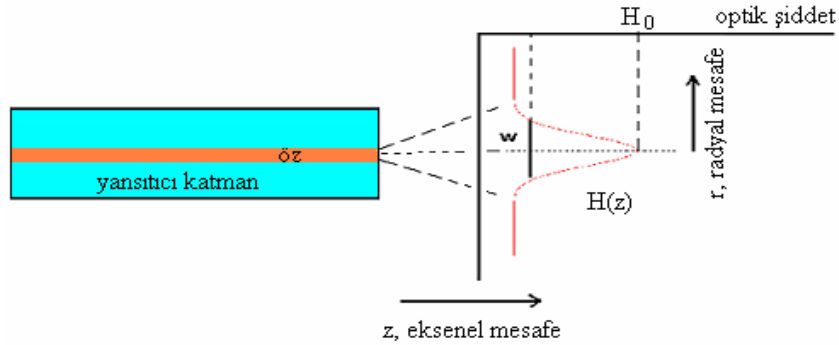
2.5. Mod Alan Çapı

İFOJ prototipinin algılama sarımı olarak kullanılacak olan optik fiberin kesilim dalga boyu ölçümü ile 1252 nm'lik kesilim dalga boyu değerine ulaşılmıştır. Bu durumda mod dağılımının olmaması için jiroskop prototipinde 1252 nm'den daha uzun dalgaboylu optik kaynakların kullanılması gerekmektedir. Bu sonuçtan hareket ile 1300 nm ve 1550 nm bölgesinde çalışan optik kaynaklar tayfsal band genişliklerini de hesaba katarak jiroskop prototipi için uygun tipte kaynaklar olup SOY'u bozan mod dağılımı için bir neden teşkil etmeyecektir. İFOJ prototipinde fiber/fiber, fiber/hava/fiber, fiber/fotodedektör ve fiber optik kaynak ara yüzeylerinde birleşim noktaları mevcuttur. İşte bu ara yüzlerin fiber optik konnektörler ile mekanik veya kaynak (ticari bir optik fiber ek cihazı ile gerçekleştirilir) yöntemleri ile birleştirilmeleri esnasında optik güçte kayıplar söz konusudur. Bu kayıpların en aza indirilmesi ve bu kayıpların kestirilebilmesi için, optik fiber içerisinde tek mod olarak yayılan elektromagnetik profili oldukça önemlidir. Tek modlu optik fiberlerde optik gücün yaklaşık %85'lik bir kısmı öz kısmında ilerlerken geri kalan kısmı ise

yansıtıcı katmanda ilerler ve bu oran kullanılan kullanılan optik kaynağın dalga boyuna bağlı olarak değişim gösterir. Fiber çıkışındaki (ve fiber içindeki tek modlu alan dağılımı da) güç dağılımı hemen hemen Gaussian yapıdadır. Dolayısıyla optik fiber çıkışındaki gücü tarif etmek için öz çapı yerine hemen hemen Gaussian olarak belirtilen fiber çıkışındaki optik güç profilinin Mod Alan Çapı-MFD parametresini belirtmek çok daha anlamlıdır. Mod Alan Çapı;

$$H(z) = H_0 e^{-\left(\frac{2r^2}{w(z)^2} \right)} \quad (2.117)$$

Gaussian Dağılım ifadesi göz önüne alınarak H_0 optik güç seviyesinin $1/e^2$ yani %13,5 değerine düştüğü radyal mesafe uzak alandaki Mode Alan Çapı –MFD olarak tanımlanır ve $w(z)$ ile gösterilir. Bu denklemde r , fiber ekseninden düşey doğrultudaki radyal mesafe, fiber ucundan herhangi bir noktadaki eksenel uzaklık z ve $w(z)$ 'de o noktaki maksimum optik güç değerinin $1/e^2$ değerine düştüğü radyal demet genişliğidir. Şekil 2.14. tek modlu bir optik fiberin çıkışındaki LP_{01} mod dağılımının radyal ve eksenel doğrultuları ile Mod Alan Çapını göstermektedir.



Şekil 2.14. Tek modlu optik fiberin desteklediği LP_{01} modunun optik fiber çıkışında oluşturduğu optik akının radyal ve eksenel şekillenimi.

H_0 maksimum güç değerinin $H(z)$ değerine düştüğü yerdeki w değeri uzak alandaki Mod Alan Çapına-MFD karşılık gelmektedir.

Optik fiberin öz ve yansıtıcı katmanlarında radyal olarak dağılım ve fiber boyunca yayılım gösteren HE_{11} (LP_{01}) elektrik alan şiddetinin genişliğini doğrudan

fiber içerisinde ölçmek, bu alanın çok küçük ölçeklerde olması nedeniyle oldukça zordur. Fiber içerisindeki bu elektrik alan Yakın Alan (Near Field) olarak tanımlanır. Yakın alanın doğrudan ölçümü yerine optik fiber çıkışındaki optik şiddetin açısal tarama ile radyal değişimi elde edilir. Radyal optik şiddetin maksimum değerinin $1/e^2$ 'sine düştüğü açı değeri belirlenerek aşağıda verilen denklemden ilgili dalga boyları için yakın alan için (HE_{11}) alan çapı elde edilebilir [Çelikel, 2005].

$$2w = \frac{\lambda}{\pi \tan \theta_{ff}} \quad (2.118)$$

Burada $2w$ temel modun yakın alan çapı (yani optik fiber içindeki gerçek alanın), λ dalga boyu ve θ_{ff} ise radyal olarak uzak alandaki optik şiddetin maksimum değerinin $1/e^2$ 'sine düştüğü açıdır. Bununla birlikte, daha doğru ve Gauss biçimli bir alan profiline sahip olmayan tek modlu Dağınımı Kaydırılmış (Dispersion Shifted Fibers) optik fiberler içinde doğru sonuçlar veren ve hiçbir yaklaşık kabule gerek bırakmayan Petermann formülü yakın alanı elde etmede en etkin araçtır [Çelikel, 2005].

$$2w = \frac{\sqrt{2} \cdot \lambda}{\pi} \left\{ \frac{\int_0^\theta P(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^\theta P(\theta) \sin^3 \theta \cos \theta d\theta} \right\}^{1/2} \quad (2.119)$$

Burada $2w$ yakın alandaki mod alan çapı (gerçek alan çapı), λ dalga boyu ve $P(\theta)$, θ açısında elde edilen uzak alandaki (far field) optik güç seviyesidir. İntegral sınırı açı değeri $\pm 90^\circ$ 'lik bir aralığı içerir. Ancak uygulamada $\pm 15^\circ$ 'lik açının ötesinde uzak alandaki optik güç seviyesi maksimum değerinin -40 dB veya daha altına kadar inebilmektedir.

Tek modlu optik fiberin mod alan çapı ile kesilim dalga boyu arasında sıkı bir ilişki mevcuttur. Zaten kesilim dalga boyunun optik fiberin tek modlu iletimi desteklemesi için bir başlangıç değeri olduğunu belirtilmişti. Bu yakın ilişki kesilim

dalga boyu ile mod alan çapı arasında aşağıda verilen ampirik formül ile gösterilebilir [Çelikel, 2005].

$$w_M = a(0,65 + 0,434(\frac{\lambda}{\lambda_c})^{1,5} + 0,0149(\frac{\lambda}{\lambda_c})^6) \quad (2.120)$$

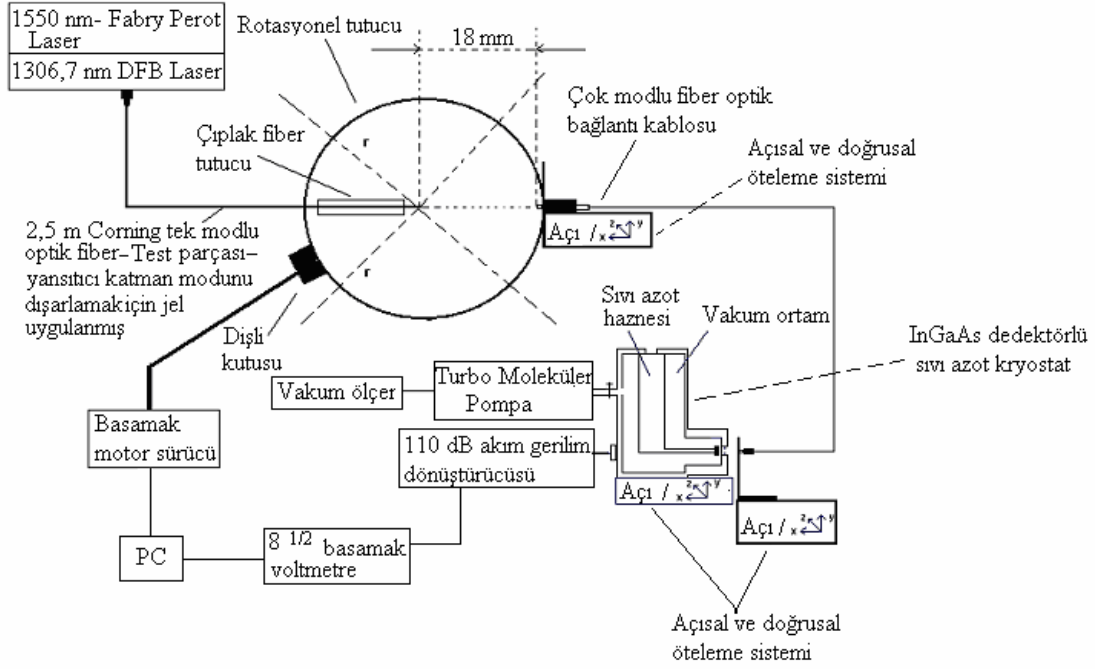
Burada w_M mod alan yarıçapı, a optik fiberin öz yarıçapı ($\sim 4,5 \mu\text{m}$), λ_c optik fiberin kesilim dalga boyu ve λ 'da ilgili mod alan çapı değerinin istendiği dalga boyu değeridir. Denklem (2.120) D. Marcuse tarafından 1978 yılında türetilmiştir.

2.5.1. Mod Alan Çapı Ölçümü

Optik fiberin mod alan çapı ölçümleri için kullanılan standardlaştırılmış iki tip ölçüm metodu mevcut olup bunlar;

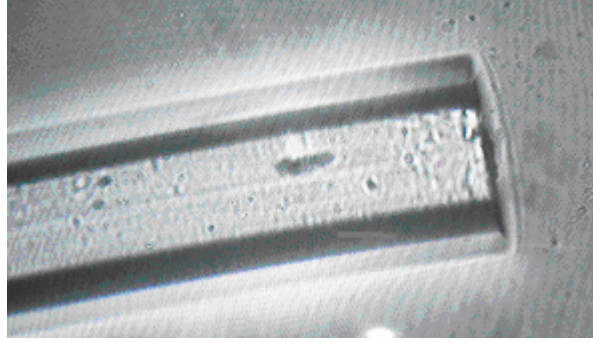
- a- Uzak alan tarama (Far Field Scanning)
- b- Yakın alan tarama (Near Field Scanning)

olarak adlandırılır. İFOJ'ta kullanılması planlanan algılama fiberinin mod alan çapını belirlemek için “Uzak Alan Tarama” metodu uygulanmıştır. Uzak alan için test fiberinin ucundan itibaren Fresnel Bölgesinin tanımlanması gereklidir. Bu alanın tanımlaması fiber ucundan hava ortamına çıkan elektromagnetik dalganın dalga boyuna ve optik fiber içerisindeki elektromagnetik alanın genişliğine bağlıdır. Dolayısıyla Telecommunication Industry Association (TIA) tarafından belirlene kritere göre, optik fiber için fiber ucundan $100.w^2/\lambda$ (mm) ve ötesi, uzak alan yaklaşımının kabul edildiği Fresnel Bölgesi şeklinde tanımlanır [Çelikel, 2005]. Burada w , λ dalga boyunda optik fiber içerisindeki elektromagnetik alanın alan yarıçapıdır. Bu kritere göre 1306,7 nm dalga boyu için $5 \mu\text{m}$ elektromagnetik alan yarıçapı değerinde 1,92 mm ve ötesi uzaklıklar uzak alan olarak kabul edilir. Deneyin gerçekleştirildiği düzenek Şekil 2.15.'te gösterilmektedir.



Şekil 2.15. İFOJ prototipi algılama sarımında kullanılan tek modlu optik fiberin mod alan çapı ölçüm düzeneği. Uzak alan tarama yöntemi için, TÜBİTAK UME Optik Laboratuvarında oluşturularak ilgili optik fiberin 1306,7 nm ve 1550 nm dalgaboylarında mod alan çapı ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Bu düzeneğe ışın kaynağı olarak 1306,7 nm’de emisyon yapan DFB ve 1480 nm – 1590 nm aralığında emisyon yapan Fabry-Perot türü lazerin 1550 nm dalga boylu emisyonu kullanılmıştır. Test fiberi yaklaşık 2,5 m uzunluğunda olup, üzerindeki plastik kaplama ticari bir fiber soyucu ile kaldırılıp temizlenmiştir. Temizlenen bu fiber kısmına yansıtıcı katman mod dışarılayıcı jel uygulanmıştır. Bu jel sayesinde oluşması muhtemel ve yansıtıcı katman / hava ara yüzeyinden fiber sonuna kılavuzlanarak erişebilen yansıtıcı katman modlarının, fiber sonuna ulaşmadan hava ortamına çıkmaları sağlanmıştır. Test fiberinin uç kısmı çıplak fiber tutucuya tutturulmuş ve bu tutucuda rotasyonel tutucunun tam merkez noktası gelecek şekilde sabit optik masa yüzeyine monte edilmiştir. Bu deneyde test fiberinin ucundan çıkacak elektromagnetik alanın açısal değişimini elde edeceğimizden ötürü test fiber ucunun 90°’lik bir açıyla kesilmiş ve temiz olmasına dikkat edilmelidir. Bunu sağlamak için ticari bir fiber kesici ile kesilen optik fiberin uç durumu bir CCD kamera ile muayene edilmiş ve aşağıdaki fotoğrafta bu durum gösterilmiştir.



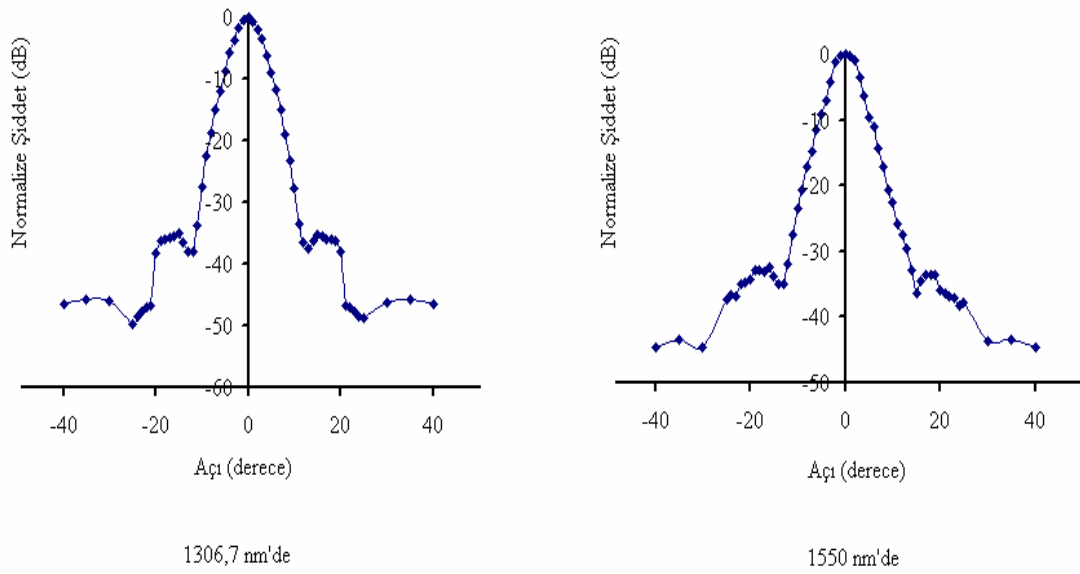
Şekil 2.16. Uzak alan tarama metoduna göre açısız alan taraması başlamadan önce CCD kamera ile alınmış test fiberinin uç durumunu gösteren fotoğraf.

Açısız elektromagnetik alan taramasının gerçekleştirilmesi için uzayda dağılım gösteren optik akının fotodiyot üzerine düşürülmesi gerektiğinden, test fiberinin uç kısmından 18 mm öteye 0,25 rad NA değerine sahip bir çok modlu optik fiber ara bağlantı kablosu, rotasyonel tutucunun kenarına monte edilmiştir. Bu çok modlu optik fiber ara bağlantı kablosunun diğer ucu kryostat içersine yerleşik bulunan 5-mm aktif çapa sahip InGaAs fotodiyot merkezine gelecek şekilde sabitlenmiştir. Fotodiyotta optik akıya bağlı üretilen fotoakım 110 dB dönüşüm aralığına sahip bir akım-gerilim dönüştürücüsü ile gerilime dönüştürülmüş ve elde edilen gerilimde 8 ½ basamaklı voltmetre ile örneklenmiştir.

Lazer kaynaklarının çıkış güç seviyeleri, 1306,7 nm için 600 μ W ve 1550 nm için ise 590 μ W değerine ayarlanmıştır. Açısız çözünürlüğün artırılması için 1,92 mm olarak hesaplanan Frensel Bölgesini gösteren değerden daha uzağa çok modlu optik fiber arabağlantı kablosunun götürülmesinde fayda vardır. $\pm 40^\circ$ 'lik bir açısız taramayı da dikkate alarak optik güç seviyesinin bu açısız değerlerde 1 nW'ın altına düşeceğini hesaba katarak fotodiyotun gürültü eşdeğer güç seviyesi değerlendirilmeli ve açısız çözünürlük adına sinyal gürültü oranındanda taviz verilmemelidir. Dolayısıyla burada gerçekleştirilen ölçümde bu mesafe 18 mm olarak optimize edilmiştir. Ölçümlerde dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi de düzgün kesilen uçtan hemen hemen Gauss biçimli elde edilen çıkışın maksimum güç seviyesini veren tepe noktasını elde etmek ve bu noktadan itibaren simetrik açısız taramaya başlanmasıdır. Ayrıca uzak alan dağılımını fotodiyot üzerine düşürmekte kullanılan çok modlu optik fiber ara bağlantı kablosunun ve bilhassa test fiberi ucunun

rotasyonel tutucunun merkezinden kaçacak şekilde yerleştirilmesi de önemli hatalar doğurur.

Rotasyonel tutucunun bağlı olduğu basamak motoru sürücü devre ve ilgili yazılım ile elde edilen θ açısı değerine karşılık voltmetreden elde edilen voltaj değerleri, bize uzak alanda o açı değeri için optik akı şiddeti değişimlerini $P(\theta)$, verir. Açısal tarama $0,5^\circ$ 'lik açı adımlarıyla gerçekleştirilmiş olup ölçüm sonuçları da Şekil 2.17.'de verilmiştir.



Şekil 2.17. Mod alan çapı ölçümü sonucunda İFOJ prototipi algılama sarımında kullanılacak olan tek modlu optik fiberin uzak alandaki elektromagnetik alan dağılımı, $\pm 40^\circ$ 'lik bir açısal tarama için elde edilmiştir.

Denklem (2.119)'da verilen Petermann eşitliğini ölçümün yapıldığı $\pm 40^\circ$ aralığında hem 1306,7 nm ve hem de 1550 nm için integre ederek, her iki dalga boyu için mod alan çapı yani optik fiber içerisindeki elektromagnetik alanın genişliği, 1306,7 nm için $9,467 \mu\text{m}$ ve 1550 nm'de ise $10,649 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Denklem (2.120)'den teorik olarak hesaplanan değerler ise sırasıyla $9,508 \mu\text{m}$ ve $10,842 \mu\text{m}$ 'dir. Şekil 2.17.'den görüldüğü üzere $\pm 15^\circ$ 'den sonraki açı değerlerinde 0° 'deki maksimum şiddet değeri -40 dB'lik düşüş göstermiştir.

Bu sonuçlara göre, yaklaşık 9 μm 'lik bir çapa sahip öz içerisinde ilerleyen 1306,7 nm dalga boyuna sahip elektromagnetik dalganın yaklaşık 0,467 μm 'lik kısmı yansıtıcı katmanda ilerlerken 1550 nm dalga boyu için 1,842 μm 'lik kısım yansıtıcı katmandan ilerlemektedir. Dolayısıyla optik fiberin öz çapından ziyade, ilgili dalgaboyları için mod alan çaplarını vermek çok daha anlamlı ve doğrudur. İFOJ protoipinin bazı noktalarında gereksinim duyulan fiber optik bağlantıların kaynak işlemlerinde, optik fiberin öz ve yansıtıcı katman eksenleri karşı uçtaki öz ve yansıtıcı katman eksenleri ile çakışmalıdır. Uygun olmayaneksen ayarı durumunda optik kaybın yüksek derece artması söz konusu olacaktır. Dolayısıyla bu deneysel sonuçlardan uzun dalga boylarında bu kaybın daha da artacağı anlaşılmaktadır.

kesim dalga boyu ve mod alan çapı ölçümleri için detaylı bilgi ve ölçümlere dair belirsizlik analizleri [Çelikel, 2005]'de verilmektedir.

2.6. Optik Fiberin Tayfsal Zayıflatma Sabiti

Optik fiber içerisinde yayılım gösteren elektromagnetik dalganın boyuna alan bileşenleri elektrik ve magnetik alanlara ayrılarak Denklem (2.23) ve Denklem (2.24)'te verildi. Bu denklemlerde verilen ve β olarak gösterilen boyuna alanların yayılım sabiti, optik fiber öz katmanının kırılma indisi ve ortam içerisinde yayılım gösteren elektromagnetik dalganın açılal dalga vektörünün bir fonksiyonudur. Yayılım sabitinin içerdiği kırılma indisi parametresi optik fiber içerisinde çok küçük de olsa değişimlere sahiptir. Bir başka deyişle kusursuz bir imâlat söz konusu olmadığından optik fiber boyunca (z- eksen) kırılma indisinde lokal farklılıklar mevcuttur. Optik fiber içerisinde ilerlemekte olan elektromagnetik dalga bu küçük kırılma indisi farklılıkları gösteren noktalardan küresel olarak saçılmaya ve yayılmaya maruz kalır. Saçılan elektromagnetik dalganın bir kısmı optik fiber içerisinde tutulup geldiği istikamet tersi yönde optik kaynağa doğru kılavuzlanırken bir kısmı da yansıtıcı katmanda üstel azalmaya maruz kalarak ısı enerjisi formuna dönüşür. Dolayısıyla kırılma indisi parametresindeki lokal değişikliklerin doğurduğu bu saçılma etkisi dalga boyunun kuvvetli bir fonksiyonu olup (4. dereceden) Rayleigh Saçılması α_R , olarak bilinir ve z-doğrultusunda ilerlemekte olan elektromagnetik dalganın üstel formda azalmasına neden olur.

$$\alpha_R = \frac{8.\pi^3}{3.\lambda^4} (n^2 - 1) k_B T \beta_c \quad (2.121)$$

Burada λ , dalga boyu, n , kırılma indisi, β_c , ısıl sıkışabilirlik, k_B , Boltzman sabiti, ve T mutlak vitrifikasyon sıcaklığıdır [Soares,1994]. Rayleigh saçılmasının yüksek derecede mevcut olması İFOJ prototipinde kullanılan fotodiyot üzerine bu etkiden kaynaklanan ve interferometrik faz bilgisini taşımayan optik akının düşmesine neden olur. Dolayısıyla fotodiyot üzerinde integre edilen fotonların ürettiği fotoakımdan faz bilgisi içeren kısmın süzülmesi mümkün değildir. Yani bir başka deyişle Rayleigh Saçılmasıyla fotodiyot üzerine düşen optik akı faz bilgisi taşıyan interferometrik sinyali maskeler. Bu durumda İFOJ prototipinde algılama sarımı olarak kullanılacak optik fiberin ve optik kaynağın dalga boyunun seçiminde bu maskeleyenin önüne geçmek bakımından dikkat edilmelidir. İFOJ prototipinde Rayleigh saçılmasının önüne geçilebilmesini sağlayan en önemli etken ise kullanılan optik kaynakların büyük tayfsal band genişliğine dolayısıyla düşük uyumluluk seviyesine (low coherence) sahip olmalarıdır. Yüksek uyum uzunluğuna sahip kaynaklar fiber / hava ara yüzeylerinde oluşan geri-yansıma ve fiber içinde meydana gelen Rayleigh Saçılması esaslı geri-saçılma etkilerinden oluşan istenmeyen kararsız interferanslara yol açar. Düşük uyum uzunluğuna sahip kaynaklar ile uzun yol farklarında kararsız ve istenmeyen bu interferans etkisi ana sinyal korunarak ortadan kaldırılmış olur. Rayleigh Saçılmasına ilave olarak bir başka tayfsal azalmaya neden olan etki de soğurma etkisidir. Yine optik fiberin imâlatı esnasında, silika içersine karışma olasılığı bulunan Fe^{+3} iyonları mor ötesi (Ultraviolet-UV) ve görünür (Visible), Fe^{+2} iyonları da mor ötesi, görünür ve kırmızı altı (Infrared-IR) ve OH^- iyonlarında yalnızca kırmızı altı bölgede soğurma bandlarına sahip olduklarından öz katmanı içerisinde bu bölgelerde de tayfsal dağılıma sahip elektromagnetik dalganın soğurulmasına ve dolayısıyla şiddetinde azalmaya sebep olurlar [Çelikel et al, 2005]. Optik fiber öz katmanında yayılım gösteren ve z- doğrultusunda ilerleyen elektromagnetik dalga için toplam optik fiberin tayfsal zayıflatma katsayısı, Rayleigh Saçılma sabiti (α_R) ve optik soğurulma sabitiden (α_A) meydana gelir.

$$\alpha \rightarrow \alpha (\alpha_R, \alpha_A) \quad \alpha_R \gg \alpha_A > 0 \quad (2.122)$$

$$\phi(z) = R \phi_0 e^{-\alpha z} \quad (2.123)$$

Burada α , tayfsal zayıflatma sabiti, R, küresel olarak saçılan ve optik fiber özü tarafından yakalanıp geri yönde kılavuzlanan fotonların saçılma tesir kesitine karşılık gelen geri saçılma (backscattering) faktörüdür. R, optik fiberin NA değerinin, öz kırılma indisinin ve Rayleigh Saçılma faktörünün ve ışık darbe olarak ilerliyorsa darbe genişliğinin bir fonksiyonudur [Çelikel et al, 2005]. ϕ_0 , fiber özüne gönderilen optik kaynağın güç seviyesi ve $\phi(z)$ ise optik fiber özü içerisinde z-doğrultusu boyunca ilerleyen elektromagnetik dalganın herhangi bir z'inci metredeki güç seviyesidir. Denklem (2.123)'te yer alan α 'nın boyutu (km^{-1})' dir. Ancak optik fiber ve haberleşme teknolojisinde elektromagnetik güç oranları kullanıldığından;

$$\alpha(\text{dB/km}) = 10 \alpha (1/\text{km}) / \ln(10) \quad (2.124)$$

dönüşümü ile Denklem (2.123), (dB/km) formuna sahip tayfsal zayıflatma sabiti α cinsinden şu şekilde yazılır [Çelikel et al, 2005];

$$\phi(z) = R \phi_0 10^{(-1/10) \alpha(\text{dB/km}) z} \quad (2.125)$$

$$z = \frac{cT}{N(\lambda)} \quad (2.126)$$

Denklem (2.126)'da $c = 2.99792458 \times 10^8$ (m/s), vakum ortam için ışık hızı, T optik fiberin λ dalga boyu için geçiş zamanı ve öz katmanı için $N(\lambda)$ 'da grup kırılma indisidir. Tayfsal zayıflatma katsayısı yüksek olan optik fiber sarımlarında öz katmanında ilerlemekte olan optik güç miktarı daha hızlı azalım göstermektedir. Denklem (2.125)'ten görüleceği üzere bu azalım üstel formdadır. Dolayısıyla İFOJ prototipinde algılama sarımı olarak kullanılacak optik fiberin tayfsal zayıflatma katsayısının, yine İFOJ prototipinde kullanılacak optik kaynakların tayfsal dağılımlarını da içerecek tayfsal band aralığında belirlenmesinde fayda vardır. Bir başka deyişle, yüksek tayfsal zayıflatma veren banda, düşük optik emisyon yapan optik kaynak kullanılması durumunda İFOJ fotodiyodu üzerine gelen optik akı azalır

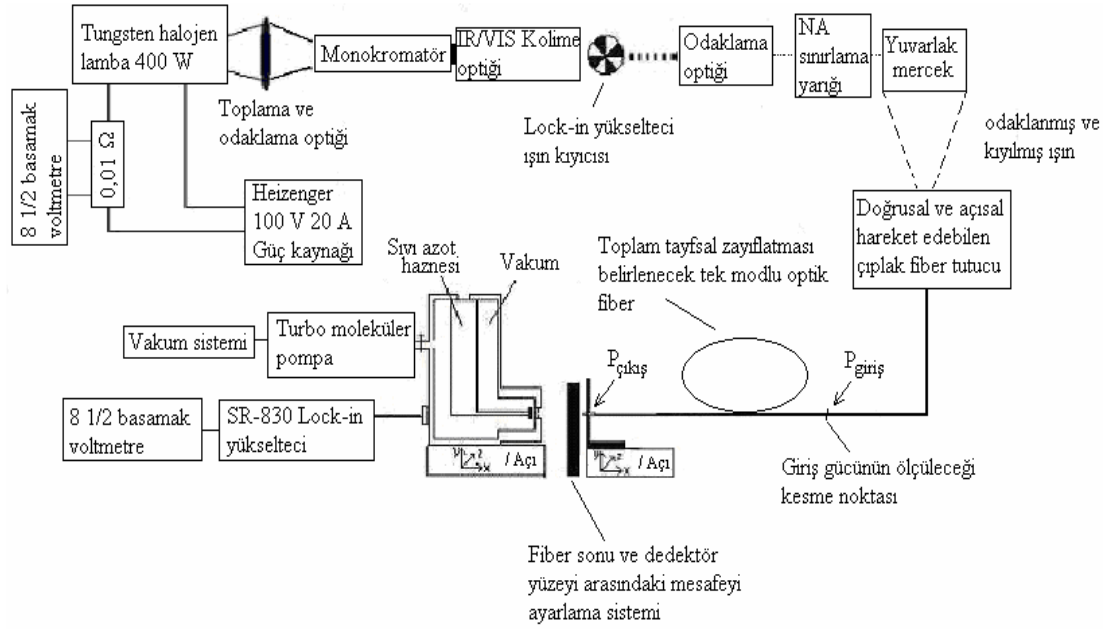
ve bu durumda ya interferansa karşılık gelen fotoakım fotodiyot tarafından üretilemez ya da interferansa karşılık gelen fotoakım üretilse dahi İFOJ prototipinin Voltaj (V) – Faz (°) dinamik aralığı sınırlandırılmış olur.

2.6.1.Tayfsal Zayıflatma Sabitinin Belirlenmesi

Rayleigh Saçılması prensibine dayalı olarak optik fiber boyunca geri yönde saçılan fotonları gerçek zamanlı olarak algılayıp bir kaç nanosaniye zaman aralığında örnekleme yapabilen Analog Sayısal Dönüştürücüden (Analog Digital Converter-ADC) meydana gelen OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) cihazları ile optik fiberin tayfsal zayıflatma katsayısını iki dalga boyunda belirlemek mümkün olmaktadır. Geniş tayfsal band aralıklarındaki değişimler için ilgili [EN 60793-1-40, 2003] standardında belirtilen “cut-back” metoduyla optik fiberin yüksek kesinlikli toplam tayfsal zayıflatmanın belirlenmesi olasıdır. Standard “Cut-Back” metoduyla toplam tayfsal zayıflatması (dB) cinsinden belirlenen tek modlu optik fiber için tayfsal zayıflatma katsayısının (dB/km) cinsinden belirlenebilmesi için “Geçiş Zamanı” ölçümü yapılır. “Geçiş Zamanı” ölçümü ile test fiberinin uzunluğu 1 m’yi aşmayan bir belirsizlik ile (optik fiberin kromatik dağınımına bağlı olarak) “km” cinsinden elde edilir. Dolayısıyla bu iki ölçümden elde edilen tayfsal toplam zayıflatma değeri, optik fiberin boyuna bölünerek birim uzunluk başına tayfsal zayıflatma değeri (dB/km) cinsinden tayin edilir.

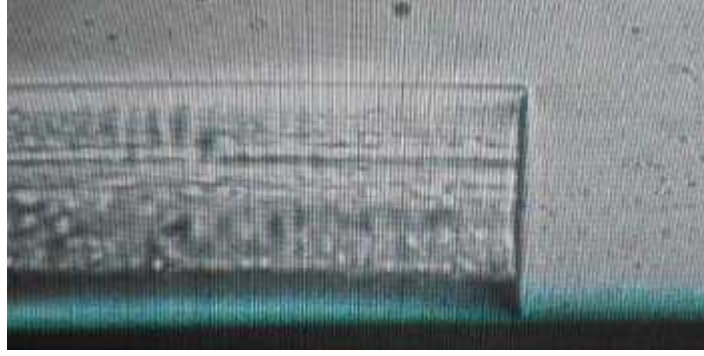
2.6.1.1.ToplamTayfsal Zayıflatma Ölçümü

“Cut-Back” metoduyla toplam tayfsal zayıflatmanın belirlenebilmesi için detayları Şekil 2.18.’de verilen ölçüm konfigürasyonu TÜBİTAK UME Optik Laboratuvarında oluşturulmuştur.



Şekil 2.18. Tek modlu optik fiberin toplam tayfsal zayıflatmasının belirlendiği “Cut-Back” ölçüm düzeneği [Çelikel et al, 2005].

Bu düzende 400 W’lık tungsten halojen lamba optik kaynak olarak kullanılmıştır. Lamba akımı 0,01 Ω ’luk direnç üzerinden 8 ½ basamaklı voltmetre ile ölçümler boyunca kontrol edilmiş ve standard sapma değerleri kaydedilmiştir. Lamba optik emisyonundan dalgalı boylarını seçmek için monokromatör kullanılmıştır. Monokromatörün optik giriş ve çıkış açıklıkları 0,5 mm değerlerine ayarlanarak çıkıştaki optik emisyonun gauss biçimli olması sağlanmıştır. Monokromatör kırınım ağınn (grating) yakın kırmızı altı (1300 nm ve 1550 nm bandlarını içeren) tayfsal bölge için lineer dağınn (linear dispersion) katsayısı 4,4 nm/mm’dir. Bu durumda 0,5 mm’lik giriş/çıkış açıklığı ile 2,2 nm’lik bir tayfsal band genişliği elde edilmiştir. Monokromatör çıkışından elde edilen 2,2 nm tayfsal band genişliğine sahip optik ışınının yaklaşık 0,1 rad NA değerine sahip optik fiber içersine gönderilmesi için kolimatörlü bir fiber optik ara bağlantı kablosu kullanılmıştır. Test fiber çıkışında 1310 nm ve 1550 nm dalgalı boylarında yaklaşık 600 pW (-62,5 dBm)’lik bir güç çıkışı elde edilmiştir. Test fiberinin çıkış ucu ticari bir fiber kesici ile kesilerek uç düzgünlüğü bir CCD kamera ile kontrol edilmiştir. $P_{\text{çıkış}}$ olarak sembolize edilecek olan çıkış gücünün elde edildiği optik fiberin uç düzgünlüğü Şekil 2.19.’da görülebilir.



Şekil 2.19. “Cut-Back” ölçümünde çıkış gücü $P_{\text{çıkış}}$ değerinin elde edildiği optik fiber çıkış ucunun uç düzgünlüğü.

“Cut-Back” ölçümünden elde edilecek olan toplam tayfsal zayıflatma değerinin belirlenmesine en yüksek belirsizlik katkısı giriş ($P_{\text{giriş}}$) ve çıkış ($P_{\text{çıkış}}$) güçlerinin elde edildiği optik fiber uçlarının kesilmesinden kaynaklanan hatalardan gelir. Çünkü giriş ve çıkış güçlerinin elde edilmesi için optik fiber kesildiğinde farklı açılarda kesilme durumunda, optik akının fotoakıma dönüştürüldüğü fotodiyodun aktif bölgesi üzerinde farklı noktalara optik akının düşmesi söz konusudur ve hatta optik fiber ucu fotodiyot yüzeyinde daha geride ise ya da NA değeri yüksek fiber için çıkıştaki optik akının aktif bölgenin dışına düşmesi olasıdır. Optik akı fotodiyot aktif bölgesi içersine düşse bile fotodiyot aktif bölgesinin tayfsal duyarlılığı (Amper/Watt) lokal olarak değişim gösterir. Bu durumda fotodiyot tarafından üretilen fotoakım fotodiyot aktif bölgesinin homojensizliğinden ötürü $P_{\text{çıkış}} / P_{\text{giriş}}$ güç oranının doğru şekilde elde edilmemesi sonucunu doğuracaktır. Fotovoltaik (InGaAs, Ge veya Si) türdeki fotodiyotlarda aktif bölgenin büyük tutulması bu homojensizliği artırır. Ayrıca kullanılan fotodiyotların düşük güç seviyelerindeki doğrusallık değerlerine dikkate edilmelidir. Bu ölçümde kullanılan 5-mm aktif çapa sahip InGaAs için 10^{-8} 'den daha düşük akım seviyelerinde çalışabileceği gösterilmiştir [Çelikel et al, 2005]. InGaAs fotodiyodun tayfsal duyarlılığı 1300 nm ile 1550 nm aralıklarında yaklaşık 1 (A/W) civarındadır. Bu bilgi ölçümlerde, aynı dalga boyu değerlerinde giriş ve çıkıştaki optik güç seviyelerinin orantısal değişimini (dB) elde edeceğimizden kullanılmayacaktır. Fotovoltaik tür fotodiyotlarda k Boltzman sabiti ve ortam sıcaklığı T 'den kaynaklan termal gürültüyü (Johnson Termal Noise) indirmek ve sinyal gürültü oranını arttırmak için 5 mm InGaAs fotodiyot sıvı azot sıcaklığına kadar soğutulmuş ve 4×10^{-5} mbar seviyesine kadar vakumlanmış kryostat içerisine yerleştirilmiştir.

Şekil 2.18.'de görülen konfigürasyonda monokromatörden seçilen dalga boylarına karşılık (1285 nm- 1395 nm bandı ve 1530 nm -1570 nm ve 1590 nm'de) $P_{\text{çıkış}}$ çıkış güç seviyelerine karşılık lock-in yükseltecinden voltaj verileri elde edilir ve Lock-in yükselteç çıkışı TÜBİTAK UME Optik Laboratuvarı Fiber Optik Metroloji Bölümünde yazılım ve tasarımını gerçekleştirdiğim 24-Bit ADC kartı ile örneklenmiştir. Ardından “Cut-Back” ölçümü prensibine göre test optik fiberi Şekil 2.18.'de gösterilen noktadan kesilerek $P_{\text{giriş}}$ gücü ölçümleri aynı dalga boyu değerleri için gerçekleştirilir ve optik sinyal için yukarıda bahsedilen Lock-in ve ADC kartı ile örnekleme işlemleri tekrarlanır. Giriş gücünün ölçüldüğü optik fiberin uç durumunu gösteren CCD kamera görüntüsü Şekil 2.20.'de verilmiştir.



Şekil 2.20.“Cut-Back” ölçümünde çıkış gücü $P_{\text{giriş}}$ değerinin elde edildiği optik fiber çıkış ucunun uç düzgünlüğü.

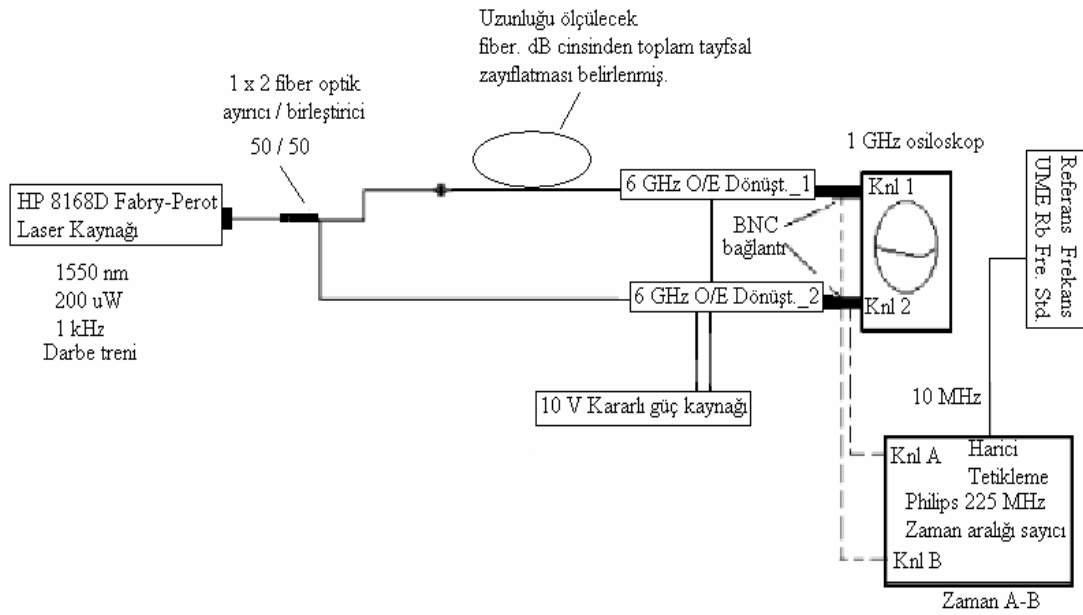
Giriş ve çıkış optik güç seviyeleri dalga boyuna karşılık voltaj değerleri olarak elde edildikten sonra, test optik fiberinin toplam tayfsal zayıflatma değeri;

$$A \text{ (dB)} = 10 \log \left(\frac{P_{\text{giriş}}}{P_{\text{çıkış}}} \right) \quad (2.127)$$

denkleminde dB cinsinden elde edilir.

2.6.1.2. Fiber Geçiş Zamanı Ölçümü ve Tayfsal Zayıflatma Sabitinin Belirlenmesi

“Cut-Back” ölçümü ile toplam tayfsal zayıflatması dB cinsinden belirlenen tek modlu optik fiberin km cinsinden uzunluğunun belirlenmesi için detayları Şekil 2.21.’de gösterilen konfigürasyon, TÜBİTAK UME Optik Laboratuvarı Fiber Optik Metroloji Bölümünde oluşturulmuştur.



Şekil 2.21. Optik fiber geçiş zamanı ölçüm konfigürasyonu [Çelikel et al, 2005].

Bu konfigürasyonda HP8168D Fabry-Perot lazer kaynağından sağlanan 1550 nm dalgaboylu, 1 kHz frekanslı ve ortalama güç seviyesi 200 μ W olan optik darbeler 1x2 (50/50 ayırma oranına sahip) fiber optik ayırıcı birleştirici yardımıyla hemen hemen eşit genlikte iki kola bölünür. Üst kısımdaki kola test fiberi bağlanırken, 2. kol doğrudan 6 GHz’lik optoelektrik (O/E converter) dönüştürücü fotodiyoda bağlanır. 1. kolda yer alan test fiberinin çıkışı da ikinci bir O/E dönüştürücüye girilir. Her iki O/E dönüştürücü de 1 GHz’lik osiloskoba bağlanır. Alt koldan giden optik sinyal üst koldan giden sinyale göre önde olacaktır. Bu iki sinyal arasında oluşan zaman farkı da UME referans frekans üretici ile tetiklenen 225 MHz zaman aralığı sayıcı ile mikro saniye cinsinden ölçülmüştür.. Zaman aralığı sayıcının her iki kanalı da 60 mV eşik değerine ayarlanır ve ölçüm uzun zaman aralıklarla ortalama aldirılarak gerçekleştirilir. Bu ölçümde dikkat edilmesi gereken husus; üst fiber daha uzun

olduğundan bu koldan giden lazer darbelerinde bir kromatik dağınım (malzeme / dalga kılavuzu dağınımı) söz konusudur. Bu dağınımdan ötürü uzun koldan giden sinyal aynı 60 mV olarak ayarlanan eşik gerilim seviyesine kısa koldan gidene göre daha uzun sürede ulaşır, yani bu koldan giden optik sinyalin değişim hızı daha düşüktür. İşte bu farkı ortadan kaldırmak için zaman aralığı sayıcı ölçümünden önce 1 GHz'lik osiloskop ile her iki koldan gelen optik sinyalin 60 mV'luk eşik değerine ulaşma zamanları elde edilir [Çelikel et al, 2005]. Bu ölçümde kısa koldan gelen optik sinyal 60 mV eşik değerine yaklaşık 8 ns (8×10^{-9} s) değerinde ulaşırken uzun koldan dağınımlı olarak gelen sinyal de aynı voltaj seviyesine 11 nsec değerinde ulaşmıştır. Dolayısıyla dağınımdan oluşan 3 ns mertebesindeki fark toplam ölçüm değerinde çıkartılmıştır.

Geçiş zamanı ölçüm sonucu olarak, test fiberi için elde edilen geçiş zamanı 8,405 µs olarak hesaplanmıştır. Denklem (2.126)'yı kullanarak ve optik fiberin (FUJIKURA Ltd.) kırılma indis değerini 1550 nm için 1,4718 alarak, test fiberinin boyu 1712 m olarak elde edilmiştir. İFOJ prototipinde kullanılacak 1700 m (1,700 km) uzunluğa sahip fiber için 1290 nm'deki tayfsal zayıflatma sabiti değeri 0,411 (dB/km) ve 1590 nm'deki tayfsal zayıflatma değeri de 0,191 (dB/km) olarak elde edilmiştir. İFOJ prototipinde iki farklı optik kaynak kullanılmış olup bunlar EDFA ve SLD (Superluminescent Light Emitting Diode) kaynaklarıdır. EDFA kaynak 1593 nm merkezli ışıma verirken SLD kaynağın tayfsal merkezi 1288,9 nm'dedir. Bu yüzden burada iki özel dalga boyu için iki tayfsal zayıflatma sabiti değeri verilmiştir.

Bölüm 2.6.1. ve 2.6.2.'de anlatılan yöntemler, uluslar arası kabul gören referans tek modlu optik fiber hazırlama yöntemleridir [Çelikel et al, 2005]. Bu metotlar kullanılarak hazırlanan düşük belirsizliğe sahip referans tek modlu optik fiber kablolar ile OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) cihazların tayfsal zayıflatma eksenlerinin kalibrasyonları da gerçekleştirilebilmektedir.

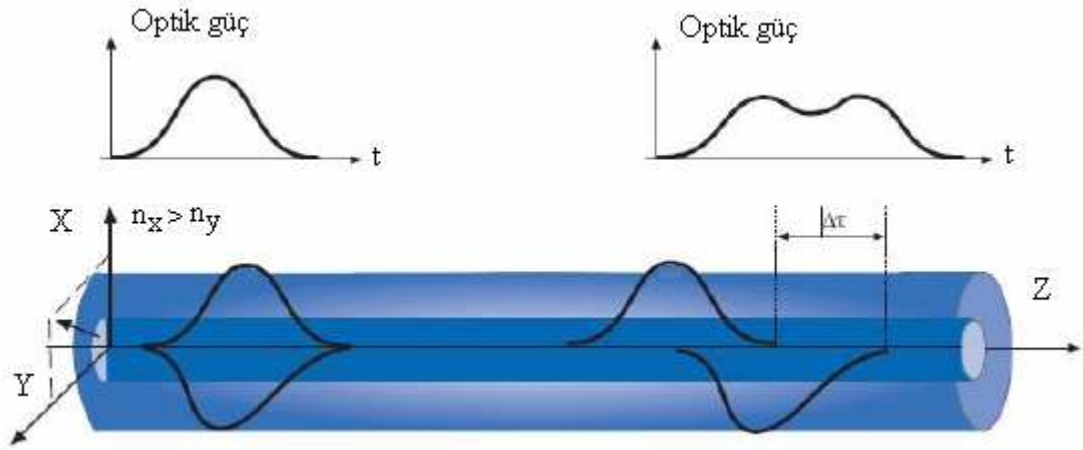
2.7. Polarizasyon Mod Dağınımı

Denklem (2.113) ile ulaştığımız sanki-enine elektrik mod çözümünün (HE_{11}) ideal ve kusursuz yapıdaki optik fiber yapısı için 2 kere çok katlı (dejenere) bir durum olduğu

belirtilip, Şekil 2.8a'dan V (normalize frekans) parametresinin değişimine karşı mod şekillenimleri verilmişti. Burada ideal ve kusursuz yapı olarak bahsedilen optik fiber yapısının kırılma indisi bakımından izotropik olmasını ifade eder. Ancak pratikte bu mümkün değildir ve optik fiber kırılma indisinin öz kesiti içerisindeki radyal ve açısall dağılımı anizotropiktir. İki kere çok katlı durum da optik fiber içerisinde birbirine dik iki polarize elektrik alanının mevcut olduğunu (E_x/B_y ve E_y/B_x gibi) belirtir. Kırılma indisindeki mevcut anizotropi, optik fiber içerisinde yayılım gösteren doğrusal polarize (LP_{01}) bu alanların farklı hızlarda yayılım göstermesine ve dolayısıyla çıkışa da farklı sürelerde ulaşmasına sebep olur.

Enerjinin taşındığı doğrusal polarizasyon modları arasında kırılma indisinin anizotropisinden kaynaklanan bu zaman farkına da Grup Fark Gecikmesi (Differential Group Delay) adı verilir ve $\Delta\tau$ olarak gösterilir. PMD, kromatik dağılım (chromatic dispersion)'da olduğu gibi fiber hattının uzunluğu ve modülasyon band genişliği dolayısıyla Gb/s cinsinden iletilen data miktarında sınırlamalara sebep olur. Kromatik dağılım optik fiberin imâl edildiği malzemenin dalga boyuna bağlı kırılma indisi değişiminden oluşan dağılım ile dalga kılavuzu geometrisinden oluşan bir dağılım türüdür. Kromatik dağılım belirtilen fiber için kararlı bir olgu iken PMD herhangi bir anda, herhangi bir sinyal şekli ve hattın durumu için kararlı olmaz. Yani modülasyon frekansı, hattın o anki geometrik yapısının oluşturacağı mekanik gerilmeler, ısıll değişiklikler, fiber hattının PMD'nı etkileyecek dolayısıyla Polarizasyon Bağımlı Kayıp (PBK) geliş güzel bir formda oluşacaktır. Bu yüzden bir fiber hattının PMD'ı ve bundan kaynaklanacak Polarizasyon Bağımlı Kaybı (PBK) için istatistiksel kestirmeler söz konusudur.

Optik fiber içerisinde z doğrultusunda ilerleyen birbirine dik iki doğrusal polarizasyon bileşeni için, öz katmanlı kırılma indisinin anizotropisinden kaynaklanan PMD Şekil 2.22.'de gösterilmektedir.

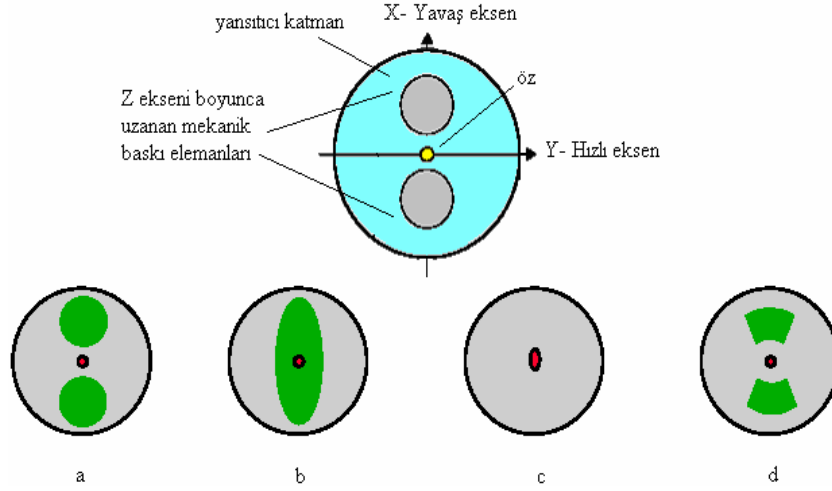


Şekil 2.22. Tek modlu optik fiber içerisinde z-boyunca ilerleyen birbirine dik iki alan bileşeninden oluşan temel mod için polarizasyon mod dağılımından kaynaklanan Fark Grup Hızı $\Delta\tau$.

İki doğrusal polarize alan bileşeni arasındaki Grup Fark Gecikmesi ($\text{ps/km}^{1/2}$) cinsinden verilir. Tek modlu fiberlerde bu kırılma indis farklılığının en büyük nedenlerinden birisi öz katmanının ovalliğinden kaynaklanır. Dolayısıyla kırılma indisi değişimi oval dalga kılavuzunda geometrik yapısı nedeniyle zaten doğal olarak var olmaktadır. Ayrıca bu oval öz yapısının oluşturduğu mekanik gerilme de ilave bir geometrik anizotropi meydana getirir. Kuartz gibi kristal malzemelerdeki kırılma indisinde meydana gelen bu anizotropi, düzenli kristal yapısı tarafından üretilir. Asimetrik fiber kısımları veya kuartz parçalar içeren bileşenler de PMD'ye sebep olurlar [Derickson,1998]. Aynı zamanda polarizasyonun bir fonksiyonu olarak fiber içerisinde birbirine paralel ve uzunlukları birbirinden önemsiz derece farklılık gösterebilen optik yollardan dolayı da Grup Fark Gecikmesi oluşabilir.

Optik fiber hatlarında gelişigüzel değişim gösteren PBK'ı en aza indirmek ve hat boyunca ortogonal elektrik alanlar arasında mevcut bulunan Grup fark Gecikmesini sabit tutarak hattın PBK'nı kestirilebilir hale getirmek için Polarizasyon Koruyan (Polarization Maintaining-PM) fiberler imâl edilmektedir. Polarizasyon Koruyan (PK) fiberler gerilme ile indüklenen tipte (stress-induced) kırılma indisi anizotropisine sahip tek modlu optik fiberlerdir. Bu tip fiberlerde, yansıtıcı katman tabakasına gömülü ve öz katmanından farklı yapıdaki cam mekanik baskı elemanları, öz katmanının bütün fiber boyunca düzgün bir asimetrik gerilmeye maruza kalmasına neden olur. Ayrıca enine kesiti dairesel olan öz katmanı eliptik yapıda

imâl edildiğinde meydana gelen geometrik asimetriden ötürü hızlı ve yavaş eksenlere sahip olmakta ve Grup Fark Gecikmesinin sabit kalmasını fiber boyunca koruyabilmektedir.



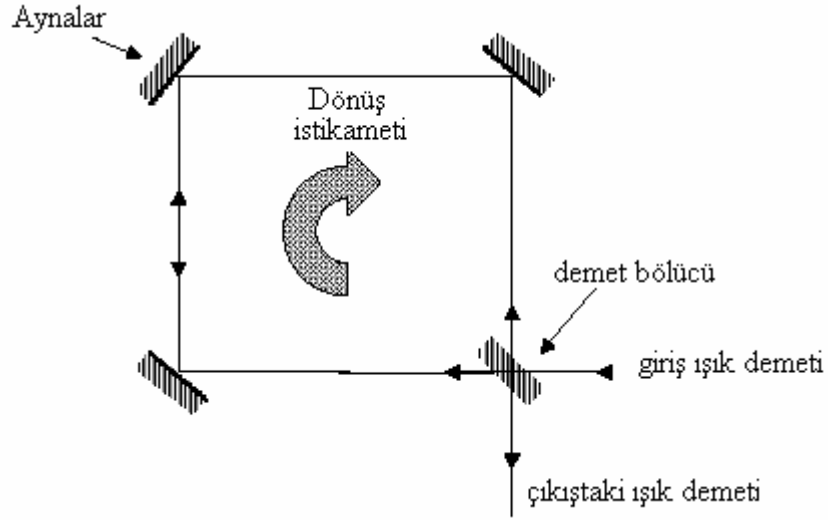
Şekil 2.23. Çeşitli PK fiber tipleri. a) En yaygın kullanımda bulunan panda tipi PK tek modlu optik fiberdir b) oval baskı elemanına sahip PK fiber c) oval öz katmanına sahip PK fiber ve d) papyon tipi mekanık baskı elemanına sahip PK fiber.

Bu durumda polarize bir ışık PK fibere girdiğinde, giren ışığın elektrik alan bileşeni, birbirine dik iki polarizasyon modunda çok küçük bir yayılma hızı farkı ile iki polarizasyon bileşenine ayrışır ve bu polarizasyon modları ve modlarda bölüşülen optik enerji PK fiber boyunca da sabit kalır [Derickson,1998].

Optik fiber içerisinde yayılan optik sinyalin polarizasyonundaki geliş güzel değişimler Sagnac fazını perdeleyebilir. Geliş güzel polarizasyon değişiminin Sagnac Fazı üzerindeki etkisini azaltmak için R. Ulrich tarafından 1980 yılında yapılan bir uygulama 50/50'lik fiber optik ayırıcı birleştiricilerin arasına fiber polarizör yerleştirilmiştir. Bu sayede dairesel (esasinda eliptik) polarize alan bileşenleri engellenerek polarizasyon değişimin Sagnac Fazına etkisi minimize edilmiştir. Polarizasyon ve değişimlerinin İFOJ üzerindeki etkisine Bölüm 7.3.2'de Magnetooptik Faraday Etkisiyle birlikte detaylı şekilde değinilecektir.

3. ÇİFT DEMET İNTERFEROMETRİSİ VE GEÇİCİ UYUMLULUK

Fiber optik jiroskoplar ile halka lazer jiroskopların (Ring Lazer Gyroscopes) fiziksel temelini oluşturan ana fikir 1913 yılında Monsieur Sagnac adlı fransız fizikçi tarafından ortaya koyulmuştur. Sagnac interferometresi adı verilen bir çift demet interferometresi, aynı kaynaktan çıkan ve kapalı bir yol üzerinden aksi istikamette ilerleyen iki ışın demetinin, kapalı yolun bir yönde dairesel hareket etmesi durumunda aralarında bir faz farkı oluşacağı gerçeğini ortaya koymuştur [Culshaw,2006]. Hava ortamında Sagnac tarafından gerçekleştirilen bu deneyde, iki ışık demeti arasında oluşan faz farkı interferometrik olarak gözlemlenmiş ve Sagnac Etkisi olarak adlandırılmıştır.



Şekil 3.1. Hava ortamında Sagnac Etkisinin gözlemlendiği çift demet interferometresi [Culshaw,2006].

3.1. Elektromagnetik Dalganın İnterferansı

İki veya daha fazla ışık demeti arasında sabit bir faz ilişkisi oluştuğunda interferans meydana gelir. Bir çift demet interferometresinde $\phi_1(x, y, z, t)$ demet bölücünden çıkıp yansıtıcı aynalara doğru ilerleyen dalganın fonksiyonu ve $\phi_2(x, y, z, t)$ 'de yansıtıcı aynalardan yansiyarak tekrar demet bölücü üzerine geri gelen dalganın

fonksiyonunu temsil etsin. $\varphi_1(x, y, z, t)$ iki ortogonal alan bileşenine sahip z yönünde ilerleyen dalga olup burada temel modun alan bileşenlerini temsil eder. Aynalardan yansıyan dalgalar ise faz farkına sahip olacaklarından dairesel ancak pratikte ise eliptik polarize yapıya sahiptir. Aynaların kusursuz bir yansıtmaya sahip olduklarını kabul ederek kompleks dalga fonksiyonları;

$$\varphi_1(x, y, z, t) = A_x e^{j(\omega t - kz)} \hat{x} + A_y e^{j(\omega t - kz)} \hat{y} \quad (3.1)$$

$$\varphi_2(x, y, z, t) = A_x e^{j(\omega t - kz + \phi)} \hat{x} + A_y e^{j(\omega t - kz + \phi)} \hat{y} \quad (3.2)$$

$\varphi_1(x, y, z, t)$ ve $\varphi_2(x, y, z, t)$ Şekil 3.1.'de gösterilen demet bölücü üzerinde birleştiğinde;

$$\varphi_1(x, y, z, t) + \varphi_2(x, y, z, t) = \hat{x} A_x e^{j(\omega t - kz)} [1 + e^{j\phi}] + \hat{y} A_y e^{j(\omega t - kz)} [1 + e^{j\phi}] \quad (3.3)$$

şeklinde toplam bir dalga fonksiyonu meydana gelir. Bu toplam dalganın fotodiyod üzerine düşmesiyle oluşacak fotoakımda;

$$I \propto \left\{ [\varphi_1(x, y, z, t) + \varphi_2(x, y, z, t)] [\varphi_1(x, y, z, t) + \varphi_2(x, y, z, t)]^* \right\} \quad (A) \quad (3.4)$$

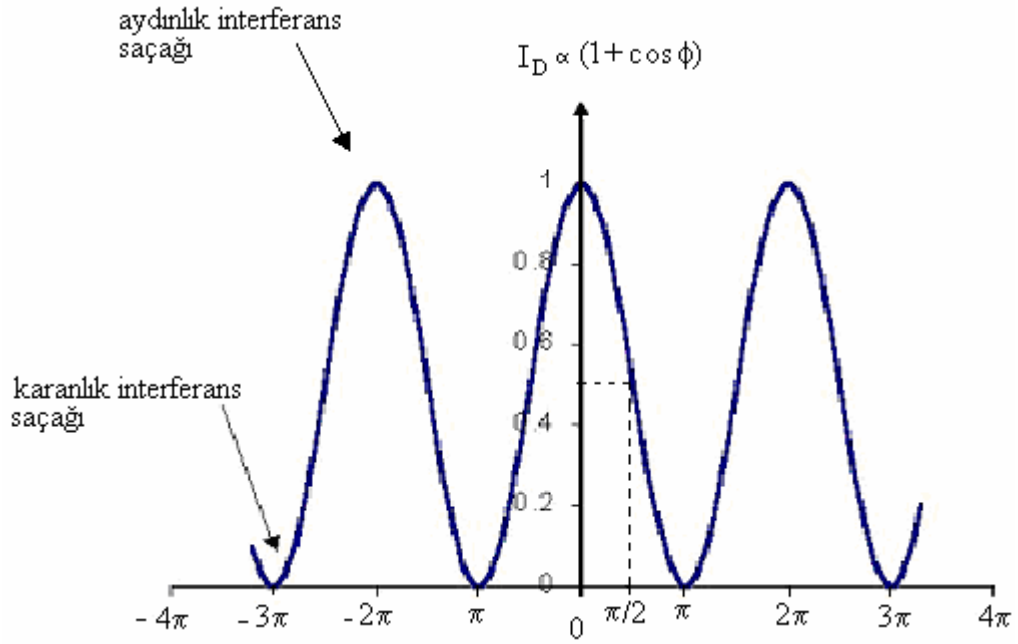
şeklinde olacaktır. Denklem (3.4)'teki parantezi açarsak;

$$I \propto 2A_x^2 + 2A_y^2 + 2(A_x^2 + A_y^2) \cos \phi \quad (3.5)$$

ifadesi elde edilir ki bu ifade bir çift demet interferometresinin tepkisi olarak bilinir. Denklem (3.5)'e bakıldığında, interferometre tepkisi bir dc bileşen ve onun üzerine binmiş φ_1 ile φ_2 arasındaki faz bilgisini taşıyan harmonik kısımdan meydana gelmektedir. Şekil 2.1'de gösterilen interferometredeki demet bölücünün %50'lik bir ayırma oranına sahip olması durumunda ($A_x = A_y$) Denklem (3.5) daha basit bir form alır;

$$I_D = K(1 + \cos \phi) \quad (3.6)$$

Burada I_D fotoakım, ϕ iki demet arasında derece (veya radyan) cinsinden faz açısı ve K 'da interferans yapan demetlerin genlikleri ile fotodiyodun tayfsal duyarlılığından oluşan katsayıdır [Çelikel, 2007]. Denklem (3.6)'ya uyan bir çift demet interferometresi için interferogram Şekil 3.2.'de verilmiştir.



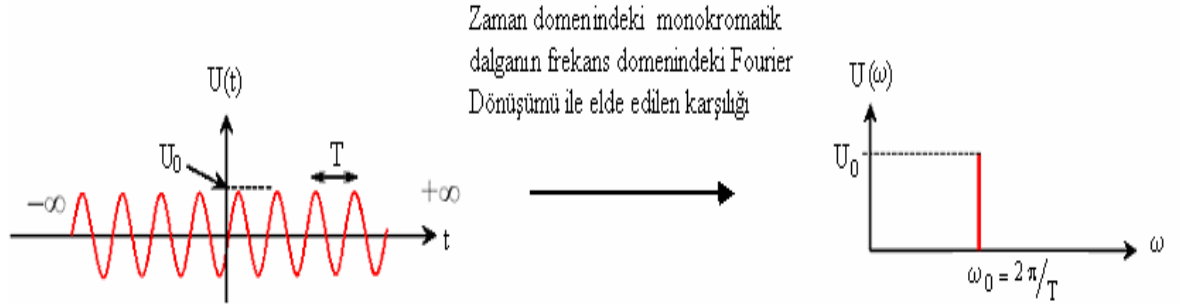
Şekil 3.2. Monokromatik kaynağa sahip bir çift demet interferometresinin tepkisi. İki ışık demeti arasındaki faz ilişkisine bağlı aydınlık ve karanlık olarak elde edilen interferans saçakları ve buna karşılık gelen fotodiyot akım tepkisi.

Denklem (3.6) monokromatik bir çift demet interferometresinin tepkisini göstermektedir. Monokromatik bir elektromagnetik dalga;

$$U(t) = U_0 e^{-j\omega_0 t} \quad (3.7)$$

ile ifade edilir. Bu monokromatik dalga için frekans ve zaman domenleri arasındaki ilişkiyi periyodik fonksiyonlara uygulanan Fourier Dönüşümünü $[-\infty, +\infty]$ aralığında uyguladığımızda tek bir frekans gösteren tayf elde ederiz;

$$U(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) e^{j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} U_0 e^{j(\omega - \omega_0)t} dt = \begin{cases} U_0 & \omega = \omega_0 \\ 0 & \omega \neq \omega_0 \end{cases} \quad (3.8)$$



Şekil 3.3. Monokromatik ışınım için Fourier dönüşümü.

Interferometrenin tepkisi optik frekans içeriği arttıkça yani monokromatik durumdan polikromatik duruma gidildikçe harmonik durumdan ayrılmaya başlar. Monokromatik durum için Denklem (3.7) ile verilen dalga denklemi polikromatik ışınım durumunda, Denklem (3.9) formunda olacaktır;

$$U(t) = \begin{cases} 0 & t < -\tau_0 / 2 \\ e^{-j\omega_0 t} & -\tau_0 / 2 < t < \tau_0 / 2 \\ 0 & t > \tau_0 / 2 \end{cases} \quad (3.9)$$

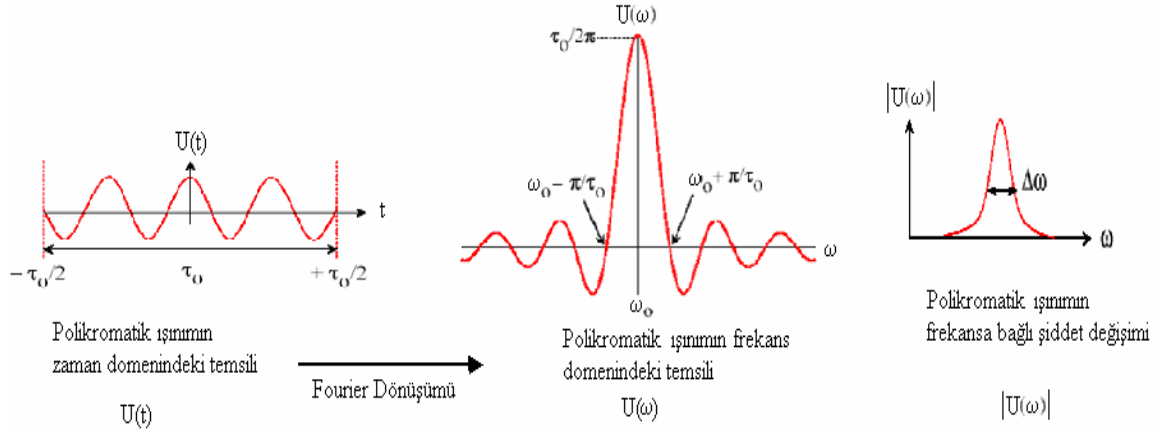
Sonlu dalga trenleri şeklinde faz geçişlerine sahip polikromatik ışınım için; $[-\tau_0 / 2, \tau_0 / 2]$ aralığında Fourier dönüşümünü uygulayarak frekans domenindeki (temsilindeki) karşılığı;

$$U(\omega) = \int_{-\tau_0 / 2}^{\tau_0 / 2} e^{-j\omega_0 t} e^{j\omega t} dt = \int_{-\tau_0 / 2}^{\tau_0 / 2} e^{j(\omega - \omega_0)t} dt \quad (3.10)$$

$$U(\omega) = \frac{1}{j(\omega - \omega_0)} \left[e^{j(\omega - \omega_0)\tau_0 / 2} - e^{-j(\omega - \omega_0)\tau_0 / 2} \right] = \frac{2\tau_0 / 2 \sin[(\omega - \omega_0)\tau_0 / 2]}{(\omega - \omega_0)\tau_0 / 2} \quad (3.11)$$

$$U(\omega) = \frac{\tau_0}{2\pi} \frac{\sin(x \tau_0 / 2)}{(x \tau_0 / 2)} = \frac{\tau_0}{2\pi} \text{sinc}(x \tau_0 / 2) \quad x = 2\pi(\nu - \nu_0) \quad (3.12)$$

Şekil 3.4., Denklem (3.12) frekans domenini için elde edilen fonksiyonun değişimini göstermektedir.



Şekil 3.4. Polikromatik ışınım için Zaman ve Frekans domenleri arasındaki dönüşüm

Denklem (3.12) ve frekans tayfını gösteren Şekil 3.4.'den şu iki önemli sonuç ortaya çıkar;

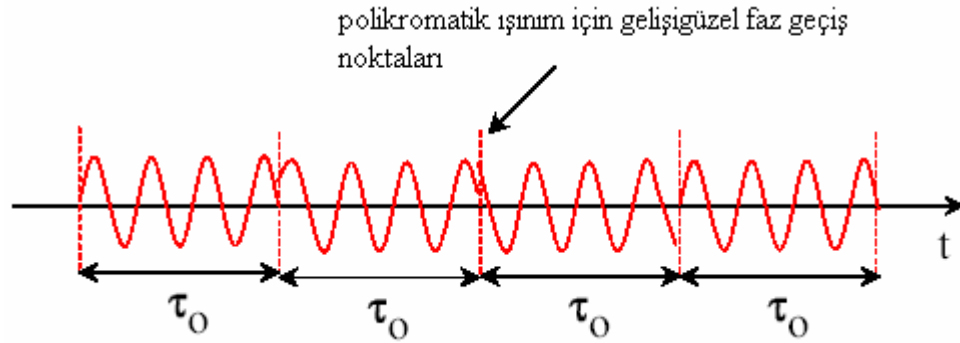
- Polikromatik ışınımın en büyük frekans içeriği $U(\omega)$ fonksiyonunun merkezinde yer alır. Frekans içeriğinin en fazla olduğu bölge merkez bölgesi olup fonksiyonun da sıfıra düştüğü noktalar arasındaki genişlik ise $\Delta\omega = 2\pi/\tau_0$ dır.
- Sonlu dalga treni olarak ifade edilen polikromatik ışınımın uyum zamanının (coherence life time) küçülmesi ışınımın frekans tayfının genişlemesine yani dalga boyu içeriğinin artmasına karşılık gelmektedir.

Bu durum geçici uyumluluk (temporal coherence) olarak adlandırılır. Monokromatik kaynak ile oluşturulan interferometrenin tipik tepki fonksiyonu Denklem (3.6) ile gösterilen K genliğine sahip simetrik bir fonksiyon olan kosinüs fonksiyonudur. Ancak pratikte saf bir tek optik frekanstan bahsetmek söz konusu değildir. Elektromagnetik ışınımın $\Delta\nu$ gibi bir tayfsal band genişliği mevcuttur. Bu durumda ışınım kaynağının saf tek frekanslı olmasından ziyade dar bantlı olup olmadığından bahsetmek daha anlamlı olacaktır. Bunun için kriter τ (saniye)

süresince optik ışınım kaynağının yapıcı interferansı sürdürebilmesi ve bu süreninde optik ışınım kaynağının uyum zamanı τ_0 değerinden çok küçük olmasıdır.

$$\tau \ll \tau_0 \approx 1/\Delta\nu \quad (3.13)$$

Denklem (3.13)'ü sağlayan bir ışınım kaynağının, $U(t)$ olarak belirtilen kompleks dalga fonksiyonunun fazı $t + \tau$ zaman sonra değişmiyor ise bu zaman aralığında monokromatik olarak kabul edilir. Ancak optik ışınım kaynağının τ_0 uyum zamanının küçülmesi Fourier dönüşümünden elde edilen $\sin c(x.\tau_0/2)$ fonksiyonunun genişlemesine neden olacaktır. Bu durum optik ışınım kaynağının frekans içeriğinin artmasına yani monokromatik durumdan uzaklaşıp polikromatik olmaya başlamasına karşılık gelir. Bir başka deyişle geçici uyumluluk (temporal coherence) ışınım kaynağının ne kadar monokromatik olduğunun bir göstergesidir. Şekil 3.5.'de polikromatik bir ışınım kaynağının τ_0 zaman aralığında uyumlu kaldığı, τ_0 zaman aralığından hemen sonra gelişigüzel faz geçişlerinin olduğu gözlemlenir.



Şekil 3.5. Polikromatik ışınımında faz uyumu ancak τ_0 uyum süresi kadardır. Yani kaynak bu süre esnasında uyumlu kalır.

Polikromatik bir ışınım kaynağıyla oluşturulan bir çift demet interferometresinde, iki ışınım demeti arasındaki faz farkı, ışınım demetinin L_c ile gösterilen uyum uzunluğundan daha küçük değerler almaya başladığında yapıcı interferans oluşmaya başlar.

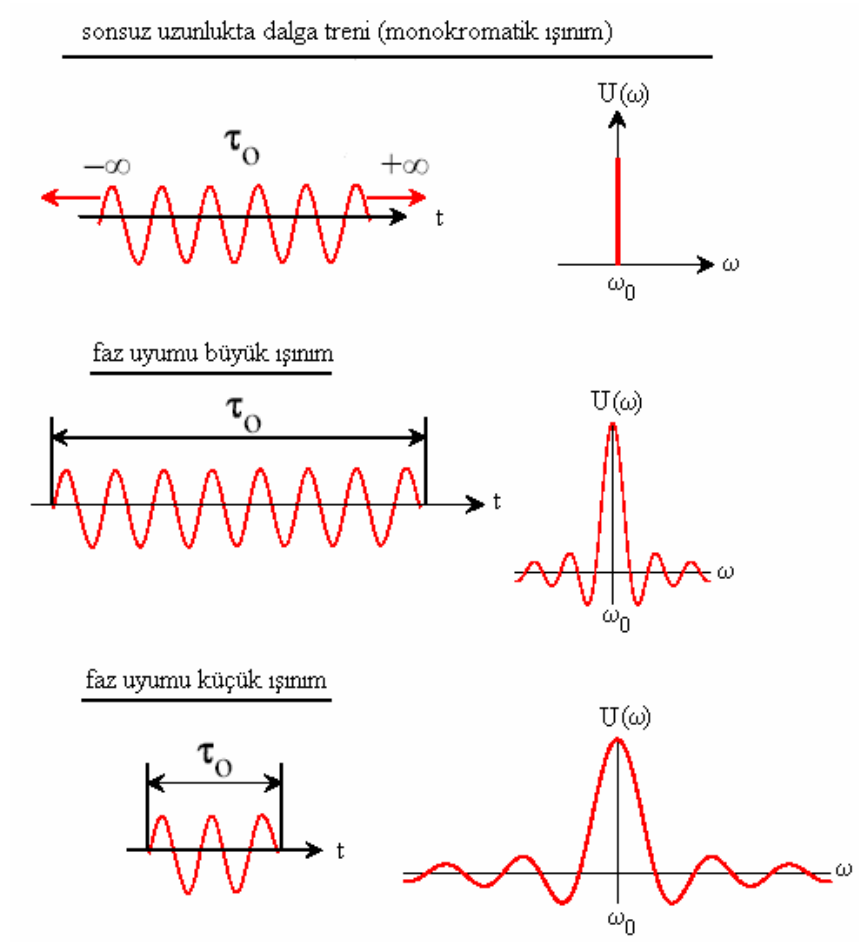
$$L_c = c \tau_0 \quad (3.14)$$

$\Delta\lambda$ gibi bir optik frekans bandına sahip polikromatik ışınım demetinden oluşturulmuş bir çift demet interferometresinde yapıcı interferans oluşabilmesi ve maksimum saçak görünebilirliği (fringe visibility) elde edilebilmesi için 2π 'lik bir faz olması gereklidir. Bu aslında iki demet arasında faz farkı olmamasına karşılık gelir.

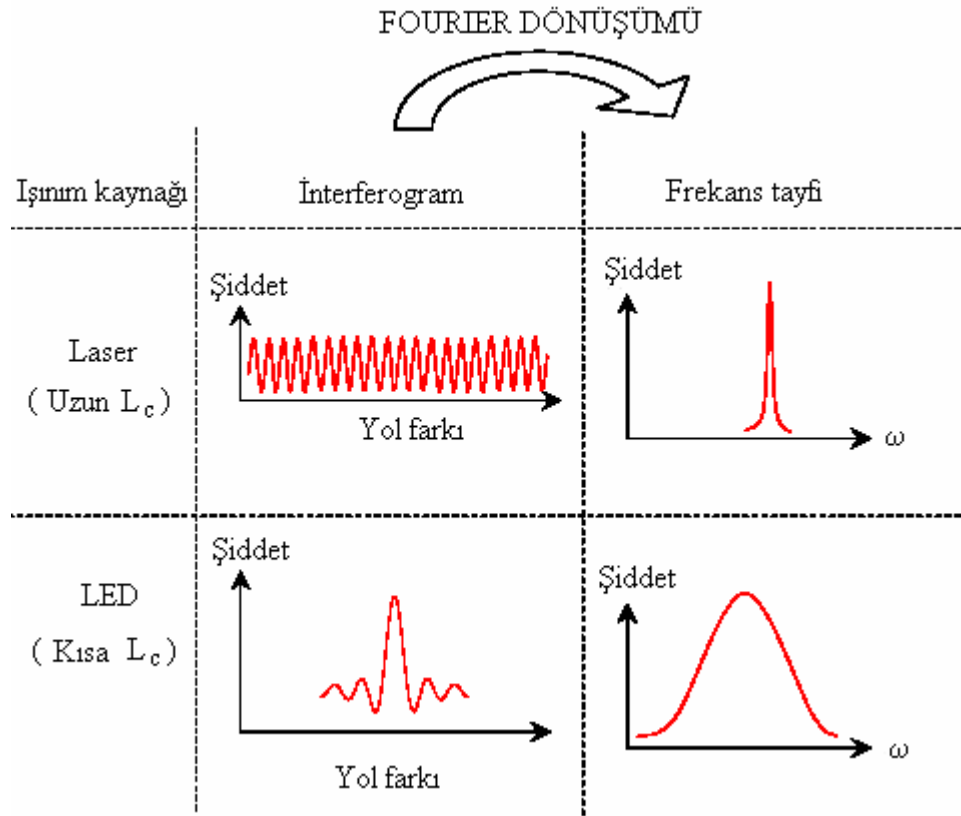
$$\Delta\phi = 2\pi = (k_1 - k_2)L_c = \left(\frac{2\pi}{\lambda} - \frac{2\pi}{\lambda + \Delta\lambda}\right)L_c \quad (3.15)$$

$$L_c \approx \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (3.16)$$

şeklinde polikromatik ışınım demetinin, tayfsal band genişliği ve merkez dalga boyu cinsinden uyum uzunluğu elde edilir. Denklem (3.16)'ya bakıldığında kaynağın tayfsal band genişliği arttıkça uyum uzunluğunun ve dolayısıyla faz uyum süresinin küçüleceği görülür. Örnek olarak Denklem (3.16)'yı kullanarak, 550 nm merkez dalgaboylu ve 300 nm band genişliğine sahip beyaz ışık için uyum uzunluğu yaklaşık $1 \mu\text{m}$, 10^{-5} nm band genişliğine sahip $10,6 \mu\text{m}$ 'de ışıma yapan CO_2 gaz lazerinin uyum uzunluğu ise 10 km olarak elde edilir.



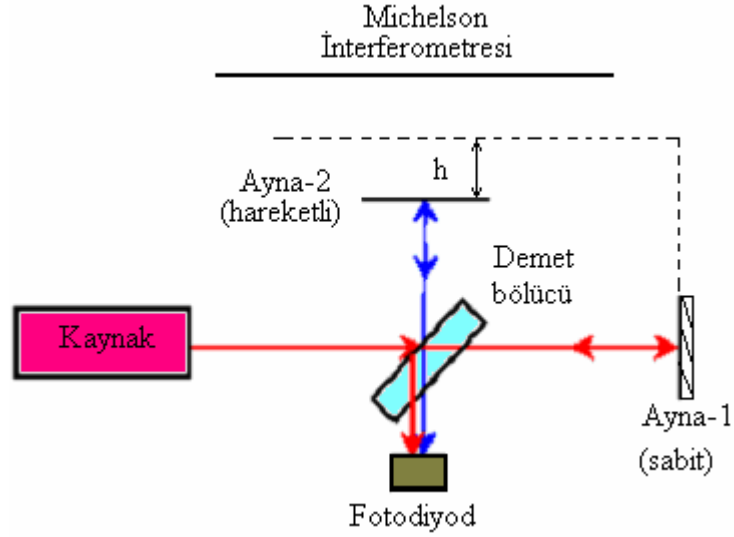
Şekil 3.6. Faz uyum süresine bağlı elektromagnetik ışınlamaların frekans domeni değişimleri.



Şekil 3.7. Elektromagnetik bir ışının frekans tayfı interferogramın Fourier Dönüşümü uygulanmış halidir.

Bu Doktora Tezi'nin konusu İFOJ Prototipinde kullanılan iki tip kaynak ta (EDFA ve SLD) polikromatik özellikte olup ortalama 40 nm'lik band genişliğine sahiptir. İFOJ prototipi çıkışında elde edilecek fotoakım şeklinin istenen nitelikte sinyaller olup olmadığına karar verebilmek için “Polikromatik bir ışınım için çift demet interferometresinin tepkisi nasıl olacaktır?” sorusuna cevap verilmelidir.

Şekil 3.8.'de gösterilen Michelson İnterferometresi için Denklem (3.1) ilâ Denklem (3.5) arasında elektromagnetik dalgayı monokromatik olarak kabul ederek yazdığımız denklemleri tekrar fakat uyum uzunluğu, yapıcı interferans saçağı görülebilirliği (fringe visibility) ve uyum fonksiyonu (“autocorrelation” veya “coherence function”) parametrelerini içerecek biçimde kompleks dalga fonksiyonu formunda yazmamız gereklidir.



Şekil 3.8. Michelson interferometresi. İki demet arasındaki faz farkı $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2h$.

Şekil 3.8.'de gösterilen çift demet interferometresi için fotodiyot üzerinde oluşacak akım h olarak gösterilen optik yol farkının bir fonksiyonu şeklinde olmalıdır $I_D(h)$. Bu akımı kompleks dalga fonksiyonları cinsinden şu şekilde yazabiliriz;

$$U(t) = U_0 e^{j(\omega t - kz)} \quad \text{ve} \quad U(t + \tau) = U_0 e^{j(\omega t - kz + \phi)} \quad (3.17)$$

Denklem (3.17)'yi yazarken ışınının sanki-monokromatik (quasi-monochromatic condition) olduğunu kabul ettik. Bu durumda interferometre tepkisi fotoakım aşağıdaki şekilde yazılır;

$$I_D(h) = \left| K_1 U(t) + K_2 U\left(t + \frac{2h}{c}\right) \right|^2 \quad (3.18)$$

$$I_D = K_1^2 |U(t)|^2 + K_2^2 \left| U\left(t + \frac{2h}{c}\right) \right|^2 + K_1 K_2 U\left(t + \frac{2h}{c}\right) U^*(t) + K_1 K_2 U(t) U^*\left(t + \frac{2h}{c}\right) \quad (3.19)$$

Burada K_1 ve K_2 ise fotodiyodun tayfsal duyarlılığını da içeren sabit katsayılardır.

$$I_0 = |U(t)|^2 = \left| U\left(t + \frac{2h}{c}\right) \right|^2 \quad (3.20)$$

$$\Gamma(\tau) = U(t + \tau) \cdot U^*(t) \quad (3.21)$$

$\Gamma(\tau)$, $U(t)$ 'nin uyum fonksiyonu (autocorrelation function veya coherence function) olarak adlandırılır ve $\tau = 2h/c$ (s) iki demet arasındaki bağıl yol farkından doğan faz farkına karşılık gelir. Denklem (3.20) ve Denklem (3.21)'deki tanımlamaları kullanarak Denklem (3.19) şu hali alır [Tanyer, 1995] ve [Mok, 2006];

$$I_D(h) = (K_1^2 + K_2^2)I_0 + K_1K_2 \Gamma(2h/c) + K_1K_2 \Gamma^*(2h/c) \quad (3.22)$$

$$I_D(h) = (K_1^2 + K_2^2) \cdot I_0 + 2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \text{Re} \left\{ \Gamma(2h/c) \right\} \quad (3.23)$$

Burada $\text{Re} \left\{ \Gamma(2h/c) \right\}$, kompleks uyum fonksiyonunun gerçel kısmını ifade eder. Demetler arasında hiçbir faz farkı yokken maksimum saçak görünebilirliği elde edileceğinden, polikromatik ışınım için sanki-monokromatik durum yaklaşımında elde edilen Denklem (3.24) interferometre tepki ifadesi, aşağıdaki şekilde normalize halde yazılabilir;

$$I_D(h) = (K_1^2 + K_2^2)I_0 \left\{ 1 + \frac{2K_1 K_2}{(K_1^2 + K_2^2)} \text{Re} [\gamma(\tau)] \right\} \quad (3.24)$$

Burada I_0 , demetler arasında faz farkı yokken oluşacak fotoakımı temsil ederken $\gamma(\tau)$ ise faz farkı varken ve faz farkı yokken ki durumlardaki uyum fonksiyonlarının oranıdır ve “normalize uyum fonksiyonu” (normalized self coherence function) olarak adlandırılır [Tanyer, 1995] ve [Mok, 2006];

$$\gamma(\tau) = \frac{\Gamma(\tau)}{\Gamma(0)} \quad (3.25)$$

$K_1 = K_2 = K$ için;

$$\alpha(\tau) = \arg\{\gamma(\tau)\} + \frac{2\pi}{\lambda} 2h \quad (3.26)$$

$$\gamma(\tau) = |\gamma(\tau)| e^{-j\left(\frac{2\pi}{\lambda} 2h - \alpha(2h/c)\right)} \quad (3.27)$$

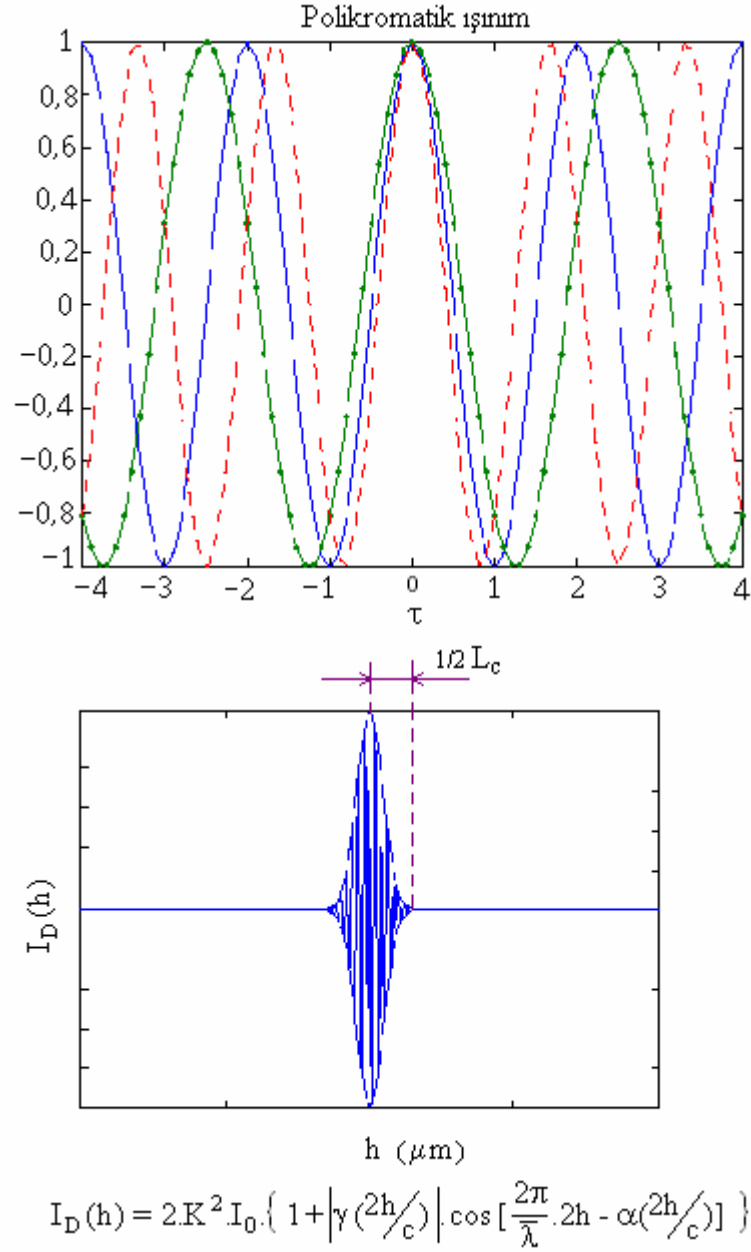
$$I_D(h) = 2K^2 I_0 \left\{ 1 + \left| \gamma(2h/c) \right| \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} 2h - \alpha(2h/c) \right] \right\} \quad (3.28)$$

$$V = \left| \gamma(2h/c) \right| \quad (3.29)$$

Denklem (3.29) interferans saçaklarının görünebilirliği olarak adlandırılır. Denklem (3.28) polikromatik ışınım için bir çift demet interferometresinin tepki fonksiyonudur. Denklem (3.28) için şu değerlendirmeleri yapabiliriz;

1) $h \rightarrow 0 \Rightarrow \gamma(2h/c) \rightarrow 1 \Rightarrow \alpha(2h/c) \rightarrow 0$ durumu interferans saçakları için maksimum görünebilirliği sağlar. Bu şart maksimum fotodiyot akımı $4I_0 K^2$ 'dir.

2) Işınım demetleri arasındaki optik yol farkı $2h$ ($\tau = 2h/c$), demetin tayfsal band genişliğinin bir fonksiyonu olan uyum uzunluğunu (L_c) veya uyum zamanını (τ_c) geçtiğinde interferans saçaklarının görünebilirliği sıfıra gider.

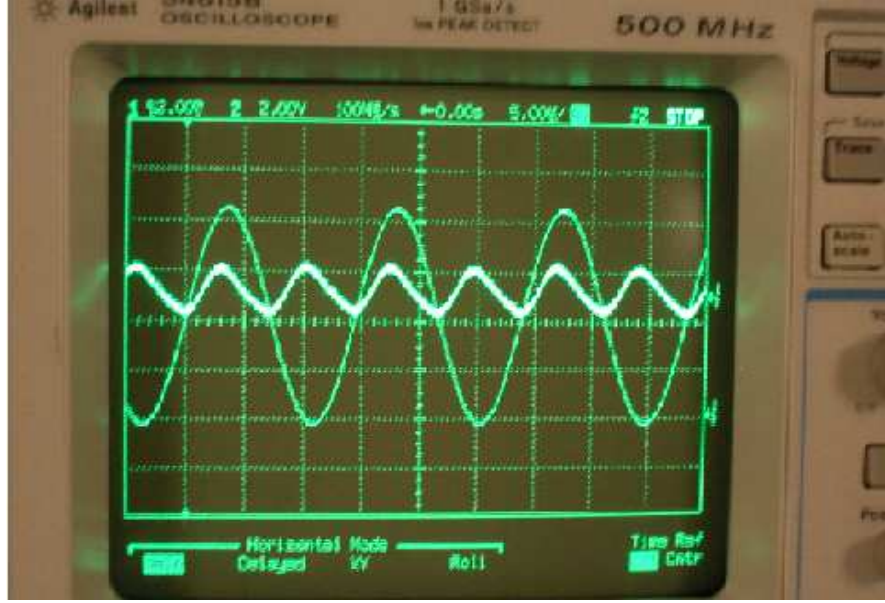


Şekil 3.9. Polikromatik ışınım demeti için çift demet interferometresinin tepkisi.

Dolayısıyla polikromatik ışık demeti ile oluşturulan bir çift demet interferometresinde iki demet arasındaki bağıl yol farkı veya bu yol farkına karşı gelen zaman farkı demetin uyum uzunluğundan daha büyük ise interferans oluşmaz. Bir başka deyişle $2h$, optik kaynağın uyum uzunluğu L_c 'den büyük olmaya başladığında yapıcı interferans saçakları görünürlüğünü kaybetmeye başlar. Aynı şeyi zaman domeninde şu şekilde söyleyebiliriz; bir çift demet interferometresindeki iki demet arasındaki bağıl zaman farkı τ (s), demeti oluşturan optik ışınının uyum zamanı τ_c (s)'den büyük olmaya başladığında interferans saçaklarının görünürlüğü

kaybolmaya başlar. Buradan şu sonuca ulaşırız, uzum uzunluğu kısa olan bir optik ışıma kaynağı ile elde edilen interferometrede elde edilen optik yol farkından oluşan interferans deseninin kontrastı, uzum uzunluğu daha uzun bir kaynağa göre elde edilen interferans desninin kontrastından daha yüksektir. Bu nedenle interferometrik jiroskop uygulamalarında kısa uyum uzunluğuna sahip optik ışıma kaynaklarının kullanımı bu kontrastın artması nedeniyle bir avantaj sağlar [Loukianov, 1999].

İFOJ prototipinde bağıl yol farkı, içi boş bir piezoelektrik transdüser (PZT)'e algılama sarımı optik fiberi birkaç kat sararak oluşturulmuştur. PZT, içerisinde yük polarizasyonuna sahip olup, bu polarizasyon PZT içerisinde bir dc elektrik alan meydana getirir. İç dc elektrik alana sahip PZT'ye dışarıdan ve kararlı yapıda uygulanan değişken voltajlar uygulanarak mevcut iç elektrik alanın modülasyonu ve dolayısıyla PZT'nin geometrik yapısının modülasyonu sağlanmış olmaktadır. Radyal ekseninde PZT üzerine sarılan İFOJ algılama sarımından bir parça optik fiber bu sayede radyal gerilmelere maruz bırakılarak bağıl yol farkı bu İFOJ prototipi için sağlanmış ve optik faz farkı modüle edilmiştir. Radyal gerilmeler ile oluşturulan yol farkı, kullanılan kaynakların geçici uyumluluk uzunluğundan daha kısa olduğunda, İFOJ fotodiyodunda maksimum interferans saçakları görülürken, bu faz farkı uyum uzunluğunu geçmeye başladığında yıkıcı interferans oluşarak saçaklar görünürlüğüne kaybetmektedir. Bu durumda PZT modülasyon sinyali şekilenimine uyan yapıda interferans saçakları İFOJ prototipi için gözlenmiştir. Şekil 3.10'da İFOJ prototipi fotodiyodundan elde edilen interferans saçakları görülmektedir [Çelikel, 2007].



Şekil 3.10. İFOJ prototipinde yer alan PZT'nin sinüs biçimli voltaj ile modüle edilmesi sonucunda oluşan interferans saçaklarının 500 MHz osiloskopta elde edilen görüntüsü.

PZT'ye uygulanan modülasyon sinyali 65,411 KHz sinüs biçimlidir ve 3,1 MHz Stanford marka fonksiyon üreticiden sağlanmıştır. Büyük genlikli sinyal PZT'ye uygulanan elektriksel modülasyon sinyali, küçük genlikli sinyal ise İFOJ prototipi fotodiyodunun çıkış fotoakımının gerilime dönüştürülmüş halidir, yani interferometre tepkisidir. Kaynağın geçici uyumluluğu ve PZT'ye uygulanan faz modülasyonu işareti ile İFOJ prototipinin tek modlu optik fiberden mevcut algılama sarımsı içerisinde elektromagnetik duran dalgalardan oluşan bir ortam meydana getirilmiştir. Tek modlu optik fiberden oluşturulan bu algılama sarımsının içerisindeki duran dalgalar ile detayları aşağıda verilen ve Sagnac etkisiyle izah edilen etki sonucunda açısal hız değişimlerini İFOJ ile algılamak mümkün olmaktadır.

4. SAGNAG ETKİSİ

Açısal hız ile dönmekte olan bir sistem içerisinde yer alan “gözlemci”, dış ortama hiçbir teması bulunmaksızın ve ilaveten Coriolis Kuvvetini algılayan bir mekanik jiroskop ta kullanmadan, kendisine etkiyen merkezci kuvveti nasıl algılayabilir? Kütlesi m olan gözlemci dönme eksenine uzaklık r bilgisine sahip ise;

$$F_{\text{merkezcil}} = m.r.\Omega^2 \quad (4.1)$$

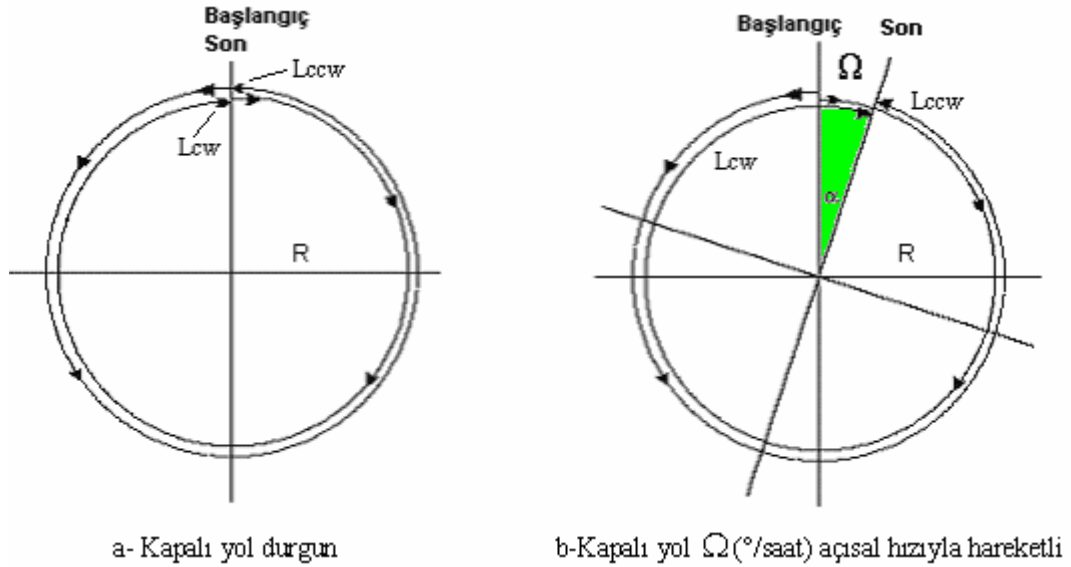
denklemden açısal hızını hesaplayabilir. Ancak r bilgisi mevcut değil ise bu gözlemci için açısal hızın hesaplanamayacağı sonucunu ortaya çıkar. Burada gözlemci dönme hareketi yapan sistem içerisinde merkezci kuvvetin etkidiği r boyunca dönme eksenine doğru ilerleyerek kendine etkiyen kuvvetin sıfır olmasını sağlayabilir. Bu durumda gözlemcinin kendisine etkiyen merkezci kuvvetin etki ettiği merkez noktayı bulması zor olacaktır. Ayrıca bir başka problem ise kendisine etkiyen kuvvetin gravitasyon mu, doğrusal bir öteleme hareketinden kaynaklanan ivmelenme sonucu oluşan kuvvet mi, yoksa dönmeden kaynaklanan merkezci kuvvet mi olduğu ayrımını yapamamasıdır.

Bu problemin çözümü gözlemcinin, dönen kapalı bir yol içerisindeki elektromagnetik ışınlam sinyalinin bir referans noktaya göre kapalı yolu katetme zamanını ölçmekten geçer. Bu ölçümün sonucu kapalı yolun geometrisine, elektromagnetik dalganın hızına ve elbette kapalı yolun dönüş hızına ($\vec{\Omega}$) bağlıdır ve Sagnac Etkisi olarak adlandırılır [Loukianov, 1999].

Sagnac Etkisinin gözlemlendiği ilk halka interferometre ve ilk deney 1911 yılında F. Harress tarafından gerçekleştirilmiştir. Harress tarafından deneyin gerçekleştirildiği tarihlerde henüz optik fiber mevcut olmadığından kapalı yol dönme hareketi yapabilecek bir platform üzerine yerleştirilmiş ve elektromagnetik ışınlamı kılavuzlayabilen prizmalardan oluşturulmuştu. Oluşturulan bu halka interferometrede ışınlam kaynağı ve saçakları gözlemlene optiği (yani çıkış birimi) interferometrenin ortasına yerleştirilmiş ve dönmeyen bir konuma sabitlenmişti. Ancak Harress'in

kurguladığı bu çift demet interferometresinde yaptığı en kritik hata (başka hatalarda mevcuttur örneğin Fresnel veya Lorentz ifadelerinin kullanılmasında ayırım yapamaması gibi [Loukianov, 1999]) iki kola ayırdığı ışınım demetleri zıt istikametlerde kapalı yol içersinde hareket ederken, her iki demetinde aynı optik yolu katettiğini kabul etmesiydi. Bu kabul deney sonucunun kendisi tarafından doğru bir şekilde yorumlanamamasına neden oldu. Harress'in yaptığı teorik tartışmalardaki ilave hatalar, Albert Einstein ve Paul Harzer tarafından 1914 yılında düzeltilmesine rağmen, günümüzdeki optik jiroskopların temel prensibini oluşturan ve Harress tarafından gözardı edilen bu etki G. Sagnac tarafından ortaya konularak 1913'te kendisi tarafından yayınlandı [Loukianov, 1999].

Bu noktada Sagnac Etkisinin nasıl oluştuğunu izah edelim: İki elektromagnetik ışınım dalgası, yarıçapı R olan durağan dairesel kapalı bir yol üzerinde aksi istikametlerde harekete başladığında, başladıkları noktaya aynı süre içerisinde ulaşacaktır. Şekil 4.1.'de "a" olarak gösterilen kapalı yol için bu durum görülmektedir.



Şekil 4.1. Sagnac Etkisi.

Bu kapalı yol belli bir yönde ($^{\circ}$ /saat) gibi bir açısal hız ile hareket ettiğinde, o yönde hareket eden ışık darbesi, ters istikamette hareket eden ışık darbesine göre başlangıç noktasına ulaşmak için daha uzun yol kateder (Şekil 4.1.'de "b" olarak gösterilen

kapalı yol). Işık hızıyla durağan kapalı yolu almak için geçen süre, c_0 vakumdaki ışık hızı olmak üzere;

$$t = \frac{2\pi R}{c_0} \quad (4.2)$$

Kapalı yol Ω (°/saat) gibi bir açısal hızla hareket ediyorsa, saat yönünde (Clockwise-CW) ve saatin tersi yönünde (Counter Clockwise-CCW) ilerleyen dalgalar için ΔL (m) kadar bir yol farkı oluşacaktır;

$$\Delta L = L_{cw} - L_{ccw} \quad (4.3)$$

$$L_{ccw} = 2\pi R - R\Omega t_{ccw} = t_{ccw} c_0 \quad (4.4)$$

$$L_{cw} = 2\pi R + R\Omega t_{cw} = t_{cw} c_0 \quad (4.5)$$

şeklinde yol farkı yazılır. Bu yol farkından doğan zaman farkı;

$$\Delta t = t_{cw} - t_{ccw} \approx \frac{4\pi R^2 \Omega}{c_0^2} = \frac{4\pi R^2 \Omega}{c_0^2} \quad (4.6)$$

ve yol farkı;

$$\Delta L_{vakum} = c_0 \cdot \Delta t \approx \frac{4A\Omega}{c_0} \quad (4.7)$$

olarak elde edilir. Optik fiber $N(\lambda)$ gibi bir grup kırılma indisine sahiptir ve Sagnac Etkisi esaslı optik yol farkını izah eden Denklem (4.7) aynen $N(\lambda)$ kırılma indisli optik fiber için de geçerlidir [Loukianov, 1999] ve [Arditty and Lefevre, 1981]. Dolayısıyla oluşacak Sagnac faz kayması Denklem (4.8) ile elde edilebilir.;

$$\Delta \phi_s = k \cdot \Delta L = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{4A\Omega}{c_0} \quad (4.8)$$

Kapalı yol N adet sarımdan oluşan optik fiber olduğundan, Sagnac faz kayması N kat daha büyük olacaktır. Bu durumda algılama elemanı N adet sarıma sahip optik fiberden oluşan bir interferometrik jiroskop için Sagnaz fazının son hali Denklem (4.9) ile verilir:

$$\phi_s = \frac{8\pi N \vec{A} \vec{\Omega}}{\lambda c_0} \quad (^\circ \text{ veya radyan}) \quad (4.9)$$

Burada A, ışık darbelerinin hareket ettiği kapalı yolun çevrelediği alan, N algılama sarımı olarak kullanılan optik fiberdeki sarım sayısı, λ kullanılan ışının dalga boyu ve c_0 vakum ortamda ışık hızıdır. Algılama sarımının boyu ve çapı cinsinden Denklem (4.9) aşağıdaki formül ile de ifade edilebilir.

$$\phi_s = \frac{2\pi L D}{\lambda c_0} \Omega \quad (^\circ \text{ veya radyan}) \quad (4.10)$$

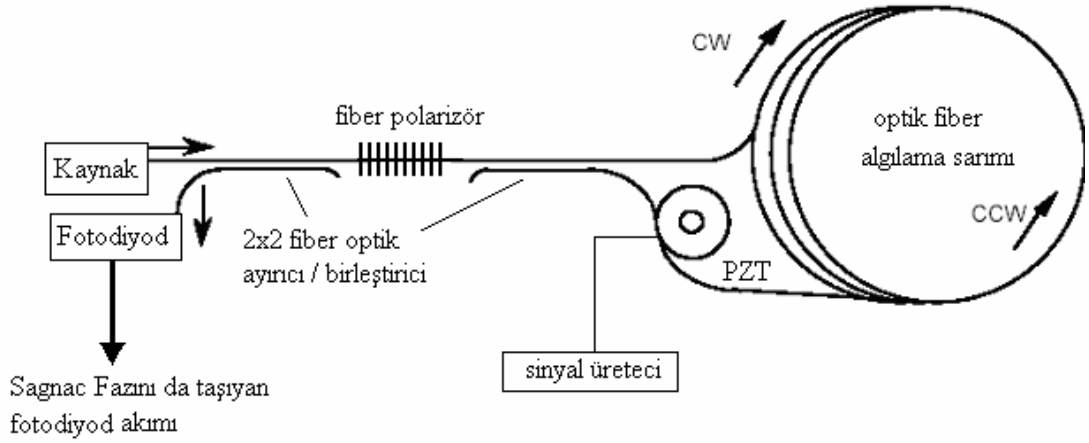
Denklem (4.10) optik fiber algılama sarımı olarak kullanıldığında Sagnac fazının hesaplanmalarında kolaylık sağlayan Sagnac Faz Kayması formülü olarak verilir ve interferometrik esaslı jiroskop uygulamalarının temelini teşkil eder [Loukianov, 1999] ve [Arditty and Lefevre, 1981]. Burada L algılama sarımı optik fiberin uzunluğu, D algılama sarımının sarıldığı makaranın çapı, Ω algılama sarımının açısal dönüş hızıdır ($^\circ/\text{saat}$). Bu Doktora Tezi'nin konusu olan İFOJ prototipi için bu noktada şu örneği vermek konunun anlaşılması ve algılanması bakımından önemlidir; 1593 nm dalga boyuna sahip ışınım kaynağı ve 1700 m uzunluğa sahip 15 cm çaplı tek modlu optik fiber algılama sarımı için, 10 ($^\circ/\text{saat}$)'lik bir açısal hızda oluşan Sagnac fazı kayması $9,3 \cdot 10^{-3}$ ($^\circ$) ($1,62 \cdot 10^{-4}$ rad) ve bu faza karşılık gelen uzunluk kayması ise $2,33 \cdot 10^{-8}$ m'dir. Eğer optik yol 1700 m yerine 1 m olsaydı optik yol farkı $1,37 \cdot 10^{-11}$ m olarak elde edilecekti. Bu durumda 10 ($^\circ/\text{saat}$)'lik bir açısal hız (Dünyanın dönüş hızı yaklaşık 15 ($^\circ/\text{saat}$)) için Sagnac faz kayması 1700 kat büyümüştür. Sagnac fazındaki bu yükselme ise interferometre fotodiyodundaki akım değerinin de o oranda büyümesine karşılık gelir. Sagnac faz kaymasının gözlemlendiği interferometrik jiroskoplar için tanımlanan ölçek faktörü (scale factor) değeri Sagnac fazının açısal hıza oranı olarak verilir;

$$SF = \frac{\phi_s}{\Omega} = \frac{8\pi AN}{\lambda c_0} = \frac{2\pi LD}{\lambda c_0} \quad [^{\circ}/(^{\circ}/\text{saat})] \quad (4.11)$$

Sagnac etkisi ile dönme yönünde ilerleyen ışık darbeleri ile aksi istikamette ilerleyen ışık darbeleri arasında faz farkına ilave olarak Doppler etkisinden dolayı tayfsal kaymaların da gözlemlenmesi mümkündür. Çözünürlüğü yüksek tayf analizör cihazları ve jiroskobun bir dereceye kadar yüksek hızda hareket ettirilmesiyle dalga boyunda Doppler esaslı kaymaların izlenmesi de olasıdır.

5. AÇIK-DÖNGÜ İNTERFEROMETRİK FİBER OPTİK JİROSKOP

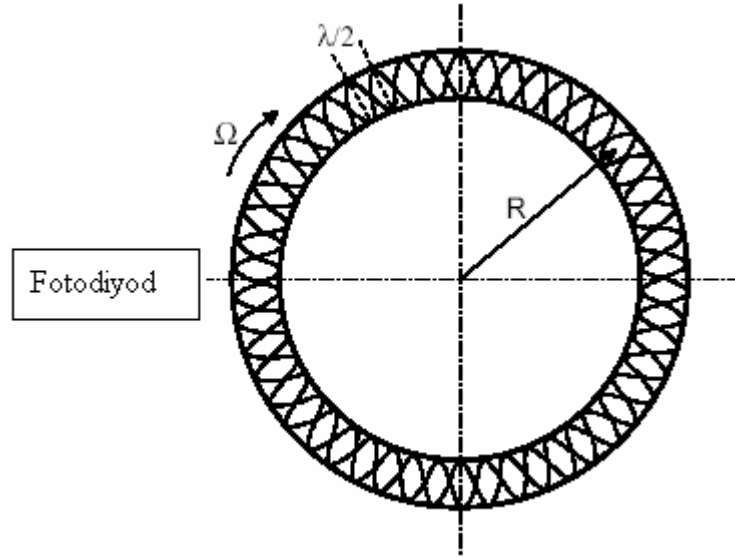
Bu Doktora Tezinin konusu olan İFOJ prototipi literatürde sinyal işleme farklılıkları nedeniyle Açık-Döngü ve Kapalı-Döngü İnterferometrik Fiber Optik Jiroskop (Open-Loop and Closed-Loop Fiber Optic Gyroscope) adlarıyla sınıflandırılır ve bu yapılar için gerekli minimum konfigürasyon da Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Açık-döngü interferometrik fiber optik jiroskop için minimum konfigürasyon.

Minimum konfigürasyona sahip İFOJ’ta, Erbium Katkılı Fiber Yükseltici ya da SLD tipi geniş tayfsal banda sahip bir optik ışınlam kaynağı, ışıma kaynağının dalga boyuna bağlı olarak fotovoltaik türde InGaAs veya Si tipte düşük Gürültü Eşdeğer Optik Güç (Noise Equivalent Power- NEP) parametresine sahip fotodiyot, zıt yönlerde optik fiber içerisinde yayılım gösteren elektromagnetik ışınlamların simetrik optik yol (SOY) (reciprocity) katetmelerini sağlamak ve en yalın haliyle Denklem (3.6)’da verilen interferometre tepkisinde yer alan Sagnac Fazının perdelenmemesi için iki adet 50/50 ayırma oranına sahip fiber optik ayırıcı/birleştirici, iki ayırıcı/birleştirici arasında yer alan fiber optik polarizör [Ulrich, 1980], optik fiberin elastooptik özelliğinden faydalanarak aksi yönde hareket eden iki ışınlam demeti arasında ışınlam kaynağının geçici uyum uzunluğundan daha kısa yol farklarını periyodik şekilde oluşturarak algılama sarımı içerisinde interferans saçakları oluşturmak için içi boş bir piezoelektrik transdüser-PZT (PZT üzerine yeterli modülasyon derinliğine ulaşmak için birkaç kat algılama sarımından optik fiber

sarılarak silikon ile bu sarım sağlamlaştırılır) ve algılama sarımı olarak ta tek modlu optik fiber kullanılır.



Şekil 5.2. İnterferometrik fiber optik jiroskobun algılama sarımının oluşturduğu kapalı yol içerisinde meydana gelen duran dalgalar [Lefevre, 1993].

5.1. İnterferometrik Fiber Optik Jiroskopta Simetrik Optik Yol - SOY Kavramı

Doğrusal bir ortam içerisinde z yönünde ilerleyen elektromagnetik dalga, faz ve harmonik frekans bileşenine ayrılarak şu şekilde yazılabilir;

$$\varphi(x, y, z, t) = \varphi_p \cdot e^{j\omega t} \quad (5.1)$$

Bu yazım şekli aslında Denklem (3.1) ve (3.2) ile özdeştir. Burada φ_p dalga denkleminin faz kısmını temsil etmektedir ve vakum ortamda ilerleyen elektromagnetik dalga için Maxwell denklemlerinden türetilen klasik dalga denklemini sağlar ya da bir başka deyişle bu denklemin çözümüdür;

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad \text{ve} \quad c = \frac{1}{(\epsilon_0 \mu_0)^{1/2}} \quad (5.2)$$

Kırılma indisi n olan ortam için, Denklem (5.1)'deki dalga denkleminin ilgili kısmi türevleri Denklem (5.2)'de yerine yazılırsa;

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{n^2 \omega^2}{c^2} \right) \phi_p = 0 \quad (5.3)$$

Helmoltz Denkleminde ulaşılır. Bu denklem için hem Denklem (5.1) ve hem de;

$$\phi'(x, y, z, t) = \phi_p \cdot e^{-j\omega t} \quad (5.4)$$

denklemini için bir çözümdür. Fiziksel olarak, açısal frekansın karesindeki bu işaret değişikliği, zıt yönlerde yayılım gösteren elektromagnetik dalganın fazının (yani yayılım zamanlarının) ve genliğindeki azalma miktarının aynı olması gerektiğini ifade eder. Bu durum “Simetrik Optik Yol (SOY) - Reciprocity” olarak Sagnac İnterferometresinde tanımlanır [Arditty and Lefevre, 1981] ve [Lefevre, 1993]. Bir başka deyişle Şekil 5.1'te gösterilen interferometrik fiber optik jiroskop için CW ve CCW olarak gösterilen ikiye ayrılmış eşit genliğe sahip ve zıt istikamette ilerleyen ışınlam dalgalarının maksimum interferans gerçekleştirebilmeleri için özdeş optik yol katetmeleri gereklidir. Şekil 5.1.'de verilen konfigürasyon SOY'un sağlandığı minimum konfigürasyon olarak adlandırılır. Boş uzayda bu özdeş yolu sağlayacak optik düzenlemeleri yapmak oldukça zordur. Ancak tek modlu iletimin mümkün olduğu optik fiberlerde ışınlam kaynağının çıkış gücünün optimize edilmesiyle (Kerr etkisi gibi doğrusal olmayan etkileri tetiklemeyecek optik güç seviyeleri) Şekil 5.1.'de gösterilen konfigürasyon oluşturulduğunda SOY bu konfigürasyonun doğasında var olan özdeş optik yolu iki yönde hareket eden elektromagnetik dalgalar için sağlayacaktır. Bölüm 2.4 ve 2.5'te detayları verilen tek modlu iletimin neden önemli olduğu bu noktada daha iyi anlaşılmaktadır. Optik fiberin tek modlu olması, SOY'un korunmasını sağlayan bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yüzden “İFOJ'da algılama sarımı olarak kullanılacak optik fiber için ışınlam kaynağı optik fiberin kesilim dalga boyundan daha uzun dalga boyuna sahip ışınlam üretmelidir” sonucuna ulaşırız.

Şekil 5.1.'de iki adet 2x2 fiber optik ayırıcı/birleştiricinin kullanıldığı görülmektedir. Bunun amacı SOY'u Sagnac interferometresinde korumak ve Sagnac Fazının perdelenmemesi için elektromagnetik ışıkların özdeş çapraz/direkt geçiş sayısını dengelemek içindir. Dolayısıyla CW ve CCW olarak işaretlenen ışık dalgaları ikişer kere direkt ve çapraz geçiş yapar [Çelikel, 2007] ve [Merlo et al, 2000]. Sonuç olarak SOY'un interferometrik fiber optik jiroskopta elde edilmesi açısal hız bilgisini içeren Sagnac Faz'ını taşıyan interferans sinyalinin maksimum kontrast ile üretilmesine karşılık gelir [Lefevre, 1993].

5.2. İnterferometrik Fiber Optik Jiroskobun Matematiksel Esası ve Faz Modülasyonu

Tasarımını gerçekleştirilip prototipi oluşturulan faz modülasyonlu açık-döngü interferometrik jiroskobu kurgularken bu tasarımın dayandığı optik ve elektronik detaylar bu bölümde sunulmuştur.

Bir çift demet interferometresi olan İFOJ'tan Bölüm 4'te detayı verilen ve açısal hız ile oluşan Sagnac Fazı'nın elde edilebilmesi için Denklem (3.6) 'yı (veya Denklem (3.29)) ele alalım.

$$I_D = K(1 + \cos \phi) \quad (5.5)$$

Denklem (5.5)'i elde ederken elektromagnetik ışınımı monokromatik olarak kabul ederek birbirine dik polarizasyon bileşenlerine sahip z yönünde ilerleyen düzlem elektromagnetik dalga denklemleri kullanılmıştı. Denklem (5.5) bir çift demet interferometresi ve dolayısıyla interferometrik fiber optik jiroskobun tepki fonksiyonudur. Kosinüs fonksiyonu çift fonksiyon olduğundan ötürü Sagnac Fazının bu tepki fadesinden türetilmesinde zorluklar söz konusudur. Denklem (5.5)'deki zorlukları şu şekilde sıralarsak;

- i- Sagnac Fazının $N\pi$ olduğu değerlerde Denklem (5.5) sıfır değeri üretmektedir. Burada N tek tamsayıdır.
- ii- Yine kosinüs teriminin çift olmasından ötürü interferometrenin dönüş istikametini belirlemek mümkün olmamaktadır.

- iii- Nispeten yüksek açısal hız değerlerinde jiroskop harekete başladığında $2N\pi$ ’lık Sagnac Faz değerlerini belirlemek mümkün olmamaktadır.

“i” ve “ii” olarak belirtilen zorlukların aşılması için kosinüs fonksiyonu yerine sinüs fonksiyonunun Sagnac Fazını taşıır hale gelmesi yeterlidir. “iii” sorunun giderilmesi ise dalga boyu çoklama (wavelength multiplexing) gibi ilave başka uygulamalar gerektirir [Çelikel, 2007] ve bu tezin bir konusu değildir. Ayrıca sinüs kutuplama modülasyon (sinüs kutuplama modülasyon) tekniği yerine doğrudan dc metotla Sagnac Fazı’nın ölçülmesi dinamik aralığı oldukça kısıtlar ve sinyal / gürültü eşik değerine çok yakın ölçümlerdir [Lefevre, 1993].

Denklem (5.5)’de yer alan ve çift bir fonksiyon olan kosinüs fonksiyonu yerine sinüs fonksiyonunun getirilmesi, dc ve ac bileşenlerden oluşan faz modülasyonunun interferometrik fiber optik jiroskoba uygulanması ile başanılır. n kırılma indisine sahip ortam içinde ilerleyen elektromagnetik dalga için faz;

$$\phi = k.L = \frac{2\pi}{\lambda} nL \quad (5.6)$$

Denklem (5.6) ile verilir. Burada L elektromagnetik dalganın k açısal dalga vektörü ile n kırılma indisine sahip ortamda aldığı optik yoldur. Denklem (5.6)’ya bakıldığında faz modülasyonunun iki parametre ile gerçekleştirilebileceği görülür. Birinci parametre ortamın kırılma indisi n ve ikinci parametre de doğrudan optik yol L’dir. Elektromagnetik ışınımın yayılım gösterdiği ortamın kırılma indisinin modüle edilerek dinamik bir faz gecikmesi oluşturulması LiNbO₃ türü elektrooptik kristaller ile gerçekleştirilir. Bu kristallere uygulanan voltaj ile kristalin kırılma indisi değiştirilir. LiNbO₃ kristalinin faz modülasyonu gerçekleştirebilmesi için elektromagnetik dalga doğrusal polarize hale getirilir ve yayılım eksenini boyunca uzunluğu L olan kristale gönderilir. Yayılım eksenine dik eksenlerdeki kırılma indisi, uygulanan dış elektrik alan ile modüle edilerek polarize dalganın kristal çıkışına polarizasyon durumunda ve şiddetinde bir değişme olmaksızın çıkması sağlanır. İkinci parametre ise doğrudan optik yolun (L) modüle edilmesidir. Bu tip modülasyon ise Şekil 5.1.’de gösterilen PZT üzerine birkaç tur sarılmış ve sıkıca sabitlenmiş optik fiber ile gerçekleştirilir. Optik fiber bir dereceye kadar elastik

yapıda olup elektriksel olarak polarize haldeki içi boş PZT üzerine sarılır. PZT uygulanan periyodik sinyal ile periyodik radyal esneme yaparken (PZT aslında üç titreşim moduna sahiptir) PZT üzerine sarılı bulunan optik fiberde bu harekete uygun şekilde periyodik esneme ve büzüşme hareketini gerçekleştirir ve bu şekli ile optik yolun periyodik değişimi sağlanmış olur. Faz modülasyon terimi ile Denklem (5.1) şu hali alır;

$$I_D = K \{1 + \cos(\phi_s + \phi_m(t))\} \quad (5.7)$$

Burada ϕ faz terimi iki parçaya ayrılarak yazılmıştır [Çelikel, 2007] ve [Lefevre, 1993]. Birinci terim ϕ_s algılama sarımının açısal hızından kaynaklanan ve elde edilmek istenen Sagnac Fazı ve ikinci terim de $\phi_m(t)$ sinüs kutuplama modülasyon (sine wave biasing modulation) sinyalinden oluşan ilave ve periyodik faz terimidir. PZT'ye veya kristal modülatöre uygulanan periyodik modülasyon sinyalinden kaynaklanan ilave periyodik faz değişimi;

$$\phi_m(t) = \phi_{m0} \sin \omega_m t \quad (5.8)$$

olarak yazılabilir. Burada ϕ_{m0} , PZT'ye veya kristal faz modülatörüne uygulanan elektriksel periyodik sinyalin oluşturduğu faz modülasyonlu dalga'nın genliği ve ω_m 'de uygulanan sinyalin açısal frekansıdır. Bu durumda faz modülasyonu uygulanan Sagnac interferometresi için tepki fonksiyonu;

$$I_D = K \{1 + \cos(\phi_s + \phi_{m0} \sin \omega_m t)\} \quad (5.9)$$

şeklidedir. Parantez içindeki kosinüs fonksiyonunu açarsak;

$$I_D = K \{1 + \cos \phi_s \cos(\phi_{m0} \sin \omega_m t) - \sin \phi_s \sin(\phi_{m0} \sin \omega_m t)\} \quad (5.10)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (5.10) Bessel Fonksiyonu türünden seriye açılırsa;

$$I_D = K \left\{ 1 + [J_0(\phi_{m0}) + 2 \sum J_{2n}(\phi_{m0}) \cos(2n\omega_m t)] \cos \phi_s - [2 \sum J_{2n-1}(\phi_{m0}) \sin(2n-1)\omega_m t] \sin \phi_s \right\} \quad (5.11)$$

ve $n = 1$ için;

$$I_D(t) = K \{ 1 + [J_0(\phi_{m0}) + 2J_2(\phi_{m0}) \cos 2\omega_m t] \cos \phi_s - [2J_1(\phi_{m0}) \sin \omega_m t] \sin \phi_s \} \quad (5.12)$$

faz modülasyonlu interferometrik fiber optik jiroskop (Sagnac İnterferometresi) için tepki fonksiyonu elde edilmiş olur [Çelikel, 2007]. Denklem (5.12) faz modülasyonlu fiber optik jiroskoptan Sagnac Fazının ve dolayısıyla bu fazdan da jiroskobun bağlı bulunduğu çerçevenin açısal hızının elektronik olarak nasıl türetileceğinin bilgisini bize vermektedir. Denklem (5.12)'de bir dc terimin yanında modülasyon sinyalinin tek ve çift frekans bileşenleri mevcuttur. Jiroskop durgunken yani hiçbir açısal hız bileşeni jiroskopa etki etmediği durumda Sagnac Fazı sıfır olduğundan " $\sin \phi_s = 0$ " ve " $\cos \phi_s = 1$ " olur. Bu durumda Denklem (5.12) bir DC bileşen üzerine binmiş " $\cos 2\omega_m t$ " terimine sahiptir. Yani fotodiyod akımı gerilime çevrilip osiloskoba bağlandığında PZT'yi sürme frekansı olan ω_m 'in iki katı frekansa sahip bir sinyal osiloskopta gözlenir.

Jiroskop dönmeye başladığında açısal hız ile indüklenen Sagnac Faz Kayması meydana gelir ve $\sin \phi_s$ fonksiyonu sıfırdan farklı değerler almaya başlar. Dolayısıyla " $\sin \omega_m t$ " tek frekans bileşenleri oluşur ve bu durum osiloskop ekranında gerçek zamanlı olarak gözlenir. Sagnac Fazı açısal hız (Ω)'ya bağlı olduğundan oluşan tek frekans bileşenlerinin genliği de artan açısal hız ile sinüs fonksiyonunun dönüm noktasını aşmamak şartı ile artar. Aynı zamanda sinüs tek fonksiyon olduğundan ötürü bağıl olarak jiroskop sağa ve sola dönüş durumlarında sinüs zıt işaret almakta ve dönüş yönü bağıl olarak kesin şekilde bilinmektedir [Çelikel, 2007]. Ayrıca $N\pi$ (Burada N tek tamsayıdır) kadar büyük bir Sagnac Fazı üreten yüksek hızlı dönme hareketinde interferometre tepkisi de artık sıfıra gitmemektedir.

Sonuç olarak, "i" ve "ii" olarak gösterilen ve kosinüs fonksiyonundan kaynaklanan zorluklar, faz modülasyonu tekniğinin kullanılmasıyla tek fonksiyon olan sinüs teriminin elde edilmesi sonucu ortadan kaldırılmıştır. Denklem (5.12)'den

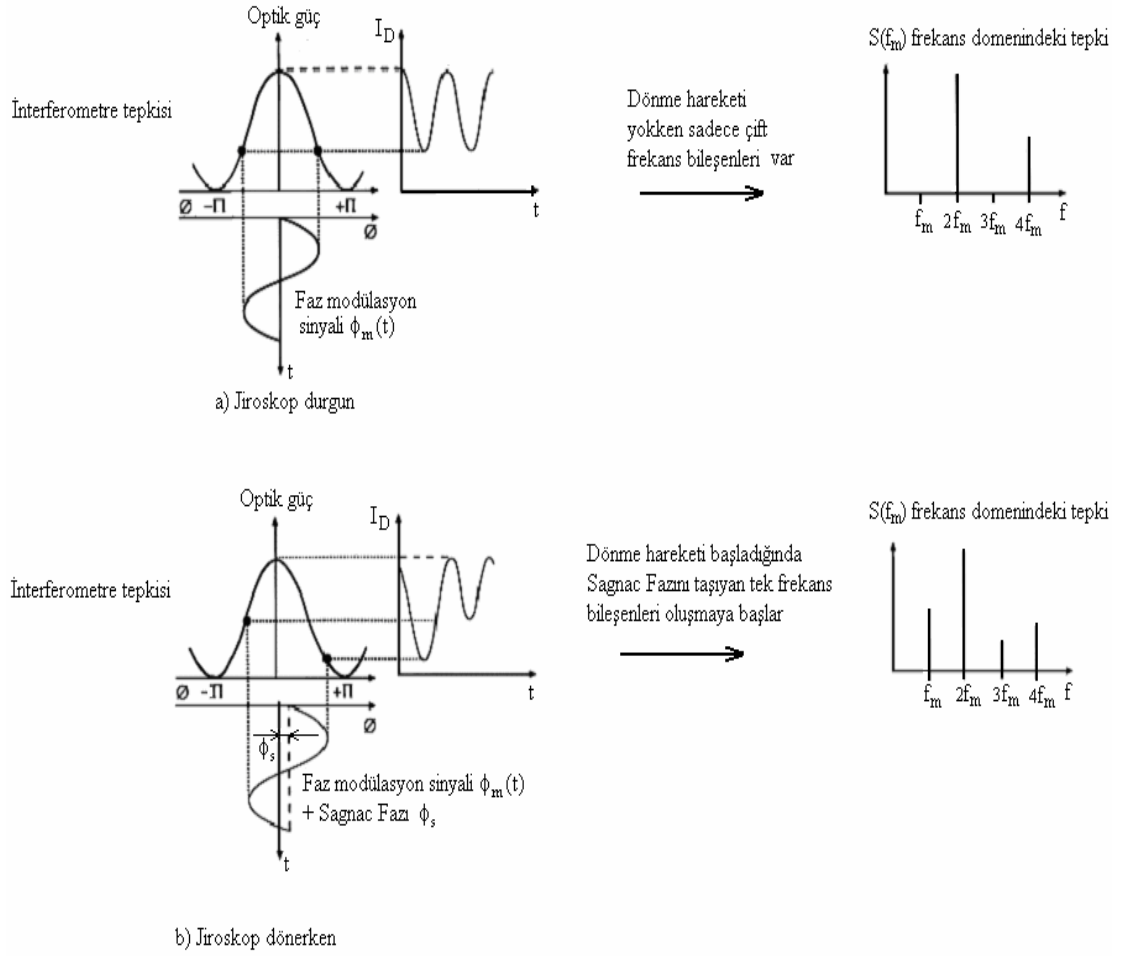
fotodiyotta Sagnac Fazını taşıyan fotoakımın bir dereceye kadar uygulanan faz modülasyonunun frekansına bağlı olduğu görülmektedir [Bergh et al, 1984]:

$$I_D'(t) = 2K J_1(2\phi'_{m0} \sin \frac{\omega_m \tau}{2}) \sin \omega_m t \sin \phi_s \quad (5.13)$$

Burada $\phi_{m0} = 2\phi'_{m0} \sin \frac{\omega_m \tau}{2} = 1,8$ (rad) olup, sinüs kutuplama modülasyon sinyalıdır. Birinci dereceden Bessel fonksiyonu, 1,8 (rad) değerinde sinüs kutuplama modülasyonu için maksimum değeri alır [Çelikel, 2007] ve [Bergh et al, 1984]. $J_1(1,8) = 0,53$ [Lefevre, 1993]. τ ise fiber optik jiroskopta algılama sarımı olarak kullanılan tek modlu optik fiber için geçiş zamanıdır (Loop Transit Time). Optik fiber için geçiş zamanı ölçümü kalibreli bir OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) cihazı ile yapılabileceği gibi Bölüm 2.6.1.2’de anlatılan yöntemle de daha düşük bir belirsizlikle gerçekleştirilebilir. Denklem (5.13)’te Sagnac Fazını taşıyan tek frekans bileşenlerinin genliği, elektriksel faz modülasyon frekansını;

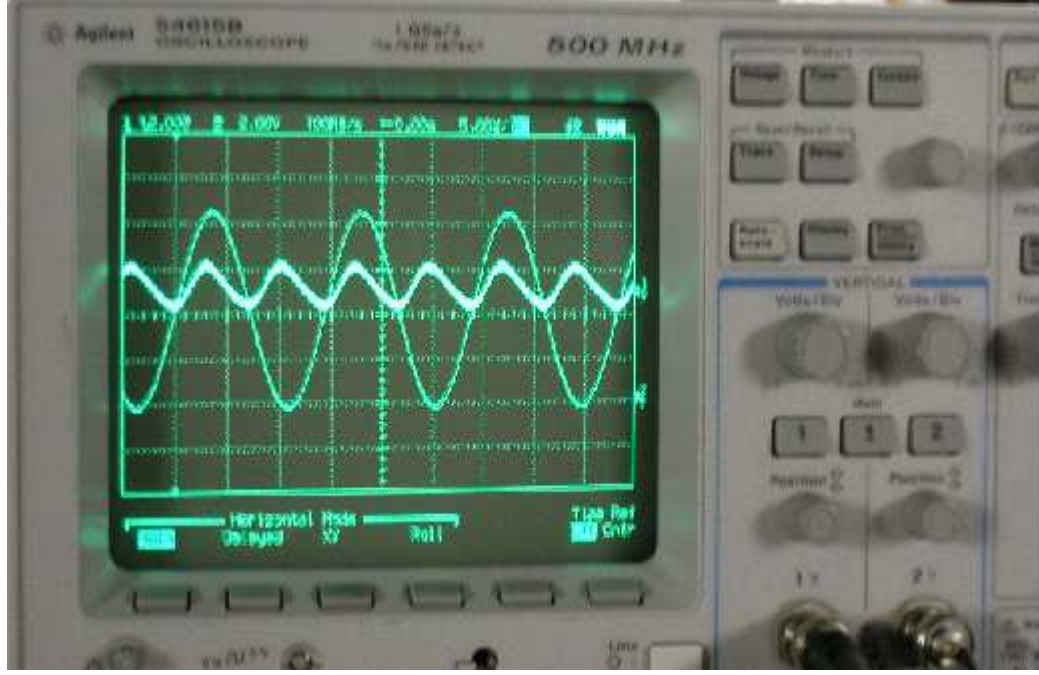
$$f_m = \frac{1}{2\tau} \quad (5.14)$$

değerine ayarlayarak yani sinüs değeri $\pi/2$ (rad) değerine getirilmesiyle maksimize edilmiş olur.



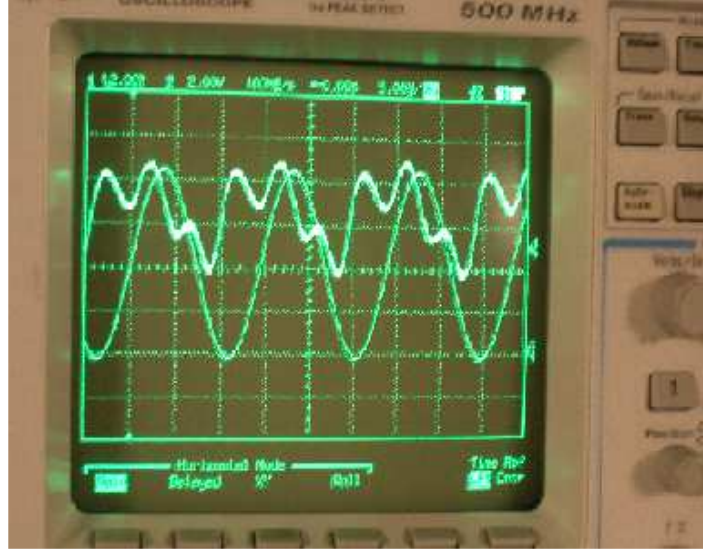
Şekil 5.3. Dönme hareketi varken ve yokken faz modülasyonlu fiber optik jiroskopta (Sagnac İnterferometresi) oluşan fotoakım şekillenimi.

Şekil 5.3.'de Denklem (5.12)'yi sağlayan faz modülasyonlu interferometrik jiroskop (Sagnac İnterferometresi) için dönme hareketi varken ve yokken oluşan fotoakım şekillenimleri görülmektedir. Şekil 5.4. ise TÜBİTAK UME Optik Laboratuvarı Fiber Optik Metroloji Bölümünde tasarımı gerçekleştirilen İFOJ prototipine ait osiloskop görüntüsüdür.

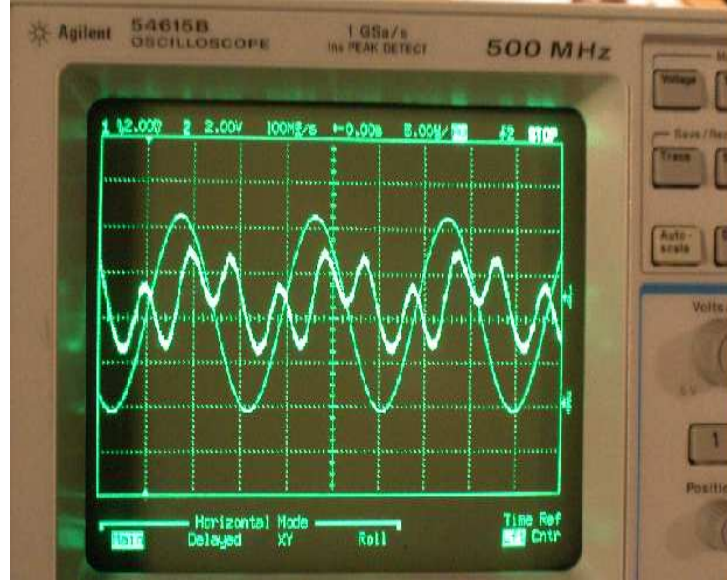


Şekil 5.4. Tasarımı gerçekleştirilen faz modülasyonlu açık-döngü İFOJ prototipinin durgunken ürettiği fotoakımının zaman bağımlılığı (Denklem (5.8)'deki çift frekans bileşenleri görülmekte).

Küçük genlikli sinyal 2 mV/div ölçeğinde ve interferometre tepkisi olup büyük genlikli sinyal de faz modülasyonu için PZT'ye uygulanan harmonik elektriksel sinyaldir ve 2 V/div ölçeğindedir, ϕ_{m0} [Çelikel, 2007]. Şekil 5.4.'de osiloskobun zaman eksenine bakıldığında küçük genlikli interferometre tepki sinyalinin büyük genlikli faz modülasyon işaretinin iki katı frekansa sahip olduğu görülür. Yani Denklem (5.12)'deki çift frekans bileşeni $\cos 2\omega_m t$ terimidir. Şekil 5.5a. ve Şekil 5.5b. ise İFOJ prototipinin sağa ve sola dönme hareketi söz konusu olduğunda verdiği tepkileri göstermektedir [Çelikel, 2007].



Şekil 5.5a. İFOJ prototipi saat istikametinde (CW) dönerken elde edilen tepki.



Şekil 5.5b. İFOJ prototipi saatin aksi istikamette (CCW) dönerken elde edilen tepki

Buradan da dikkatli bir şekilde bakılırsa FOG CW ve CCW istikametlerinde dönmeye başladığında yani “ $\sin \phi_s$ ” sıfırdan farklı değerler başlayacaktır. Sinüs fonksiyonu sıfırdan farklı değer alması Denklem (5.12) ve Denklem (5.13)’deki “ $\sin \omega_m t$ ” tek harmonik bileşenleri “ $\sin \phi_s$ ” ’den dolayı dönüş yönünü de içeren bir şekilde devreye girmektedir. Uygulanan sinüs kutuplama modülasyonu ile fazın modüle edilmesi sonucu elde edilen tek fonksiyon sinüs, sayesinde dönüş hareketinin yönü de algılanabilmektedir. Yani CW ve CCW yönde dönüşler için İFOJ

prototipinden zıt polarizasyonlu akım/voltaj çıktıları Denklem (5.12) ile tam bir uygunlukla elde edilmiştir.

5.3. Dinamik Faz İzleme Yöntemi ile Sagnac Fazının Türetilmesi

İFOJ prototipinde (°/saat) cinsinden Ω mutlak açısal hıza bağlı oluşan Sagnac Fazı (ϕ_s)’nin değişimine karşı DC çıkış veren faz duyarlı bir elektronik tasarıma ihtiyaç vardır. Faz modülasyonlu çift demet interferometrelerinde faz değişimini algılama amaçlı olarak tasarılan çeşitli elektronik kurgulamalar mevcut olup bunlardan bazıları;

a) Elektronik veya nümerik olarak fazın entegrasyon ile elde edildiği “Çapraz Türev Çarpanlı - Faz Üreten Taşıyıcı” Metodu (Phase Generated Carrier (PGC) with Differential-Cross-Multiplier (DCM))

b) “Tek Kanal Faz İzleme Devresi” (The Single-Channel Phase Tracker)

c) $\sin(\Delta\phi) / \cos(\Delta\phi)$ Faz İzleme Metodu

olarak belirtilebilir [Chang and Sirkis, 1998]. Bu tezin konusu olan Açık-Döngü ve Kapalı-Döngü İFOJ prototipinde ise “Faz Üreten Taşıyıcı Kullanarak Dinamik Faz İzleme veya Demodülasyon” metoduyla Sagnac Fazına bağlı mutlak açısal hız verisi elektronik olarak elde edilmiştir [Dandridge, 1982]. İFOJ prototipi fotoakımından Sagnac Fazına bağlı açısal hız verisinin türetilmesi için tasarlanması gereken elektronik devre detaylarının belirlenebilmesi için öncelikle Denklem (5.8)’in analiz edilmesi gereklidir. Bu yüzden Denklem (5.12)’yi daha yalın bir formda şu şekilde yazmak anlamlı olur;

$$I_D(t) = [(C_1 + I_1 \cos 2\omega_m t) \cos \phi_s - (I_2 \sin \omega_m t) \sin \phi_s] \quad (5.15)$$

Denklem (5.15)’den çift harmonik bileşenlerinin genliğinin “ $\cos \phi_s$ ” ve tek harmonik bileşenlerinin genliğinin de “ $\sin \phi_s$ ” fonksiyonlarına bağlılığı açıkça gözükmektedir. İFOJ prototipinin dönmeye başlaması esnasında oluşan Sagnac Fazı $\sin \omega_m t$ tek frekans bileşenlerini oluşturmaktadır. Bu durum Şekil 5.3.’te frekans domeninde f_m ($3f_m, 5f_m, \dots$) tek frekans bileşeni sinyallerin oluşmasıyla gösterilmiştir. Dolayısıyla tek frekans bileşeni fotoakım sinyalinin genliği de $\sin \phi_s$ ’tir ve elektronik olarak

yapılması gereken şey $\sin\phi_s$ genliğinin elde edilmesi olacaktır. İFOJ prototipinin ürettiği optik sinyalden açısal hız değişimine karşı elektriksel gerilimin nasıl elde edileceği detayları aşağıda sunulmuştur. Sonuçta, tasarımılanan Dinamik Faz İzleme Devresi ile Açısal hız ($^{\circ}$ /saat)’a karşı Voltaj (V) çıktısının elde edilmesi amaçlanmaktadır. Devre çıkışında elde edilen Voltaj (V) “ $\sin\phi_s$ ” sinüs fonksiyonunun doğrusal bölgesinde tanımlanan dinamik bölge içersindedir. Ancak yüksek açısal hız sonucu indüklenen büyük değerli sagnac Fazı durumunda (açısal Hız – Voltaj) fonksiyonu yani prototipin ölçek faktörü sinüs fonksiyonundan ötürü doğrusallıktan sapmaya başlamaktadır. İşte bu noktada yani bağıl olarak büyük Sagnac Faz Kayması durumlarında jiroskobun ölçek faktörünün doğrusal bölgeye çekilmesi gerekmektedir. Bu da ancak detayları Bölüm 9 ve 10’da verilecek olan Kapalı-Döngü İFOJ ile mümkün olmaktadır.

5.3.1. Dinamik Faz İzleme Devresi

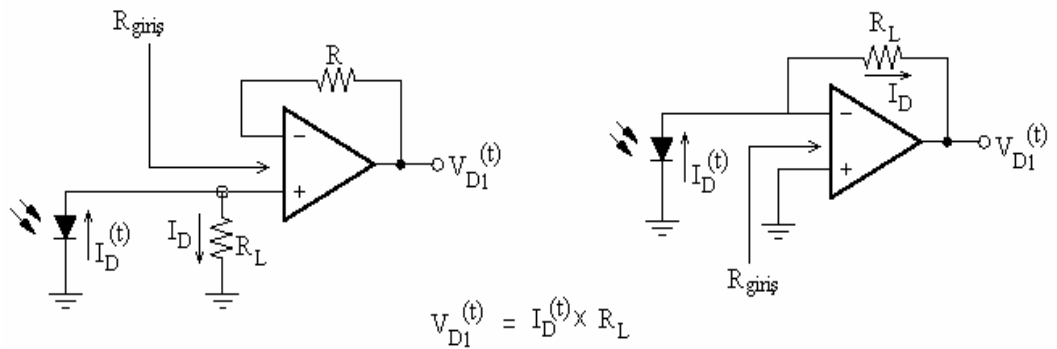
Aşağıda prototipi oluşturulan İFOJ prototipinden, Faz Üreten Taşıyıcı Kullanarak Dinamik Faz İzleme (demodülasyon) yöntemiyle Sagnac Fazının elde edilmesine olanak veren elektronik devrenin tasarım detayları hakkında bilgiler sunulmuştur.

Akım Gerilim Dönüştürücü Katı;

İFOJ prototipinde optik işareti elektriksel işarete dönüştürmek için fotovoltaiik esasta çalışan fotodiyotlar kullanılır. Yakın mor ötesi ve görünür bölge olan 200 nm – 1100 nm tayfsal aralığında Si fotodiyotlar duyarlılığa sahipken, yakın kırmızı altı bölge olarak adlandırılan 800 nm – 1700 nm aralığında InGaAs veya Ge fotodiyotlar duyarlıdır. Ge fotodiyotların sıcaklık bağımlılığı InGaAs fotodiyotlara göre daha yüksek olduğundan ilave sıcaklık kontrolüne ihtiyaç duyar. Si fotodiyotların tayfsal duyarlılığı tipik olarak 555 nm dalga boyu değerinde 0,505 civarında iken A/W, 1550 nm’de InGaAs’ın ~ 1 (A/W)’tır ve Ge için ise 0,8 (A/W) seviyesindedir. Tayfsal duyarlılık parametresi fotodiyodun aktif bölgesi üzerine düşen optik akının ne kadarlık bir kesrinin fotoakıma dönüştürüldüğünün bir ölçüsü olup InGaAs fotodiyodun Ge ve Si fotodiyolara göre daha yüksek kuantum verimi ile çalıştığı verilen tayfsal duyarlılık verilerinden anlaşılmaktadır.

İFOJ prototipinde InGaAs fotodiyot kullanılmıştır. Tayfsal duyarlılık parametresinin yanında bir diğer önemli karakteristikte de fotodiyodun kesilim frekansıdır (cut-off frequency). kesim frekansı fotodiyodun maksimum duyarlılığa sahip olduğu dalga boyu değerindeki tayfsal duyarlılığının genellikle %10'una düştüğü frekans değeri olarak tanımlanır. Tasarımda kullanılan InGaAs fotodiyodun kesilim frekansı 400 MHz civarında olup 100 – 200 KHz'lik bir modülasyon frekans bandı için oldukça yüksek bir kesilim frekans değeridir. Dolayısıyla modülasyon frekansından kaynaklanacak tayfsal duyarlılıkta azalım yüksek kesilim frekansına sahip fotodiyodun seçimi ile engellenmiş olur. Dikkate edilmesi gereken bir başka önemli parametrede fotodiyodun gürültü eşdeğer güç seviyesidir (Noise Equivalent Power-NEP). Bu parametre fotodiyodun 1 Hz'lik band genişliği ve tepe dalga boyu değerinde algılayabileceği minimum optik güç seviyesinin bir ölçüsüdür. InGaAs fotodiyot için $\sim 10^{-14}$ W/Hz^{1/2} değerindedir. Düşük optik güç seviyelerinde çalışma durumlarında ölçümün sinyal /gürültü oranını belirleyen başlıca parametredir.

Fotodiyotta uyarılan fotoakımın kullanılabilir olması için gerilime dönüştürülmesi gereklidir. Denklem (5.15)'te verilen fotoakım, bir akım-gerilim-dönüştürücüsü devre (Transimpedance Amplifier) yardımıyla gerilime dönüştürülür. İFOJ prototipinde de kullanılan bu devre katı Şekil 5.6.'da gösterilmiştir [Çelikel, 2007].



Şekil 5.6. Operasyonel yükselteç kullanarak oluşturulan tipik akım-gerilim-dönüştürücüsü devre kurguları.

Akım gerilim dönüştürücüsünün (V/A) cinsinden dönüştürme çarpanı G ile gösterilirse, elde edilen gerilim;

$$V_{D1}(t) = I_D(A) \times G(V/A) = G(V/A) \times [(C_1 + I_1 \cos 2\omega_m t) \cos \phi_s - (I_2 \sin \omega_m t) \sin \phi_s] (V) \quad (5.16)$$

Bu devrede kullanılan aktif devre elemanı operasyonel yükseltecin giriş direnci 10^9 ohm mertebesinde olduğundan [OPA27 Data Sheet, 2008] fotodiyodun ürettiği akım R_L direnci çok büyük seçilmemek şartıyla operasyonel yükselteçten içeri akmaz ve akımın büyük kısmı yani $10^9/R_L$ 'lik kısmı ideal durumda R_L üzerinden akar ve çıkışta;

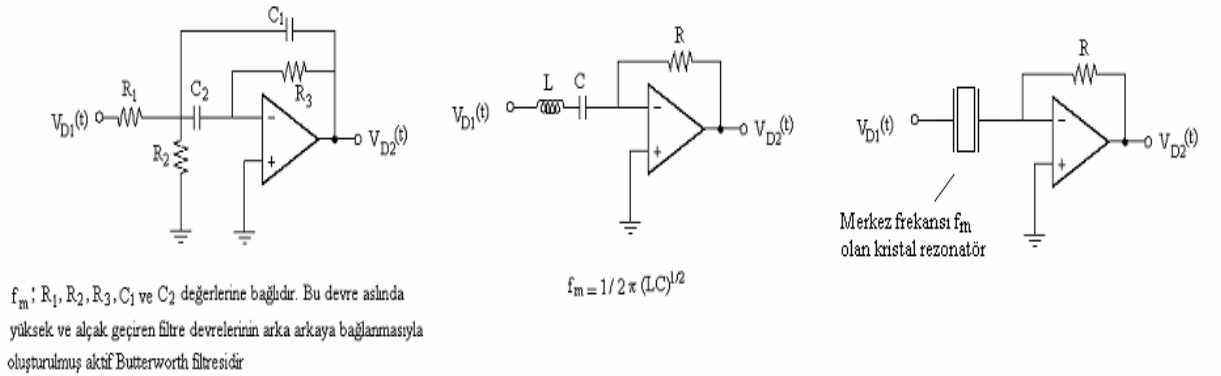
$$V_{D1}(t) = I_D(A) \times G(V/A) \quad (5.17)$$

gerilimi elde edilir. Burada $G(V/A)$ aslında R_L direncine karşılık gelmekte olup operasyonel yükseltecin akımı gerilime dönüştürme katsayısıdır.

Band Geçiren Filtre Katı;

Dinamik Faz İzleme Devresinin (dengeli demodülasyon) ana kısımlarından birisidir. Açısal hızdan dolayı oluşan Sagnac Fazı “ $\sin \phi_s$ ” 'dir ve bu sinyal Denklem (5.15)'den görüldüğü gibi tek frekans bileşenleri tarafından taşınır. Dolayısıyla Denklem (5.16) ile gösterilen akım gerilim dönüştürücüsünden elde edilen sinyaldeki çift frekans bileşeni bastırılmalıdır. Bir başka deyişle akım gerilim dönüştürücüsünden elde edilen ve Denklem (5.16) ile gösterilen sinyalden sadece $I_2 \cdot \sin \omega_m t \cdot \sin \phi_s (V)$ sinyalini çıkaracak bir elektronik kurguya ihtiyaç vardır. Denklem (5.16) bir dc bileşen içerir. Bu dc bileşenden kurtulmak için blokaj kapasitesi kullanarak kurtulmak kolayken çift frekans bileşeni $I_1 \cos 2\omega_m t$ teriminden kurtulmak kolay olmayacaktır. Bu terimden kurtulmak için sadece $I_2 \sin \omega_m t$ terimini geçiren bir filtreye ihtiyaç vardır. Bilinen RLC (LC rezonans devresi veya Butterworth filtreleri) devreleri ile çok yüksek Kalite Faktörüne (Q-Factor) ulaşmak mümkün olmadığından, bu tip RLC devreleri ile yapılan filtrelerde yan frekans bandları kristal kullanılan band geçiren filtrelerdeki kadar zayıflatılamaz. Band geçiren filtrenin Q faktörünün düşük olmasının bir diğer dezavantajı da, filtrenin omik direncinin yüksek olmasına karşılık geleceğinden, sensörden gelen ve kullanmak istediğimiz sinyalin $I^2 R$ oranında bir güç kaybına uğrayacağıdır. En iyi kalite RLC devrelerinin Q faktörü tipik olarak 5,000 – 10,000 arasında değişir

[Ivanov, 1999]. Bu durumda $I_1 \cos 2\omega_m t$ sinyalinin bastırılması için Q değeri çok yüksek kristal rezonatörlü, çok dar bantlı band geçiren filtre oluşturulması gereklidir. Bu tip kristal rezonatörlü filtrelerin Q -faktörü 50,000 seviyesine kadar ulaşır ve merkez frekansın yaklaşık 200 Hz 'lik civarında dağılım gösteren frekanslar yaklaşık 50 - 60 dB'lik bir zayıflamaya uğrar. Ayrıca sayısal sinyal işleme (Digital Signal Processing – DSP) yöntemleri ile de band geçiren filtre tasarımı uygulamaları gerçekleştirilebilir. Fakat bu yöntemlerde ana sinyal ilk olarak yüksek modülasyon frekansında analog sayısal dönüştürücü ile (Analog Digital Converter – ADC) örneklenmek (sampling) zorundadır. Yüksek modülasyon frekanslarında sinyal/gürültü oranının çok yüksek olmadığı durumlarda örnekleme oldukça zor olacağından bu filtreleme sisteminin dinamik aralığını oldukça kısıtlayıcı bir faktördür [Ivanov, 1999]. Akım gerilim dönüştürücü devrenin ardından merkez frekansı f_m değerinde olan bir aktif RC filtre ve bir aktif LC filtre İFOJ prototipi için oluşturulmuştur [Çelikel, 2007]. Oluşturulan devrelerin taslakları Şekil 5.7.'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Band geçiren filtre devresi. f_m merkez frekansına sahip filtre devresi Sagnac Fazını taşıyan tek frekans bileşenlerini geçirir.

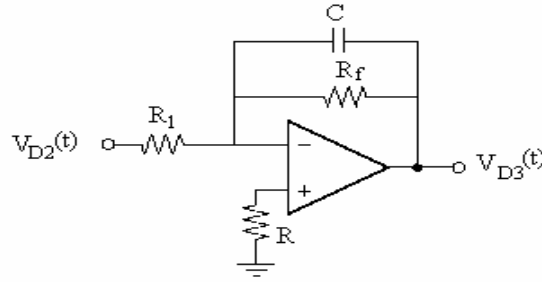
Bu durumda band geçiren filtreden sonra elde edilen sinyal ise,

$$V_{D2}(t) = G(V/A) \times I_2 \sin \omega_m t \sin \phi_s \quad (V) \quad (5.18)$$

şeklinde olacaktır. Çift frekans bileşeni $I_1 \cos 2\omega_m t$ band geçiren filtrenin frekans bandı dışında kaldığından band geçiren filtre devresi tarafından bastırılmıştır.

Gerilim Yükselteci Katı;

Elde etmek istediğimiz $\sin \phi_s$ fazını taşıyan $G(V/A) \times I_2 \sin \omega_m t$ (V/A) voltajı Şekil 5.7.'de gösterilen band geçiren filtrenin sahip olduğu omik dirençten ötürü (çünkü Q-faktörünün sonsuz olmaması filtre devrenin omik dirence sahip olmasına karşılık gelmekte) genlikçe kayba uğrayacaktır. Bu durumda $G(V/A) \times I_2 \sin \omega_m t$ (V/A) terimine ilave bir gerilim kazancı uygulamak gerekir/gerekebilir.



$$V_{D3}(t) = -(R_f / R_1) \times V_{D2}(t)$$

Şekil 5.8. 180° faz çeviren doğrusal yükselteç devresi.

Böyle bir yükseltecin kapalı çevrim kazancı (0 Hz – “ f_m ” Hz) bandında K olmak üzere;

$$V_{D3}(t) = V_{D2}(t) \times K = K \times G(V/A) \times I_2 \sin \omega_m t \sin \phi_s \quad (V) \quad (5.19)$$

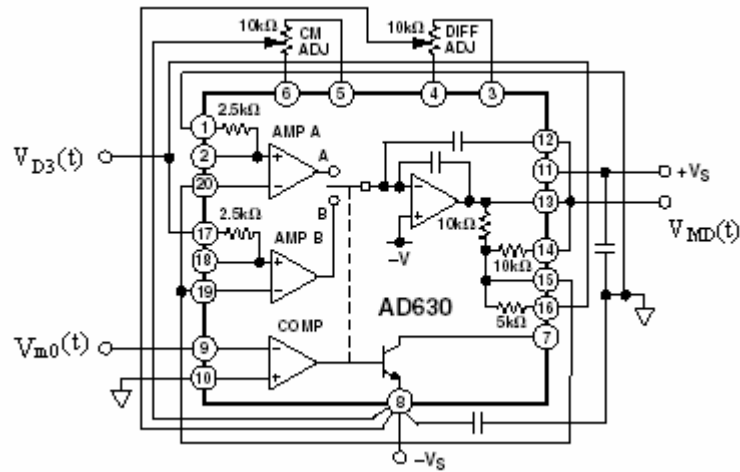
şeklinde yükseltilmiş bir genliğe sahip olacaktır. Devredeki R akım kompanzasyon direnci olup $R = R_1 // R_f$ 'dir. Gerilim yükselteci katında dikkat edilecek husus yükselteç kazancının, ilgili frekansta devre RC eş değerinin ve buna bağlı oluşabilecek geri besleme etkileri ile giriş ve çıkış gerilimleri arasında faz açısının kaymasının kontrol edilmesidir. Ayrıca yüksek kazancın uygulanmanın da ilave elektronik gürültü akımlarını (özellikle operasyonel yükseltecin kollarından akan kutuplama akımlarını) da yükselteceğinin hatırd tutulması gereklidir. Devredeki C kapasitesi operasyonel yükseltecin f_m frekansında yükseltme işlemi gerçekleştirirken yükseltecin ilave bir

-180°'lik faz kayması sonucu oluşması muhtemel osilasyonu (pozitif geri besleme) engellemek için bağlanmıştır.

Dengeli Modölatör/Demodölatör Katı;

Denklem (5.19)'a dikkatli bakıldığında, $I_2 \sin \omega_m t$ sinyalinin genliğinin $\sin \phi_s$ fazı ile modüle edildiğini söylemek yanlış olmaz. Genlik modülasyonu, yüksek frekanslı taşıyıcı dalga ile alçak frekanslı sinyalin logaritmik yükselteçlerden oluşan modölatör devresi tarafından analog çarpımı sonucu gerçekleştirilir. Alçak frekanslı sinyalin yüksek frekanslı sinyalden ayrıştırılması ise demodülasyon olarak adlandırılır. Bu şekilde analog iki sinyalin çarpım işlemlerini gerçekleştiren ticari entegre devreler mevcut olup bu Doktora Tezinin konusu olan İFOJ Prototipinin Dinamik Faz İzleme Devresi katında AD630 dengeli modölatör/demodölatör entegresi kullanılmış ve bu entegre devre faz duyarlı (lock-in) olarak çalıştırılmıştır [Çelikel, 2007] ve[Ivanov, 1999].

İFOJ prototipinde Sagnac Fazını DC voltaja karşı (açık-döngüde bir dereceye kadar doğrusal) doğrusal değişimle elde etmek için Denklem (5.19)'da verilen sinyalin, sabit frekans ve faza sahip olan elektriksel faz modülasyon sinyali ile AD630 modölatör/demodölatör entegresi aracılığıyla analog olarak çarpılması gereklidir.



Şekil 5.9. AD630 dengeli modölatör/demodölatör entegresi ile referans faz modülasyon sinyali ve Sagnac Fazı'nı taşıyan sinyalin analog çarpımı [AD630 Data Sheet, 2008].

Referans elektriksel faz modülasyon sinyali,

$$V_{m0}(t) = M \sin \omega_m t \quad (5.20)$$

Buradaki M genliği, Denklem (5.13)'deki $\phi_m(t)$ 'yi üreten elektriksel sinyaldir. Gerilim yükselteci katından gelen ve Sagnac Fazı $\sin \phi_s$ 'yi taşıyan sinyal;

$$V_{D3}(t) = V_{D2}(t) \times K = \zeta \sin \omega_m t \sin \phi_s \quad (5.21)$$

AD630 entegresi aracılığıyla analog olarak çarpılan sinyal;

$$V_{MD}(t) = V_{m0}(t) \times V_{D3}(t) = \zeta \sin^2 \omega_m t \sin \phi_s \quad (5.22)$$

Şeklinde olacaktır. Burada ζ , Denklem (5.19)'daki K, G ve I_2 ile Denklem (5.20)'deki M 'nin çarpımlarından oluşan sabit bir katsayısıdır. Aşağıda verilen trigonometrik bağıntılar yardımıyla;

$$\cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta$$

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$$

Denklem (5.22) şu şekilde düzenlenebilir;

$$V_{MD}(t) = \zeta \left\{ \frac{1 - \cos 2\omega_m t}{2} \right\} \sin \phi_s \quad (5.23)$$

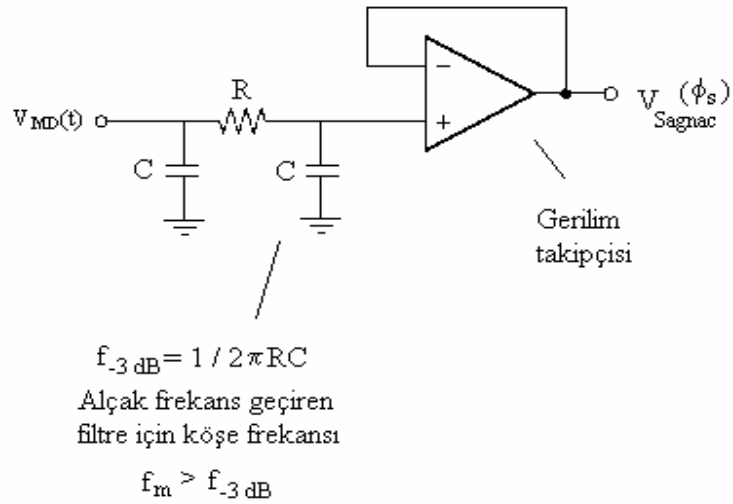
$$V_{MD}(t) = \frac{\zeta \sin \phi_s}{2} - \frac{\zeta \cos 2\omega_m t \sin \phi_s}{2} \quad (5.24)$$

terimi elde edilecektir. Denklem (5.24)'de Sagnac Fazını taşıyan bir DC bileşen ve sağ tarafında yüksek frekans bileşeni $\cos 2\omega_m t$ bulunmaktadır. Bu noktadan sonra

açısal hız taşıyan Sagnac Fazı harmonik bileşenlerden ayrılarak bir DC bileşen haline getirilmiştir [Çelikel, 2007].

Alçak Frekans Geçiren Filtre Katı;

$V_{MD}(t)$ sinyalinin içeriğinde bulunan $\cos 2\omega_m t$ yüksek frekans bileşeni, köşe frekansı (-3 dB frekansı) f_m (Hz) frekansının daha altında bulunan bir alçak geçiren filtre ile kolayca filtrelenebilir. Oluşturulan alçak geçiren filtre aynı zamanda bir gerilim takipçisi (voltage follower-buffer) şeklinde düzenlenen bir operasyonel yükseltece bağlanarak ideal kaynak haline getirilir. Gerilim takipçisi giriş direnci yaklaşık $1G\Omega$, çıkış direnci 1Ω ve kapalı çevrim kazancıda 1 olan izolasyon yükseltecidir. Gerilim takipçisi katı Dinamik Faz İzleme Devresi'nin çıkış katı olup faz izleme devresine bağlanacak herhangi bir devreden ötürü (örneğin bir analog sayısal dönüştürücü veya integratör vb.) faz izleme devresinin yüklenmemesini (fazla akım çekilerek) sağlayan ve ideal besleme kaynağı şeklinde çalışmasına olanak veren devre katını meydana getirir. Alçak frekans geçiren filtre ile birlikte düzenlenen gerilim takipçisi katı Şekil 5.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Dinamik faz izleme devresinin çıkış katını oluşturan alçak frekans geçiren filtre ve gerilim takipçisi katı.

Bu durumda açısal hızdan kaynaklanan Sagnac Fazına karşı gerilim değeri;

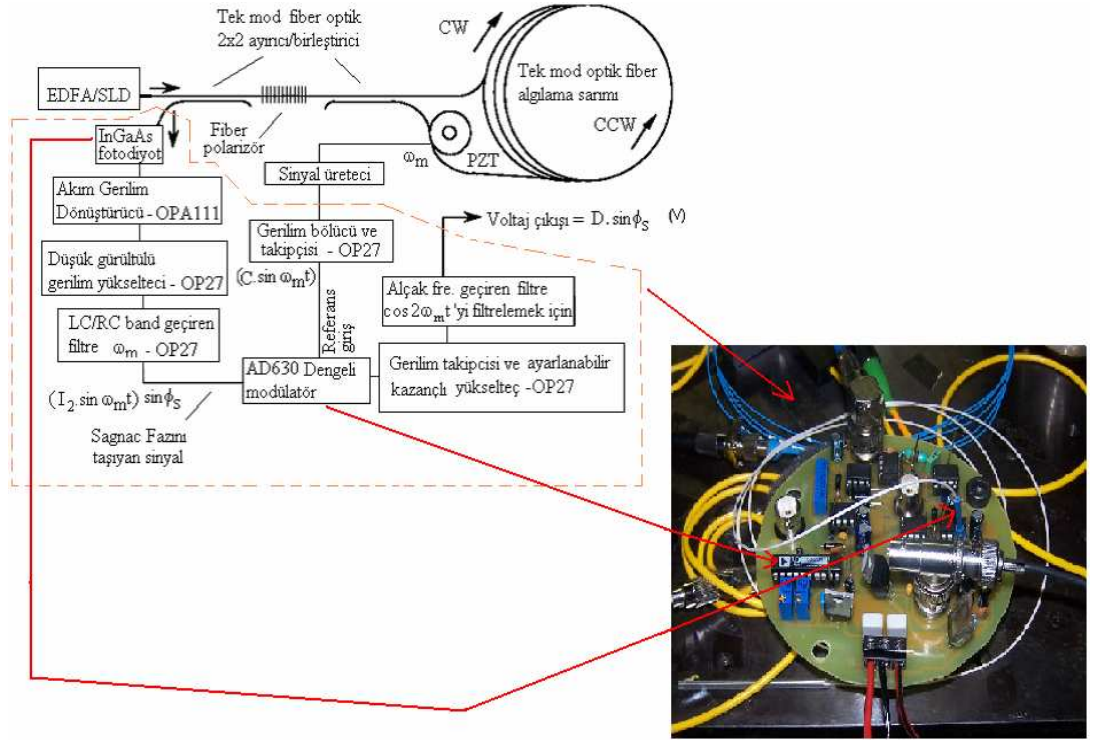
$$V_{\text{Sagnac}}(\phi_s) = \frac{\zeta \sin \phi_s}{2} \text{ (V)} \quad (5.25)$$

şeklinde elde edilir. Denklem (5.9) ve (5.10)'a bakıldığında açısal hız ile Sagnac Fazı'nın birbirlerine sadece sabit parametreleri ile bağımlı olduğu görülür. Açısal hızla orantılı DC V_{Sagnac} sinyali sinüs fonksiyonunun doğrusal bölgesi dahilinde kalmak koşulu ile açısal hıza bir dereceye kadar doğrusal biçimde bağımlıdır.

İlave olarak İFOJ prototipinin zaman sabitini doğrudan etkileyen Dinamik Faz İzleme Devresi'nin zaman sabiti alçak frekans geçiren filtreyi meydana getiren direnç ve kapasitörlerin bir fonksiyonudur. Dolayısıyla bu direnç ve kapasitör değerlerinin fazlaca yüksek seçilmesi filtre devresinin dalgalanma çarpanını düşürmesine rağmen prototipin zaman sabitini arttıracaktır. Artan zaman sabiti ile İFOJ prototipinin ani değişim gösteren açısal hızlara karşı tepki süresinin uzaması anlamına geldiğinden, alçak geçiren filtreyi oluştururken direnç ve kapasitans seçimlerinde optimizasyon yapılmalıdır. İFOJ prototipi için minimum tepki zamanı ise algılama sarımının uzunluğu olup bu da 1700 m'lik sarıma karşılık 8,5 µs olarak belirtilebilir [Çelikel, 2007].

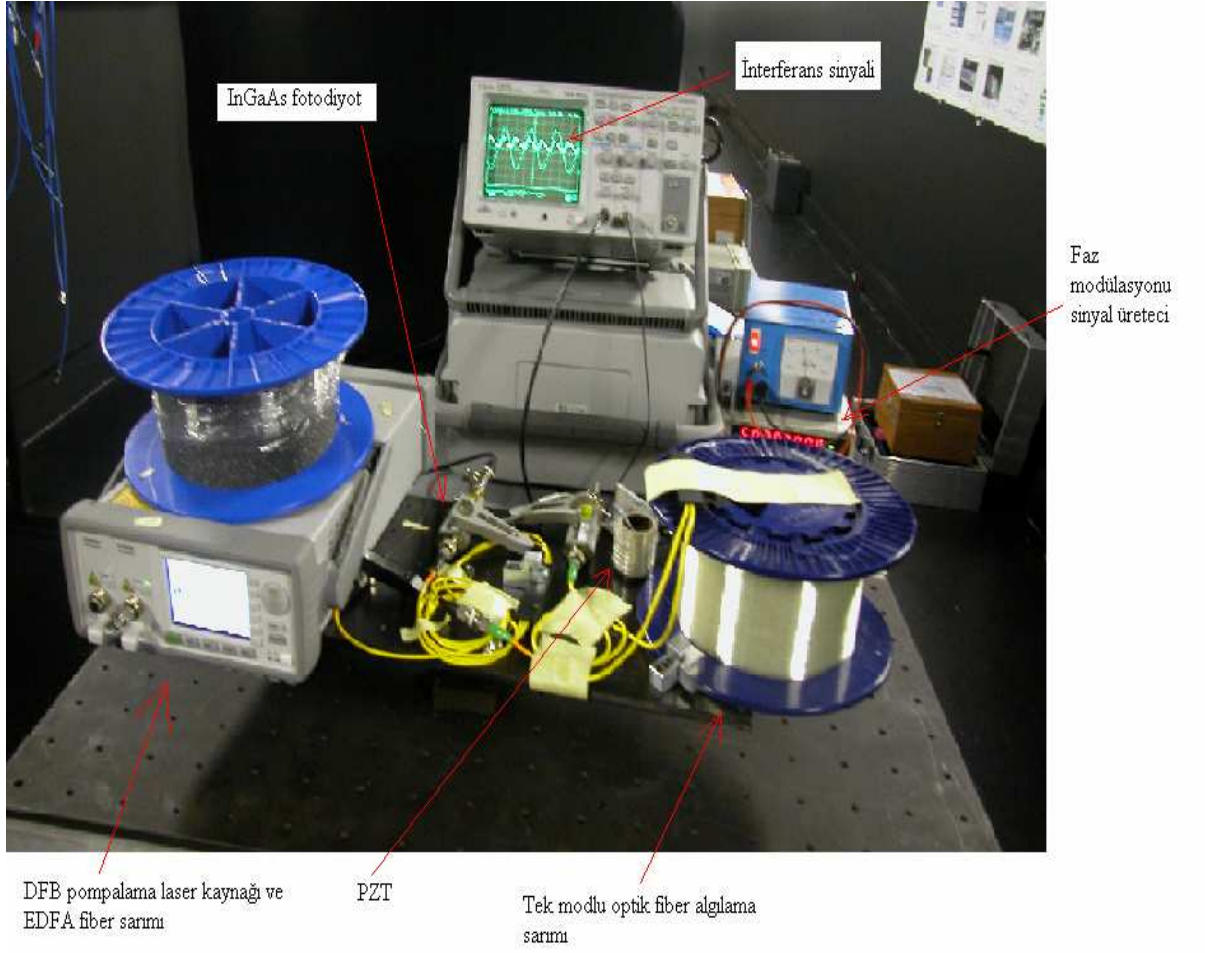
6. AÇIK-DÖNGÜ İFOJ PROTOTİPİNİN TASARIM DETAYLARI

Tasarımı TÜBİTAK UME Optik Laboratuvarı Fiber Optik Metroloji Bölümünde gerçekleştirilen açık-döngü fiber optik jiroskop prototipinin; algılama sarımı tek modlu optik fiber, 2 adet 2x2 (50/50 ayırma oranına sahip) fiber optik ayırıcı birleştirici, fiber polarizör ve EDFA/SLD türü düşük uyum uzunluğuna sahip optik ışıma kaynakları Açık-Döngü İFOJ prototipinin optik kısımlarını meydana getirirken, dinamik faz izleme devresi de elektronik kısmı meydana getirir. Prototipin ve oluşturulan faz izleme devresinin detayları Şekil 6.1.'de verilmiştir [Çelikel, 2007].

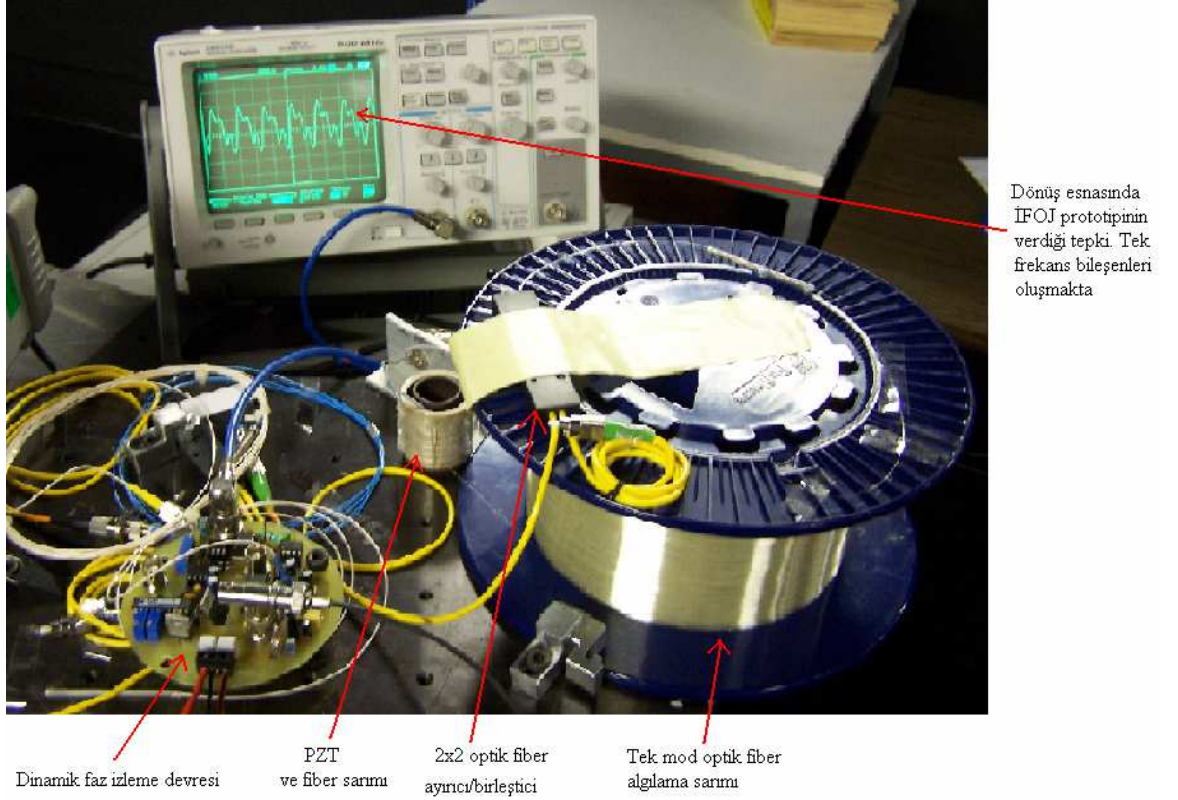


Şekil 6.1. İFOJ prototipinin optik ve elektronik bileşenler ile bazı elemanların dinamik faz izleme devresi üzerindeki yerleşimleri. OP27 ve OPA111 ilgili elektronik devre katında kullanılan operasyonel yükselteçlerin kodudur.

Şekil 6.2.'de ise İFOJ prototipinin ilk gerçekleştirildiği konfigürasyon gösterilmiştir. Bu durumda faz izleme devresi mevcut değildir.

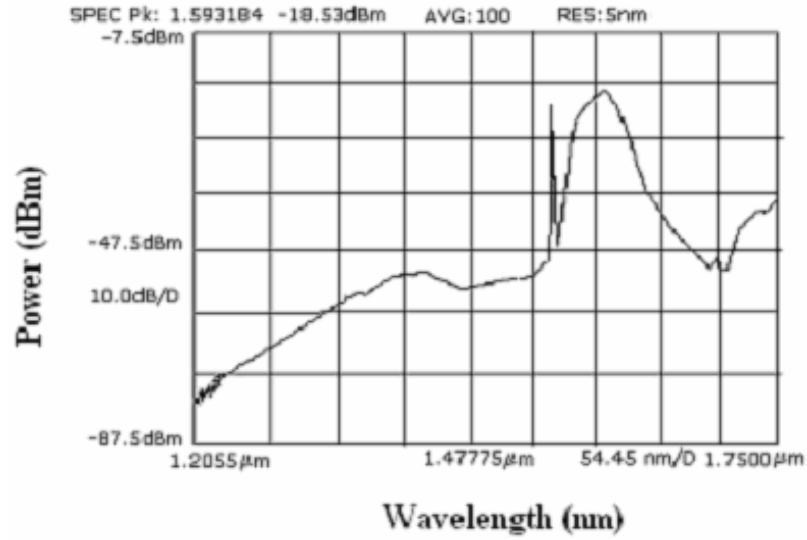


Şekil 6.2. İlk kurgulanan Açık-Döngü İFOJ prototipi. Dinamik Faz İzleme Devresi tasarımının tamamlanmamış olduğu durum.



Şekil 6.3. Dinamik faz izleme devresi oluşturulmuş halde Açık-Döngü İFOJ prototipi ve 10 cm çapa sahip Dinamik Faz İzleme Devresi'nin baskılı devreye aktarılmış hali.

Bu Doktora Tezi'nin konusu olan İFOJ protoipinde, iki tür elektromagnetik ışıyım kaynağı kullanılmıştır. Bunlar EDFA ve SLD (Superluminescent LED) kaynaklarıdır. İlk tasarımılanan İFOJ prototipte 1549,0 nm'de emisyonu sahip DFB lazer ile pompalanan EDFA fiber geniş bandlı ışıma kaynağı olarak kullanılmıştır. EDFA çıkışındaki genişbandlı yükseltilmiş spontane emisyon (Amplified Spontaneous Emission-ASE)'un tayfı Optik Tayf Analizör (Optical Spectrum Analyzer) cihazı ile gözlemlenmiş ve bu tayf Şekil 6.4.'de verilmiştir.



Şekil 6.4. İFOJ prototipinde optik ışıma kaynağı olarak kullanılan EDFA'nın genişbandlı ASE tayfı.

EDFA emisyonunun tepe değerinin 1593,0 nm'de ve yarı maksimumdaki tam genişliğinin de (FWHM), yaklaşık 45 nm olduğu görülmektedir. Bu tepe dalga boyu ve tayfsal genişliğe karşılık gelen geçici uyum uzunluğu da (temporal coherence) 56 μm'dir. EDFA 70 m uzunluğunda olup 25 mW'lık 1549,0 nm DFB lazer ile pompalandığında İFOJ prototipi fotodiyodu üzerinde elde edilen ASE güç seviyesi de yaklaşık 32 μW değerindedir [Çelikel, 2007]. Jiroskop uygulamalarında kullanılan EDFA'da yeralan Er^{+3} iyonlarının sebep olduğu ASE'e üzerine EDFA uzunluğunun, pompalama güç seviyesinin, pompalama tepe dalga boyunun ve diğer fiziksel parametrelerin etkileri [Hall et al, 1995]'de detaylı olarak tartışılmıştır.

Şekil 6.2. ve 6.3.'de görülen içi boş silindirik yapıdaki piezoelektrik transdüser (PZT) üzerine sarılgı algılama sarımı ile faz modülasyonu uygulanmıştır. PZT'nin radyal elastik gerilmeleri ile ve optik fiberin elastooptik özelliğinden ötürü, CW ve CCW yönde hareket eden elektromagnetik dalgalar için faz farkı oluşturulmuştur. Yeterli modülasyon derinliğine ulaşabilmek için PZT üzerindeki sarım sayısı bir kaç tur yapılmış ve silikon türü yapıştırıcı ile PZT üzerinde sabitlenmiştir. PZT'nin uygulanan sinüs biçimli elektriksel faz modülasyon ile CW ve CCW dalgalar için oluşturulan optik yol farkı 56 μm'den küçük olduğunda yapıcı interferans saçakları yüksek görünürlükle (high visibility) elde edilmiştir. Elde edilen interferans saçakları Şekil 5.4., 5.5a. ve 5.5b.'de görülmektedir ve Denklem

(5.8)'deki fonksiyona karşılık gelir. Üç adet titreşim moduna sahip olan PZT'yi faz modülatörü olarak kullanmadan önce bir RLC-metre (empedansmetre) rezonans frekansları belirlenmiş ve radyal rezonans frekansı yaklaşık 66 kHz olarak bulunmuştur [Çelikel, 2007].

Algılama sarımı içerisinde ilerleyen CW ve CCW dalgalar için Simetrik Optik Yol (SOY)'un bozulmaması amacıyla özdeş sayıda direkt geçiş/çapraz geçiş sayısını eşitlemek için iki adet 2x2 optik fiber ayırıcı birleştirici kullanılmıştır (Şekil 6.1 ve 6.3). Bu sayede CW ve CCW olarak belirtilen ışık dalgaları 2 tane direkt geçiş ve 2 tane çapraz geçiş yaparak izledikleri SOY'u bozmaksızın fotodiyoda ulaşırlar. İki ayırıcı/birleştirici arasında bir fiber optik polarizör kullanılarak sadece doğrusal polarize elektrik alanların fotodiyoda ulaşması sağlanmış ve polarizasyonun gelişigüzel değişiminden kaynaklanan ve Sagnac Fazını perdeleyen optik gürültünün önüne geçilmesi ve bu sayede yüksek kararlılık değerlerine ulaşılmasına olanak sağlamaktadır [Ulrich, 1980].

Şekil 6.1., 6.2. ve 6.3.'de gösterilen algılama sarımı, Corning firması tarafından imâl edilen SMF-28 model telekomünikasyon tipi tek modlu optik fiberdir. Sarımın uzunluğu kalibreli bir OTRD ile ölçülmüş ve 1700 olarak elde edilmiştir. Algılama sarımı olarak kullanılan optik fiber detayları [Culshaw, 2006]'da verilen simetrik dipolar tarzda sarılmıştır. Bu tip sarım metodu ile algılama sarımına etki etmesi muhtemel asimetric termal ve akustik şokların, simetrik olarak sarıma etki ettirilmesi sağlanarak kompanzasyon etkisi oluşturulmuştur [Culshaw, 2006].

İFOJ prototipinde maksimum optik sinyal, sinyal üreticinin 65,411 kHz frekansında elde edilmiştir. Bu değer de Denklem (5.10)'a uygulanadığında algılama sarımı optik fiberin geçiş zamanının $1/(2.65,411 \times 10^3)$ (sn) olmasına karşılık gelir. Bu geçiş zamanı da yaklaşık 1600 m'lik optik fiber uzunluğuna özdeştir (optik fiberin 1550 nm'deki kırılma indisi 1,47 için). OTDR ile ölçülen algılama sarımı uzunluğu 1700 m olup Denklem (5.10) ile uyumlu bir sonuç elde edilmiştir.

7. İNTERFEROMETRİK FİBER OPTİK JİROSKOP İÇİN PERFORMANS PARAMETRELERİ

Bu bölümde İFOJ prototipinin ölçek faktörünün belirlenmesi ile sabit kayma kararlılığının (uzun dönem kararlılık-long term stability) ölçümlerinden bahsetmeden önce, interferometrik fiber optik jirooskop sensör sistemleri için performansı belirleyen temel parametreler olan Ölçek faktörü (Scale Factor), Gürültü (Noise), Sabit Kayma Kararlılığı (Bias Stability /Bias Drift - Long Term Stability) parametreleri tarif edilecektir.

7.1. Ölçek Faktörü

Ölçek faktörü, mutlak açısal hız sensör sisteminin (fiber optik jirooskop, halka lazer jirooskop veya Coriolis sensörü) maruz kaldığı açısal hıza karşı verdiği voltaj cinsinden tepkinin ölçüsüdür ve $(^{\circ}/\text{saat})/V$ cinsinden tanımlanır. Denklem (4.11) ve (5.21). Üç boyutlu uzayda hareketli bir nesnenin gerçek zamanlı yer değiştirmesi hakkında bilgiye ulaşmak için o nesnenin bir orijine göre vektör temsilinin ve ilaveten bu vektörün zaman içinde hangi fonksiyon ile değiştiğinin bilinmesi gereklidir. Herhangi bir eksendeki ilgili vektör bileşeninin büyüklüğü, o eksen boyunca nesnenin ivmelenmesinin büyüklüğüne karşılık gelirken, nesnenin yönelim bilgisi de ilgili eksen veya eksenler ile yapılan açılarla tespit edilir.

Vektörün büyüklük bilgisi olan ivmelenme, ivmeölçer sensör elemanları ile elde edilir. Açı bilgisi ise yüksek kesinlikli frekans üreteçleri ile birlikte çalışan ve açısal hız bilgisini ölçek faktörü ile orantılı olarak DC voltaj cinsinden veren jirokoplar tarafından türetilir. Dolayısıyla $(^{\circ}/\text{saat})/V$ cinsinden ölçek faktörüne sahip jirokobun çıkışındaki voltaj, zaman üzerinden entegrasyona tâbi tutulduğunda, Sagnac Fazı esaslı ilgili eksene (veya eksenlere) göre toplam açısal yer değiştirme $(^{\circ})$ cinsinden elde edilmiş olur [Çelikel, 2007].

7.2. Gürültü

İyi şekilde tasarımılanmış bir interferometrik fiber optik jiroskop için, temel olarak üç gürültü kaynağı mevcuttur. Bu üç gürültü kaynağı interferometrik fiber optik jiroskop için $^{\circ}/(\text{saat})^{1/2}$ (bu da $(^{\circ}/\text{saat})/\text{Hz}^{1/2}$ 'e eşittir) cinsinden ifade edilen ve “gelişigüzel yürüme-random walk” adı verilen bir gürültü karakteristiğini oluşturur.

Bu üç gürültü kaynağı;

a-) Termal Gürültü

b-) Foton-Shot Gürültüsü

c-) Fazlalık Gürültü (Excess noise)

şeklinde verilir. Bu gürültü kaynaklarının jiroskop fotodiyodunda uyardıkları gürültü akımı şu şekilde yazılır;

$$\langle I_{\text{gürültü}}^2 \rangle = I_{\text{shot}}^2 + I_{\text{fazlalık}}^2 + I_{\text{termal}}^2 \quad (7.1)$$

7.2.1. Termal Gürültü

Fotovoltaik tarzda çalışan fotodiyodun algılayabilceği minimum optik güç seviyesi olarak tarif edilir Fotovoltaik tipteki fotodiyotların gürültü eşdeğer güç seviyesi (Noise Equivalent Power-NEP) olarak adlandırılır, birimi ise $(\text{pW}/\text{Hz}^{1/2})$ 'dir. Johnson gürültüsü olarak da bilinen Termal Gürültü, Boltzman sabiti ile fotodiyodun bulunduğu ortamın T sıcaklığının çarpımının bir fonksiyonudur Sıcaklık arttıkça fotodiyodun iç şönt direnci azalırken Johnson Gürültü Akımı (I_{termal}) da artar [Hamamatsu Product Catalogue, 1997].

$$I_{\text{termal}} = \sqrt{\frac{4kTB}{R_{\text{şönt}}}} \quad (7.2)$$

Burada k Boltzman sabiti, T (K) mutlak sıcaklık, B ölçüm band genişliği (gürültü band genişliği) ve $R_{\text{şönt}}$ (ohm) cinsinden ise fotodiyodun şönt direncidir. Fotodiyodun şönt direncinin sıcaklık ile gösterdiği değişime bağlanan Termal Gürültüye, Dinamik

Faz İzleme Devresi'nde kullanılan diğer aktif ve pasif devre elemanlarının sıcaklıkla değişen karakteristikleri de katkıda bulunur[Culshaw, 2006].

7.2.2. Foton-Shot Gürültüsü

Fotodiyod üzerine düşen optik akı, fotonların oluşturduğu istatistiksel bir topluluktur ve bu istatistiksel topluluktaki foton sayısı N, zaman içerisinde belirli bir standard sapma σ dahilinde gelişigüzel dağılım gösterir. Bir başka deyişle birim zamanda fotodiyot tarafından algılanan foton sayısı sabit değildir ve Poisson olasılık dağılımına uyar [Bergh et al, 1984]. Foton sayısındaki bu değişim fotodiyotta uyarılan fotoakımda Shot gürültüsü (beyaz gürültü - $I_{shot} = \sqrt{2e(I_{fotoakım} + I_{karanlık}).B}$) adı verilen [Hamamatsu Product Catalogue, 1997] ve foton sayısının standard sapmasıyla sınırlı bir aralıkta değişim gösteren gürültüye neden olur. Burada e, elektron yükü, $I_{fotoakım}$, fotodiyot üzerine düşen optik akının oluşturduğu fotoakım ve $I_{karanlık}$ ise şayet fotodiyod ters beslemeye maruz bırakılmışsa fotodiyodun üzerine hiçbir optik akı düşmediği durumda oluşan karanlık akımını ifade eder [Iwatsuki, 1991].

Foton akısının zaman içerisindeki gelişigüzel dağılımı tarafından indüklenen Shot gürültüsünü elde etmek için; T süresi içerisinde fotodiyodun üzerine düşen ortalama foton sayısı, ortalama foton enerjisini tek bir fotonun enerjisine bölerek elde edilebilir [Bergh et al, 1984];

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \bar{P}_0 T \quad (7.3)$$

tek bir fotonun enerjisi;

$$\epsilon = h\nu \quad (7.4)$$

Burada , $\bar{P}_0$ ortalama optik güç, h Planck sabiti ve ν optik frekanstır. Bu durumda fotodiyot üzerine düşen ortalama foton sayısı da;

$$\bar{N} = \frac{1}{2} \frac{\bar{P}_0 T}{h\nu} \quad (7.5)$$

olarak elde edilir. Burada T ölçümün gerçekleştirildiği zaman aralığıdır. Poisson olasılık dağılımına göre foton sayısındaki standard sapma ortalama foton sayısının karekökü ile orantılıdır;

$$\sigma = \sqrt{\langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2} = \sqrt{\bar{N}} \quad (7.6)$$

Bağıl sapma miktarı da Foton-Shot Gürültüsüne karşılık gelen faz gürültüsü olarak adlandırılır ve Denklem (5.1)'deki Sagnac Fazı için Foton-Shot Gürültüsünden kaynaklanan faz gürültüsü de;

$$\Delta\phi_{\min} = \frac{\sigma}{\bar{N}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{N}}} \quad (7.7)$$

ifadesi ile verilir. Denklem (7.5)'i de kullanarak söz konusu interferometrik fiber optik jiroskop için minimum algılanabilir açısal hız değeri [Bergh et al, 1984];

$$\Delta\phi_{\min} = \sqrt{\frac{2h\nu}{\bar{P}_0 T}} \quad (7.8)$$

olarak bulunur. Denklem (4.9)'dan da Sagnac Fazı'ndan açısal hız terimini türeterek, Denklem (7.8)'i söz konusu interferometrik jiroskobun algılayabildiği minimum açısal hız değerini verecek biçimde aşağıdaki gibi yazarız. Bu değer aynı zamanda teorik açısal hız limiti şeklinde adlandırılır ve Gürültüye Eşdeğer Dönme Hızı (Noise Equivalent Rotation Rate-NEΩ) olarak ta belirtilir;

$$\frac{\Omega_{\min}}{\sqrt{B}} = \frac{\lambda c_0}{8\pi A N} \sqrt{\frac{2h\nu}{\bar{P}_0 \eta}} \quad (^\circ/\text{saat})/\text{Hz}^{1/2} \quad (7.9)$$

Burada $B=1/T$ olup ölçüm sisteminin band genişliğidir [Bergh et al, 1984]. η , fotodiyodun kuantum verimi olup fotonun fotodiyod tarafından elektrona dönüştürülme verimini ifade eder. Bu Doktora Tezi'nin konusu olan İFOJ prototipi için, $\lambda = 1593 \text{ nm}$, $A=0,01766 \text{ m}^2$ (algılama sarımının yarıçapı 7,5 cm), $N=1062$ tur sarım, $c_0=3.10^8 \text{ m/s}$, $h=6,62.10^{-34} \text{ J.s}$, $\nu = 1,883.10^{15} \text{ Hz}$, fotodiyodun kuantum verimi $\eta \approx 1$ ve İFOJ prototipi fotodiyodu üzerine düşen optik güç $\bar{P}_0 = 32 \mu\text{W}$ olmak üzere, Foton Shot Gürültüsü eşiğindeki prototipin algılayabileceği minimum açısal hız değeri $0,001 (^\circ/\text{saat})/\text{Hz}^{1/2}$ olarak elde edilir. Bu değer 1 saniyelik örnekleme aralığına karşılık gelen $B=1 \text{ Hz}$ 'lik ölçüm band genişliği için hesaplanmıştır [Çelikel, 2007].

7.2.3. Fazlalık Gürültü

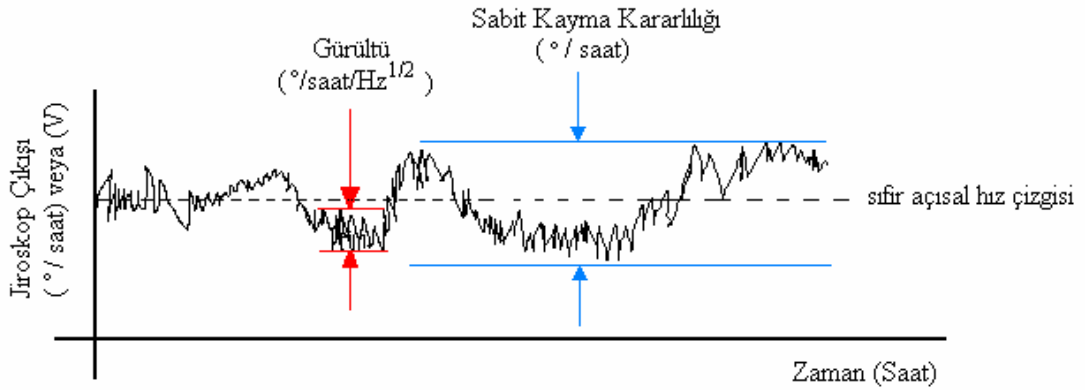
Bu tip gürültü kaynağı özellikle EDFA'tipi yükseltilmiş spontane emisyon (Amplified Spontaneous Emission-ASE) çıkışları optik ışıyım kaynağı olarak kullanılan interferometrik fiber optik jiroskop uygulamalarında etkindir. Özellikle $5 \mu\text{A}$ 'den yüksek fotoakım değerlerinde Fazlalık Gürültü (Excess Noise) olarak adlandırılan ve kaynağın tayfsal band genişliği ile orantılı olan gürültü etkili iken, $5 \mu\text{A}$ 'den düşük fotoakım değerlerinde ise termal gürültü (Johnson gürültüsü) etkilidir ve aşağıdaki formül ile verilir [Iwatsuki, 1991].

$$I_{\text{fazlalık}} = I_{\text{fotoakım}} \sqrt{\frac{B}{\Delta\nu}} \quad (7.10)$$

Burada yer alan $\Delta\nu$, Hz cinsinden optik ışıyım kaynağının tayfsal frekans genişliği $\Delta\nu = c.\Delta\lambda/\lambda^2$ ve B elektronik band genişliğidir [Iwatsuki, 1991]. Denklem (7.10)'dan şu önemli sonuca ulaşılır; kullanılan ışıyım kaynağının $\Delta\lambda$ tayfsal band genişliği arttırıldıkça, Fazlalık Gürültü akım değeri düşer ve jiroskobun Gürültüye Eşdeğer Dönme Hız değerini azaltılır. Yani interferometrik fiber optik jiroskop daha düşük hızları algılama duyarlılığına daha büyük tayfsal band genişliği ile ulaşır.

7.3. Sabit Kayma Kararlılığı (Bias Stability / Bias Drift)

İnterferometrik jiroskop (halka lazer jiroskop veya fiber optik jiroskop) için Sabit Kayma Kararlılığı parametresi ile gürültü kaynaklı “Gelişigüzel Yürüme” (Random Walk) parametresi birbirine karıştırılmamalıdır. İnterferometrik jiroskop herhangi bir açısal hıza maruz kalmadığı durumda bile gelişigüzel ve sınırlı bir şekilde DC çıkış üretir. Bu DC çıkış sıfır açısal hız (null rotation rate) değerinin etrafında salınım yapar. Sıfır açısal hız değerinin etrafındaki bu pozitif ve negatif yönlü salınıma Sabit Kayma Kararlılığı adı verilir ve ($^{\circ}/\text{saat}$) cinsinden ifade edilir. Gürültü kaynaklı “Gelişigüzel Yürüme” (Random Walk) zaman ekseninde daha küçük zaman dilimleri için değerlendirilirken, Sabit Kayma Kararlılığı parametresi interferometrik jiroskobun uzun süreli ölçümleri ile değerlendirilir ve Uzun Dönem Kararlılığı (Long Term Stability) olarak adlandırılır. Şekil 7.1., Gürültü ve Sabit Kayma Kararlılığı arasındaki farkı açıklamada anlamlıdır.



Şekil 7.1. İnterferometrik jiroskopta Gürültü (Noise) ve Sabit Kayma Kararlılığı (Bias Stability / Bias Drift).

İnterferometrik fiber optik jiroskobun pozitif ve negatif yönlerde sıfır açısal hız çizgisinin etrafındaki bu salınımı, temelde üç ana etki tarafından şekillendirilir ve bu üç ana etki algılama sarımının fiziksel niceliklerinin değişmesine neden olarak interferometrik fiber optik jiroskobun Sabit Kayma Kararlılığını etkiler. Bu etkiler Doğrusal olmayan Kerr Etkisi, Magnetooptik Faraday Etkisi, ve Shupe Etkisi olarak belirtilebilir. Ayrıca faz modülasyonundaki kaymalarda Sabit Kayma Kararlılığını etkilese de bu üç ana etki interferometrik fiber optik jiroskobun uzun dönem

kararlılığını belirlemede baskın olup doğrudan algılama sarımını etkileyen faktörler olarak ortaya çıkar.

7.3.1. Doğrusal Olmayan Kerr Etkisi

Uzun dönem kararlılığı veya bir başka deyişle Sabit Kayma Kararlılığını belirleyen ana parametre Doğrusal Olmayan Kerr Etkisidir (Nonlinear Kerr Effect). İnterferometrik fiber optik jiroskop konfigürasyonunda kullanılan 2 adet %50 / %50 ayırma oranına sahip optik fiber ayırıcı/birleştirici için bu ayırma oranı tam anlamıyla %50 / %50 değildir. Yani bir koldaki optik güç seviyesi diğer koldakinden az da olsa farklılık gösterir. Dolayısıyla algılama sarımı içerisinde göreceli olarak küçükte olsa meydana gelen bu optik güç dengesizliği, CW ve CCW olarak hareket eden ve Sagnac Fazını oluşturan ışınım demetleri için algılama sarımının kırılma indeksinin farklılaşmasına neden olur. Algılama sarımı optik fiberin kırılma indisindeki bu farklılaşmadan kaynaklanan ve CW ve CCW ışınım dalgaları için SOY'da bozulmalar meydana gelir. SOY'daki bu bozulmalar ise faz düzensizlikleri oluşturur [Lefevre, 1993]. Kerr tarafından indüklenmiş faz kaymasını değerlendirmek için 633 nm'de şu formülü [Lefevre, 1993] göz önünde tutmak gereklidir:

$$\Delta\phi_K / L \Delta P \approx 2 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot \mu\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1} \quad (7.11)$$

Burada L, algılama sarımının uzunluğu, ΔP , optik fiber ayırıcı/birleştiricinin ayırma oranındaki sapmadan kaynaklanan iki kol arasındaki optik güç farkı ve $\Delta\phi_K$ ise Kerr Etkisi tarafından indüklenen fazdaki kaymadır. Bu ifadeye bakıldığında sarımın uzunluğu ve optik güç farkı arttıkça Kerr Etkisi kaynaklı faz kayması artacak bu da interferometrik fiber optik jiroskobun uzun dönem kararlılığının kötüleşmesine karşılık gelecektir. 10^{-5} rad'lık faz kayması göreceli olarak küçük olarak düşünülebilir. Ancak bu Doktora Tezi'nin konusu olan İFOJ Prototipi için gerçekleştirilen Sabit Kayma Kararlılığı ölçümünden elde edilen sonuç ile bu sonuç karşılaştırıldığında Kerr Etkisinin uzun dönem kararlılığı belirleyen önemli parametrelerin başında geldiği gözükmemektedir. Son dönem fiber optik jiroskop

uygulamalarında Boş-Özlü Fotonik Band Aralıklı Fiberlerin (Hollow – Core Photonic Band Gap Fiber) Kerr Etkisinin indirgenmesinde etkin olarak rol oynadığı görülmektedir.

7.3.2. Magnetooptik Faraday Etkisi

Tek modlu optik fiber içerisinde yayılım gösteren elektromagnetik dalga, dairesel veya daha doğru söyleyle eliptik polarize yapıdadır. Bunu nedeni, optik fiber öz katmanı kusursuz bir silindirik yapıya sahip değildir ve içerisinde bazı safsızlıkların bulunması olasıdır. Ayrıca bir makara üzerine algılama sarımı olarak kullanılmak üzere sarıldığında, simetrik olmayan eğilme ve bükülmelerin neden olduğu gerilmelere maruz kalır. Bu bahsedilen fiziksel gerilmelerden ve doğasında var olan kusursuz imâl edilememe etkenlerinden ötürü, algılama sarımı optik fiber boyunca düzensiz bir çift-kırma (birefringence) değişimi söz konusudur ve aslında dielektrik dalga kılavuzu optik fiberin anizotropisini ifade eder. Bu düzensiz çift-kırma özelliğinden ötürü birbirine dik iki polarizasyon alan bileşeni arasında faz gecikmeleri meydana gelir ki bu durum E elektrik alan vektörünün optik fiber boyunca dönmesine neden olur.

Magnetooptik Faraday Etkisi; n kırılma indisine sahip ortam içerisinde yayılım gösteren dairesel veya eliptik polarize elektromagnetik dalganın fazının, bir dış B magnetik alan etkisiyle, ortamın (V) Verdet Sabitiyle, orantılı şekilde değişim göstermesi olarak tarif edilir ve Verdet Sabiti dalga boyuna bağlı bir parametredir [Lefevre, 1993]. Ortamın n kırılma indisinin dış magnetik alan etkisinde değişim göstermesi, bu ortamı oluşturan atomların çekirdekleri etrafında kararlı yörüngelerde bulunan elektronlarının açısal momentumlarının, sağ ve sol dairesel (veya eliptik) polarize elektromagnetik dalgalar ile etkileşerek presesyon hareketi yapmasının sonucudur [Spears, 2003];

$$V = \frac{e}{2mc} \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (7.12)$$

Burada, e elektron yükü, m elektronun kütlesi, c vakum için ışık hızı, λ dalga boyu ve n kırılma indisidir [Spears, 2003]. Magnetooptik Faraday Etkisi tarafından indüklenen sağ / sol eliptik (dairese) polarize alanlar arasındaki faz kayması da;

$$\Delta\phi_F = 2VBL \quad (7.13)$$

şeklinde verilir. Burada V , rad/(T.m) cinsinden Verdet Sabiti, B (T) cinsinden dış magnetik alan (yeryüzünün magnetik alanı) ve L , (m) cinsinden optik yoldur [Lefevre, 1993]. Deneyler, 0,5 G (5×10^{-5} T) yeryüzünün magnetik alanından kaynaklanan Faraday Magnetooptik Etkisi tarafından indüklenmiş faz kaymasının oluşturduğu Sabit Kaymanın, yeryüzünün açısal hızı 15 ($^{\circ}$ /saat) değerinin oluşturduğu Sagnac Fazına eşdeğer olduğunu göstermiştir [Lefevre, 1993]. Tek modlu optik fiber içerisinde doğrusal veya dairese polarize yayılımdan ziyade eliptik polarizasyondan bahsetmek daha doğru olur. Çünkü kusursuz bir geometrik yapıda olmayan öz katmanının enine kesiti ideal bir silindirden ziyade elips (oval) biçimlidir ve bu durum sağ ve sol dairese polarize elektromagnetik dalgalar yerine sağ ve sol eliptik polarize dalgaların üretilmesine yol açar. Yani bir başka deyişle tek modlu optik fiber iki polarize alan bileşeni için geciktirme levhası gibi davranarak birbirine dik elektrik alan vektörleri arasında geliş güzel tarzda faz farkı meydana getirir (Fark Grup Hızı). Doğrusal polarize alan bileşenleri ise Polarizasyon Koruyan (PK) optik fiberler için söz konusudur ve PK tipteki optik fiber geometrileri için de az da olsa artık eliptik polarize alan bileşenlerinin optik fiber içerisinde yayılımı mevcuttur [Loukianov, 1999]. Bir başka deyişle, geleneksel yapıdaki tek modlu optik fiberlerde sağ/sol eliptik polarize alan bileşenleri PK fiberlere göre çok daha yüksek orandadır ve dolayısıyla algılama sarımı bu tip tek modlu optik fiberden oluşturulmuş interferometrik fiber optik jiroskoplar dış magnetik alana, yüksek oranda doğrusal alan bileşenine sahip PK fiberden oluşturulmuş jiroskoplara göre daha fazla duyarlıdır. Ayrıca iki ortogonal alan bileşeni arasındaki zayıflatma oranı yüksek PK fiberlerde, magnetik alana karşı duyarlılık daha da azdır ve bu durum Faraday Etkisi tarafından indüklenen jiroskobun Sabit Kaymasını da azaltır [Hotate and Tabe, 1987].

Doğrusal polarize alan, sağ ve sol dairese polarize iki alanın üst üste gelmiş hali olarak ifade edilebilir. Dolayısıyla iki ortogonal alan bileşeni arasındaki

zayıflamanın fazla olduğu PK fiberler için artık eliptik polarize alan miktarı azalacağından dış magnetik alana karşı daha duyarsız bir algılama sarımı oluşturulması mümkün olacaktır. Algılama sarımının Faraday Etkisi nedeniyle oluşan Sabit Kaymasının indirgenebilmesindeki bir diğer metotta algılama sarımının μ -metal adı verilen metal yapı ile ekranlanmasıdır [Lefevre, 1993]. İFOJ prototipinde Faraday Etkisinden kaynaklanan indüklenmiş Sabit Kayma'nın minimize edilmesi için algılama sarımı bakır levhadan oluşan metal kılıf içerisine yerleştirilmiş ve ölçümler bu şekilde alınmıştır. Bu sayede Magnetooptik Faraday Etkisinden kaynaklanan Sabit Kayma minimize edilmiştir.

Ayrıca Boş-Özlü Fotonik Band Aralıklı Fiberlerin (Hollow –Core Photonic Band Gap Fiber) de algılama sarımı olarak fiber optik jiroskoplarda kullanımı Sabit Kaymayı indirger. Çünkü bu tip fiberlerde öz katmanını hava ortamı oluşturur ve havanın Verdet Sabiti silikaya göre ortalama teorik olarak 200 kat daha küçüktür. Ancak bu yapıdaki fiberler için tayfsal zayıflamanın oldukça yüksek olduğu ve diğer uygulama zorluklarının var olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır.

7.3.3. Shupe Etkisi

İnterferometrik fiber optik jiroskopta algılama sarımı olarak kullanılan optik fiberin bulunduğu dış ortamın sıcaklık değişiminden dolayı,

i-) öz / yansıtıcı katmanının enine kesitinde,

ii-) uzunluğunda

termal genişlemeler ile büzüşmeler söz konudur.

İlave olarak bu etkilerin doğuracağı mekanik baskılardan ötürü elastooptik yolla ve sıcaklık değişiminin de doğrudan oluşturacağı

iii-) kırılma indisinde değişimler

mevcuttur ve bu değişimler de optik fazda ($\phi = \frac{2\pi n}{\lambda} L$) değişimlerine karşılık gelir

[Dangui et al, 2005]. Sıcaklığa (Shupe Etkisi) bağlı olarak meydana gelen bağlı optik faz değişimi;

$$S = \frac{1}{\phi} \frac{d\phi}{dT} \quad (7.14)$$

$$S = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} = S_L + S_n \quad (7.15)$$

$$\Delta\phi_{\text{shupe}} = \frac{2\pi n}{\lambda} L S \quad (7.16)$$

şeklinde yazılabilir [Dangui et al, 2005]. Burada S Shupe Katsayısı'dır ve (ppm/°C) cinsinden optik fazda kaymaya karşılık gelir. Shupe Etkisi ile indüklenen Sabit Kaymayı indirmek için algılama sarımı termal olarak dış ortamdan yalıtılmalıdır. Ayrıca hem termal ve hem de ilave olarak akustik geçici şoklardan oluşabilecek faz kayma etkilerini azaltabilmek için algılama sarımı Simetrik Dipolar veya quadrupolar tarzda sarım tekniğiyle sarılmış olmalıdır [Culshaw, 2006]. Shupe Etkisini azaltmanın bir başka yöntemi de yine Kerr ve Faraday Etkisinde olduğu gibi Shupe Katsayısı daha küçük hava ortamında iletim sağlayan Boş-Özlü Fotonik Band Aralıklı Fiberlerin (Hollow – Core Photonic Band Gap Fiber) algılama sarımı olarak kullanımıdır.

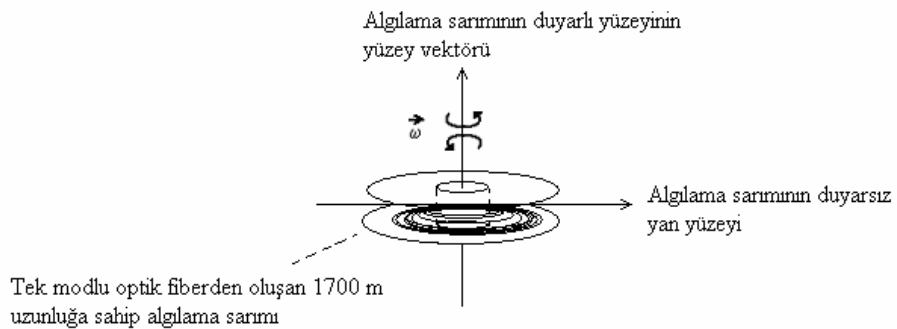
Silikaya göre havanın doğrusal olmayan bu fiziksel etkilere karşılık gelen katsayıları çok daha küçüktür. Bu nedenden dolayı Boş-Özlü Fotonik Band Aralıklı Fiberlerin (Hollow –Core Photonic Band Gap Fiber) kullanımı algılama sarımında uygun görülebilir. Ancak geleneksel yapıdaki optik fiberlere kıyasla oldukça yüksek tayfsal zayıflatmaya sahip olmaları, uygulanmasındaki ve yayılım gösteren elektromanyetik alanın polarizasyonunun korunmasındaki zorlukların ve ilaveten maliyetinin de göz önünde bulundurulması gereklidir.

8. AÇIK-DÖNGÜ İFOJ PROTOTİPİNİN ÖLÇEK FAKTÖRÜ İLE SABİT KAYMA KARARLILIĞI ÖLÇÜMLERİ VE SONUÇLAR

Bu bölümde, TÜBİTAK UME Optik Laboratuvarı Fiber Optik Bölümünde tasarımı gerçekleştirilen ve bu Doktora Tezinin konusu olan açık-döngü İFOJ prototipinin Sabit Kayma Kararlılığı ile (°/saat)/mV cinsinden Ölçek Faktörünün belirlenmesi için yapılan ölçümlere dair detaylar ve sonuçları sunulmuştur.

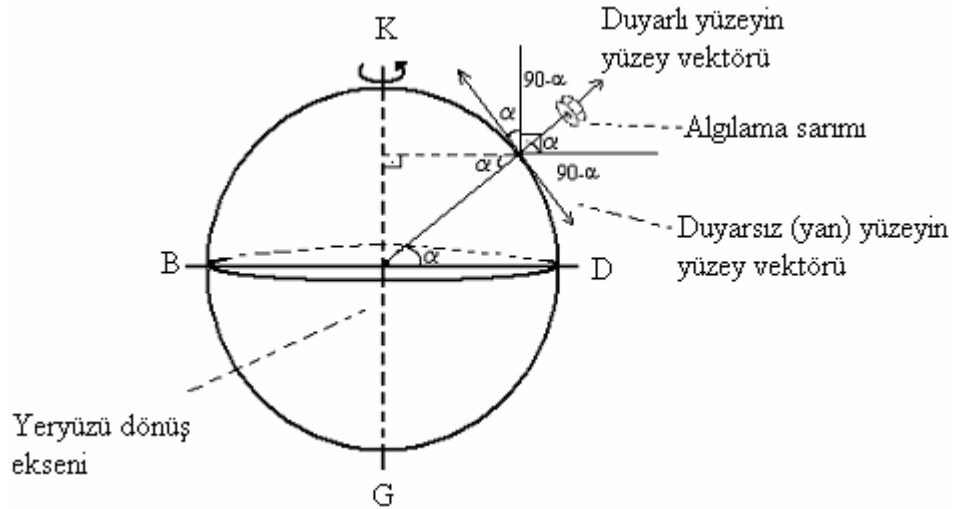
8.1. Açık-Döngü İFOJ Prototipinin Ölçek Faktörünün Belirlenmesi

İlk olarak, WGS (World Geodesic System)'e göre $4,178074 \times 10^{-3}$ (°/s) (15,041 °/saat) açısal hızla dönmekte olan yeryüzünün İFOJ prototipinde ofset olarak oluşturacağı yaklaşık $2,44 \times 10^{-4}$ (rad) (bu da $1,4 \times 10^{-2}$ °'ye eşittir) Sagnac Fazı'nı ortadan kaldırmak için, ölçümün gerçekleştirildiği Gebze ilçesinin enlemsel açısı (latitude), coğrafi bilgi sağlayan uydu verilerinden $\alpha = 40,8^\circ$ olarak elde edilmiştir [Çelikel, 2007] ve [Arnaudov and Angelov, 2005]. Dolayısıyla hem Sabit Kayma Kararlılığı ve hem de Ölçek Faktörünün belirlenmesi ölçümlerinden önce algılama sarımının açısal hıza duyarlı yüzeyinin yüzey vektörü yeryüzünün dönüş eksenine dik konuma getirilerek bu ofset ortadan kaldırılmıştır [Çelikel, 2007]. Zaten Denklem (4.9)'dan bu görülmektedir.



Şekil 8.1. Algılama sarımının açısal hıza duyarlı ve duyarlı yüzeyleri.

Şekil 8.1.'de algılama sarımının açısal hızla duyarlı yüzey vektörü gösterilmiştir. Açısal hız eksenini algılama sarımının duyarlı yüzeyinin yüzey vektörüne paralel olduğunda en yüksek tepkiyi üretir, Denklem (4.9). Dolayısıyla açısal hızın var olduğu eksen algılama sarımının duyarlı yüzeyinin yüzey vektörüne dik durumda iken Denklem 4.9'daki $\vec{A}$ alanı ve $\vec{\Omega}$ açısal hız arasındaki skaler çarpım sıfıra gittiğinden İFOJ prototipi üzerine yeryüzünün dönmesinden kaynaklanan Sagnac Fazı katkısı binmeyecektir. Bunu ofsetin ortadan kaldırılması için İFOJ Prototipinin monte edildiği, açısal hızı 0,02 (°/saat) doğrulukla ayarlanabilen ve servo motor ile sürülen döner platformun kuzeyden güneye doğru $\alpha = 40,8^\circ$ 'lik açıyla eğilerek, algılama sarımının duyarlı yüzeyinin yeryüzü dönüş eksenine dik olması sağlandı. Bu konumlandırma Şekil 8.2.'de gösterilmektedir [Çelikel, 2007].



Şekil 8.2. Ölçek Faktörü ve Sabit Kayma Kararlılığı ölçümlerinden önce yeryüzü açısal hızından dolayı İFOJ Prototipi üzerinde uyarılan ofset Sagnac Fazı'nın ortadan kaldırılması için algılama sarımının yeryüzü dönüş eksenine dik şekilde konumlandırılması [Çelikel, 2007].

Kuzeyden itibaren algılama sarımının bu şekilde gerçek zamanlı olarak eğimlendirilmesi ve İFOJ prototipindeki kaymanın da gerçek zamanlı olarak izlenerek sıfır dönüş (null rotation) değerine ulaşıldığı açı değerinin elde edilmesi, İFOJ prototipinin “kuzey bulucu” (North Finder) olarak işlev görmesine olanak verir. Yeryüzünün coğrafik kuzey doğrultusunun jiroskop yardımıyla bulunması işlemi için üç eksene yerleştirilecek üç adet jiroskoba ihtiyaç duyulurken, bir tane de jiroskobun

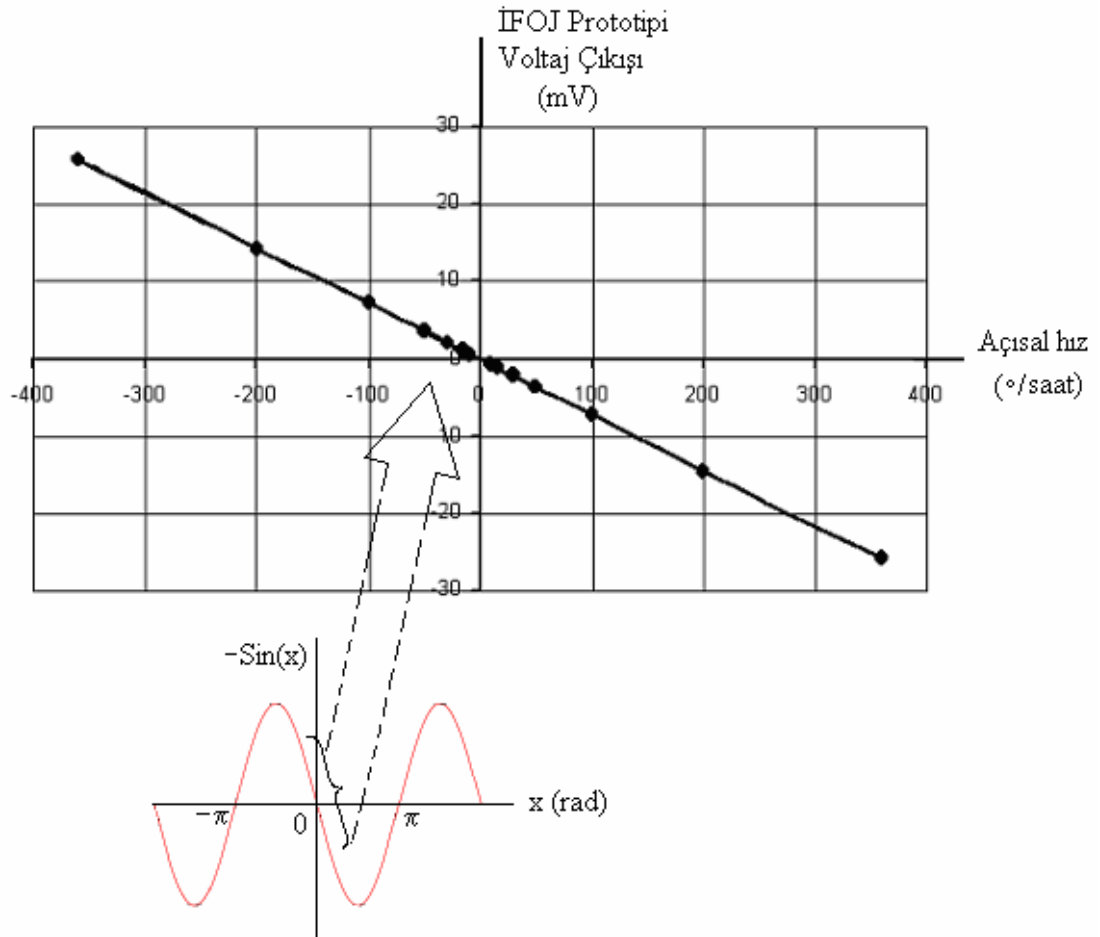
yataylık bilgisinin elde edilmesi için ya doğrudan yerel kütle çekim vektörü g 'yi m/sn^2 cinsinden ölçen ivme ölçere ya da daha basit yapıda elektrolit sıvı içeren mekanik göstergeli bir aparata ihtiyaç duyulur. İlave olarak bu tip bir kuzey bulucu sistemin oluşturulmasında kullanılacak olan jiroskopların da yeryüzü dönüş hızından en az 100 kat daha iyi bir doğruluğa (Sabit Kayma Kararlılığına) sahip olması gereklidir (0,1 (°/saat) veya daha düşük) [Gaiffe et al, 2000].

İFOJ Prototipi bu konumlandırma durumundayken (°/saat)/ mV cinsinden Prototipin Ölçek Faktörünün (Duyarlılık = 1 / Ölçek Faktörü) elde edilmesi için servo motorlu döner platform (açısal hız doğruluğu 0,02°/saat), sırasıyla 360 (°/saat), 200 (°/saat), 100 (°/saat), 50 (°/saat), 30 (°/saat), 15 (°/saat) ve 10 (°/saat)'lik açısal hızlarda CW ve CCW yönlerinde eşit açısal hızlarda hareket ettirilerek, detayları Bölüm 5.3.1'de verilen ve Şekil 6.1.'de gösterilen Dinamik Faz İzleme Devresi'nden bu açısal hızların oluşturduğu Sagnac Fazı'na karşılık gelen DC voltaj çıkışları elde edildi. Açık-Döngü İFOJ prototipinin açısal hıza tepkisini DC voltaja çeviren Dinamik Faz İzleme Devresi'nin çıkışı 8½ basamaklı sayısal voltmetre örneklendi. Örnekleme hızı 1 (örnekleme/saniye) olmak üzere her bir voltaj verisi 70 adet örneklenmiş sinyalden oluşmuştur. (°/saat) açısal hızına karşı (V) voltaj çıktısı da Çizelge 8.1.'de verilmiştir.

Çizelge 8.1. Açık-Döngü İFOJ Prototipi Ölçek Faktörünün belirlenmesine dair sonuçlar.

Dönüş Yönü	Açısal Hız Ω , (°/saat)	Karşı Gelen Sagnac Fazı, ϕ_s (°)	V_{demod} (mV)	İFOJ Prototipi Duyarlılığı, (V/(°/saat))
CW	360	0,454780233	25,646964	0,07402
CCW	360		-26,991115	-0,07498
CW	200	0,252655685	14,371833	0,07186
CCW	200		-14,617032	-0,07309
CW	100	0,126327842	7,226001	0,07294
CW	100		7,201644	
CW	100		7,454475	
CCW	100		-7,900544	-0,07420
CCW	100		-7,23934	
CCW	100		-7,119189	
CW	50	0,063163921	3,498666	0,07233
CW	50		3,555392	
CW	50		3,794951	
CCW	50		-3,619915	-0,07242
CCW	50		-3,72426	
CCW	50		-3,518756	
CW	30	0,037898353	2,208235	0,07237
CW	30		2,174221	
CW	30		2,131035	
CCW	30		-2,241873	-0,07435
CCW	30		-2,317414	
CCW	30		-2,132304	
CW	15	0,018949176	1,25386	0,07763
CW	15		1,026692	
CW	15		1,212989	
CCW	15		-1,387329	-0,07717
CCW	15		-0,98451	
CCW	15		-1,101009	
CW	10	0,012632784	0,743716	0,07394
CW	10		0,724612	
CW	10		0,749838	
CCW	10		-0,778541	-0,07570
CCW	10		-0,71609	
CCW	10		-0,77642	

Çizelge 8.1.'de ($^{\circ}$ /saat) cinsinden İFOJ Prototipine uygulanan açısal hız değerlerinin, prototipin Dinamik Faz İzleme Devresi üzerinden elde edilen voltaj değerlerine bölünmesi ile ortalama duyarlılığı $\% 0,73$ 'lük bir bağıl standard sapma ile $72 \mu\text{V}/(^{\circ}/\text{saat})$ olarak hesaplanmıştır. Bu ortalama duyarlılığa karşı gelen Ölçek Faktörü ise $13,83 (^{\circ}/\text{saat})/\text{mV}$ 'tur [Çelikel, 2007].



Şekil 8.3. Açık-Döngü İFOJ Prototipinin açısal hıza verdiği tepki.

Denklem (5.21)'de verilen sinüs fonksiyonunun bir dereceye kadar doğrusal kısmı, Şekil 5.3.'de gösterilen grafik Açık-Döngü İFOJ Prototipinin uygulanan açısal hıza tepkisi olarak elde edilmiştir [Çelikel, 2007].

8.2. Açık-Döngü İFOJ Prototipi Sabit Kayma Kararlılığı Ölçümü

Açık-Döngü İFOJ Prototipinin uzun dönem kararlılığını gösteren Sabit Kayma parametresi, Bölüm 7.3.'de detayları verilen Doğrusal Olmayan Kerr Etkisi, Magnetooptik Faraday Etkisi, Shupe (Termal Etki) Etkisi ile Dinamik Faz İzleme Devresi'nde mevcut olan diğer tüm elektriksel kaymalar ile optik kaymalardan meydana gelir. İFOJ Prototipinin Sabit Kayma değerinin azaltılabilmesi için, Dinamik Faz İzleme Devresi iyi şekilde ekranlanıp, topraklanmış ve kararlı ± 15 V DC gerilim kaynağı ile beslenmiştir. Ayrıca devrenin tasarımında kullanılan aktif devre elemanları düşük akım-gerilim kayması ve gürültü karakteristiğine sahip bileşenlerden oluşturulmuş ve yüksek kesinlikli pasif devre elemanları kullanılmıştır. Optik kısımda ise kullanılan fiber polarizör Sabit Kayma'ya polarizasyonun katkısını azaltmıştır. Fiberli InGaAs fotodiyodun düşük sıcaklık bağımlılığı ve algılama sarımının duyarlı yüzeyinin yüzey vektörünün de yeryüzü dönüş eksenine dik konuma getirilmesi de yeryüzünün İFOJ Prototipi üzerinde oluşturacağı Sagnac Fazını ortadan kaldırmış ve bu sayede Prototipin Sabit Kaymasını etkileyen dış faktörler azaltılmıştır [Çelikel, 2007]. İFOJ prototipinin Sabit Kayma Kararlılığı ölçümü 5 saat süresince Dinamik Faz İzleme Devresi'nin çıkışını 8 ½ basamaklı sayısal voltmetre örneklenmesiyle elde edilmiştir. Ölçümlere başlanmadan evvel prototip laboratuvar ortamında 2 saat süre ile şartlandırılmıştır. Örneklemme hızı 1 (örneklemme/saniye) olmak üzere her bir voltaj verisi 100 adet örneklenmiş sinyalden oluşmuştur. Ölçüm sayısına karşı ($^{\circ}$ /saat) cinsiden İFOJ Prototipi'nin Sabit Kayma Kararlılığı'na ait veriler Çizelge 8.2.'de sunulmuştur.

Çizelge 8.2. Açık-Döngü İFOJ Prototipi için Sabit Kayma Kararlılığı sonuçları.

Ölçüm Sayısı	İFOJ Prototipi'nin Sabit Kaymasına Karşılık Gelen Voltaj Çıkışı (mV)	Sabit kaymaya Karşılık Gelen Açısal Hız (°/saat) Ölçek Faktörü= 13,83 (°/saat)/mV
1	-129,108084	2,388735
2	-129,106477	2,366510
3	-128,994137	0,812848
4	-128,845982	-1,236135
5	-129,104027	2,332627
6	-129,006200	0,979680
7	-128,807855	-1,763432
8	-128,870942	-0,890939
9	-128,815596	-1,656374
10	-128,694883	-3,325835
11	-128,899772	-0,492220
12	-129,016953	1,128394
13	-128,91564	-0,272765
14	-128,969872	0,477263
15	-128,977666	0,585054
16	-129,061902	1,750038
17	-128,985462	0,692873
18	-129,090601	2,146945
19	-129,142529	2,865110
20	-128,870176	-0,901532
21	-128,980979	0,630873
22	-129,089235	2,128054
23	-129,015341	1,106100
24	-129,030602	1,317159
25	-129,131882	2,717862
26	-129,059885	1,722143
27	-129,094528	2,201256
28	-129,043567	1,496465
29	-128,762228	-2,394456
30	-128,651199	-3,929984
31	-128,600656	-4,628994
32	-128,726388	-2,890120
33	-128,855878	-1,099274
34	-128,773753	-2,235062
35	-129,115946	2,497467
36	-128,758698	-2,443273
37	-129,270624	4,636663
38	-128,973571	0,528420
39	-129,082679	2,037384
40	-129,316318	5,268611
41	-129,183929	3,437672
42	-129,138513	2,809568
43	-128,957564	0,307044
44	-129,025381	1,244953
45	-129,054117	1,642372

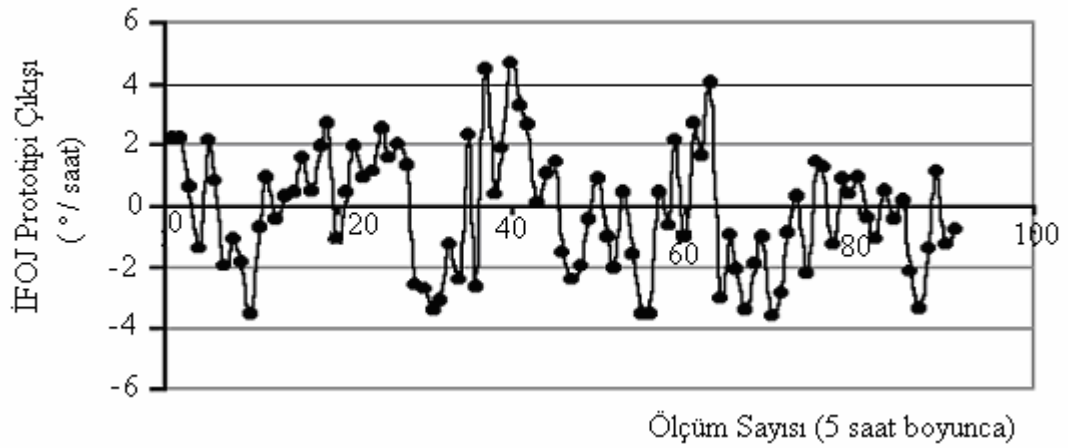
Çizelge 8.2.'ye devam.

Ölçüm Sayısı	İFOJ Prototipi'nin Sabit Kaymasına Karşılık Gelen Voltaj Çıkışı (mV)	Sabit kaymaya Karşılık Gelen Açısal Hız (°/saat) Ölçek Faktörü= 13,83 (°/saat)/mV
46	-128,837881	-1,348172
47	-128,776613	-2,195509
48	-128,806098	-1,787731
49	-128,91833	-0,235563
50	-129,010177	1,034681
51	-128,877386	-0,801818
52	-128,802884	-1,832181
53	-128,981505	0,638148
54	-128,832639	-1,420669
55	-128,691374	-3,374364
56	-128,692014	-3,365513
57	-128,97952	0,610695
58	-128,903059	-0,446760
59	-129,101257	2,294318
60	-128,873433	-0,856488
61	-129,145755	2,909725
62	-129,068342	1,839103
63	-129,237911	4,184243
64	-128,730648	-2,831205
65	-128,87787	-0,795124
66	-128,796455	-1,921094
67	-128,700418	-3,249286
68	-128,811617	-1,711403
69	-128,877531	-0,799813
70	-128,690875	-3,381265
71	-128,742278	-2,670362
72	-128,885756	-0,686061
73	-128,969144	0,467195
74	-128,787732	-2,041733
75	-129,050941	1,598448
76	-129,040508	1,454159
77	-128,858456	-1,063620
78	-129,012559	1,067625
79	-128,976505	0,568998
80	-129,015180	1,103873
81	-128,919672	-0,217003
82	-128,869271	-0,914049
83	-128,983649	0,667799
84	-128,916644	-0,258880
85	-128,960792	0,351687
86	-128,792806	-1,971559
87	-128,705296	-3,181823
88	-128,848598	-1,199956
89	-129,029634	1,303772
90	-128,857864	-1,071807
91	-128,894914	-0,559406

Çizelge 8.2.'de sunulan verilerden Açık-Döngü İFOJ Prototipi için Sabit Kayma Kararlılığı değerini elde edebilmek için Allan Varyans Modeli kullanılmıştır:

$$AVAR^2(t) = \frac{1}{2(n-1)} \sum_i [y(t)_{i+1} - y(t)_i]^2 \quad (8.1)$$

Burada $AVAR^2(t)$, ortalama t zamanın fonksiyonu olarak Allan Tipi Varyans (Sapma), y_i , t ortalama süresince alınan i . ortalama değer ve n alınan toplam veri sayısıdır.



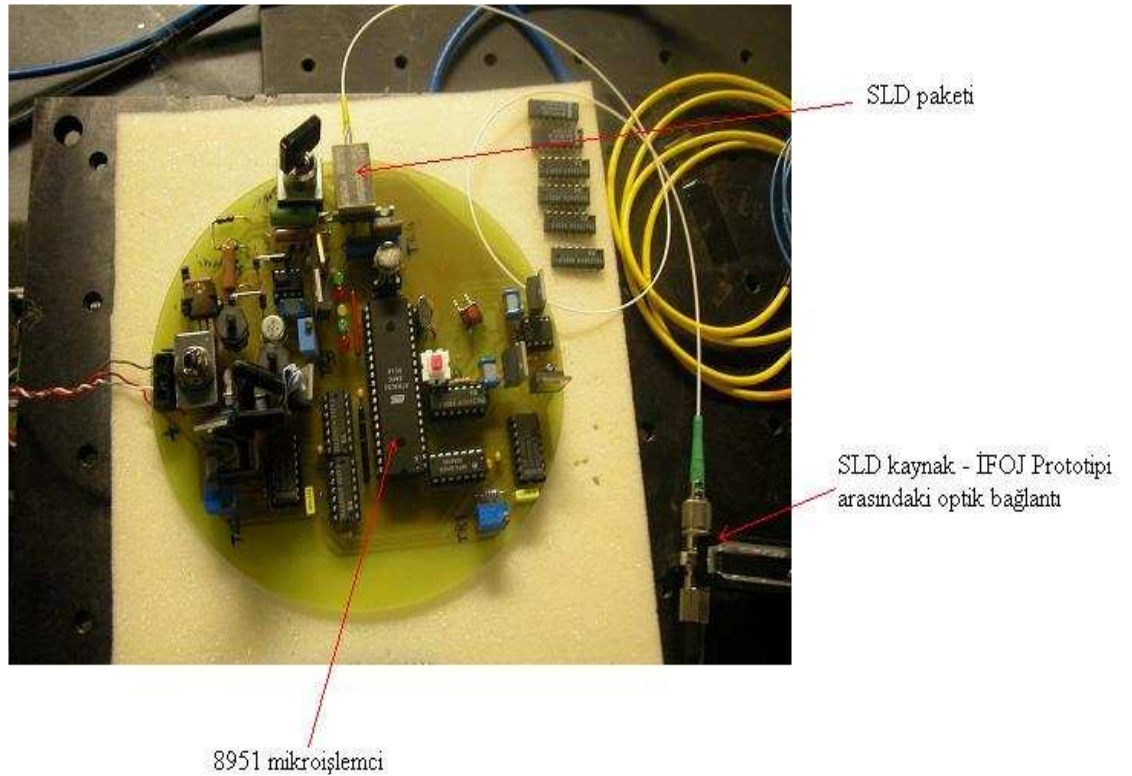
Şekil 8.4. Açık-Döngü İFOJ Prototipinin Sabit Kayma Kararlılığı ölçüm sonucu.

Allan Varyans Modeline göre Açık-Döngü İFOJ Prototipi için Sabit Kayma Kararlılığı 1,57 (°/saat) olarak elde edilirken Şekil 8.4.'ten de görüleceği üzere en büyük gürültü değeri tepeden-tepeye 8 (°/saat) olarak gözlemlenmiştir [Çelikel, 2007].

1,57 (°/saat) Sabit Kayma ve 8 (°/saat)'lık tepeden tepeye gürültü değerleri mevcut prototip üzerinde sırasıyla $2,55 \cdot 10^{-5}$ (rad) ve $1,3 \cdot 10^{-4}$ (rad)'lık ofset faz kaymalarına eşdeğerdir. Dolayısıyla interferometrik fiber optik jiroskopların Sabit Kayma (Bias Drift) parametrelerini etkileyen önemli parametrelerden biri olan ve Bölüm 7.3.1'de detayları verilen Doğrusal Olmayan Kerr Etkisi'nin neden olduğu yaklaşık 10^{-5} rad mertebesindeki faz kaymasının ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır. İlaveten Magnetooptik Faraday Etkisi'nin yaklaşık 15 (°/saat) ve buna karşılık gelen ofset faz kaymasının da $2,44 \cdot 10^{-4}$ (rad) olduğu göz önüne

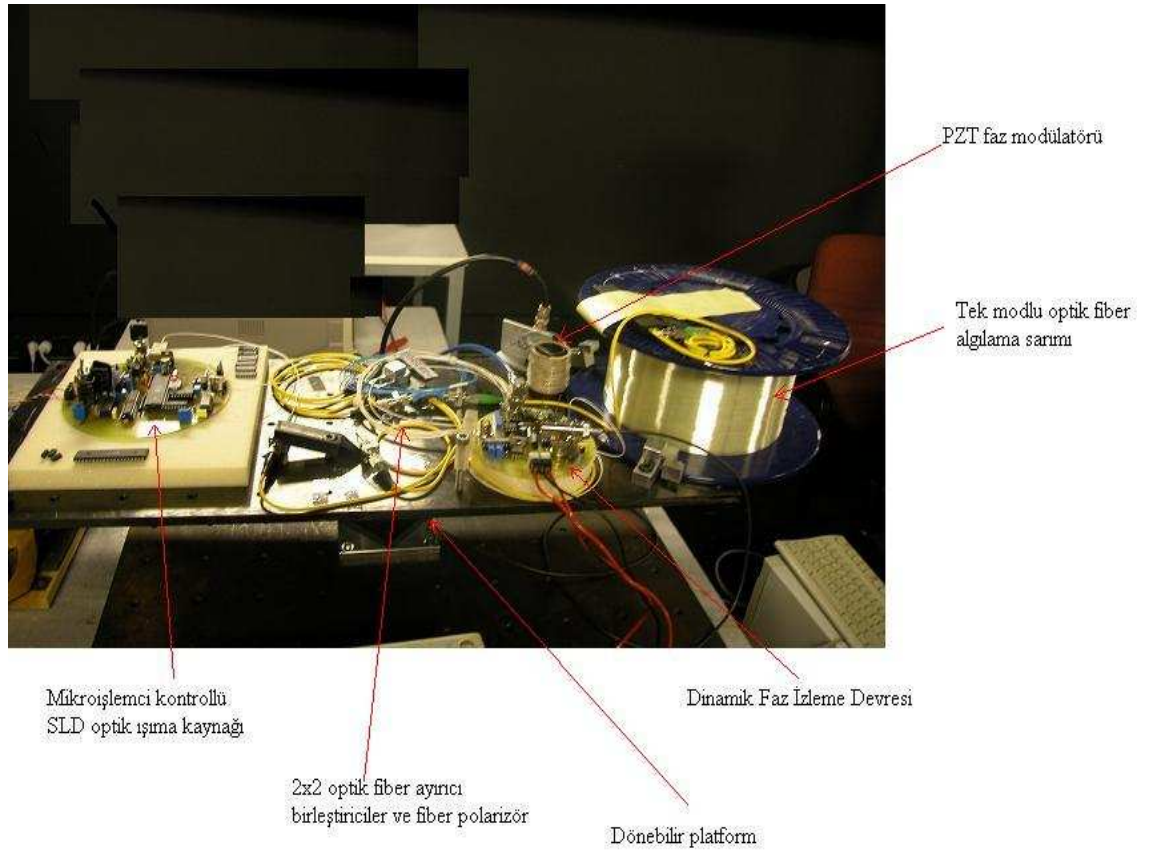
alındığında, doğrusal olmayan bu etkilerden İFOJ Prototipi'nin arındırılmasının önemi anlaşılır. İFOJ Prototipi için elde edilen 1,57 (°/saat)'lik Sabit Kayma Kararlılığı değeri 1 (°/saat) ilâ 0,1 (°/saat) aralığında kabul edilen Taktik Amaçlı Füze (Tactical Aimed Missiles) sistemlerinin üst sınırına yakın bir değerdir. Ayrıca Açık-Döngü İFOJ Prototipinin tepeden tepeye 8 (°/saat)'lik gürültü değeri de yeryüzünün 15,041 (°/saat) dönüş hızının altındadır [Çelikel, 2007].

Açık-Döngü İFOJ Prototipinin ilerleyen zaman içerisinde kullanılabilir boyutlara indirgenebilmesi için, prototipte optik ışıma kaynağı olarak kullanılan DFB lazer ile pompalanan EDFA'nın yerine daha küçük boyutlarda SLD ve mikro işlemci kontrollü besleme kartının tasarlanması sonucu ortaya çıkmıştır. Donanımsal ve yazılımsal tasarımı tamamlanan 8951 mikroişlemci tabanlı akım ve sıcaklık kontrollü besleme kartı ile SLD optik ışıma kaynağı mevcut İFOJ Prototipine entegre edilmiştir. Bu Doktora Tezi'nin konusu olmadığından mikroişlemci esaslı SLD Besleme Kartının detaylarından burada bahsedilmemiştir.



Şekil 8.5. Açık-Döngü (ve Kapalı-Döngü) İFOJ Prototipi için yazılımsal ve donanımsal tasarımı gerçekleştirilen mikroişlemci esaslı akım ve sıcaklık kontrolüne sahip SLD Besleme Kartı.

Şekil 8.5.'te mikroişlemci kontrollü besleme kartı ve SLD paket modülü görülmektedir. SLD paketi içerisinde kendi termoelektrik soğutucusu (Thermo-Electric Cooler-TEC) ve NTC termistörü mevcuttur. Mikroişlemci EPROM'una yüklenen yazılım ile mikroişlemci sıcaklık bilgisini paket içinde bulunan NTC'den almakta ve gerekli soğutma akımını Peltier Prensibine dayalı olarak çalışan TEC'a göndermektedir. Aynı yazılım ile oluşturulan 1 saniye bilgisi ile SLD'ye uygulanan optik ve soğutma sürme akımlarının süresi de ayarlanabilmektedir. Şekil 8.6.'da ise Açık-Döngü (ve Kapalı-Döngü) İFOJ Prototipin son hali gösterilmektedir.



Şekil 8.6. SLD optik ışınlama kaynağına sahip Açık-Döngü (ve Kapalı-Döngü) İFOJ Prototipi'nin son hali.

Mikroişlemci kartının bir başka önemli avantajı da sürme akımları onaltılık (hexadecimal codes) makine dili kodlarına karşılık geldiğinden sadece yazılım değiştirilerek yani herhangi bir donanımsal değişime gerek olmaksızın SLD optik güç seviyesi de kolaylıkla değiştirilebilmektedir. İFOJ Prototipi yaklaşık 15 cm çapına sahip bir ortam içerisine yerleştirilebilecek ölçülerde entegre hale getirilmiş Dinamik Faz İzleme Devresi ve SLD besleme kartından meydana gelmektedir.

Sonuç olarak TÜBİTAK UME Optik Laboratuvarı Fiber Optik Metroloji Bölümünde hem EDFA ve hem de SLD optik ışınım kaynaklarına sahip metrolojik ve metin içerisinde belirtilen diğer amaçlar için de kullanılabilir nitelikte Açık-Döngü İFOJ Prototipleri oluşturulmuştur. Açık-Döngü İFOJ Prototipinin karakterizasyonu için gerçekleştirilen ölçümler sonucunda, Prototipin Allan Varyans Metoduna göre hesaplanan Sabit Kayma'sının $1,57$ ($^{\circ}$ /saat), tepeden tepeye gürültü değerinin 8 ($^{\circ}$ /saat) olduğu belirlenmiştir. Prototip için Ölçek Faktörü ise $\%0,73$ 'lük bir standard sapma ile $13,83$ ($^{\circ}$ /saat)/mV olarak hesaplanmıştır. Prototipin performansının değerlendirilmesi için yeryüzü dönüş hızının $15,041$ ($^{\circ}$ /saat) ve Taktik Amaçlı Füzelere de kullanılan interferometrik fiber optik jiroskopların da Sabit Kayma Kararlılığı parametresinin üst sınırının 1 ($^{\circ}$ /saat) olduğunun bilinmesi faydalı olur. Dolayısıyla oluşturulan Prototip Taktik Amaçlı Füzelere için belirtilen sınıra oldukça yakın bir Sabit Kayma Kararlılığına sahiptir [Çelikel, 2007].

9. KAPALI-DÖNGÜ İNTERFEROMETRİK FİBER OPTİK JİROSKOP

Ölçek faktörünün doğrusallığı ve doğruluğu ile termal, foton-shot ve fazlalık gürültü terimleri ile indüklenen ($^{\circ}/\text{saat}/\text{Hz}^{1/2}$ veya $^{\circ}/\text{saat}^{1/2}$) cinsinden verilen Gelişi Güzel Yürüme (Random Walk) ve SOY’da bozulma olarak ortaya çıkan magneto-optik Faraday Etkisi, doğrusal olmayan Kerr Etkisi ve Shupe Etkisi ile indüklenen ($^{\circ}/\text{saat}$) cinsinden karakterize edilen sabit kayma kararlılığı parametreleri jiroskop için en kritik parametrelerdir.

Denklem (5.5)’te ortaya çıkan dönüş yönünün belirlenmesi ve $\pm\pi^{\circ}$ ’lik Sagnac Faz kaymasında interferometre tepkisinin sıfıra gitmesi gibi problemler, sinüs kutuplu modülasyon/demodülasyon tekniğiyle çözülmüş ve Denklem (5.25)’te doğrudan sinüsün bir fonksiyonu olan voltaj çıkışı açık-döngü İFOJ’un demodülatör çıkışında elde edilmiştir. Sinüs fonksiyonu ile yukarıda özetlenen iki sorun çözülmesine rağmen, bu fonksiyonunun periyodik doğasından ötürü açık-döngü İFOJ’un ölçek faktörünün doğrusallığı bütünüyle sınırlanmıştır. Nispeten yüksek kabul edilebilen dönüş hızları ile zorlanan Sagnac Faz kayması için ölçek faktöründeki doğrusallık önemli ölçüde sinüs tepkisi “ $\sin\phi_s$ ” yüzünden bozulur. Bu durum açık-döngü İFOJ’un uygulamalarda kullanımı için bir dezavantajdır.

Demodülasyondan sonra elde edilen fotoakım (gerilim karşılığı) Denklem (5.25)’te verilmişti. Bu denklemi optik ve elektrik ofsetler ile birlikte optik ve elektrik ölçek faktörleri cinsinden şu şekilde yazmak daha doğru ve anlamlı olacaktır:

$$V_{\text{demod}}(\Omega) = A_1 \sin(A_2 \Omega + A_3) + A_4 \quad (\text{V}) \quad (9.1)$$

burada A_1 , A_2 , A_3 ve A_4 sırasıyla elektrik ölçek faktörü, optik ölçek faktörü, optik ofset, ve elektrik ofsettir [Moeller et al, 1989].

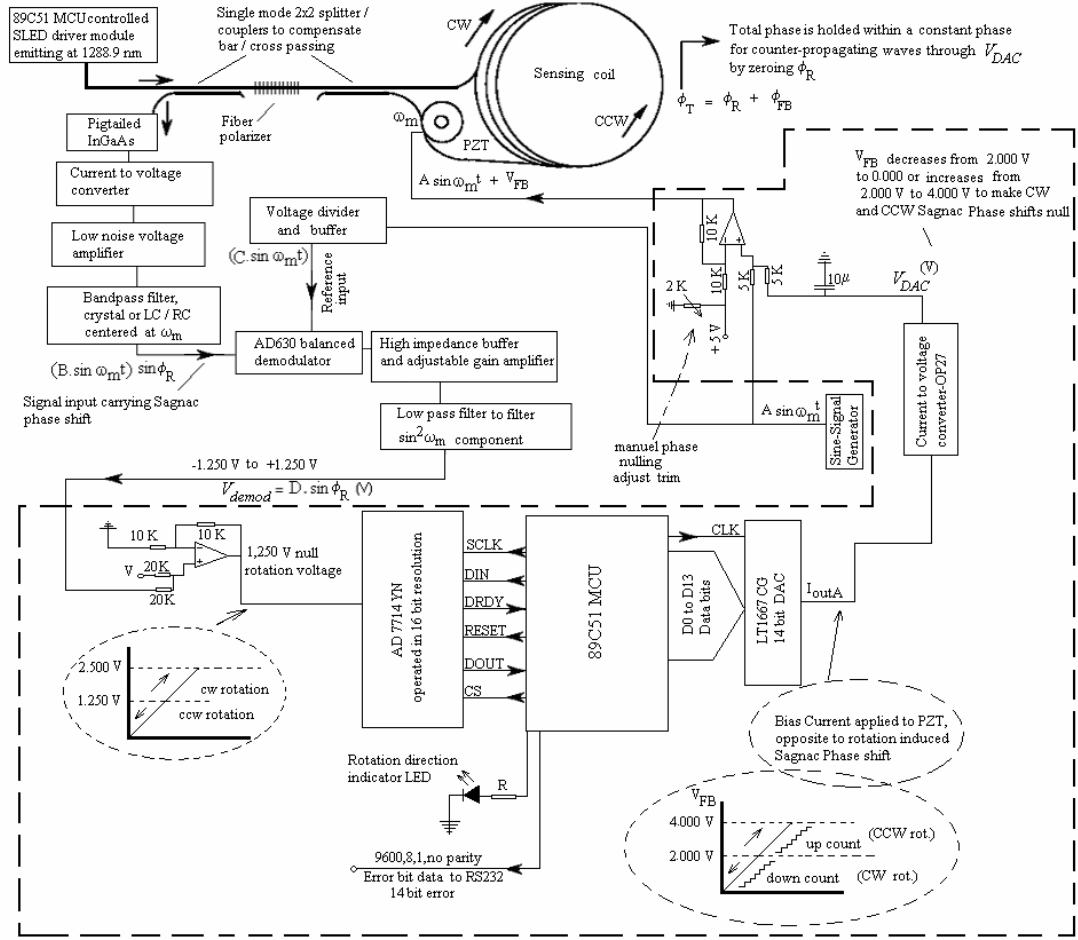
Ataletsel Seyrüsefer Sistemleri (Inertial Navigation Systems-INS)’nde yüksek kesinlikli frekans üreteçleri ile birlikte kullanılan jiroskoplar ile toplam açışal

yerdeğiştirme, hem voltajın ve hem de voltaj değişiminin olduğu zaman aralığının elektronik (sayısal sinyal işleme metotlarını da içeren) integrasyonu ile hesaplanır. Bu şu anlama gelir; geçmişte yapılan her voltaj (veya zaman) hatası sistemin toplam açısal yerdeğiştirmesinin hesaplanmasında hatalar oluşturur. Bir başka deyişle İFOJ'un ölçek faktörünün doğrusallık hatası toplam açısal yerdeğiştirmenin hesaplanmasındaki hatayı doğrudan etkileyecektir [Lefevre, 1993].

Açık-döngü İFOJ'un ölçek faktörünün doğrusallıktan sapmasının oluşturacağı bu sınırlama kapalı-döngü İFOJ ile üzülür.

9.1. Kapalı-Döngü İFOJ Prototipinin Tasarım Detayları

Kapalı-döngü İFOJ prototipi için, açık-döngü İFOJ prototipinde de olduğu gibi düşük uyum uzunluğuna sahip kaynak (ok düşük uyum uzunluğunun İFOJ'un dinamik aralığı sınırladığı da unutulmamalıdır) olarak Superlum Inc. Firması tarafından imâl edilen ve SLD-561-MP2-DIL-SM olarak kodlanmış optik ışınım kaynağı kullanılmıştır (şekil 8.5). SLD, Bölüm 8'de belirtildiği gibi optik ve soğutucu sürme akımları bütünüyle 89C51 mikroışlemcisiyle kontrol edilir. SLD'nin termoelektrik soğutucusuna (TEC) mikroışlemci kontrollü akım kontrolü yapılması rağmen ilaveten metal dış yüzeyi Al soğutucu ile dış ortamdan yalıtılarak soğutma akımı ile daha kararlı bir soğutma işlemi ve buna bağlı olarak daha kararlı bir optik emisyon çıkışı elde edilmiştir. Bu durumda şekil 9.1'de gösterilen optik fiberli InGaAs fotodiyod üzerine düşen optik güç seviyesi 62 μW 'tır. Emisyonun tepe değeri 1288,9 nm ve tayfsal bandgenişliği de 34,6 nm'dir. Bu durumda ışıma kaynağı SLD'nin geçici uyum uzunluğu (temporal coherence) yaklaşık 48 μm ve bu denli kısa uyum uzunluğu ile sinüs kutuplu faz modülasyonu sayesinde interferans deseni yüksek bir kontrastla osiloskopta izlenmiştir, şekil 5.4. ve 5.5.. Tasarımda kullanılan optik fiberin kesilim dalga boyu değerinin 1252 nm olduğu belirlenmişti. Dolayısıyla 34,6 nm'lik tayfsal band genişliğine sahip ve 1288,9 nm tepe değerinde emisyon yapan SLD için tek modlu iletim sağlanır dolayısıyla modlar arası dağınımın (intermodal dispersion) bir sonucu olarak karşımıza çıkması muhtemel SOY'un bozulması söz konusu olmaz [elikel ve San, 2008].



Şekil 9.1. Kapalı-döngü İFOJ prototipinin tasarım detayı. Kesikli çizgi ile gösterilen kısım mikroişlemci kontrollü geribesleme devresi.

Kapalı-döngü İFOJ prototipinin optik kısmı, detayları Bölüm 6’te verilen açık-döngü İFOJ’un aynısı olup tek fark kesikli çizgiler ile gösterilen ilave bir elektronik geribesleme devresinin var olmasıdır. Bu yapıdaki bir kapalı-döngü İFOJ, literatürde Bütünüyle Sayısal Kapalı-Döngü İFOJ (All Digital Closed-Loop IFOG) olarak bilinir. Bütünüyle Sayısal Kapalı-Döngü İFOJ (BSKD-İFOJ) yaklaşımının temeli, bir geri besleme voltajı ile faz modulatörüne müdahale ederek açısal hız ile indüklenen Sagnac Fazını sıfırlamaktır. $\bar{\Omega}$ açısal hızı ϕ_S Sagnac Fazını ve elbette sinüs kutuplu faz modülasyonu ile oluşan interferans desenini Denklem (9.1)’deki offsetleri de göz önüne alarak doğrusal bir değişimle etkiler, Denklem (4.9). Sagnac Faz Kayması ve açısal hız arasındaki bu doğrusal ilişki, Sagnac Faz kaymasına uygun bir geri besleme operasyonu ile müdahale etmeyi mümkün kılar ve bu sayede açık-döngü İFOJ’un doğrusal olmayan ölçek faktöründen kapalı-döngü yaklaşımı ile daha doğrusal bir ölçek faktörüne ulaşılır [Çelikel and San, 2008].

Kapalı-Döngü yaklaşımı doğrusal bir ölçek faktörü üretmek bakımından anlamlı bir uygulama olmasına rağmen, demodülasyon devresindeki elektrik kaymalara ek olarak dalga boyu ve şiddet gibi optik kaynak-esaslı değişimler ile Faraday Etkisi, Kerr Etkisi ve Shupe Etkisi ile zorlanan tarzda algılama sarımının optogeometrik özelliklerinin değişmesinin de jiroskobun açık veya kapalı döngü olup olmasına bakmaksızın ölçek faktörünün doğrusallığına ve doğruluğuna etki ettiğini her zaman hatırd tutmak gereklidir [Çelikel and San, 2008].

9.1.1. BSKD-İFOJ Prototipinin Çalışma Prensipleri

Bu bölümde, optik detayları ve demodülasyon işleminin gerçekleştirildiği dinamik faz izleme devresinin detaylarının Bölüm 5, 6 ve 8’de verildiği Açık-Döngü İFOJ prototipine ilave olarak tasarımı ve açık-döngü sisteminin kapalı-döngü sistemine dönüşmesine olanak veren geri besleme devresinin donanımı ve yazılımı hakkında bilgi verilecektir. Bu sayede bir interferometrik jiroskop yapısında Sagnac Fazının nasıl sıfırlandığı ve nasıl doğrusal bir ölçek faktörüne ulaşıldığı hakkında detaylı bilgiler sunulacaktır.

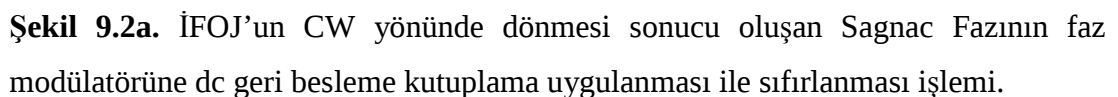
Şekil 9.1’deki geri besleme devresi göz önüne alındığında; faz izleme devresinin çıkışı ayarlanabilir kazançlı yükselteç ile $\pm 1,25000$ V değerine ayarlanır. Devre çıkışını CW ve CCW dönüşlerde pozitifte tutabilmek için, demodülasyon devresi çıkışı bir ucu $+1,25000$ V’ta tutulan doğrusal bir toplama devresine girilir. Bu durumda faz devresi sıfır dönüş hızında $+1,25000$ V üretir ve CW ve CCW tüm aralık için faz izleme devresinin çıkışı $[0,00000 \text{ V} - 2,50000 \text{ V}]$ aralığına taşınmış olur.

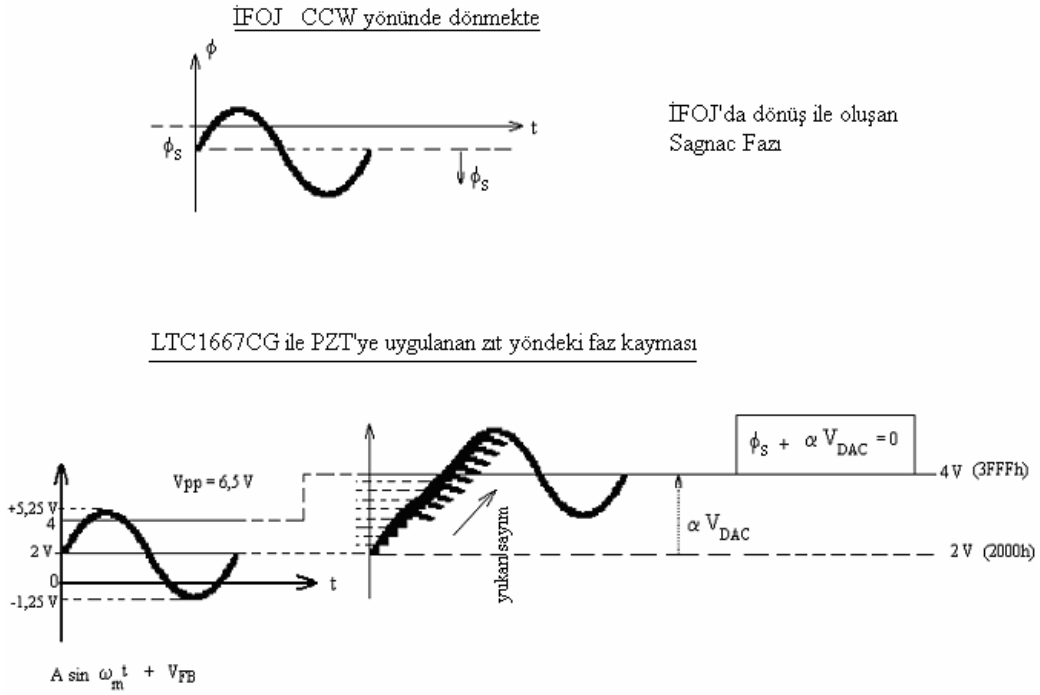
Pozitif aralığa doğrusal toplama devresi ile taşınan faz izleme devresinin çıkışındaki voltaj, 16-bit çözünürlükte çalıştırılan ve esasında 24 çözünürlüğe erişebilen AD7714YN sigma-delta sayısal analog dönüştürücü (ADC) ile örneklenir. Flash, multistage ve successive-approximation tipteki ADC entegreleri ile kıyaslandığında sigma-delta ADC’ler yüksek çözünürlüklere ulaşmasına rağmen oldukça yavaş örnekleme hızlarına sahiplerdir. BSKD-İFOJ prototipinde yer alan ve demodülasyon katından (faz izleme devresi) gelen ve doğrudan Sagnac Fazını

taşıyan sinyalin örneklenmesinde kullanılan AD7714YN için 2,50000 V'luk bir referans voltajı ve 2,4576 MHz'lik frekans üreten kristal osilatör kullanılmıştır. 2,50000 V'luk tam voltaj aralığı için AD7714YN'nin basamak ölçüsü (step size) 38 μ V'tur. AD7714YN'yi mikroişlemci kontrolünde çalıştırabilmek için gerekli bacak bağlantıları Şekil 8.1'de gösterilmiştir. AD7714YN'nin RESET, CS (Chip Select) ve DRDY (Data Ready) girişleri aktif 0 (active LOW) sinyallerdir. DIN (Data In) ve DOUT (Data Out) veri giriş ve çıkış uçları olup ise bütünüyle SCLK (Clock) darbelerinin yükselen kenarları ile senkronize şekilde çalışır. DIN ucu AD7714YN'nin içinde yer alan kayıtçılara (on chip-registers) ADC'nin çalışma şeklini, filtreleme esaslarını, kazancını vb. şekilde konfigürasyonu ile ilgili verileri yazmaya yarayan giriş ucudur. DOUT ucu ise DRDY ucundaki sinyal aktif 0 seviyesine düştüğünde, AD7714YN'ye faz izleme devresinden gelen ve Sagnac Fazını taşıyan örneklenmiş voltajın sayısal formatta okunduğu çıkıştır. DRDY çıkışının aktif 0 seviyesine düşmesi AD7714YN'nin örneklemeyi bitirdiğini ve yeni datanın okunmak için hazır olduğunu gösterir. BSKD-İFOJ prototipi için, AD7714YN'nin girişindeki 2,50000 V'luk voltaj $(1111111111111111)_2 = (FFFFh) = 2,50000 \text{ V}$ 'a karşılık gelir. Bu durumda faz izleme devresinin çıkışı $[0,00000 - 2,50000 \text{ V}]$ aralığına taşınmış olduğundan sıfır dönüş (null rotation)voltajı $1,25000 \text{ V}$ 'a karşılık gelir ki buda ikili gösterimde $(1000000000000000)_2 = (8000h) = 1.25000 \text{ V}$ olacaktır. DRDY sinyalinin 1 (High) seviyesinde kalma süresi $500 \times t_{clk} = 205 \mu s$ 'dir. BSKD-İFOJ uygulaması için AD7714YN'ye yazma işlemi $120 \mu s$, okuma işlemi $30 \mu s$ kadardır. Bu durumda tek bir örneklemeye için geçen süre yaklaşık $360 \mu s$ 'dir [Çelikel and San, 2008].

89C51 mikroişlemcisinin senkronize bir şekilde hem 16-bit AD7714YN ADC'sini ve hem de 14-bit LTC1667CG DAC'sini kontrol edebilmesi için 8051 assembler kodlarından oluşan bir yazılım tasarımlanmış ve 89C51'in iç EEPROM'una uygun elektronik vasıtalar ile (EZ uploader software ve evaluation board aracılığıyla) kaydedilmiştir. Yazılıma göre mikroişlemci ilk olarak $(8000h)=1,25000 \text{ V}$ değerine karşılık gelen ve sıfır dönüş hızına karşılık gelen değeri tutar ve 14-bits $(1000000000000000)_2 = (2000h) = 2,0000 \text{ V}$ değerini LTC1667CG'nin giriş uçlarına yükler. LTC1667CG'nin girişine yüklenen bu 14-bitlik bu veri faz modülatörü PZT için bir dc kutuplamaya karşılık gelir ki bu Sagnac Fazını

Yukarıda anlatılan ve bütünüyle mikroişlemci tarafından gerçekleştirilen BSKD-İFOJ ait faz dönüş ile zorlanan Sagnac Fazını sıfırlama işlemi aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.





Şekil 9.2b. İFOJ'un CCW yönünde dönmesi sonucu oluşan Sagnac Fazının faz modülatörüne dc geri besleme kutuplama uygulanması ile sıfırlanması işlemi.

Buraya kadar yazılımsal olarak yapılan işlemleri BSKD-İFOJ'ta oluşan faz terimleri cinsinden anlatalım. BSKD-İFOJ'daki toplam faz ϕ_T ;

$$\phi_T = \phi_S + \phi_{FB} \quad (^\circ) \quad (9.2)$$

Burada ϕ_S , açısal hızdan dolayı oluşan Sagnac Fazı ve ϕ_{FB} , LTC1667CG çıkışında mikroişlemciye yazılım sayesinde oluşturulan dc kutuplama voltajının oluşturduğu geri besleme fazıdır. Dolayısıyla Denklem (5.7)'de açık-döngü İFOJ için yazılan ϕ_S faz terimi yerine BSKD-İFOJ'da ϕ_T faz terimini yazmak doğru olacaktır. Bu sayede ϕ_S Sagnac Fazını, ϕ_{FB} geri besleme faz terimi ile sıfıra götürmek mümkün olur ve BSKD-İFOJ'daki toplam faz ya sıfır ya da sabit bir ofset değerindedir. Tasarım gereği olarak LTC1667CG'nin çıkış akımı herhangi bir açısal hız yokken PZT üzerinde 2,0000 V'luk bir dc kutuplama uyaracak şekilde ayarlanmıştır. Dolayısıyla yukarıda bahsedilen bir dc ofset faz BSKD-İFOJ için sözkonusudur ve bu faz CW yönünde oluşmuştur. Söyleneni faz cinsinden yazarsak [Çelikel and San, 2008];

$$\phi_T = \phi_S + \alpha(2,0000 + V_{DAC}) \quad (^\circ) \quad (9.3)$$

Burada ($2,0000 + V_{DAC}$) Şekil 9.1'deki V_{FB} voltajıdır ve PZT üzerindeki fazın voltaj türünden yazılmış halidir. α , PZT'ye uygulanan voltajın PZT tarafından İFOJ yapısı içinde ne kadarlık bir faza dönüştürüleceğini gösteren bir sabit olup ölçek faktörü ile ilgili ölçümlerde elde edilecektir. LTC1667CG'nin her bir akım (veya akım gerilim dönüştürücü devrenin çıkışında ise voltaj) basamağının ne kadarlık bir faz basamağına dönüşeceğini gösteren sabit katsayısıdır [Çelikel and San, 2008].

BSKD-İFOJ durağanken faz izleme devresi çıkışı 1,25000 V ve tabi olarak Sagnac Faz kayması sıfırdır. Mikro işlemci herhangi bir sayım işlemi başlatmayacağından V_{DAC} sıfırdır. Bu durumda BSKD-İFOJ'daki SOY boyunca yayılım gösteren dalgalar için sadece sabit bir $\alpha 2,0000$ (°)'lik ofset faz mevcuttur.

$$\phi_T = \alpha 2,0000 \text{ (°)} \quad (9.4)$$

BSKD-İFOJ, CW yönünde dönerken faz izleme devresi 1,25000 V'tan daha yüksek değerli voltaj üretmeye başlar ve bu durumda AD7714YN (8000h) = 1,25000 V'tan daha yüksek değerli veriyi mikroişlemciye gönderir. Mikroişlemci bu ikili koddaki veri ile önceden yazılımsal olarak girilen (8000h) verisini karşılaştırarak dönüş yönüne karar verir ve (2000h) değerinden başlayarak aşağı doğru saymaya başlar. Her bir 14 bitlik veri bloğu mikroişlemcinin LTC1667CG'nin CLK ucunu aktif 1 yaparak çıkışta akıma ve akım gerilim dönüştürücüsü ile de gerilime dönüştürülerek doğrusal toplama devresi ile PZT'ye uygulanır. Yani PZT'ye uygulanan voltaj değeri 2,0000 V'tan daha düşük değerlere gitmeye başlar ve CW yönündeki dönüşten ötürü oluşan Sagnac Fazı sıfırlanana kadar aşağı yöndeki sayım işlemi devam eder. Her bir sayıma ait voltaj PZT'ye uygulandığından mikroişlemci AD7714YN'nin çıkışını ve dolayısıyla faz izleme devresinin çıkışının 1,25000 V olup olmadığını gerçek zamanlı olarak kontrol eder. Sayımın devam ettiği durumda BSKD-İFOJ'daki toplam anlık faz değeri [Çelikel and San, 2008];

$$\phi_T = \phi_R^{CW} - \alpha V_{DAC} + \alpha 2,0000 \text{ (°)} \quad (9.5)$$

şeklinde olur. AD7714YN mikroişlemciye 1,25000 V'a karşı gelen (8000h) değerini gönderdiğinde mikroişlemci aşağı yönde sürdürdüğü sayımı keser ve (2000h)'ten farklı değerler hata voltajı bitleri olarak mikroişlemcinin seri porttan iletişim

yapmasına olanak veren kayıtçısına (Serial Buffer Register) kaydedilir. Bu durumda BSKD-İFOJ'daki toplam faz $\alpha 2,0000$ (°) ofset değerindedir. BSKD-İFOJ durağan duruma getirildiğinde LTC1667CG'nin çıkışı tekrardan 2,0000 V değerine mikroişlemci tarafından getirilir [Çelikel and San, 2008].

BSKD-İFOJ, CCW yönünde dönerken faz izleme devresi 1,25000 V'tan daha düşük voltaj üretmeye başlar ve bu durum da AD7714YN (8000h) = 1,25000 V'tan daha düşük değerli veriyi mikroişlemciye gönderir. Mikroişlemci bu veri ile dönüş yönüne karar verir. 2,0000 V'a karşılık gelen (2000h)'ten başlayarak yukarı yönde sayıma başlar ve her sayım değerini LTC1667CG'ye CLK sinyalinin yükselen kenarı ile senkronizasyonu sağlayarak gönderir. Bu şekilde her bir sayım LTC1667CG ile akıma ve akım gerilim dönüştürücüsü ile de gerilime dönüştürülerek doğrusal toplama devresi üzerinden PZT'ye dc kutuplama olarak gönderilir. Bu durumda PZT üzerindeki voltaj 2,0000 V'tan yüksek değerler almaya başlar ve CCW yönündeki dönüşten dolayı oluşan Sagnac Fazı sıfırlanana kadar yukarı yöndeki sayım devam eder. Her bir sayıma ait voltaj PZT'ye uygulandığından mikroişlemci AD7714YN'nin çıkışını ve dolayısıyla faz izleme devresinin çıkışının 1,25000 V olup olmadığını gerçek zamanlı olarak kontrol eder. Sayımın devam ettiği durumda BSKD-İFOJ'daki toplam anlık faz değeri [Çelikel and San, 2008];

$$\phi_T = \phi_S^{CCW} + \alpha \cdot V_{DAC} + \alpha 2,0000 \quad (^\circ) \quad (9.6)$$

şeklinde olur. AD7714YN mikroişlemciye 1,25000 V'a karşı gelen (8000h) değerini gönderdiğinde mikroişlemci yukarı yönde sürdürdüğü sayımı keser ve (2000h)'ten farklı değerler hata voltajı bitleri olarak mikroişlemcinin seri porttan iletişim yapmasına olanak veren kayıtçısına (Serial Buffer Register) kaydedilir. Bu durumda BSKD-İFOJ'daki toplam faz $\alpha 2,0000$ (°) ofset değerindedir. BSKD-İFOJ durağan duruma getirildiğinde LTC1667CG'nin çıkışı tekrardan 2,0000 V değerine mikroişlemci tarafından getirilir. Dolayısıyla hem CW ve hem de CCW yönündeki açısal hızlardan kaynaklanan Sagnac Fazının sıfırlanması için uygulanan geri besleme voltajı için 2,0000 V'tan sapan her voltaj bir hata voltajı olup V_{DAC} olarak sembolize edilir. Denklem (9.5) ve (9.6)'yı dikkate alarak [Çelikel and San, 2008];

$$\phi_S^{CW} - \alpha \cdot V_{DAC} = \phi_S^{CCW} + \alpha \cdot V_{DAC} \quad (9.7)$$

Denklem (9.7) aşağıdaki şekilde yazılır, çünkü LTC1667CG bir bitlik akım (veya gerilim) basamağı için aynı faz değişimini üretir.

$$\phi_S^{CW} = -\phi_S^{CCW} = \phi_S \quad (^\circ) \quad (9.8)$$

sonuç olarak BSKD-İFOJ için hata voltajına karşı PZT tarafından üretilen faz arasındaki ilişkiyi veren α ($^\circ/\text{mV}$) katsayısı aşağıdaki şekilde türetilir.

$$\alpha = \frac{\phi_S(\Omega)}{V_{DAC}} \quad (^\circ/\text{mV}) \quad (9.9)$$

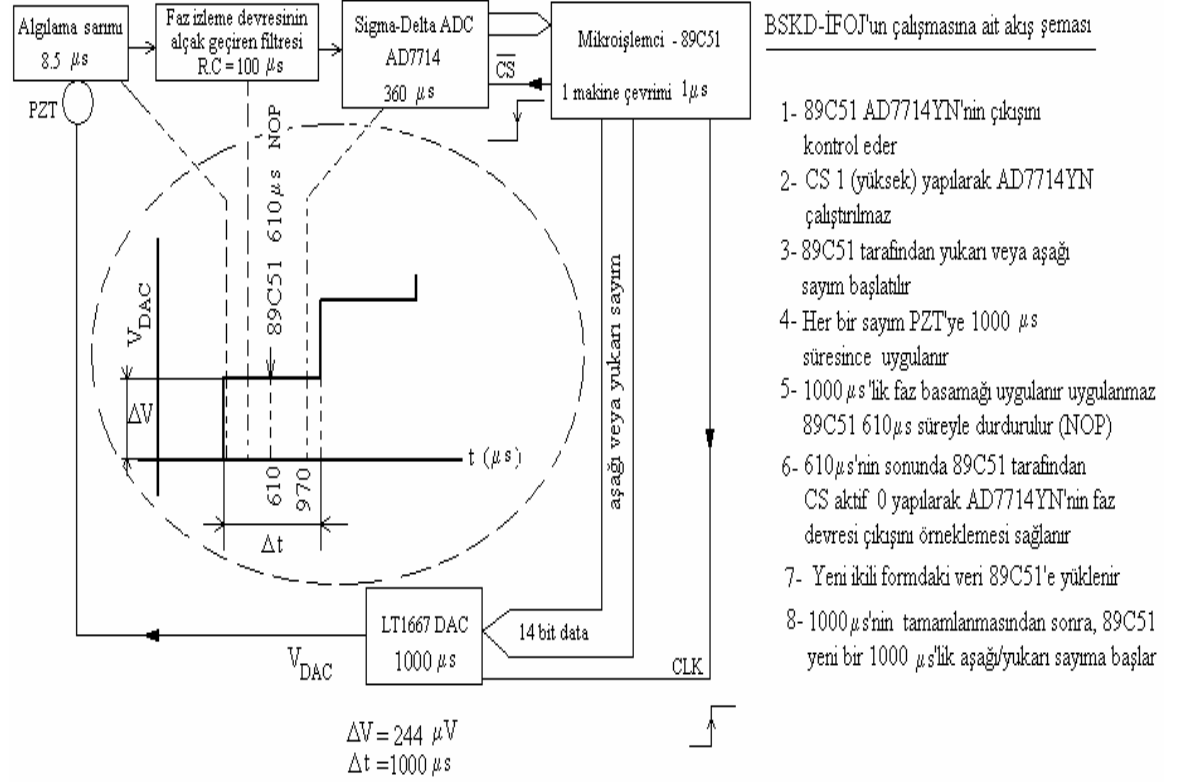
α ($^\circ/\text{mV}$) BSKD-İFOJ prototipinin, optik, elektrik ve geometrik karakteristiklerinin bir fonksiyonu olup yukarıda belirtildiği gibi V_{DAC} hata voltajını Sagnac Fazı'na ilişkilendiren bir katsayıdır. BSKD-İFOJ prototipinin ölçek faktörü (SF) uygulanan açısal hızın LTC1667CG tarafından üretilen hata voltajına oranı olarak elde edilir.

$$SF = \Omega / V_{DAC} \quad (^\circ/\text{saat})/\text{mV} \quad (9.10)$$

PZT'ye uygulanan tam aralık geri besleme kutuplaması (full range bias) 4,0000 V'tur. LTC1667CG 14 bit çözünürlük için 16383 basamak üretir. Bu durumda her bir faz basamağı belirtilen tam aralık için $244 \mu\text{V}$ 'tur [Çelikel ve San, 2008].

Faz izleme devresinin çıkışında yer alan alçak-geçiren filtrenin zaman sabiti $100 \mu\text{s}$ 'dir. Bu değer faz izleme devresinin çıkışının yeterli voltaj seviyesine ulaşp ulaşmamasının belirlenmesinde önemlidir. Bu nedenle faz devresinin çıkışının uygulanan açısal hıza tepki olarak verdiği voltaj seviyesine erişebilmesini sağlamak amacıyla, her faz basamağı LTC1667CG ile PZT'ye uygulanır uygulanmaz mikroişlemci $610 \mu\text{s}$ süresince hiçbir işlem yapmaz (NOP-No operation). AD7714YN'nin $360 \mu\text{s}$ 'lik okuma/yazma ve örnekleme süresini de dikkate alarak algılama sarımı, faz izleme devresi, LTC1667CG ve AD7714YN'nin mikroişlemci tarafından senkronizasyonun hayati bir anlam taşıdığı anlaşılır. Bu senkronizasyon

89C51 mikroişlemcisinin 11,0592 MHz frekansla tetiklenmesi ile 1 makine çevriminin 1 μs 'ye (daha gerçekçi bir değer olarak 1,0850694 μs) ayarlamasıyla ve mikroişlemcisinin Özel Fonksiyon Kayıtları (Special Function Registers – TMOD, TCON, TH0 ve TL0) kullanılarak başlanır [Çelikel ve San, 2008].



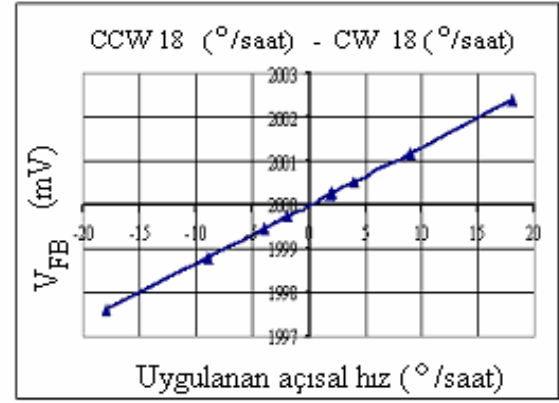
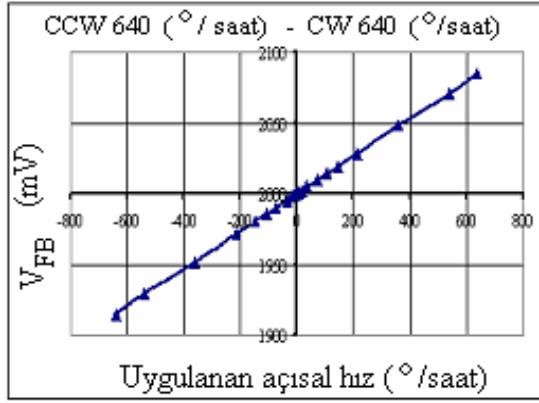
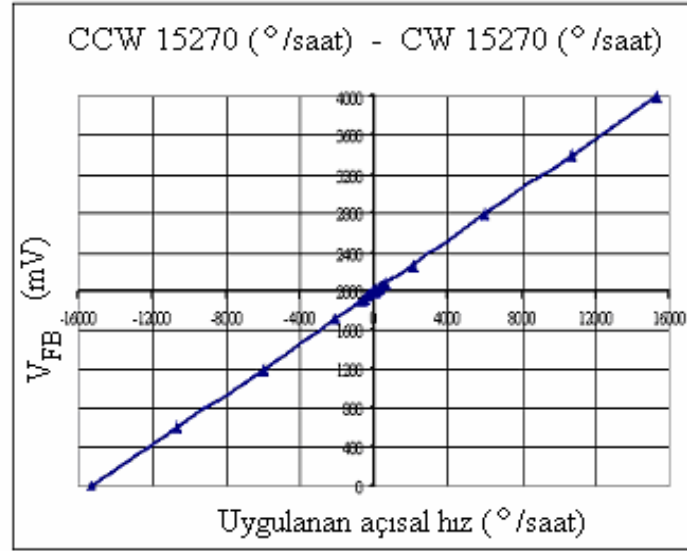
Şekil 9.3. BSKD-İFOJ'un zamanlama diyagramı ve yazılımın akış şeması.

10. BSKD-İFOJ PROTOTİPİNİN ÖLÇEK FAKTÖRÜ İLE SABİT KAYMA KARARLILIĞI ÖLÇÜMLERİ VE SONUÇLAR

Bu bölümde, TÜBİTAK UME Optik Laboratuvarı Fiber Optik Bölümünde tasarımı gerçekleştirilen ve bu Doktora Tezinin konusu olan BSKD-İFOJ prototipinin (°/saat) cinsinden Sabit Kayma Kararlılığı ile (°/saat)/mV cinsinden Ölçek Faktörünün belirlenmesi için yapılan ölçümlere dair detaylar ve sonuçları sunulmuştur.

10.1. BSKD-İFOJ Prototipinin Ölçek Faktörünün Belirlenmesi

Sagnac Fazını sıfırlama voltajı V_{DAC} (hata voltajı) cinsinden BSKD-İFOJ'un ölçek faktörünü (SF) türetmek için, prototip Şekil 8.2'de verilen konumlamaya yerleştirilerek yeryüzünün dönüşünden kaynaklanan Sagnac Fazı katkısı ortadan kaldırılmıştır. Prototip bu konumlama durumundayken 1 (°/saat) – 15270 (°/saat) aralığında değiştirilen açısal hızlara servo-motor sistemi ile tâbi tutulmuştur. Servo-motorlu sistemin açısal hız doğruluğu 0,02°/saat'tir. Prototipe uygulanan açısal hız, mikroişlemci tarafından Sagnac Fazını sıfır yapacak ikili kod üretilene kadar kararlı halde tutulmuştur. Uygulanan kararlı açısal hıza karşı geri besleme devresinin çıkışındaki V_{FB} voltajının değişimi Şekil 10.1.'de gösterilmiştir [Çelikel and San, 2008].



Şekil 10.1. BSKD-İFOJ Prototipinin uygulanan açısal hıza karşı verdiği tepki olarak belirlenen Ölçek Faktörü'ndeki (SF) değişim.

Çizelge 10.1. BSKD-İFOJ Prototipinin Ölçek Faktörü ölçüm sonuçları

Dönüş Yönü	Ω	ϕ_s	V_{FB}	V_{DAC}	SF Ω/V_{DAC}	α
	(°/h)	(°)	(mV)	(mV)	(°/h)/mV	(°/mV)
CW	15270	17,57448	2,2180	1997,7820	7,643477	0,00879699
	10650	12,25725	602,3453	1397,6547	7,619908	0,00876987
	6000	6,90549	1196,5376	803,4624	7,467680	0,00859467
	2100	2,41692	1723,2291	276,7709	7,587502	0,00873257
	640	0,73659	1914,7961	85,2039	7,511396	0,00864498
	540	0,62149	1928,9820	71,0180	7,603704	0,00875122
	360	0,41433	1951,7853	48,2147	7,466606	0,00859343
	216	0,24860	1971,5194	28,4806	7,584108	0,00872867
	144	0,16573	1980,6413	19,3587	7,438513	0,00856110
	108	0,12430	1985,5970	14,4030	7,498417	0,00863004
	72	0,08287	1990,5385	9,4615	7,609758	0,00875819
	36	0,04143	1995,1826	4,8174	7,472885	0,00860066
	18	0,02072	1997,6215	2,3785	7,567846	0,00870995
	9	0,01036	1998,7980	1,2020	7,487521	0,00861750
	4	0,00460	1999,4726	0,5274	7,584149	0,00872871
	2	0,00230	1999,7363	0,2637	7,584108	0,00872867
	1.84	0,00212	1999,7542	0,2458	7,485639	0,00533776
CCW	1.84	0,00212	2000,2471	0,2471	7,447679	0,00531070
	2	0,00230	2000,2684	0,2684	7,452372	0,00857705
	4	0,00460	2000,5287	0,5287	7,565128	0,00870682
	9	0,01036	2001,1927	1,1927	7,546099	0,00868492
	18	0,02072	2002,4013	2,4013	7,495820	0,00862705
	36	0,04143	2004,8075	4,8075	7,488350	0,00861846
	72	0,08287	2009,5354	9,5354	7,550842	0,00869038
	108	0,12430	2014,3840	14,3840	7,508327	0,00864145
	144	0,16573	2018,9787	18,9787	7,587450	0,00873251
	216	0,24860	2028,5681	28,5681	7,560891	0,00870195
	360	0,41433	2048,1947	48,1947	7,469705	0,00859700
	540	0,62149	2071,3202	71,3202	7,571493	0,00871415
	640	0,73659	2085,2387	85,2387	7,508327	0,00864145
	2100	2,41692	2275,1709	275,1709	7,631620	0,00878335
	6000	6,90549	2805,2006	805,2006	7,451559	0,00857611
	10650	12,25725	3395,8547	1395,8547	7,629734	0,00878118
	15270	17,57448	3997,7820	1997,7820	7,643477	0,00879699

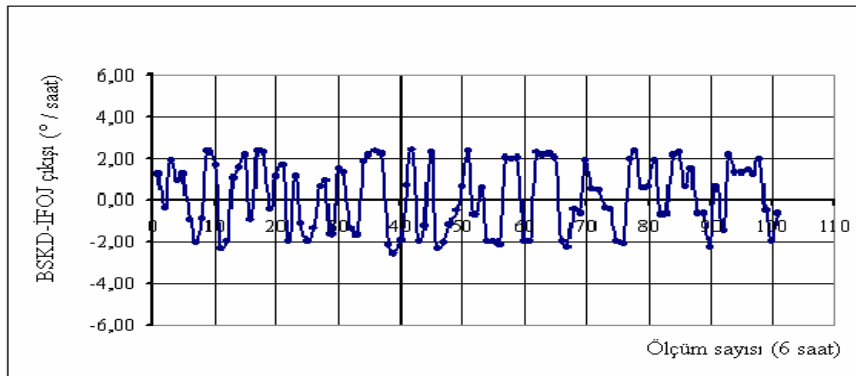
LTC1667CG'nin 1000 μ s'lik faz basamağını göz önüne aldığımızda, 14-bitlik çözünürlük için 16383 basamak sözkonusudur ve bu sayıdaki faz basamağı yaklaşık 16,4 sn'de tamamlanır. Bir başka deyişle PZT'ye uygulanan 0,0000 V – 4,0000 V'luk tam aralık için harcanacak süre 16,4 sn'dir. Uygulanan maksimum açısal hız değeri 15270 °/saat olup bu yaklaşık 4,2 °/saniye değerine eşittir ve dolayısıyla (4.2 °/s) x (16.4 s) = 68.9 °'lik bir açısal yerdeğiştirmeye maksimum hızdan doğacak

Sagnac fazını tam aralıkta sıfırlamak için müsaade etmek gerklidir. BSKD-İFOJ için ortalama Ölçek Faktörü (SF) yukarıdaki Çizelge 10.1'deki verileri kullanarak 7,539 (°/h)/mV olarak %0,85'lik bir bağıl standard sapma ile elde edilmiştir [Çelikel and San, 2008].

10.2. BSKD-İFOJ Prototipinin Sabit Kayma Kararlılığının Ölçülmesi

Tasarımı tamamlanan BSKD-İFOJ prototipinin (°/saat) cinsinden sabit kayma kararlılığı ölçümünden önce, prototip Şekil 10.2'de detayları belirtilen konumlamaya yerleştirilmiştir. Bu şekilde Denklem (4.9)'da verilen $\vec{A}$ ve $\vec{\Omega}_{earth}$ arasındaki skaler çapım sıfıra götürülerek yeryüzünün açısal hız katkısının BSKD-İFOJ prototipi üzerine binmesi engellenmiştir. Bölüm 8'de belirtildiği gibi 40,8°'lik bir enleme oturan Gebze/KOCAELİ'nde ölçümler gerçekleştirildiğinden, prototip kuzeyden itibaren bu açı değerine ayarlanarak faz devresi ve dolayısıyla V_{DAC} devresi çıkışının sıfırlanması ya da daha doğru bir anlatımla çıkış voltajının minimize işlemi gerçekleştirilmiştir [Çelikel and San, 2008].

BSKD-İFOJ prototipinin laboratuvar ortamında 3 saat şartlandırılması ve SLD'in optik emisyonunun kararlı hâle gelmesinin ardından ölçümler başlatılmıştır. Ölçümlerde Sagnac Fazını sıfırlama voltajı olarak belirtilen V_{DAC} hata voltajı 8 ½ basamaklı sayısal voltmetre ile örneklenerek 6 saat boyunca kaydedilmiş ve her bir voltaj değeri BSKD-İFOJ'un SF (°/saat/mV) değeri ile çarpılarak prototipin (°/saat) cinsinden sabit kayma kararlılığı ölçümü tamamlanmıştır [Çelikel ve San, 2008].



Şekil 10.2. BSKD-İFOJ Prototipinin Sabit Kayma Kararlılığı ölçüm sonucu.

Çizelge 10.2. BSKD-İFOJ Prototipi Sabit Kayma Kararlılığı ölçüm sonuçları

Ölçüm Sayısı	V_{DAC} (mV)	Sabit kaymaya Karşı gelen açısal hız (°/saat) SF =7,539 (°/saat)/mV
1	0,1654320	1,247172
2	-0,0567812	-0,428067
3	0,2546874	1,920058
4	0,1213200	0,914617
5	0,1645369	1,240424
6	-0,1211220	-0,913124
7	-0,2752432	-2,075025
8	-0,1185617	-0,893822
9	0,3112242	2,346282
10	0,2256100	1,700847
11	-0,3151230	-2,375674
12	-0,2567421	-1,935548
13	0,1442338	1,087362
14	0,2054970	1,549217
15	0,2867390	2,161691
16	-0,1248020	-0,940867
17	0,3151973	2,376235
18	0,2983740	2,249406
19	-0,0622382	-0,469206
20	0,1495237	1,127241
21	0,2265537	1,707961
22	-0,2629820	-1,982590
23	0,1466379	1,105485
24	-0,1495374	-1,127345
25	-0,2556637	-1,927418
26	-0,1853710	-1,397490
27	0,0843469	0,635881
28	0,1226540	0,924674
29	-0,2184210	-1,646650
30	0,1954137	1,473200
31	0,1684124	1,269641
32	-0,1863740	-1,405051
33	-0,2221987	-1,675129
34	0,2468237	1,860774
35	0,2874230	2,166848
36	0,3141320	2,368203
37	0,2953716	2,226771
38	-0,2853743	-2,151403
39	-0,3413700	-2,573547
40	-0,2486719	-1,874708
41	0,0953814	0,719069
42	0,3196400	2,409728
43	-0,2563700	-1,932743

Çizelge 10.2. (devam)

Ölçüm Sayısı	V_{DAC} (mV)	Sabit kaymaya Karşı gelen açısal hız (°/saat) SF =7,539 (°/saat)/mV
44	-0,1658200	-1,250097
45	0,3090207	2,329670
46	-0,3115237	-2,348540
47	-0,2687132	-2,025797
48	-0,1539870	-1,160890
49	-0,0649938	-0,489980
50	0,0846378	0,638074
51	0,3132830	2,361803
52	-0,0945268	-0,712626
53	0,0756852	0,570582
54	-0,2658740	-2,004392
55	-0,2556740	-1,927496
56	-0,2854790	-2,152192
57	0,2687412	2,026008
58	0,2671234	2,013811
59	0,2689414	2,027517
60	-0,2654871	-2,001475
61	-0,2658234	-2,004011
62	0,2982374	2,248376
63	0,2863471	2,158736
64	0,2937153	2,214285
65	0,2735239	2,062064
66	-0,2637410	-1,988312
67	-0,2985374	-2,250638
68	-0,0632471	-0,476812
69	-0,0837154	-0,631121
70	0,2523740	1,902617
71	0,0655535	0,494200
72	0,0631852	0,476346
73	-0,0561274	-0,423138
74	-0,0637150	-0,480340
75	-0,2635147	-1,986606
76	-0,2783452	-2,098411
77	0,2683740	2,023239
78	0,3111121	2,345437
79	0,0721252	0,543744
80	0,0869837	0,655760
81	0,2531473	1,908447
82	-0,0965378	-0,727787
83	-0,0853712	-0,643603
84	0,2867430	2,161721
85	0,2963745	2,234332

Çizelge 10.2. (devam)

Ölçüm Sayısı	V_{DAC} (mV)	Sabit kaymaya Karşı gelen açısal hız (°/saat) SF =7,539 (°/saat)/mV
86	0,0893715	0,673761
87	0,1995374	1,504289
88	-0,0842370	-0,635053
89	-0,0837144	-0,631113
90	-0,2993385	-2,256677
91	0,0853740	0,643624
92	-0,1993356	-1,502767
93	0,2883713	2,173996
94	0,1773823	1,337264
95	0,1753412	1,321876
96	0,1887437	1,422916
97	0,1638520	1,235261
98	0,2663741	2,008162
99	-0,0687434	-0,518248
100	-0,2685371	-2,024469
101	-0,0843712	-0,636065

Her bir voltaj verisi 1 Hz’lik gürültü band genişliğinde 100 adet örneklenmiş voltaj bilgisinden elde edilmiştir. BSKD-İFOJ prototipinin sabit kayma kararlılığı ölçümlerinde yine Denklem (7.1)’de verilen Allan Varyans modeli kullanılmıştır. Bu metoda göre BSKD-İFOJ prototipinin sabit kayma kararlılığı 1,48 (°/saat) olarak hesaplanmıştır. Tepeden tepeye gürültü değeri ise Çizelge 9.1’den verilen 4,97 (°/saat) olarak belirlenmiştir [Çelikel and San, 2008].

11. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu Doktora Tezi Çalışması'nda Türkiye'de ilk defa uygulanabilir nitelikte performans parametrelerine sahip Açık-Döngü ve Kapalı-Döngü İnterferometrik Fiber Optik Jiroskop (İFOJ) prototiplerinin hem optik ve hem de elektronik kısımlarının bir bütünlük içerisinde tasarımıyla prototiplerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Prototiplerin tasarımı esnasında yapılan ve detayları bu tez metni içerisinde verilen deneysel çalışmalarla ve bilhassa bu deneysel çalışmalar esnasında karşımıza çıkan teknik problemlerin anlaşılması, bunlara bilimsel mânâda çözümler üretilmesiyle, TÜBİTAK tarafından 10 Mart 2005 tarihinde düzenlenen 11. Bilim Teknoloji Yüksek Kurulu Toplantısının değerlendirme metninde yer alan “2005 yılında başlayıp 2011 yılının sonuna kadar uzanan bir periyot içerisinde jiroskop teknolojisinin geliştirilmesine” yönelik oluşturulan ulusal hedef için, gerekli bilgi alt yapısına önemli katkılar sağlanmıştır.

Bölüm 11.1'de optik ve elektronik kısım olarak temelde iki parçaya ayrılabilen Açık-Döngü ve Kapalı-Döngü İFOJ prototipleri için, bu Doktora Tezi çalışmasında kazanılan bilimsel alt yapıya dair özet bilgi ve deneysel sonuçlar tezin gelişimine uygun bir akış düzeni içerisinde okuyanların anlamasını kolaylaştırmak amacıyla sıralanmıştır.

Bölüm 11.2'de ise İFOJ'ların kullanım sahaları hakkında kısaca bilgi verilerek oluşturulan prototiplerden elde edilen bilimsel alt yapı ile hangi tip uygulamaların yurt içersinde yapılabileceği hakkında kısa öneri ve tartışmalar sunulmuştur.

11.1. Sonuçlar

a-) İFOJ'ta Sagnac Faz Kayması temelinde mutlak açısal hız algılama elemanı olarak optik fiber kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada ilk olarak Kritik Açı, Nümerik Açıklık temel optik fiber terimleri izah edilmiştir.

Temel terimlerin açıklanmasının ardından silindirik bir dielektrik dalga kılavuzu olan optik fiberde içerisinde yayılım gösteren elektromagnetik dalganın yayılım karakteristiğinin anlaşılabilmesi amacıyla elektromagnetik mod çözümleri için teorik hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar ile temel mod HE_{11} (sanki-enine elektrik mod) çözümüne ulaşılmış ve bu modun aslında birbirine dik iki polarize alan bileşeninden meydana geldiği yani iki kere dejenere olduğu sonucuna varılmıştır (LP_{01}). Bu sayede İFOJ'ta mod dağılımından kaynaklanan ve Sagnac Fazı'nı perdeleyen "Simetrik Optik Yol"daki bozulmanın engellenebilmesi için algılama fiberinde başarılması gerek tek modlu yayılımın nasıl gerçekleştirileceği hakkında teorik alt yapı sağlanmıştır. Kesim dalga boyu mod alan çapı gibi parametrelerin tek modlu iletimdeki konumları bu temelde anlatılmıştır.

b-) Teorik bilgi altyapısının oluşturulmasından sonra, İFOJ'un optik kısmında algılama sarımı olarak kullanılacak optik fiberin, belirli temel optik karakteristiklerinin yüksek doğruluklu ve kesinlikli ölçümler ile belirlenmesi gerekliliği aşikârdır. Dolayısıyla tasarımın bu ölçümler sonucunda elde edilen bilgiler ışığında gerçekleştirilmesi, İFOJ'un uygulanabilir nitelikte olmasını belirleyen performans kriterlerine sahip şekilde çalışmasına olanak sağlar.

İFOJ'un doğrudan performans kriterlerini etkileyen algılama sarımının başlıca optik karakteristikleri:

- i- Kesim dalga boyu
- ii- Mod alan çapı
- iii- Tayfsal zayıflama sabiti ve optik fiber uzunluğu

İFOJ prototiplerinde yer alan optik fiber algılama sarımı için gerçekleştirilen Kesim Dalga Boyu ölçümlerinde 1252 nm dalga boyu elde edilmiştir. Dolayısıyla İFOJ prototiplerinde algılama sarımı olarak kullanılacak olan optik fiberde, Sagnac Fazını perdeleyen "Simetrik Optik Yol"daki bozulmanın engellenebilmesi amacıyla tek modlu iletimin başarılması ve bunun içinde kullanılacak ışınım kaynağının dalga boyunun tayfsal band genişliğini de hesaba katarak 1252 nm'den daha uzun dalga boyuna sahip olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır[7].

Kesim Dalga Boyundan daha uzun dalga boylarına sahip ışıma kaynakları için optik fiber içersinde sağlanan tek modlu iletimde enerjiyi taşıyan bu tek modun çapının ölçümü önemli olduğu özellikle fiber/fiber, fiber/ışıma kaynağı ve fiber/fotodiyod ara yüzlerindeki birleştirme noktalarında ışıma kaynağının dalga boyuna göre bu kaybın da değişebileceği anlatılmıştır. Bu nedenle algılama sarımı optik fiber için 1306,7 nm ile 1550 nm’de Mod Alan Çapı ölçümleri gerçekleştirilerek dalga boyuna bağlı olarak yayılım gösteren tek modun optik fiber özü içersindeki genişliklerinin değişimleri gözlemlenmiştir. İFOJ prototiplerinde çeşitli noktalarda mevcut bulunan fiber eklerinin, fiber konnektör bağlantılarının ve fiber foto diyot bağlantı noktalarındaki kayıpların değerlendirilmesinde Mod Alan çapı ölçümleri önemli olmuştur. Mod Alan Çapı 1306,7 nm için 9,467 μm ve 1550 nm’de ise 10,649 μm olarak hesaplanmıştır [7]. Bu sonuçlara göre uzun dalga boylu ışınının kısa dalga boylu ışımandan çapça yaklaşık 1,2 μm ’lik bir fazlalık kısmının yansıtıcı katmandan ilerlediği sonucuna ulaşılmış ve fiber ek noktalarında öz/yansıtıcı katman eşleşmelerine dikkat edilerek ek kayıplarının 0,1 dB’den yüksek olmamasına özen gösterilmiştir.

Optik fiberin tayfsal zayıflama sabitinin dalga boyuna 4. dereceden bağımlı Rayleigh Saçılmasıyla ve bu saçılmaya göre daha küçük değerlerde olan ve özellikle Fe ile OH iyonlarının sebep olduğu soğurma etkisinden kaynaklandığı anlatılmıştır. Özellikle dalga boyuna 4. dereceden bağımlı olan Rayleigh Saçılması’nın açılal hız bilgisi taşıyan Sagnac Fazını perdelediği ve bunun önüne geçebilmek için küçük uyum uzunluğuna sahip kaynakların kullanılması gerekliliği sonucuna varılmıştır. Buna ilaveten İFOJ prototipinde kullanılacak optik fiberin tayfsal zayıflama sabitinin belirlenmesiyle kullanılacak ışıma kaynağının birim fiber boyu başına ne kadarlık bir zayıflatma göstereceği hesaplanarak aradaki ek ve konnektör bağlantı kayıplarının bu hesaba dahil edilerek fotodiyot üzerine düşen optik güç seviyesinin kestirilmesi mümkün olmuştur. Bu sayede küçük dalga boyunda yüksek optik uygulandığında artan Rayleigh Saçılmasından ve fiber/hava ara yüzeyinden Fresnel yansımalarından gürültü sinyallerinin oluşabileceği düşünülerek uygun dalga boyu değerinde uygun optik güç seviyelerinin kullanılması mümkün olmuştur. Dolayısıyla İFOJ prototipinde kullanılacak 1700 m (1,700 km) uzunluğa sahip fiber için 1290 nm’deki tayfsal zayıflatma sabiti değeri 0,411 (dB/km) ve 1590 nm’deki tayfsal zayıflatma

değeri de 0,191 (dB/km) olarak elde edilmiştir [9]. İFOJ prototipinde iki farklı optik kaynak kullanılmış olup bunlar EDFA ve SLD (Superluminescent Light Emitting Diode) kaynaklarıdır. EDFA kaynak 1593 nm merkezli ışımaya verirken SLD kaynağın tayfsal merkezi 1288,9 nm'dedir. Bu yüzden burada iki özel dalga boyu için iki tayfsal zayıflatma sabiti değeri verilmiştir. Fotodiyot üzerine düşen optik güç seviyeleri de 30 µW ilâ 90 µW arasında değişim göstermiştir.

Tayfsal zayıflatma sabiti ölçümleri esnasında optik fiberin geçiş zamanı ölçümü de gerçekleştirilmiştir. Optik fiber uzunluğu özellikle faz bilgisini taşıyan faz modülasyonlu fotodiyot akımını maksimize edilmesinde önemlidir. Algılama sarımı optik fiberin uzunluğu 8,405 µs olarak ölçülmüş ve faz modülasyon frekansı da;
 $f_m = 1/2.(8,405.10^{-6})$ Hz frekansına ayarlanarak Sagnac Fazını taşıyan fotodiyot akımını maksimize edilmiştir.

c-) İFOJ prototipinin performansını belirleyen temel optik fiber karakteristiklerinin ölçülmesine dair bilgiler verilmesinin ardından, temelde bir çift demet interferometrisi olan İFOJ kurgusunun anlaşılabilmesi için monokromatik ve polikromatik ışınım demetlerinden oluşturulan interferometrik düzenekler hakkında teorik bilgiler sunulmuştur. Elektromagnetik dalganın Zaman ve Frekans domenlerinde Fourier Dönüşümlerine yer verilerek saf bir monokromatik elektromagnetik dalganın zaman uzayında uyum uzunluğunun sonsuza gittiğini ancak belirli bir frekans genişliğine sahip polikromatik dalga için ise zaman domeninde fazın belirli bir τ_0 (uyum süresi - geçici uyumluluk) aralığında sabit kaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu bilgiler ışığında polikromatik ve monokromatik ışınım demetleri için çift demet interferometresinin tepki fonksiyonları elde edilerek esasında bir polikromatik çift demet interferometresi olan İFOJ'un (Sagnac İnterferometresi) PZT ile faz modülasyonuna tâbi tutulduğunda vermesi gereken doğru tepki fonksiyonu hakkında teorik bilgiler sunulmuştur.

d-) Çift demet interferometrisi hakkında sunulan bilgilerin ardından ilk defa 1913 yılında Fransız Fizikçi G. Sagnac tarafından sezilen Sagnac Faz Kayması hakkında teorik bilgiler tarihsel akışı içinde sunulmuştur. Bir çift demet interferometresinde Sagnac Faz Kayması etkisinin nasıl oluştuğu hakkında teorik bilgiler sunularak tasarımılanması planlanan İFOJ prototiplerinin açısal hıza bağlı olarak (°) cinsinden

ne kadarlık Sagnac Faz Kayması oluşturacağı ve [voltaj - açısal hız] arasındaki dönüşüm katsayısı olan Ölçek Faktörü'nün hangi fiziksel parametrelere bağlı olacağı bilgileri sunulmuştur.

e-) Sagnac Faz Kayması'nın algılanıp açısal hız bilgisinin türetildiği İFOJ için açık-döngü konfigürasyonunun tarifi yapılmış ve konfigürasyonda kullanılan optik elemanların detaylarından bahsedilerek Açık-Döngü İFOJ prototipi tasarımının çerçevesi oluşturulmuştur. Faz modülasyonlu interferometrik fiber optik jiroskobun matematiksel esaslarından bahsedilerek, Sagnac Fazı'nı taşıyan ve faz modülasyonu uygulanmış interferometrik sinyalin (fotoakım) fonksiyonu elde edilmiştir. Oluşturulan ilk İFOJ düzeneğinde elde edilen interferans sinyallerin teorik olarak hesaplanan fotoakım şekillenimiyle uyuşup uyuşmadığı osiloskop çıktılarıyla teyid edilmiş ve Sagnac Fazı'nı taşıyan sinyalin gerçek zamanlı çıktıları laboratuvar ortamında gözlemlenmiş ve bu veriler fotoğraflarla tez metni içerisinde paylaşılmıştır.

Yukarıda verilen çalışmaların ardından hem Açık-Döngü ve hem de Kapalı-Döngü İFOJ prototipleri için Sagnac Fazı'na karşı voltaj çıktısı üreten Dinamik faz İzleme Devresi'nin (Demodülasyon Devresi) tasarımı ile kullanılan aktif ve pasif elektronik devre elemanları ve bu devre elemanları ile oluşturulan devre katları hakkında detaylar ve prototiplerin fotoğrafları sunulmuştur.

f-) Oluşturulan Açık-Döngü İFOJ prototipinin karakterize edilmesi için yapılması gerekli ölçümlere ait detaylara geçmeden önce, İFOJ sensör sistemleri için performansı belirleyen temel parametreler olan Ölçek Faktörü (Scale Factor), Gelişi Güzel Yürüme'yi indükleyen (Random Walk) Gürültü (Noise) ile Doğrusal Olmayan Kerr Etkisi, Magnetooptik Faraday Etkisi ve Shupe Etkisiyle indüklenen Sabit Kayma Kararlılığı (Bias Stability / Bias Drift - Long Term Stability) parametrelerinden bahsedilmiştir.

g-) İFOJ için performans parametrelerinin açıklanmasını, oluşturulan prototipin karakterizasyon ölçümlerini kapsayan detaylar takip etmiştir. Açık-Döngü İFOJ prototipi için ilk olarak, prototipin uygulanan açısal hız karşı verdiği voltaj tepkisi olarak tanımlanan Ölçek Faktörü'nün belirlenmesine dair ölçüm gerçekleştirilmiştir.

Ölçümlere başlamadan önce İFOJ prototipi kuzeyden itibaren $40,8^\circ$ (ölçümün yapıldığı Gebze ilçesinin yeryüzü üzerindeki enlemsel açısı)'lık bir açıyla eğimlendirilmiş ve İFOJ'un açısal hıza duyarlı yüzeyi yeryüzünün dönüş eksenine dik konuma getirilerek yer yüzünün kendi etrafındaki dönüşünün İFOJ'da indükleyeceği Sagnac Fazı sıfırlanmıştır. Bu durumda $10 (^\circ/\text{saat})$ 'ten başlayıp $360 (^\circ/\text{saat})$ 'e kadar değişen hızlarda açısal hızlarda açısal hız değerleri İFOJ'a uygulanarak Dinamik Faz İzleme Devresi'nin voltaj çıktıları kaydedilmiştir. Açısal hız değerlerini, karşılık gelen voltaj çıktılarına bölerek ($SF = \Omega / V_{\text{demod}}$) Açık-Döngü İFOJ prototipinin Ölçek Faktörü $13,83 (^\circ/\text{saat})/\text{mV}$ olarak $0,73$ 'lük bir bağıl standard sapmayla $10 (^\circ/\text{saat}) - 360 (^\circ/\text{saat})$ aralığında hesaplanmıştır [Çelikel, 2007].

h-) Ölçek faktörünün belirlenmesine dair ölçümlerin sona ermesinden sonra bir diğer önemli parametre olan Sabit Kayma Kararlılığı ölçümü 5 saatlik bir süre boyunca gerçekleştirilmiştir. Allan Varyans Modeline göre Açık-Döngü İFOJ Prototipi için Sabit Kayma Kararlılığı $1,57 (^\circ/\text{saat})$ olarak elde edilirken en büyük gürültü değeri tepeden-tepeye $8 (^\circ/\text{saat})$ olarak gözlemlenmiştir [Çelikel, 2007].

ı-) Açık-Döngü İFOJ prototipinin ölçüm ve dolayısıyla karakterizasyon çalışmalarının tamamlanmasının ardından, Açık-Döngü İFOJ'un çıkışında faz modülasyonunun sonucu olarak karşımıza çıkan sinüs bağımlı voltajın oluşturduğu doğrusallığın bozulması probleminin söz konusu olduğu belirtilmiştir. Yüksek açısal hızlarda indüklenen büyük Sagnac Faz Kayma'larında büyük sapmalara yol açan bu durumu ortadan kaldırmak için mevcut Açık-Döngü İFOJ prototipine 89C51 mikroişlemci kontrollü 16 bit çalıştırılan AD7714 ADC'si ve 14 bit çalıştırılan LTC1667CG DAC'sinden oluşan bir geri besleme devresi eklenerek mevcut prototip için Bütünüyle Sayısal Kapalı-Döngü İFOJ (BSKD-İFOJ) oluşturulmuş ve Sagnac Fazı'nı sıfır yapan hata voltajı (V_{DAC}) bu durumda açısal hıza karşılık getirilmiştir. Bu yapıda doğrudan PZT faz modülatörüne dc kutuplama uygulayarak açısal hızdan kaynaklanan Sagnac Fazı'nın sıfırlanması sağlanmış ve İFOJ'ta faz modülasyonunun doğurduğu periyodik sinüs fonksiyonundan kaynaklanan doğrusallığın bozulması probleminin önüne geçilmiştir [Çelikel ve San, 2008].

i-) Oluşturulan geri besleme devresi ile Kapalı-Döngü İFOJ haline getirilen prototip için yine benzer pozisyonlama için Ölçek Faktörü ($SF = \Omega / V_{\text{DAC}}$) ölçümleri 1

(°/saat) -15270 (°/saat) açısal hız aralığında gerçekleştirilirken ve Sabit Kayma Kararlılığı ölçümleri de 6 saat boyunca alınan hata voltajlarının Allan varyans metoduna göre işlenmesiyle tamamlanmıştır [Çelikel ve San, 2008].

Ölçüm sonuçlarına göre BSKD-İFOJ prototipinin Ölçek Faktörü 1 (°/saat) - 15270 (°/saat) aralığındaki açısal hız değerleri için 7,539 (°/h)/mV olarak %0,85'lik bir bağıl standard sapma ile elde edilmiştir [Çelikel ve San, 2008].

Allan Varyans metoduna göre BSKD-İFOJ prototipinin Sabit Kayma Kararlılığı 1,48 (°/saat) olarak hesaplanmıştır. Tepeden tepeye gürültü değeri ise 4,97 (°/saat) olarak belirlenmiştir.

11.2. Öneriler

Bu Doktora Tez çalışması sonucu Türkiye’de ilk kez; hassas konumlamanın ve konumun gerçek zamanlı değişiminin izlenmesinde kullanılan Ataletsel Seyrüsefer (Inertial Navigation Ssytems – INS) Sistemlerinin en önemli kısımlarından birisi olan Açık-Döngü ve Kapalı-Döngü İFOJ prototipleri TÜBİTAK UME Optik Laboratuvarı Fiber Optik Metroloji Bölümü’nde oluşturulmuştur. Prototiplerin oluşturulması, teknik detayların bu Doktora Tezi’nde ortaya koyulması ve kazanılan bilgi alt yapısının uluslar arası bilim camiasında bilimsel yayınlarla ortaya koyulması bu stratejik ürünün artık yurtiçinde imâl edilebilir oluştuğunu ortaya koymaktadır.

Oluşturulan masaüstü prototipler için; Açık-Döngü İFOJ 1,57 (°/saat)’lik bir Sabit Kayma Kararlılığı’na sahipken aynı prototip için tepeden tepeye en büyük gürültü değeri 8 (°/saat)’tir. Kapalı-Döngü İFOJ için ise 1,48 (°/saat)’lik bir Sabit Kayma Kararlılığı 4,97 (°/saat) tepeden tepeye gürültü değeri elde edilmiştir [Çelikel ve San, 2008]. Taktik amaçlı füzelerin 1 (°/saat)’lik sınırını dikkate aldığımızda elde edilen Sabit Kayma Kararlılığı değerleri bu sınıra oldukça yakındır. Prototipler için erişilen Sabit Kayma Kararlılığı değerlerini göz önüne aldığımızda, bu değerler yaklaşık 4 nm’lik bir yol farkına karşılık gelen 26 µrad’lık Sagnac Faz Kayması sınırına özdeştir. Bu değerlendirmelerin ışığında prototipler hem metrolojik

uygulamalarda ve hem de hassas konumlamaya ihtiyaç duyulan noktalarda uygulanabilir niteliklere haizdir.

12. KAYNAKLAR

- [1] Soares, D.D.: Trends in Optical Fibre Metrology and Standards. NATO ASI Series. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston/ London (1994).
- [2] Derickson, D.: Fiber Optic Test and Measurement. Prentice Hall PTR., New Jersey (1998).
- [3] “Fibercore Limited, Fibercore House, University Parkway, Chilworth Science Park, Southampton, Hampshire, SO16 7QQ, United Kingdom” resmi internet sitesi. www.fibercore.com/ .
- [4] Grattan, K.T.V., Meggitt, B.T.: Optical Fiber Sensor Technology. Chapman & Hall, London (1995).
- [5] “Crystal Fibre A/S - Blokken 84, 3460 Birkerød, Denmark” resmi internet sitesi <http://www.crystal-fibre.com/products/airguide.shtm>.
- [6] Corning Incorporated SMF-28 Technical Data Sheet (2008).
- [7] Çelikel, O.: Mode Field Diameter and cut-off wavelength measurements of single mode optical fiber standards used in OTDR calibrations. Optical and Quantum Electronics. 37, 587 (2005).
- [8] Prof. Dr. C.D. Cantrell and Dr. Dawn M. Hollenbeck: Fiber Optic Mode Functions Tutorial. Erik Jonsson School of Engineering and Computer Science, Univeristy of Texas at Dallas Richardson, TX (November 11, 2001).
- [9] Çelikel, O., Kucukoglu, M., Durak, M., Samadov, F.:Determination of attenuation coefficients of single mode optical fiber standards to be used in OTDR calibrations. Optics & Laser Technology. 37, 420 (2005).

- [10] EN 60793-1-40 (2003): Optical fibres-Measurement methods and test procedures – Attenuation.
- [11] Culshaw, B.:The Optical fibre sagnac interferometer:an overview of its principles and applications. Meas. Sci. Technol. 17, R1 (2006).
- [12] Çelikel, O.: Construction and characterization of interferometric fiber optic gyroscope (IFOG) with erbium doped fiber amplifier. Optical and Quantum Electronics. **39** (2), 147 (2007).
- [13] Doç. Dr. Gökhun Tanyer EM-525 Fourier Optiği ve İstatistik Optik Yüksek Lisans Ders notları. Ankara Üniversitesi Elektronik Mühendisliği, (1995).
- [14] Dr. Fai Mok lecture notes. California Institute of Technology, 26 September 2006.
- [15] Loukianov, D., Rodloff, R., Sorg, H., Steiler, B.: Optical Gyros and Their Applications. (The Research and Technology Organization (RTO) of NATO printed by Canada Communication Group Inc.), (1999).
- [16] Arditty, H.J. and Lefevre, H.C.: Sagnac effect in fiber optic gyroscope. Optic Lett. **6** (8), 401 (1981).
- [17] Ulrich, R.:Fiber-optic rotation sensing with low drift. Optics Lett. **5** (5), 173 (1980).
- [18] Lefevre, H.: The Fiber Optic Gyroscope. Artech House, Boston/London (1993).
- [19] Merlo, S., Norgia, M. and Donati, S.: Fiber Gyroscope Principles. Electrooptics Group of University of Pavia, Italy (2000).
- [20] Bergh, R.A., Lefevre, H.C. and Shaw, H.J.: An overview of Fiber Optic Gyroscopes, Journal of Ligthwave Technology, **LT-2** (2), 91 (1984).

- [21] Chang, C.C. and Sirkis, J.S.: Design of fiber optic sensor systems for low velocity impact detection, *Smart Mater. Struct.* **7**, 166 (1998).
- [22] Dandridge A., Tveten A.B., and Giallorenzi T.G.: Homodyne Demodulation Scheme for Fiber Optic Sensors Using Phase Generated Carrier *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **QE-18**, (10), (1982).
- [23] Analog Devices - OPA 27 Operational Amplifier Data Sheet (2008).
- [24] Ivanov, E.V.: Bandpass crystal filter for enhanced phase-sensitive detection, , *Meas. Scien. Technol.* **10**, N77-N81 (1999).
- [25] Analog Devices - AD630 Balanced Modulator/Demodulator Data Sheet.
- [26] Hall, D.C., Burns, W.K. and Moeller, R.P.: High-stability Er^{3+} doped superfluorescent fiber sources, *Journal of Lighthwave Technology*. **13**, 1452, (1995).
- [27] Hamamatsu Photonics Infrared Detectors Product Catalogue. Japan (1997).
- [28] Iwatsuki, K.: Excess Noise Reduction in Fiber Gyroscope Using Broader Spectrum Linewidth Er-Doped Superfluorescent Fiber Laser. *IEEE Photonics Technology Lett.* **3** (3), 281 (1991).
- [29] Spears, Thomas G.: The Verdet Constant of Light Flint Glass. Physics Department, The College of Wooster, Wooster, Ohio 44691 (Dated: May 1, 2003).
- [30] Hotate K. and Tabe, K.: Drift of an Optical Fiber Gyroscope Caused by the Faraday Effect: Experiment. *Journal of Lighthwave Technology* **LT-5**, (7), 997 (1987).
- [31] Dangui, V., Kim, H.K., Digonnet, M.J.F. and Kino, G.S.: Phase sensitivity to temperature of the fundamental mode in air-guiding photonic band gap fibers. *Optic Express*. **13**, (18), 6669 (2005).

- [32] Arnaudov R. and Angelov, Y.: Earth rotation measurement with micromechanical yaw-rate gyro. *Meas. Sci. Technol.*, **16**, 2300 (2005).
- [33] Gaiffe, T., Cottreau, Y., Faussaot, N., Hardy G., Simonpietri, P. And Arditty, H.: Highly compact fiber optic gyrocompass for applications at depths up to 3,000 meters. *IEEE*, 0-7803-6378-7/00, (2000).
- [34] Moeller, R.P., Burns W.K., and Frigo N.J.: Open-Loop Output and Scale Factor Stability in a Fiber-Optic Gyroscope. *Journal of Lighthwave Technology*, **(7)**,2, 262 (1989).
- [35] Çelikel, O., and San, S.E.,: Establishment of All Digital Closed-Loop Interferometric Fiber Optic Gyroscope and Scale Factor Comparison for Open-Loop and All Digital Closed-Loop Configurations. *IEEE Sensors Journal*, Accepted (2008).
- [36] Çelikel, O., and San, S.E.,: Design Details and Characterization of All Digital Closed-Loop Interferometric Fiber Optic Gyroscope with SLED. *Optical Review*, Accepted (2008).

13. ÖZGEÇMİŞ

Yazar 1973 yılında Ankara Yenimahalle’de dünyaya gelmiştir. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Ankara’da tamamladıktan sonra 1990 yılında Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü’nde üniversite eğitime başlamıştır. 1994 yılında Lisans eğitimini tamamladıktan sonra aynı yıl Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Müh. Bölümünde Yüksek Lisans programına kabul edilmiş 1 yıl İngilizce Hazırlık Okulu’nun ardından ve Şubat 1998 yılında aynı bölümden Optoelektronik/Spektroskopi alanında yaptığı tez çalışmasıyla Fizik Yük. Müh. Ünvanı ile mezun olmuştur. Mart 2002 yılından beri TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü Optik Bölümü Fiber Optik Metroloji Bölümünde Araştırmacı olarak çalışmaktadır. Fiber Optik, Radyometri ve Fotometri alanında uluslar arası çeşitli hakemli dergilerde yayınları bulunan yazar İngilizce bilmektedir. Hüseyin Türkalp ve Ataberk adlarında iki çocuk babasıdır.