

Yasin ÜSTÜNOL

Yüksek Lisans Tezi

KÜ 2016

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yüksek Hassasiyetli Fiber Optik Jiroskopun
Modellenmesi ve Simülasyonu

Yasin ÜSTÜNOL

OCAK 2016

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalında Yasin ÜSTÜNOL tarafından hazırlanan YÜKSEK HASSASİYETLİ FİBER OPTİK JİROSKOPUN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Recep ÇALIN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY _____
Üye (Danışman) : Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM _____
Üye : Doç. Dr. Necaattin BARIŞÇI _____

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof.Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

YÜKSEK HASSASİYETLİ FİBER OPTİK JİROSKOPUN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

ÜSTÜNOL, Yasin

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Doç. Dr. Ertuğrul ÇAM

Ocak 2016, 93 sayfa

Jiroskoplar navigasyon, yer bulma, izleme ve doğrulama sistemlerinde kullanılan, açısal momentumun korunma ilkesine bağlı olarak çalışan ve sistemdeki dönüşü ölçen aletlerdir. Geçmişten günümüze kadar gelen sürede bir çok jiroskop tipi kullanılmıştır. Farklı jiroskop tipleri farklı amaçlarla askeri ve endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada jiroskopların yeni nesil tipi olan ‘fiber optik jiroskopun MATLAB-SIMULINK ortamında modellenmesi ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan fiber optik jiroskop modeli optik alıcı ve geri besleme modelleri olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmalarına göre farklı dijital örnekleme metodu kullanılarak jiroskopun hassasiyetinin artırılabilirdiği gözlemlenmiştir. Bu tezde fiber optik jiroskopun MATLAB modeli oluşturulması ve yapılan örnekleme tekniği sonucunda ortaya çıkan simülasyon sonuçları gösterilmektedir.

Anahtar kelimeler: Jiroskop, Fiber optik, Simülasyon

ABSTRACT

MODELING AND SIMULATION OF HIGH PRECISION CLOSED LOOP FIBER OPTIC GYROSCOPE

ÜSTÜNOL, Yasin

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Defence Technology, M. S. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr.. Ertuğrul ÇAM

January 2016, 93 pages

Gyroscopes are used for stabilization, navigation and tracking systems by measuring rotation which based on the principles of angular momentum. From past to present various types of gyroscopes are used. Different types of gyroscope are used in industrial and military area. In this paper we focused on modeling and simulation of 'fiber optic gyroscope' by MATLAB-SIMULINK tool. The model consists of two parts. One is optical receiver model another is modulation and feedback model. According to result of simulation we see that precision of fiber optic gyroscope can be increased by a different sampling method. In this work we presented that mat-lab model of fiber optic gyroscope and sampling technique effects on its performance.

Key Words: Gyroscope, Fiber optic, Simulation

TEŐEKKÖR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımcı esirgemeyen ve biz genç araştırmacılara büyük destek olan, bilimsel deney imkanlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine veren, tez yöneticisi hocam, Sayın Doç. Dr.Ertuğrul ÇAM'a, büyük fedakarlıklarla bana destek olan çalışma arkadaşım Mehdi DUMAN'a, ve son olarak bana birçok konuda olduğu gibi, tezimi hazırlamam esnasında da yardımlarını esirgemeyen aileme'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür İncelemesi.....	3
2. MATERYAL VE YÖNTEM	5
2.1. Fiber Optik Jiroskopun Bileşen Yapısı.....	5
2.1.1. Işık Kaynağı.....	6
2.1.2. Bağlaştırıcı, Kuplör (Coupler).....	7
2.1.3. Fiber Sargı.....	8
2.1.4. Polarizör.....	11
2.1.5. Dedektör.....	11
2.1.6. Faz Modülatörü.....	12
2.1.7. Çok Fonksiyonlu Optik Entegre (ÇFOE).....	14
2.2. Fiber Optik Jiroskopun Çalışma Prensibi.....	15
2.2.1. Fiber Optik Jiroskopun Gürültü Kaynakları.....	16
2.2.1.1. Shot Gürültüsü.....	16
2.2.1.2. Johnson Gürültüsü.....	18
2.2.2. Sagnac Etkisi.....	19
2.2.3. Karşılıklı Yapısı (Reciprocity).....	22
2.2.4. Sabit Kayma Modülasyonu.....	23
2.2.4.1. Kare Dalga Modülasyonu.....	27

2.2.5. Polarizasyon	31
2.3. Fiber Optik Jiroskop Konfigürasyonları.....	33
2.3.1. Açık Döngü Konfigürasyonu	33
2.3.2. Kapalı Döngü Konfigürasyonu	35
3. MODEL TASARIMI	39
3.1. Fiber Optik Jiroskop Faz Ölçüm Sistemi	39
3.1.1. Optik Alıcı Elektronik Sistemi	40
3.1.2. Geri Besleme Elektronik Sistemi	45
3.2. Fiber Optik Jiroskopun Modellenmesi	47
3.2.1. Optik Alıcı Sistem Modeli	47
3.2.1.1. Foto Diyot Bloğu	48
3.2.1.2. TIA Bloğu	51
3.2.1.3. Analog Anahtarlama Bloğu.....	51
3.2.1.4. Voltaj Kazanç Bloğu	53
3.2.1.5. İntegratör	53
3.2.2. Geri Besleme Devresi Modeli	55
3.2.2.1. Kapalı Döngü FOJ Periyot Analizi	57
3.2.2.2. Geribesleme Fazı Oluşturulması ve Reset Kontrolü.....	60
3.3. Simülasyon Çıktıları	64
3.3.1. Optik Alıcı Benzetimi	64
3.3.2. Geri Besleme Benzetimi.....	69
4. SONUÇLAR.....	74
KAYNAKLAR	75
EKLER.....	81
EK 1. Çok Fonksiyonlu Optik Entegre (ÇFOE) Teknik Dokümanı	81
EK 2. Işık Kaynağı Teknik Dokümanı	83

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. FOJ'un Temel Yapısı.....	5
2.2. FOJ Bileşen Dizilimi.....	7
2.3. Kuplörün Yapısı	8
2.4. Fiber Bileşenleri	9
2.5. Fiber Kabul Açısı	10
2.6. Çok Modlu ve Tek Modlu Fiber	10
2.7. Polarizasyon	11
2.8. Faz Modülatörü Yapısı.....	12
2.9. Modülatör Kontrol Diyagramı	13
2.10. ÇFOE Dalga Kılavuzları	14
2.11. FOJ Diyagramı (a) Faz Modülatörü İle (b) ÇFOE İle.....	15
2.12. İnterferogramda Sabit Kayma Noktası.....	17
2.13. Sagnac Etkisiyle Oluşan Yol Uzunluğu Değişimi	19
2.14. Dönü Hareketinde Giriş ve Çıkış Noktaları	20
2.15. Karşılıklı Yapısı Akış Diyagramı [25].....	23
2.16. Farklı Uzunlukta Dalga Gecikmesi	24
2.17. İnterferogram Eğrisi	25
2.18. Kare Dalga Modülasyonu [25].....	28
2.19. Optimal Frekanstaki Faz Modülatörü Kontrolü.....	29
2.20. Faz Farkı formu.....	30
2.21. FOJ'da Polarizör ve Depolarizör Konumu [34].....	32
2.22. PM Fiber Sargılı FOJ [34].....	33
2.23. FOJ Optik Entegre [34].....	33
2.24. Açık Döngü IFOJ [34]	34
2.25. Modülasyon Genliği.....	35
2.26. Kapalı Döngü Geri Besleme Sinyali [44]	36
2.27. Kapalı Döngü Diyagramı [47]	37
2.28. Modülasyon Basamak Aralığı [47]	38
3.1. Elektronik Ölçüm Sistemi Blok Diyagramı	40

3.2.	Optik Alıcı Devresi Blok Diyagramı	40
3.3.	Elektronik Devre Modeli.....	42
3.4.	İntegrasyon Devresi ve Olası Çıktıları.....	43
3.5.	Faz Modülasyon Sinyali.....	46
3.6.	Optik Alıcı Modeli Blok Diyagramı	48
3.7.	Fotodiyot Üzerinde Oluşan Optik Güç	49
3.8.	Faz Farkı Durumunda Fotodiyot Üzerinde Oluşan Optik Güç.....	50
3.9.	DC Bileşeni Elenen Fotodiyot Sinyali	50
3.10.	TIA Çıkış Sinyali	51
3.11.	TIA Çıkış Sinyali ve Anahtarlama İşlemi.....	52
3.12.	Anahtarlama Sonrası Çıkış Sinyali	52
3.13.	Kazanç OpAmp Çıkış Sinyali	53
3.14.	İntegratör Çıkışı	54
3.15.	FOJ Sayısal İşleme Yapısı	55
3.16.	Geri Besleme Kontrol Diyagramı	56
3.17.	Periyot Atlama Algoritması	59
3.18.	Faz Rampası.....	62
3.19.	FOJ Modeli Akış Şeması	63
3.20.	Optik Alıcı Transfer Fonksiyon Blok Şeması.....	65
3.21.	Optik Alıcı Simulink Modeli	66
3.22.	Fotodiyot Sinyali.....	66
3.23.	TIA Çıkış Sinyali	67
3.24.	Anahtar Sinyali ve Anahtarlama Çıkış Sinyali	67
3.25.	İntegratör Çıkış Sinyali	68
3.26.	Optik Güç.....	69
3.27.	FOJ Geri Besleme ve Faz Modülasyonu Modeli	70
3.28.	Sinyal Üretici.....	70
3.29.	Sagnac Faz Farkı.....	71
3.30.	Pi/2 ve -Pi/2 Fark Grafiği.....	71
3.31.	Giriş Sinyali ve Fazı Kaydırılan Sinyal	72
3.32.	Algoritma Eklenmemiş Faz Modülatörü Sinyali	73
3.33.	Algoritma Eklenmiş Faz Modülatörü Sinyali	73

1. GİRİŞ

Kapalı bir hat üzerindeki faz kaymasını bir lazer girişim aracı ile ölçme fikri, lazer tarihinin erken dönemlerine dayanmaktadır ve aviyonik araçlarda özellikle ataletsel navigasyon ve yön tayininde doğru sonuçlar elde etmek için iyi bir teknik olduğu öne sürülmüştür. 1961 yılında He-Ne tüplerinin girişim hesabı için uygun olduğu kabul gördükten sadece bir yıl sonra dünya dönüşünden kaynaklanan Sagnac etkisinin He-Ne tüpleri üzerinde yaklaşık 1 metre hataya neden olduğu Macek and Davis ikilisi tarafından öne sürülmüştür [1]. Dünyanın yarattığı bu ataletsel kayma ile birlikte bu alandaki çalışmalar yavaşlamıştır. 15 yıl süren uluslararası çalışmalarda çok sayıda makale yayınlamış ve bir çok problemin çözümüne dair çalışmalar ortaya konmuştur. Bunlardan en önemlilerinden biri küçük dönü seviyelerini ölçebilmek adına yapılan uygulamalar olmuştur [2]. 1970'li yıllarda lazer jiroskoplar (LJ) tam anlamıyla anlaşılmalı ve yüksek performans sağlayacak şekilde üretilebilme seviyesine ulaşmıştır. Sonunda askeri ve sivil alanda kullanılabilecek olan ataletsel navigasyon sistemlerinin seri üretimleri yapılmıştır. 1976'da Vali and Shorthill tarafından yapılan çalışma jiroskoplarda yayılma ortamı olarak fiberlerin kullanılması için avantaj sağlamıştır [3-4]. Bu gelişme Sagnac sinyallerinin daha hassas ölçülebileceği anlamına gelmekteydi. Fiberler modüler yapısıyla birlikte daha kolay üretim ve ucuz maliyet sağlamıştır. İlk başlarda fiber optik jiroskop (FOJ) tasarımları hassasiyet kavramından uzaktı fakat gelişen teknoloji ve bilimsel çalışmalar ile birlikte, özel fiberler ve pasif optik entegreler (kuplör, faz modülatörü) üretilmeye başlanmış ve FOJ tasarımlarında dramatik değişimler gözlenmeye başlanmış, karşılıklı kavramı, açık ve kapalı optik devre tasarımları gündeme gelmeye başlamıştır [5-7]. 1980'li yıllarda artık FOJ mühendisliği olgunluğa ulaşmış ve endüstrideki yerini almıştır. Daha önce kullanılan lazer jiroskoplara göre daha küçük ve daha hassas (~0.001 derece/saat) olan FOJ, LJ'nin yerini almıştır.

Günümüzde halen FOJ alanında yapılan çalışmalar devam etmektedir. Hassasiyeti artırmak, termal dayanıklılık, küçük boyut ve düşük maliyet uygulamaları askeri alanda olduğu gibi otomotiv ve robotik alanında da kullanılmaktadır.

Fiber optik dönü ölçerler (FOJ) bir çok alanda başarıyla kullanılmaktadır. Bu alanlar başlıca seyrüsefer ve güdüm sistemleri, kararlılık amaçlı kontrol sistemleri, yönelim referans sistemleri gibi alanlardır. Dönü ölçerler (jiroskoplar) seyir veya herhangi bir uygulama için gerekli olan yönelim bilgisini ölçmeye yarar. Fiber optik dönü ölçerlerin tercih edilmesindeki en önemli etkenler yüksek performansları, mekanik parçalarının az olması, elektromanyetik etkilere dayanıklılık olarak sıralanabilir. Buna rağmen FOJ tasarımındaki en önemli güçlükler kullanılan parçalarının çok hassas olması ve ölçülen büyüklüklerin çok küçük olmasıdır. Ölçüm aralığı küçüldükçe sinyal/gürültü oranı da küçülmektedir ve sinyalin gürültüden ayırt edilmesi hassas süreçler, hassas elektronik bileşenler gerektirmektedir. Bu gereksinimler maliyetin yükselmesine neden olmaktadır.

Bu tez fiber optik jiroskop tasarımı için gerekli olan sistem tanımı ve sistem benzetimini içermektedir. Sistem tanımı, tasarımın gerçekleşebilmesi için ön koşuldur. Sistem tanımı tasarımcıya genel bir alt yapı hazırlar ve sistemin yapısına göre kullanılacak ana bileşenler bu safhada büyük ölçüde belirlenir. Bu aşamada genel işlev akışı bellidir ve sistem bir bütün olarak ele alınmalıdır. Sistem tanımını bileşen analizi izler. Kapalı döngü FOJ benzetim ortamı olarak Matlab Simulink tercih edilmiştir. Bu tezde şimdiye kadar yapılan çalışmalardan farklı olarak ölçüm aralığını ve ölçüm hassasiyetini artırmak için periyot atlama analizi adını verdiğimiz bir sinyal işleme tekniği kullanılmaktadır. Bu işlem sayesinde, ölçüm aralığı teorik olarak limitsiz seviyeye ulaştırmak ve gerçek zamanlı sistemdeki kısıtların izin verebileceği seviyeye kadar dönüş açısı bilgisi ölçüm yapılabilmesi hedeflenmiştir. Kullanılan bu teknik ile bu alanda yapılacak çalışmalara yeni bir yaklaşım açısı sunmak ve literatüre katkıda bulunmak amaçlanmıştır. İlk bölümde FOJ çalışma mantığı incelenecek ve genel FOJ bileşenlerinden bahsedilecektir. Bu bölümde FOJ ile ilgili temel bilgi edindikten sonra FOJ elektronik mimarilerinden söz edilecektir. Daha sonraki bölümde ise FOJ benzetimi için gerekli olan sistem tanımı ve sistem parametreleri hesabı yapılacaktır. Son olarak benzetim ve sonuçları incelenerek tez sonlandırılacaktır.

1.1. Literatür İncelemesi

Günümüzde navigasyon ve yön bulma sistemlerinde kullanılan fiber optik jiroskoplara olan ilgi arttıkça bu alanda yapılan çalışmalar da aynı oranda artış göstermiştir. Yapılan çalışmaların birinde açık döngü interferometrik fiber optik jiroskopun yapısı ve işlevsel akışı tanımlanmış ve dönüş açısını hesaplamak üzere teorik yaklaşımlarda bulunulmuştur [8]. Diğer bir çalışmada FOJ sisteminin durağanlık ve hassasiyetine dolayısı ile performansına etki eden titreşim ve şok etkilerinin bilgisayar tabanlı modeli oluşturulmuştur [9]. [10]'da öne sürülen yaklaşımda ise kapalı döngü FOJ'un dinamik ve tahmini modellenmesi çalışılmıştır. Yapılan yaklaşımlar sonucunda lineer olmayan dinamik model basitleştirilerek lineer ve kesintili model oluşturulmuştur. Dünyanın manyetik alanı etkisinden kurtulmak için alternatif bir yöntem öneren çalışmada, sistemin azimut açısını hesaplama yöntemi anlatılmış ve yapılan sistem modelinde FOJ'un daha iyi sonuçlar verdiği ileri sürülmüştür [11]. Başka bir makalede jiroskop tasarlamak veya FOJ çıkış bilgisini dönüş bilgisine çevirmek amacıyla kullanılacak simülasyon ortamı geliştirilmiştir [12]. Fiber hat uzunluğunun, sistemin hassasiyeti üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmada uzunlukla beraber gelen bozucu etkenleri eleme yöntemlerine ilişkin yaklaşımlar belirtilmiştir [13]. Fiber optik jiroskop denklemlerinin temelini oluşturan teorilerden yola çıkarak, en uygun FOJ parametrelerinin ve bileşenlerinin seçiminin yapılmasını anlatan çalışmada ayrıca FOJ yapısına uygun yazılım ve donanım geliştirme seçeneklerinden bahsedilmiştir [14]. Diğer bir çalışmada faz modülasyonu ve sapma modülasyonu arasındaki ilişkiler teorik olarak analiz edilmiştir. Faz modülasyonu tekniklerinin FOJ performansı ve hata seviyeleri araştırılmıştır [15]. Bu alanda yapılan bir tez çalışmasında bir simülasyon yazılımı kullanılarak geri bildirim döngülü interferometrik fiber optik jiroskop simülasyonu yapılmıştır. Jiroskobun hareketsiz konumunda ve farklı açılarda dönmesi durumlarında elde edilen sonuçlar incelenmiştir [16]. Günümüzde bu alanda yapılan çalışmalar yoğun bir şekilde sürdürülmektedir. Özellikle hassas ölçüm gerektiren uygulamalar için geliştirilen sistemler az sayıdadır. Bu nedenle bu konudaki geliştirmeler önem arz etmektedir. Yapılan bu çalışmalardan farklı olarak bu tezde oluşturulan FOJ'un ölçüm aralığı ve hassasiyeti farklı bir örnekleme metodu kullanılarak artırılmak hedeflenmiştir. Bu işlem için periyot atlama algoritması

tasarlanmış ve MATLAB ortamında modellenmiştir. Ayrıca oluşturulan modelin sadece simülasyon ortamında değil, sonraki çalışmalarda donanım seviyesinde elektronik kart uygulamasına aktarılabilir şekilde oluşturulması amaçlanmıştır.

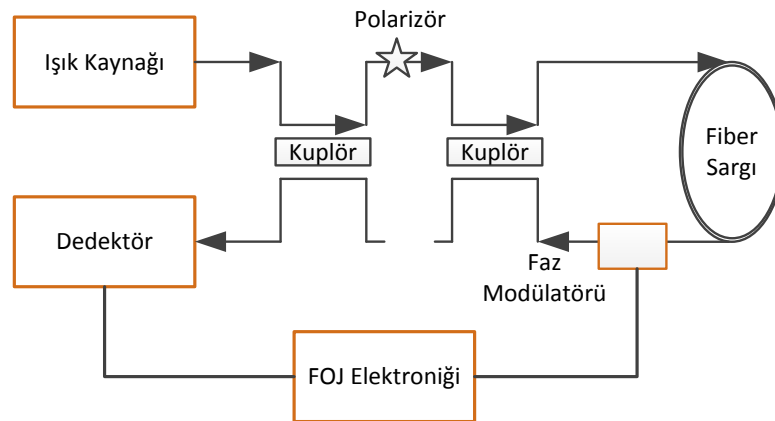


2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde ilk olarak fiber optik jiroskopun temel bileşenlerinden ve çalışma prensiplerinden bahsedilecektir. Daha sonra FOJ sisteminin teorik olarak temelini oluşturan Sagnac etkisi detaylı bir şekilde incelenecektir. Son kısımda açık ve kapalı döngü FOJ konfigürasyonları ve farkları ile ilgili bilgiler verilecektir.

2.1. Fiber Optik Jiroskopun Bileşen Yapısı

Fiber optik Jiroskopun temel öğeleri Şekil 2.1’de FOJ’un temel yapısını gösteren bileşenlerden meydana gelmektedir. Bu bölümde FOJ’un öğeleri, teknik gereksinimleri ve işlevleri hakkında bilgiler verilmektedir. Fiber optik dönü ölçerlerdeki temel bileşenler iki kısımda incelenebilir. Bunlar optik bileşenler ve elektronik bileşenlerdir. Optik bileşenler fiber sarım, ışık kaynağı, kuplörler, polarizör (kutuplayıcı), fotodedektör ve faz modülatörü olarak sıralanabilir. Elektronik bileşenler ise analog/sayısal çeviricileri (A/D), sayısal/analog (D/A) çeviriciler, analog yükselticiler ve işlemcilerdir.



Şekil 2.1. FOJ'un Temel Yapısı

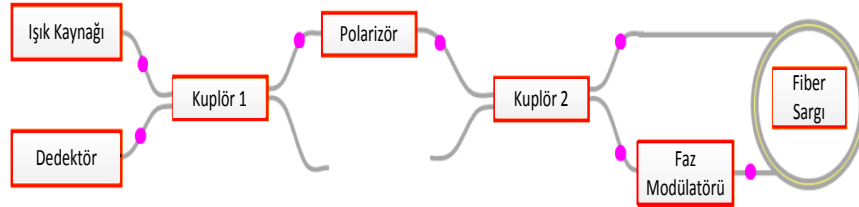
2.1.1. Işık Kaynağı

Güçlü bir optik sistemde bant genişliği dar ışık kaynakları kullanılırken, FOJ'un temel referansı olan ışık kaynağının geniş bant aralığına sahip olması gerekir [17]. Bu gereksinimin temel nedeni tek modlu ortamda (single-mode waveguide) önemli ölçüde gücü aktarabilmesinin gerekmesinden dolayıdır. Bu değer $100 \mu\text{W}$ veya daha büyük olmalıdır. Bir diğer önemli gereksinim ise 'Rayleigh Saçılması'nın (Rayleigh backscattering) neden olduğu hataları en aza indirebilecek yapıda olmasıdır. Optik fiber içerisinde saçılan ışıkların bir kısmı dedektöre kadar gider, istenmeyen bu ışık hüzmelerinin de dedektöre ulaşmasıyla, CW (saat yönü) ve CCW (saat yönünün tersi) ışık dalgalarıyla beraber dört dalga dedektör üzerine düşer. CW ve CCW dalgaları bilgi taşıırken saçılmış dalgalar sadece gürültü taşırlar, hiç bir anlam ifade etmezken, bilginin olduğu ışık dalgalarını da bozarak karmaşıklık oluştururlar. Bu saçılmanın kilometrelerce fiber hat boyunca çoğu kez farklı açılarla meydana gelebileceği düşünüldüğü zaman, bu gürültülerin kesinlikle yok edilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır [18]. Kullanılan Işık kaynağındaki bir diğer önemli unsur sabit dalga boyuna sahip olmasıdır. Çünkü ölçek faktörü (SF) dalga boyuyla doğrudan orantılıdır. Işık kaynağı olarak kullanılabilir olan kaynaklardan LED diyotlar (Light emitting diode) geniş bant aralığına ve düşük gürültü seviyesine sahip iken çıkış gücü düşüktür ve bağlanma verimliliği düşüktür. Lazer diyotların (LD) ise çıkış gücü çok yüksek olmasına karşın dar optik spektrum genişliği önemli bir dezavantajdır. LED ve LD arasında bir karakteristik özellik gösteren SLD (Superluminescent diode) yüksek çıkış gücüne sahiptir ve aynı zamanda geniş optik spektrumda çalışmaktadır. SLD'nin bu özellikleri saçılan ışıklardan kaynaklı gürültü ve faz kaymalarını engellemekte ve fiber optik jiroskoplar için ideal bir ışık kaynağı davranışı sergilemektedir. Fakat SLD'nin dezavantajı ise sıcaklık ve sürülme akımına bağlı olarak değişkenlik gösteren dalga boyudur. Bu problemi çözmek için SLD geliştirilerek daha karmaşık yapıya sahip olan FLS (Earth-doped fiber light source) üretilmiştir. FLS'nin dalga boyu sabitliği mükemmeldir ve fiber optik jiroskoplarda birinci tercih ışık kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu tasarımda amaçlanan işletim dalga boyu 1.550 mikrometre ve benzetim sonucunda elde edilen girdi ışık gücü ise 5 - 50 μW civarındadır. Işık kaynağının sahip olması gereken en önemli özellik dalga boyu ve optik güç kararlılığıdır. Dalga boyu kararlılığı otomatik

olarak bant genişliği kararlılığını da getirmektedir. Optik güç ve dalga boyu kararlılıkları sıcaklıkla doğrudan ilişkilidirler. Tüm FOJ mimarilerinde sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan dalga boyu ve optik güç değişimleri bastırılmalı ve kontrol edilmelidir.

2.1.2. Bağlaştırmacı, Kuplör (Coupler)

Bağlaştırmacıların ışığı bölme ve yönlendirme olmak üzere iki temel işlevi bulunmaktadır. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi fiber optik jiroskoplarda 2 adet bağlaştırmacı kullanılır. Kuplörler anahtarlama birimleri gibi davranır. Sinyali istenen kısma yönlendirir veya böler. Kuplörün sahip olması gereken en önemli özellik sinyali istenen yöne yönlendirmesi, güç kaybının çok az olması ve sinyal frekansındaki veya fazındaki uyumu bozacak herhangi bir unsur taşımamasıdır. Sinyal fazına herhangi bir eklenti olması bile ölçüm sonucunu değiştireceği için kabul edilemez sonuçlara yol açabilir.



Şekil 2.2. FOJ Bileşen Dizilimi

Birinci bağlaştırmacı;

- Işık kaynağından gelen ışığı ileri yönde fiber sargıya,
- Ters yönde ise dedektöre yönlendirir.

İkinci bağlaştırmacı;

- fiber sargı önünde bulunur ve ışığı iki eşit parçaya ayırır (CW ve CCW)
- Ters yönde fiber sargıdan gelen ışıkları birleştirir.

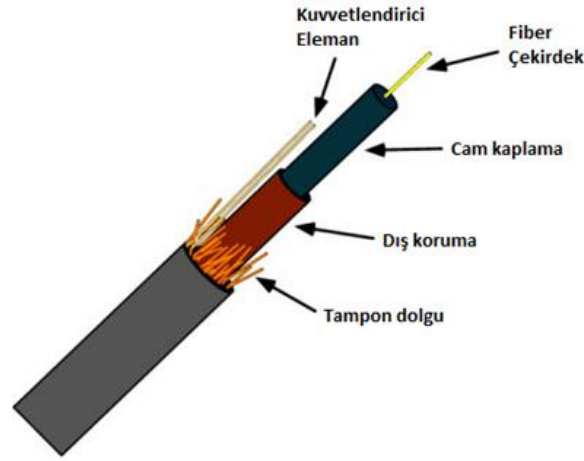
İdeal bir Y fiber optik bağlaştırmacı sinyali %50-50 oranında ikiye böler, Şekil 2.3 ile gösterilmiştir. Sinyalleri bu şekilde parçalamak için kullanılan bağlaştırmacılar ayırıcı anlamına gelen 'splitter' adını alır.



Şekil 2.3. Kuplörün Yapısı

2.1.3. Fiber Sargı

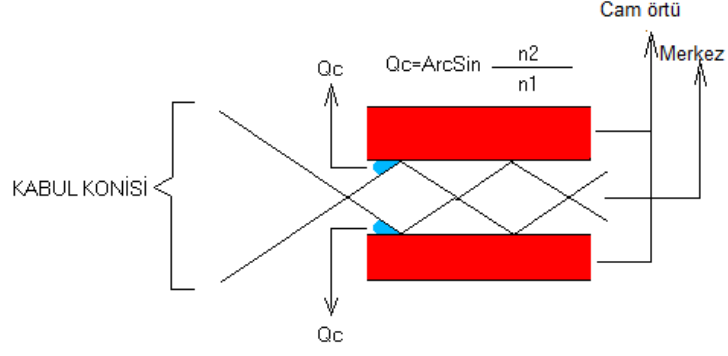
Fiber optik jiroskopların önemli bir parçası olan fiber sargılar Sagnac etkisinin doğrudan ilişkili olduğu parametrelerden biridir. Sonraki bölümlerde Sagnac faz kaymasında fiber optik sargının boyunun ve çapının nasıl bir rol oynadığı detaylı şekilde anlatılacaktır. Fiberler ışığın yansımaya ve kırılma kurallarına göre çalışır. Işık az yoğun ortamdan çok yoğun ortama geçerken yansır veya kırılarak ortamı terk eder. Işığın bu davranışı ortama geliş açısına bağlıdır. Işığın kırılıma uğrayarak fiber ortamı terk etmesi istenmeyen bir durumdur, ideal durum ışığın tam yansımalara uğrayarak fiber hat boyunca yoluna devam etmesidir. Fiber optik kablolar Şekil 2.4'te görüldüğü gibi üç kısımdan oluşur;



Şekil 2.4. Fiber Bileşenleri

- **Çekirdek (Merkez)**
Saf camdan yapılmış esnek bir malzemedir çapı 6-100 mikrometre arasında değişebilir. Fiberin merkezinde bulunur ve ışığın ilerlediği ortam burasıdır.
- **Cam Örtü**
Çekirdek üzerini saran yapıdır ve çekirdek ile aynı malzemenen yapılmıştır. Fakat kırılma indisleri çekirdekle farklılık gösterir. Bu farklılığın nedeni çekirdekten yansıyan ışığın cam örtüye çarparak dışarı çıkmadan geri yansımalarını sağlamaktır.
- **Kılıf**
Bu kısım fiber hattı çevresel etkenlerden korumak için en dış kısmında bulunan yapıdır. Optik çalışma prensibinde herhangi bir yeri yoktur.

Işığın fiber içerisinde yol alabilmesi için fibere belirli bir açı ile giriş yapması gerekir bu açı aralığını kaplayan bölgeye kabul konisi denir, Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Işığın iletimi için kabul edilen en büyük açı ise Eşitlik 2.1 ile verilmiştir.

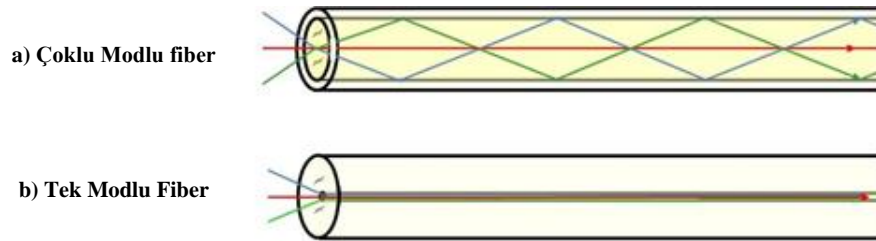


Şekil 2.5. Fiber Kabul Açısı

n_1, n_2 sırasıyla çekirdeğin ve cam örtünün kırılma indisleri olmak üzere kabul açısı:

$$\theta_m = \frac{1}{n_0} \arcsin\left(\sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right) \quad (2.1)$$

Fiberler ışığın içerisinde izleyebileceği yol sayısına göre tek modlu veya çok modlu olarak adlandırılır. Tek modda ışığın izleyebileceği tek bir yol varken, çapı daha büyük olan çok modlu fiberde ışık birden fazla yoldan ilerleyebilir. Bu ilerleyiş görsel olarak Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

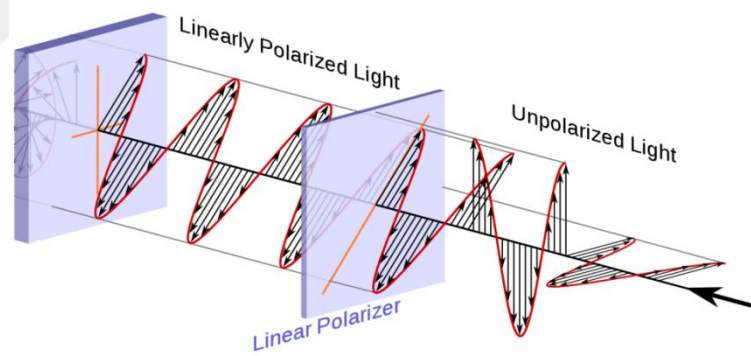


Şekil 2.6. Çok Modlu ve Tek Modlu Fiber

Ölçülebilir Sagnac Etkisi'nin oluşabilmesi için yeterince uzun ve yeterli kalitede fiber sarımı kullanılmalıdır. Bu tasarımda kullanılacak fiber sarımının uzunluğu 2000 metre ve fiber kırılma indisi 1.46 olarak belirlenmiştir.

2.1.4. Polarizör

Bölüm 2.2.2.'de anlatılacak olan karşılıklı yapısını sağlayan bir fiber optik jiroskop için polarizasyon hataları en aza indirmek için önemlidir. Polarizör kullanılmasının diğer bir amacı ise faz modülatörüne girecek olan sinyalin lineer polariteye sahip olması gerektiği içindir. Temel olarak polarizörün görevi girişindeki sinyalleri çıkışta istenen tek polarizasyonlu sinyale göre elemektir [19]. Şekil 2.7'de polarizasyona uğrayan sinyal görsel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 2.7. Polarizasyon

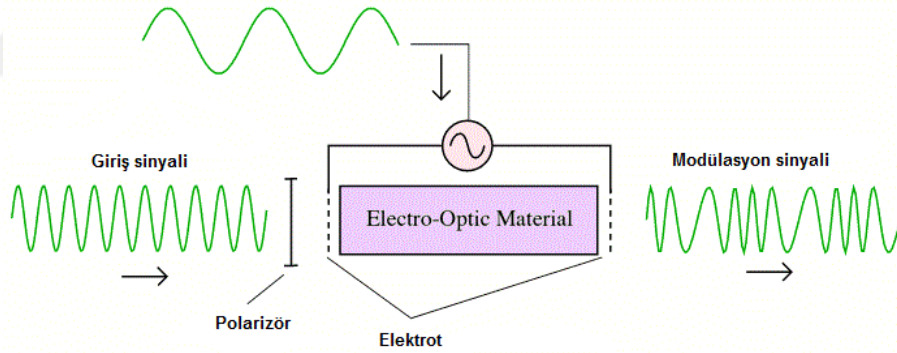
2.1.5. Dedektör

FOJ'larda kullanılan foto dedektörler ışık gücünün yoğunluğuna bağlı olarak elektrik akımını üreten bileşenlerdir. Fiber optik jiroskopta kullanılacak olan dedektör aşağıdaki özellikleri sağlaması gerekmektedir. Yüksek kuantum verimliliği, yüksek

lineerlik, düşük gürültü, düşük sıcaklık hassasiyeti ve yüksek kuantum verimliliği üzerine düşen ışık yoğunluğunda maksimum çıkış sağlaması anlamına gelmektedir. Bu özelliği içeren PIN foto diyotlar fiber optik jiroskoplarda birinci tercih sırasını alırlar [20]. Bu tasarımda öngörülen kuantum verimliliği 0.85'dir.

2.1.6. Faz Modülatörü

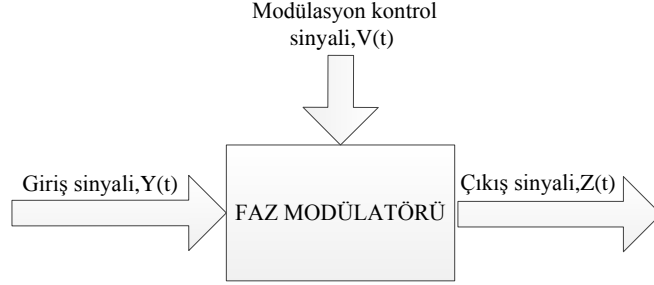
FOJ için uygun frekans modülasyonu işlemini yapan birim faz modülatörüdür. Değişen elektrik alana göre sergilediği karakteristik özellikleri de değişen özel yalıtkan (dielectric) malzemeden üretilen modülatörler elektro-optik faz modülatörü olarak adlandırılır. Uygulanan voltaja göre elektrik alan üreten iki elektrot arasında bir dalga kılavuzu (waveguide) bulunur, Şekil 2.8'de görülmektedir. Faz modülatörünün kullanımı, jiroskopta oluşan rotasyonun hangi yönde olduğunun bilinmesini sağlar.



Şekil 2.8. Faz Modülatörü Yapısı

Elektro optik faz modülatörüne π radyan kadar faz modülasyonu yaptırmak için uygulanması gereken gerilimin formülü Eşitlik 2.2 ile verilmiştir. V_{π} uygulacak gerilim, L faz modülatörünün uzunluğu, d elektrotlar veya kapasitörler arası uzaklık, λ ışığın dalga boyu, n_z ve r_{33} elektro-optik sabitleri olmak üzere aşağıdaki gibi hesaplanır [21].

$$V_{\pi} = \frac{d\lambda}{n_z^3 r_{33} L} \quad (2.2)$$



Şekil 2.9. Modülatör Kontrol Diyagramı

Şekil 2.9 faz modülatörünün matematiksel modelini göstermektedir. Faz modülatörü çıkış sinyali Eşitlik 2.3'teki gibi olacaktır.

$$Z(t) = Y(t + KV(t)) \quad (2.3)$$

FOJ'da giriş sinyali $Y(t)$ Eşitlik 2.4'te gösterildiği gibi sinüzoidal bir formdadır.

$$Y(t) = A \sin(\omega_m t) \quad (2.4)$$

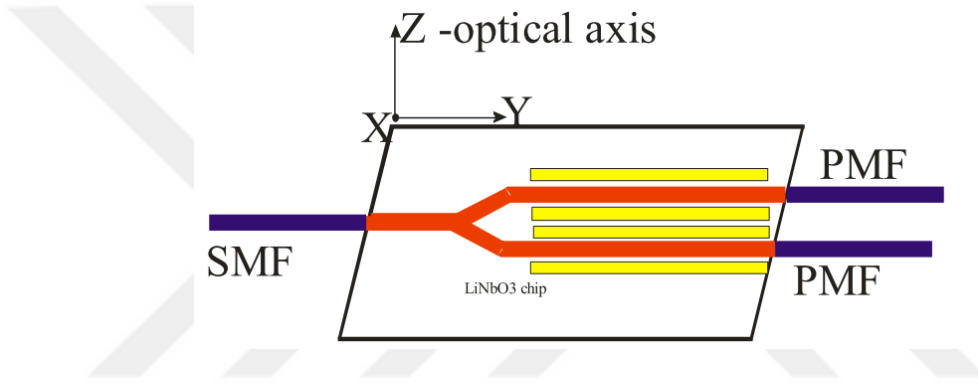
$Y(t)$ Eşitlik 2.3'te yerine yazılırsa,

$$Z(t) = A \sin(\omega_m t + KV(t)) \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.5'te görüldüğü gibi idealde faz modülatörü girdi sinyalinin büyüklüğünü değiştirmemeli yalnızca faz üzerinde etkide bulunmalıdır.

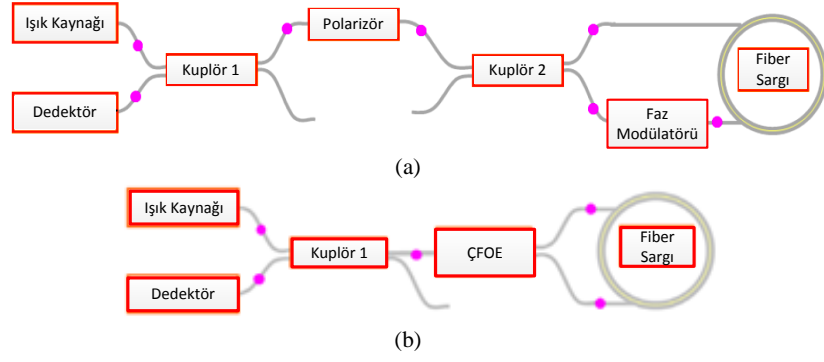
2.1.7. Çok Fonksiyonlu Optik Entegre (ÇFOE)

ÇFOE gelişen teknoloji ile geliştirilmiş bir faz modülatörü olmasının yanı sıra içerisinde polarizör ve kuplör içeren bir optik entegredir [22]. Fiber kuplörden gelen ışık ÇFOE içerisindeki polarizörde 60dB ve üzeri bir seviyede polarize edilir. Böyle yüksek bir seviyede yapılan polarizasyon sayesinde hata oranı minimum seviyeye indirilir. ÇFOE içerisindeki Y kuplörde eşit genliklerde ikiye ayrılan ışık ilgili dalga kılavuzlarına iletilerek, yine ÇFOE içerisindeki faz modülatörü ile modüle edilir, Şekil 2.10 ile gösterilmiştir.



Şekil 2.10. ÇFOE Dalga Kılavuzları

ÇFOE bileşeninin çalışma prensibi uygulanan voltaja göre sinyaller arasında faz kayması yaratmasıdır. ÇFOE içerisinde bulunan dalga kılavuzlarına voltaj farkı uygulandığı zaman, dalga kılavuzları arasından geçen ışığın hızında uygulanan voltaj seviyesine göre bir azalma meydana gelir. Bundan dolayı, yavaşlayan ışıklar arasında belli bir faz farkı oluşturur. Bu şekilde modülasyon işlemini gerçekleştirir. ÇFOE entegresinin kullanılmasının en büyük avantajı fiber optik jiroskop yapısında kullanılan elemanları içererek konfigürasyon kalabalığını minimize etmesidir. Bu durum Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. FOJ Diyagramı (a) Faz Modülatörü İle (b) ÇFOE İle

ÇFOE üretiminde kullanılan HTPe (High-Temperature Proton Exchange method) teknolojisinin sağladığı,

- Yüksek seviye polarizasyon
- Düşük sürme gerilimi
- Fiber bağlantı noktalarında düşük kayıp

Gibi avantajlar FOJ tasarımında tercih edilme sebeplerinden bazılarıdır.

2.2. Fiber Optik Jiroskopun Çalışma Prensibi

Fiber optik jiroskopların detaylı çalışma mantığını ayrıntılı olarak diğer bölümde anlatacağız fakat sistemin yapısını ve işleyişini anlamak için tipik bir fiber optik jiroskop' un yapısının nasıl olduğunu bilmek gerekmektedir. FOJ bir ışık kaynağı, iki kuplör, faz modülatörü fiber sargı ve foto dedektörden oluşmaktadır. İki kola bölünmüş olan ışık fiber sargı üzerinde ters yönlere hareket ederler ve fiber sargının dönü hareketiyle birlikte aralarında bir faz farkı oluşur. Dönü miktarıyla orantılı olan bu faz farkı dedektör üzerine düşer ve ışık dalgaları arasında oluşan girişim paterni elde edilmiş olur.

2.2.1. Fiber Optik Jiroskopun Gürültü Kaynakları

FOJ'da baskın gürültü kaynakları Shot, Johnson, termal, yeğlilik olarak sıralanabilir. Bunlardan Shot ve Johnson gürültüleri en baskın gürültülerdir. Shot gürültüsü dedektöre rasgele çarpan fotonların oluşturduğu elektronlar tarafından yaratılan gürültüdür. Johnson ise ısı etkilerden kaynaklanan dirençlerde dolaşan elektronların oluşturduğu gürültüdür. Termal gürültü, ısı etkilerin fiber sarımının kırılma indisini değiştirmesi sonucu oluşan gürültüdür. Göreli yeğlilik ise FOJ'de kullanılan ışığın ne kadar geniş bantlı (broad-band) olduğuyla ilgili olan gürültüdür.

2.2.1.1. Shot Gürültüsü

Eşitlik 2.6'da Shot gürültüsünün güç spektral yoğunluğu gösterilmiştir.

$$S(f) = 2\pi S(\omega) = 2e\langle i \rangle \quad (2.6)$$

Shot gürültüsünün güç spektral yoğunluğu (S), Elektron yükü (e), akımın ortalama değeri ($\langle i \rangle$), bant genişliği (B), kuantum verimliliği (ρ) ile gösterilmiştir. Eşitlik 2.7'de Shot gürültüsünün varyansı belirtilen denklem ile bulunmuştur.

$$\sigma_i^2 = S(f)B = 2e\langle i \rangle B \quad (2.7)$$

Sinyal-gürültü oranı (SNR) ise Eşitlik 2.8 ile verilmiştir.

$$\text{SNR} = \frac{\langle i \rangle}{\sigma_i^2} = \sqrt{\frac{\langle i \rangle}{2eB}} \quad (2.8)$$

Optik dedektördeki Shot gürültüsünü hesaplanırsa, Sagnac fazından kaynaklanan güç Eşitlik 2.9'daki denklemle hesaplanır.

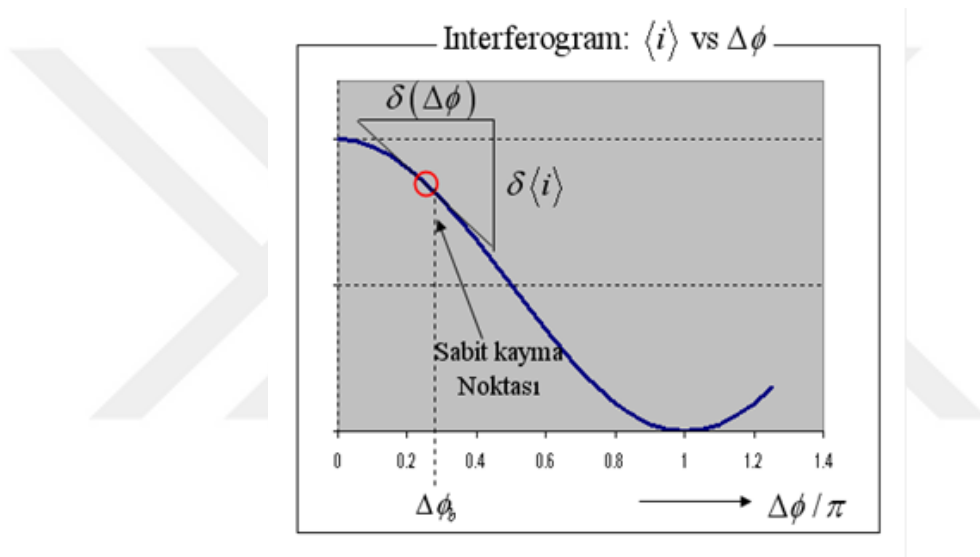
$$\langle P(\Delta\phi_{\text{sagnac}}) \rangle = \frac{I_0}{2} (1 + \cos(\Delta\phi_{\text{sagnac}})) \quad (2.9)$$

Foto dedektörün kuantum verimliliğın hesaba katarak dedektör çıkışındaki ortalama akım değeri Eşitlik 2.10 ve 2.11’de verilmiştir.

$$\langle i \rangle = \rho \langle P \rangle \quad (2.10)$$

$$\langle i(\Delta\phi_{\text{sagnac}}) \rangle = \frac{I_0}{2} \rho (1 + \cos(\Delta\phi_{\text{sagnac}})) \quad (2.11)$$

Şekil 2.12’de interferogram eğrisindeki sabit kayma noktası gösterilmiştir.



Şekil 2.12. İnterferogramda Sabit Kayma Noktası

Sabit kayma noktasına göre ortalama güç hesaplanırsa, eğim Eşitlik 2.12’deki gibi olur.

$$\left. \frac{d\langle i \rangle}{d(\Delta\phi)} \right|_{\Delta\phi_b} = \frac{I_0}{2} \rho \sin(\Delta\phi_b) \quad (2.12)$$

Akım dalgalanmalarına karşılık gelen faz dalgalanmasının değişkeni (varyansı) Eşitlik 2.13’de verilmiştir.

$$\sigma_{\Delta\phi}^2 = \left[\frac{d(\Delta\phi)}{d(i)} \Big|_{\Delta\phi_b} \right]^2 \times \sigma_i^2 \quad (2.13)$$

σ_i^2 ’nin değerini yerine yazarsak Eşitlik 2.14’te gösterilen denklem elde edilir.

$$\sigma_{\Delta\phi} = \sqrt{\frac{2eB}{\rho I_0} \frac{1}{\sin(\Delta\phi_b/2)}} \quad (2.14)$$

1σ değeri bant genişliğine, optik güce, kuantum verimliliğine ve sabit kayma noktasına bağlıdır. Sabit kayma noktasını π ’ye ayarlanırsa, faz dalgalanmalarını minimize eder; ama sabit kayma noktası π ’ye ayarlandığında interferogramda sürekli karanlık noktalar görülür ve hiç bir şey ölçülemez. İnterferogramın doğrusallığını da düşünürsek sabit kayma noktasını $\pi/2$ ’ye ayarlanması gerekir. Optik gücü arttırmak gürültü kaynaklı çalkantıyı azaltacaktır. Optik güç ayarlanarak A/D’nin 1 LSB’si bu 1σ çalkantısını ölçebilecek şekilde ayarlanmalıdır.

2.2.1.2. Johnson Gürültüsü

Johnson gürültüsü yükselticideki akımı voltaja çevirirken oluşan gürültüdür. Genel olarak tüm dirençlerde bu tip gürültü vardır ve değeri bant genişliğine ve ortam sıcaklığına göre değişmektedir. Yükselticideki geçiş empedans değeri artırılarak akım dalgalanması düşürülebilir. Eşitlik 2.15’te Johnson gürültüsünden kaynaklanan akım dalgalanmasının değişkesi gösterilmiştir.

$$\sigma_i^2 = \frac{4kT}{R} B \quad (2.15)$$

B : Bant genişliği, Hz

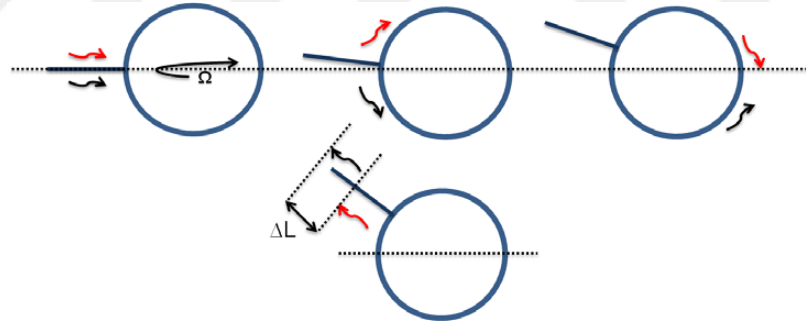
R : Akım-voltaj çevirici direnci (trans-empedance), ohm

T : Ortam sıcaklığı, Kelvin

Johnson gürültü Shot gürültüsüyle karşılaştırıldığında ihmal edilebilir düzeydedir. Fakat sıcaklık arttıkça Johnson gürültüsü baskınlaşacağı için tasarım sürecinde bu gürültü gözletilmelidir. Diğer bir çözüm Johnson gürültüsü ve diğer tüm gürültüleri ihmal edilip Shot gürültüsünün iki katı alınarak da hesap yapılabilir.

2.2.2. Sagnac Etkisi

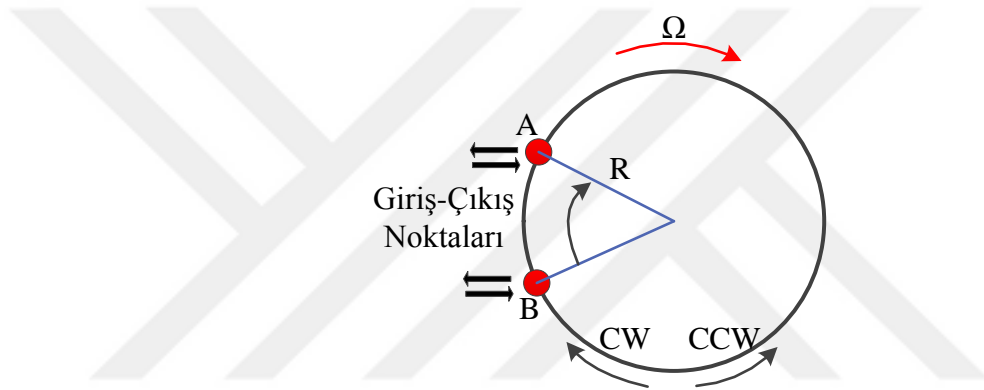
Sagnac Etkisi, FOJ çalışma prensibinin temel yapısını oluşturan kuramdır. Adını bu alanda çalışan Geroges Sagnac tarafından almıştır. Sagnac temel olarak Ω dönme hızına sahip bir interferometrik halkada dönme hızı ile orantılı $\Delta\phi$ miktarında bir faz kayması oluşacağını ileri sürmüştür [23]. Şekil 2.13 Sagnac etkisinin anlaşılması için iyi bir gösterimdir.



Şekil 2.13. Sagnac Etkisiyle Oluşan Yol Uzunluğu Değişimi

Işık dalgaları birbirine ters yönde hareket ederken halka hareket haline geçiyor ve ışık dalgalarının birbirlerine göre aldıkları yol uzunlukları arasında, halkanın dönme miktarı ile orantılı bir fark oluşur bu da elektriksel bir faz farkına neden olur [24]. Sagnac etkisinin fiziksel açıklaması bu şekilde iken matematiksel çözümlemesi ise ışık dalgalarının yolculuk zamanlarından diğer bir deyişle faz farklarından hareketle hesaplanır. Işığın hızı tüm referans çerçevelerinde aynı olduğu için fiber içindeki

gözlemci ve herhangi bir laboratuvar referans çerçevesinden ölçülecek ışığın hızı sabittir. Fiber sarım içinde ölçülen ışığın hızı sabit olduğuna göre, fiber sarım içindeki gözlemciye göre ışık fiber sarımıyla birlikte dönmüyor gibi görünecektir. Şekil 2.14'teki A ve B noktalarından çıkan ışık dalgaları eğer fiber halka durağansa aynı zamanda, fiber halka dönüyorsa farklı zamanlarda fiber sarımından çıkacaklardır. FOJ, dönünün neden olduğu zaman kayması neticesinde oluşan dalgalar arası faz kaymasını ölçerek dönüyü hesaplar. Verilen parametrelerden R sargı yarı çapı, $L = 2\pi R$ çemberin çevresi, $A = \pi R^2$ sistem alanı, c ışık hızı, Ω halka sargının açısal hızı cw saat yönü ve ccw saat yönünün tersini göstermektedir.



Şekil 2.14. Dönü Hareketinde Giriş ve Çıkış Noktaları

Işık halkaya sadece belirli noktalardan giriş ve çıkış yapar. Eğer fiber sargı hareket ederse giriş ve çıkış noktaları da yer değiştirmiş olur. Bunun sonucu olarak birbirine ters yönde hareket eden ışık dalgaları arasında bir turu tamamlamak için gereken zamanlar arasında fark meydana gelir. Işık dalgalarının aldıkları yol uzunlukları Eşitlik 2.16 ve 2.17'de gösterilmiştir.

$$L_{ccw} = 2\pi R - R\Omega t_{ccw} \quad (2.16)$$

$$L_{cw} = 2\pi R + R\Omega t_{cw} \quad (2.17)$$

Işık dalgalarının yolu tamamladıkları süreler Eşitlik 2.18 ve 2.19'deki gibi olur.

$$t_{ccw} = \frac{R(2\pi - \Omega t_{ccw})}{c} \quad (2.18)$$

$$t_{cw} = \frac{R(2\pi + \Omega t_{cw})}{c} \quad (2.19)$$

İki Eşitlik ayrı ayrı çözülürse süreler arasındaki fark Eşitlik 2.20'deki gibi olur.

$$\Delta t = t_{cw} - t_{ccw} = 4\pi \frac{R}{c} \left(\frac{R\Omega}{c} \right) \quad (2.20)$$

Fiber sargıların uzunluğu genelde fazla olduğundan ve sistem yapısına göre değiştiğinden dolayı sargı sayısına N denirse zaman farkı Eşitlik 2.21'deki hali alır.

$$\Delta t = t_{cw} - t_{ccw} = 4\pi \frac{RN}{c} \left(\frac{R\Omega}{c} \right) \quad (2.21)$$

Fiber sargının uzunluğu $L = 2\pi RN$ ve halka çapı $D = 2R$ olmak üzere:

$$\Delta t = \frac{LD\Omega}{c^2} \quad (2.22)$$

Zaman farkı Eşitlik 2.22'deki gibi hesaplanır. Elde edilen zaman farkından faz kayması ise Eşitlik 2.23'ten elde edilir.

$$\Delta\phi = \omega \cdot \Delta t = \frac{\omega \cdot L \cdot D \cdot \Omega}{c^2} \quad (2.23)$$

Dalga boyu λ olan bir ışık dalgasının uzunluğu L çapı D olan fiber sargı boyunca aldığı yoldaki faz kayması Eşitlik 2.24 ile ifade edilir.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi \cdot L \cdot D \cdot \Omega}{\lambda \cdot c} \quad (2.24)$$

FOJ'lar için bir diğer önemli parametre ise ölçek faktörü veya orantı katsayısıdır [25].

$$SF = K_s = \Delta\phi/\Omega = \frac{2\pi.L.D}{\lambda.c} \quad (2.25)$$

Eşitlik 2.25 Sagnac faz kaymasının nasıl oluştuğunu açıklamaktadır. Fiber optik dönü ölçerlerde asıl ölçülen büyüklük bu faz kaymasının neden olduğu güç dalgalanmalarıdır. Tek renkli dalga girişimi incelenecek olursa, girişim sonucu oluşan dalganın gücü girişen dalgalarının gücü ve aralarındaki faz farkı ile ilişkilidir.

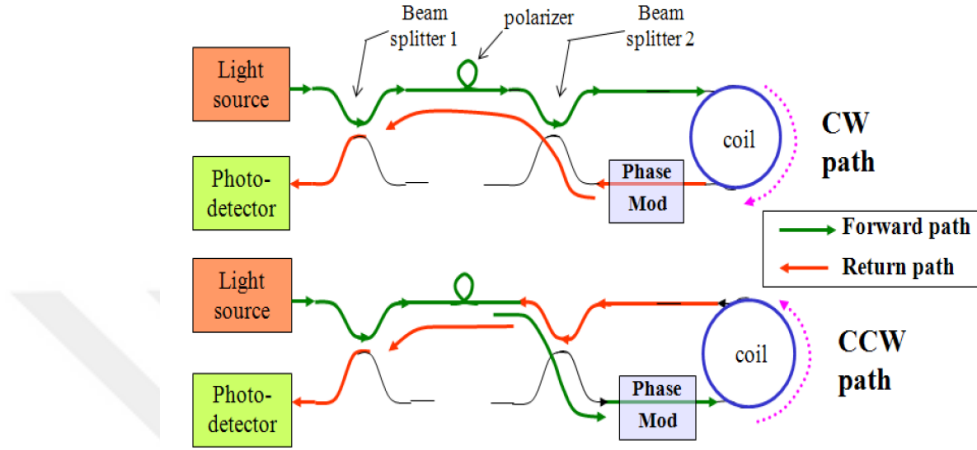
2.2.3. Karşılıklı Yapısı (Reciprocity)

FOJ sistemlerinde Sagnac faz kaymasını doğru ölçebilmek ve çevresel etkilerden doğan gürültüleri elemek için karşılıklı yapısı olarak adlandırılan bir konfigürasyon kullanılır. Çünkü Sagnac faz kayması çok küçük olduğu için dış etkenler Sagnac etkisini bastırır ve anlaşılabilir duruma getirir. Karşılıklı yapısı bir FOJ için önemli bir doğruluk ve kalite ölçüsüdür.

Lazer ışınları ışın ikiye ayrıldıktan sonra fiber uçlara doğru yönelirler ve çıkışta birleşerek bir girişim oluştururlar. FOJ konfigürasyonunda elemanların yerleşimi giriş gücünü fazla etkilemese de çıkışta faz uyuşmasını bozar bu sorundan kurtulmak için FOJ'un karşılıklı yapıya sahip olması gerekmektedir [26]. Karşılıklılık yapısının uygulanması için sistemde dönüş olmadığı zaman birbirine zıt yönde ilerleyen ışık dalgalarının aynı uzunluktaki yol üzerinde yolculuklarını aynı sürede tamamlamaları gerekmektedir. Bu şekildeki bir sistemde çevresel etkilerden dolayı sinyaller üzerinde oluşan faz farklılıkları her iki sinyal için aynı oranda olacağı için çıkışta faz gecikmeleri arasında fark oluşmaz. Karşılıklı yapısının temel amacı ışınların ters yönlerde olmak üzere özdeş yolları kullanmalarını sağlamaktır [27-29].

Şekil 2.15'te CW ve CCW ışık dalgaları özdeş yolları ters yönlerde izlemektedir. CW 1. Işın bölücü (Beam splitter 1) daha sonra 2. Işın bölücü (Beam splitter 2)' den geçtikten sonra halkaya girer. Halkadan çıkmak için 2. Işın bölücü ve tekrar 1. Işın

bölücüye izleyerek dedektöre ulaşır. Aynı yolu CCW dalgası da izler, aynı zamanda iki dalga da yolculuklarının sonunda faz modülatorüne girer fakat tek fark ters yönde girmeleridir.



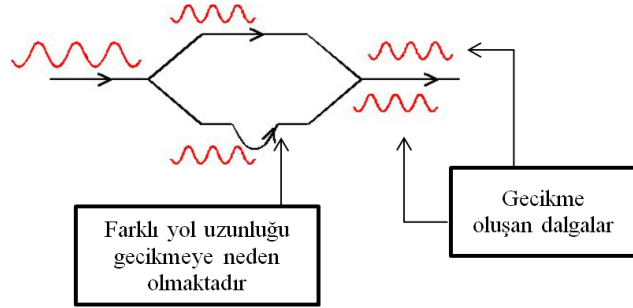
Şekil 2.15. Karşılıklı Yapısı Akış Diyagramı [25]

FOJ sisteminde karşılıklı yapısını kurup uygun bir operasyonu devam ettirmek basit bir işlem değildir. Çünkü manyetik alan etkisi, görecelilik etkisi gibi çevresel etkenler karşılıklı yapısını bozmaya yönelik davranışlar sergilerler [30]. Eğer ortamın doğrusal (lineer), zamandan bağımsız ve manyetik alan etkisinden uzak olduğu ve CW ile CCW yollarının özdeş olduğu kabul edilirse iki ışık dalgası da Sagnac faz kayması haricinde dedektöre ideal bir şekilde aynı fazla dönerler.

2.2.4. Sabit Kayma Modülasyonu

İnterferometre ışık dalgalarını iki ayrı kola ayıran, ayrılan ışık dalgalarının farklı yollarda ilerledikten sonra farklı faz gecikmeleriyle birleştikleri ortamı sağlayan

cihazlardır. Şekil 2.16’da farklı yol uzunluğunda gecikmeye uğrayan dalgalar gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Farklı Uzunlukta Dalga Gecikmesi

Eğer sisteme giren ışık dalgası Eşitlik 2.26 ile ifade edilirse, bölünen ışık dalgaları Eşitlik 2.27 ve 2.28’de gösterildiği gibi olur.

$$E = E_0 \hat{y} \sin(kx - \omega t) \quad (2.26)$$

$$E_1 = E_1 \hat{y} \sin(kx - \omega t) \quad (2.27)$$

$$E_2 = E_2 \hat{y} \sin(kx - \omega t + \Delta\phi) \quad (2.28)$$

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 \quad (2.29)$$

Eşitlik 2.29’den yola çıkarak ortalama çıkış gücü hesaplanırsa;

$$\langle P \rangle = c\epsilon \left[\frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} + (2E_1E_2 \sin(kx - \omega t) \sin(kx - \omega t + \phi)) \right]$$

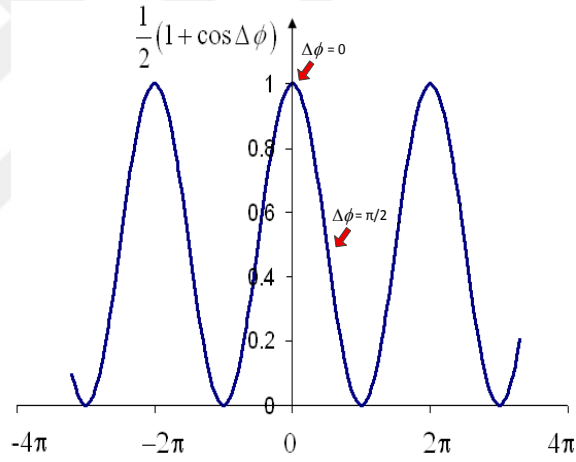
$$= c\epsilon \left[\frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} + (E_1E_2 \cos(\phi) \cos(2kx - 2\omega t) + \phi) \right]$$

$$= P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} \cos\phi \quad (2.30)$$

Eşitlik 2.30'daki interferometer ışık dalgasını eşit iki parçaya böldüğü için ışık dalgalarının güçleri de Eşitlik 2.31'deki gibi eşit olacaktır. ($P_1 = P_2 = P$).

$$\langle P \rangle = 2P(1 + \cos\Delta\phi) = \frac{I_0}{2}(1 + \cos\Delta\phi) \quad (2.31)$$

I_0 faz farkının olmadığı yani sistemde dönü hareketinin olmadığı sıradaki dedektör üzerine düşen gücü ifade etmektedir. Dedektör üzerinde oluşan güç ile faz farkının birbirine göre çizilen grafiğine “İnterferogram” adı verilir. İnterferogram Şekil 2.17'de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. İnterferogram Eğrisi

Eşitlik 2.31'de görüldüğü gibi ortalama güç zamandan bağımsızdır ve büyüklüğü faz kayması ile doğrusal olmayan bir ilişki tarafından belirlenir. Ayrıca pozitif ve negatif faz farkı aynı gücün ölçülmesine neden olur. Bu ilişki doğrudan dönü ölçülmesi işleminde kullanılamaz. Çeşitli modülasyon teknikleri uygulanılarak bu güç-faz kayması ilişkisinden pozitif ve negatif dönüler ayırt edilebilir ve sinyal doğrusallığı

daha çok arttırılabilir. Faz modülasyonu kısmında bu konu daha ayrıntılı bir biçimde anlatılacaktır. Fiber optik jiroskopta optik güç bir kosinüs fonksiyonudur ve dönü miktarı sıfır iken maksimum noktadadır. Hassasiyeti arttırmak için bu sinyale eğimi sıfırdan farklı olacak şekilde sabit kayma modülasyonu uygulamak gerekmektedir.

$$\langle P \rangle = \frac{I_0}{2} [(1 + \cos(\Delta\phi + \Delta\phi_b))] \quad (2.32)$$

Eşitlik 2.32’de $\Delta\phi_b$ faz sapmasıdır ve $\Delta\phi_b$ ne kadar tutarlı olursa sistemin hassasiyetide o derece iyi olur. Şekil 2-17’deki İnterferogramda faz farkının sıfır olduğu $\Delta\phi = 0$ noktası hassasiyetin en az fakat gücün en fazla olduğu noktadır. Aralarında ters orantılı bir ilişki bulunan bu iki kavram için en fazla hassasiyeti sağlayacak nokta $\Delta\phi = \pi/2$ noktasıdır. Faz kaymasını sağlayan faz modülatörü fiber hattın bir kolunda bulunur ve üzerinden t zamanında geçen bir sinyale ϕ_m kadar faz kayması uygular. Birbirine ters yönde hareket eden sinyaller farklı zamanlarda bu modülatör üzerinden geçtiği için sabit kayma modülasyonu Eşitlik 2.33’deki gibi olur.

$$\phi_m = \phi_m(t) - \phi_m(t - \tau) \quad (2.33)$$

t : saat yönündeki sinyalin geçme zamanı

τ : saat yönü tersindeki geçme zamanı

Girişim sinyali Eşitlik 2.34’teki hali alır.

$$\langle P(t) \rangle = \frac{I_0}{2} [(1 + \cos(\Delta\phi(t) + \Delta\phi_m(t)))] \quad (2.34)$$

Farklı türlerde faz modülasyon teknikleri kullanan modülatörler vardır. Bunlardan bazıları elektro optik ve piezoelektrik modülatörlerdir. Elektro optik modülatörde sinyaller voltaj uygulanan bir kristalin içinden geçerken, piezoelektrik modülatörde fiber sargı bir çevirici üzerine sarılıdır. Uygulanan voltajla fiber sargı uzunluğu değişir. Sonuç olarak iki modülatörde uygulanan voltaja bağlı olarak üzerinden geçen sinyale faz kayması vermektedir.

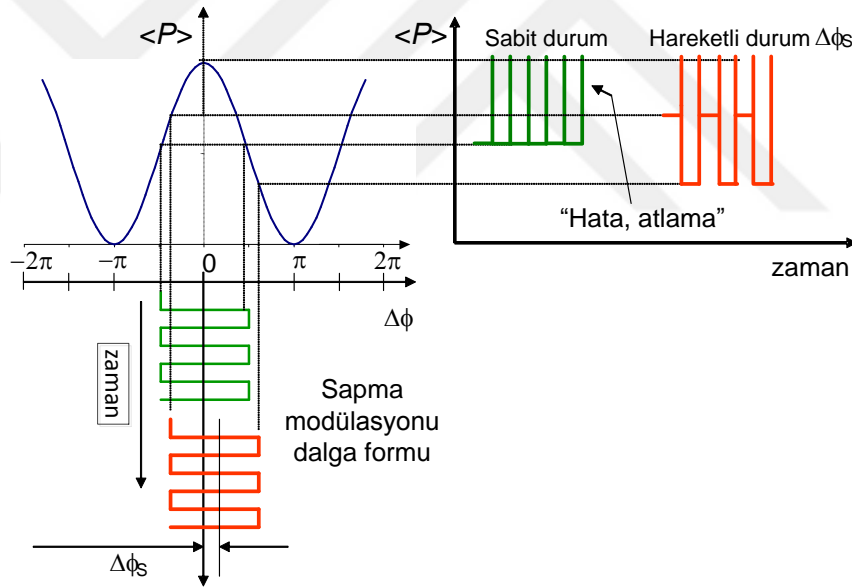
2.2.4.1. Kare Dalga Modülasyonu

Faz modülatörü bölümünde faz modülasyonuna ihtiyaç vurgulanmış ve nedenleri açıklanmıştır. Faz modülatörü ile sisteme eklenen faza sabit kayma modülasyonu denir. Amaç güç-faz farkı ilişkisindeki işletim noktasını değiştirmek ve doğrusallığı arttırmaktır. Sabit kayma modülasyon yapısı faz modülatörüne uygulanan kontrol girdisinin türüne göre değişik adlar alır. Kare dalga uygulanıyorsa kare dalga modülasyonu, uygulanan kontrol sinüs formunda ise sinüs modülasyonu olarak adlandırılır. Kare dalga modülasyonu sayısal tasarıma uygun olduğu için bu FOJ tasarımında kare dalga modülasyonu tercih edilmiştir ve sadece bu modülasyon türüne ait matematiksel eşitliklere yer verilecektir. Işık dalgaları arasındaki faz farkını işlemenin en iyi yolu kare dalga modülasyonu uygulamaktır. İnterferogram eğrisinde dedektör gücünün Sagnac faz kaymasına göre grafiği gösterilmiştir. Bu grafiğe göre sistemde dönüş olmadığı zaman, $\Delta\phi = 0$ noktasıdır. Bu noktadan sonra sistemdeki her dönüş, dönüş miktarı ile orantılı olarak $\Delta\phi$ noktasını kaydıracaktır. Fakat $\Delta\phi$ değeri çok küçük olduğundan dolayı 0 noktasını operasyon aralığı olarak seçmek bazı dezavantajlar getirir. Dezavantajları daha iyi anlamak için bir sayısal örnekle $\Delta\phi$ 'nin değerini teorik olarak hesaplayalım. Sargı uzunlu L (2000m), yarı çapı D (5 cm) olan sargıda dalga boyu λ (1550nm) olan ışık dalgası hareket etmektedir. Dünya ekseninin dönüş hızı : $15^\circ/s = 7.2 * 10^{-5} \text{rad/dk}$ olarak alınıp Eşitlik 2.24 ve 2.25 kullanılarak sonuç hesaplandığında, $SF = 1.35s$, $\Delta\phi = 9.75 * 10^{-5} \text{rad}$ olarak bulunur. FOJ halkasının sonunda bulunan dedektör üzerine ışık dalgaları $9.75 * 10^{-5} \text{rad}$ faz farkı ile ard arda geleceklerdir. Bu durumda dedektör üzerinde girişim yapan dalgaların ortalama gücü;

$$\begin{aligned}\langle P \rangle &= \frac{I_0}{2} (1 + \cos\Delta\phi) \\ &= \frac{I_0}{2} (1 + \cos(9.75 * 10^{-5} \text{rad})) \\ &= \frac{I_0}{2} (1 - 5 * 10^{-9})\end{aligned}$$

I_0 , $\Delta\phi = 0$ olduğu durumdaki dedektör gücüdür. Sonuçtan da anlaşılacağı gibi çok küçük değerlerde olan bu değişimleri algılayabilmek için mükemmel hassasiyete sahip

dedektör kullanılması gerekmektedir. Yukarıdaki örnekte anlatıldığı üzere $\Delta\phi = 0$ noktasındaki dezavantajın ilki düşük hassasiyettir. Bir diğeri ise dönüş yönünün algılanmasındaki karışıklıktır. Dönüş sırasında sinyalde faz kayması olacağı için dönüş yönü ister saat yönü isterse saat yönü tersine olsun $\Delta\phi$ noktası tepe noktasından aşağı ineceği için iki durumdada azalma gösterecektir. Bu sebepten dolayı hangi yönde bir dönüş hareketi olduğunu kavramamız mümkün olmayacaktır. Fakat FOJ'un amacı dönüş miktarını ve yönünü en doğru şekilde ölçmek olduğu için bu kararsızlığı önlemek amacıyla kare dalga modülasyonu uygulanır [31]. FOJ'larda bunu sağlayan fiber sargının sadece bir tarafına entegre edilen faz modülatörüdür [32]. Şekil 2.18'de gösterildiği gibi operasyon aralığı kare dalga modülasyonu yapılarak dedektör sinyali grafiğinin tepe noktasından $-\pi/2$ ve $+\pi/2$ aralığına çekilmiştir.



Şekil 2.18. Kare Dalga Modülasyonu [25]

Grafik üzerindeki kırmızı noktalar operasyon aralığını göstermektedir. Şekil 2.18'in sağ üst köşesindeki yeşil grafik dönüş olmadığı zaman dedektör çıkışını göstermektedir. Bu grafiğin tek bir DC seviyeye sahip olduğu görülmektedir. Fakat

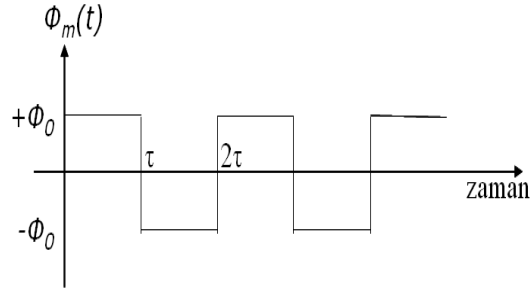
dönüş hareketinin olduğunu gösteren kırmızı grafikte ise $-\pi/2$ ve $+\pi/2$ aralığında farklı değerler görülmektedir. Bu farklı değerlerin sebebi dönüş hareketi ile birlikte sinyal üzerine eklenen Sagnac faz kaymasıdır. Sabit kayma modülasyonu uygulanırken bir diğer önemli nokta en uygun frekansta sistemi modüle etmektir. Modülasyon aralığını $-\pi/2$ ve $+\pi/2$ aralığında tutarken aynı zamanda birbirine ters yönde hareket eden sinyallerin faz modülatörü üzerinden geçerken farklı modülasyon seviyelerinden geçmesi gerekmektedir. Her iki sinyal aynı seviye kare dalga modülasyonuna girmemesi gerekir çünkü bu durumda faz farkını ayırt etmek mümkün olmaz [33]. Uygun modülasyon frekansını uygulamak için Eşitlik 2.35 kullanılır.

$$f = \frac{1}{2\tau} \quad (2.35)$$

f modülasyon frekansını τ ışık dalgasının fiber sarımı tamamlama süresini göstermektedir. Sagnac interferogramında $\pm 2\phi_0$ etrafında çalışmak için Şekil 2.19'da görüldüğü gibi faz modülatörüne en uygun frekansta kontrol voltajı uygulanmalıdır.

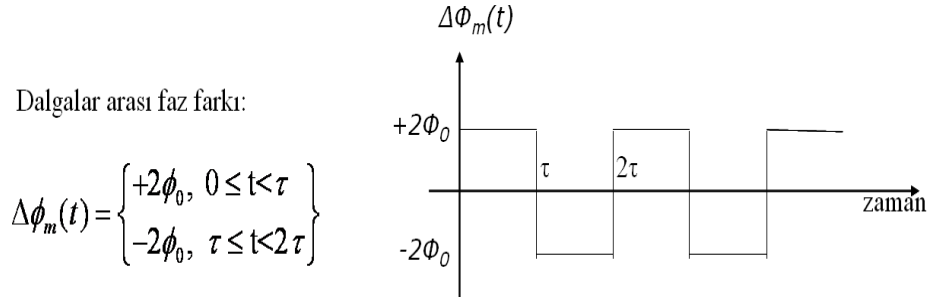
$$\phi_m(t) = \begin{cases} +\phi_0, & 0 \leq t < \tau \\ -\phi_0, & \tau \leq t < 2\tau \end{cases}$$

(ϕ_0 modülasyon derinliği)



Şekil 2.19. Optimal Frekanstaki Faz Modülatörü Kontrolü

Elde edilecek faz farkı ve formu Şekil 2.20'de gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Faz Farkı formu

İnterferogramın en duyarlı bölgesi olan $\pm\pi/2$ noktalarında çalıştırmak için $\phi_0 = \pi/4$ olmalıdır. Kare dalga modülasyonu sonucu oluşan güç eşitliğinin matematiksel formu Eşitlik 2.36'da verilmiştir.

$$\langle P \rangle = \frac{I_0}{2} [(1 + \cos(\Delta\phi_{\text{sagnac}} + \Delta\phi_m))] \quad (2.36)$$

Faz modülatörü periyodik aralıklarla iki farklı değer aldığından, ortalama güç eşitliği de aynı şekilde iki farklı değer alacaktır. Yukarıdaki denkleme trigonometrik açılım uygularsak Eşitlik 2.37'deki gibi olur.

$$\langle P \rangle = \frac{I_0}{2} [(1 + \cos(\Delta\phi_{\text{sagnac}}) \cos(\Delta\phi_m) - \sin(\Delta\phi_{\text{sagnac}}) \sin(\Delta\phi_m))] \quad (2.37)$$

Farklı zamanlarda ortalama güç Eşitlik 2.38'de gösterilmiştir.

$$\left(\begin{array}{l} \langle P \rangle = \frac{I_0}{2} \left(\begin{array}{l} 1 + \cos(\Delta\phi_{\text{sagnac}} - \Delta\phi_f) \cos(2\phi_0) - \\ \sin(\Delta\phi_{\text{sagnac}} - \Delta\phi_f) \sin(2\phi_0) \end{array} \right), \quad (n-1)\tau \leq t \leq n\tau \\ \langle P \rangle = \frac{I_0}{2} \left(\begin{array}{l} 1 + \cos(\Delta\phi_{\text{sagnac}} - \Delta\phi_f) \cos(-2\phi_0) - \\ \sin(\Delta\phi_{\text{sagnac}} - \Delta\phi_f) \sin(-2\phi_0) \end{array} \right), \quad n\tau \leq t \leq n+1\tau \end{array} \right) \quad (2.38)$$

Yukarıdaki eşitlik kullanılarak Sagnac faz farkı kolayca çekilebilir. Güç sinyali voltaj veya akım formuna dönüştürüldükten sonra aralıklarla örneklenip çıkarılırsa Eşitlik 2.39 ve 2.40'da gösterilen denklemler elde edilir.

$$\Delta\langle P \rangle = \Delta\langle P(t) \rangle - \Delta\langle P(t - \tau) \rangle \quad (2.39)$$

$$\Delta\langle P \rangle = \frac{I_0}{2} (2\sin(\Delta\phi_{\text{sagnac}})\sin(\Delta\phi_m)) \quad (2.40)$$

Demodülasyon sonucu elde edilecek Sagnac faz farkı Eşitlik 2.41’de gösterildiği gibi olur.

$$\Delta\phi_{\text{sagnac}} = \sin^{-1} \left[\frac{\Delta\langle P \rangle}{I_0 \sin(\Delta\phi_m)} \right] \quad (2.41)$$

Uygulanan girdi dönü ise Eşitlik 2.42’deki gibi hesaplanır.

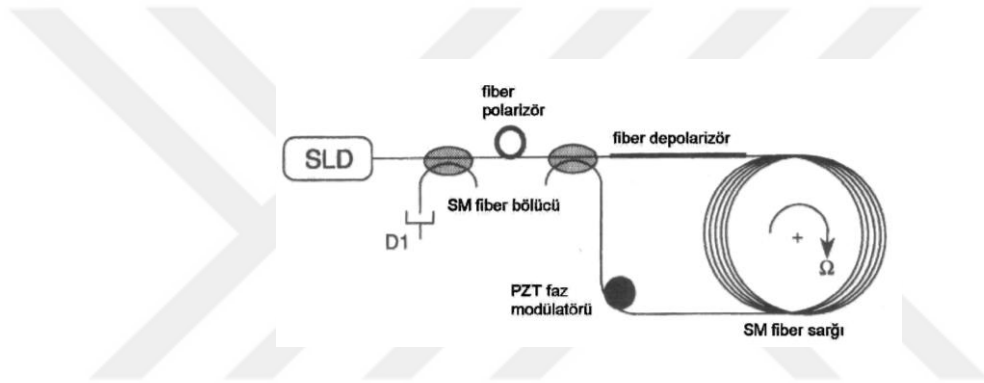
$$\Omega = \frac{\lambda c}{2\pi L D} \sin^{-1} \left[\frac{\Delta\langle P \rangle}{I_0 \sin(\Delta\phi_m)} \right] \quad (2.42)$$

FOJ tasarımında kare dalga modülasyonu kullanıldığında sinyal demodülasyonu kolay olmasına rağmen ters sinüs alma işlemi gerektirmektedir. Kapalı döngü FOJ’da geri besleme fazı oluşturulup sisteme katılacağı için yukarı eşitlikleri biraz değiştirerek kapalı döngü işletimi açıklanabilmektedir. Ters sinüs alma işlemi çeşitli kontrol yöntemleri ve kontrolcüler kullanılarak ortadan kaldırılabilir. Demodülasyon sonucu hesaplanan dönü bir çok değişkene bağlıdır. λ ve I_0 çevresel durumlara özellikle sıcaklığa çok duyarlıdır. Bu parametrelerdeki küçük değişimler büyük hatalara yol açacağından, hesaplanan dönüş açısının bunlara bağlı olmaması sağlanmalıdır. Bu nedenle kapalı döngü FOJ’lar geliştirilmiştir.

2.2.5. Polarizasyon

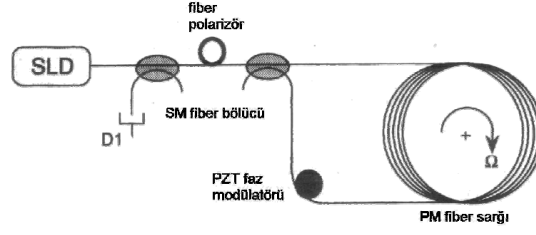
Basit FOJ sistemlerinde kullanılan fiberler tek modlu (SM) fiberlerdir. Tek modlu fiberlerde simetrik olmayan yapılar ve birden fazla polarizasyon modu bulunur. Bunun yanı sıra fiber hattın maruz kaldığı fiziksel etkilerle beraber (bükülme, gerilme vb.) ışık dalgası çift kırınma denilen polarizasyon değişikliğine uğrar. Polarizasyonları farklı olan ışık dalgalarının ortamda yayılma katsayıları da farklılık gösterecektir. İki ışık dalgası arasındaki bu ince ayırım büyük faz farklılıklarına yol

açar. Bu ayrımı engellemek için çift kırınımdan dolayı oluşan faz farkını azaltan bir polarizör kullanılır ve polarizör sistemin giriş bölümüne eklenir. Polarizörün görevi fiber hatta yayılan dalgalardan sadece aynı polarizasyona sahip olanları seçmesidir. Teorik olarak polarizasyon sorunsuz çalışsa da pratikte bazı problemleri de beraberinde getirmektedir. Polarizasyon konumunun değişmesi dedektör üzerine gelen ışık gücünün azalmasına hatta kaybolmasına neden olur. Bu problemi engellemek için polarizörün tersi bir mantık ile çalışan depolarizör fiber sargının girişinde kullanılır. Tek polarizasyon konumunda gelen dalgayı farklı polarizasyon konumlarına gelişigüzel dağıtarak, optik gücün yarısının aktarılmasını sağlar. Jiroskopta polarizör ve depolarizörün konumları Şekil 2.21’de gösterilmiştir.



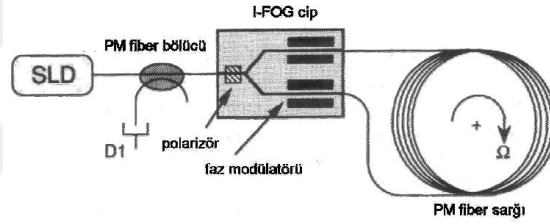
Şekil 2.21. FOJ’da Polarizör ve Depolarizör Konumu [34]

Aslında depolarizör bir polarize modlu (PM) fiber parçasıdır ve daha hassas jiroskoplarda PM fiber tercih edilir. İki polarizasyon moduna sahip bu fiberde istenmeyen polarizasyondaki sinyaller elenir ve sinyal kaybına neden olmaz [35,36]. Şekil 2.22’de gösterildiği gibi ek olarak bir depolarizör kullanmaya gerek duyulmaz.



Şekil 2.22. PM Fiber Sargılı FOJ [34]

Daha yüksek hassasiyetteki jiroskoplarda Şekil 2.23'te gösterilen, içerisinde iki adet faz modülatörü ve bir adet polarizör bulunan LiNbO₃ yapısına sahip bir optik entegre kullanılmaktadır.



Şekil 2.23. FOJ Optik Entegre [34]

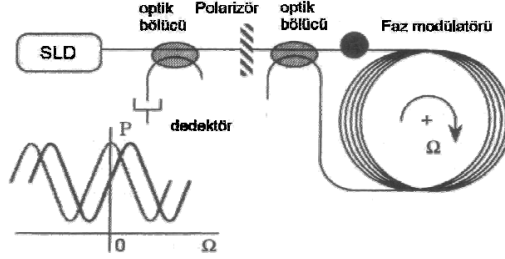
2.3. Fiber Optik Jiroskop Konfigürasyonları

İnterferometrik fiber optik jiroskopların açık döngü ve kapalı döngü olmak üzere iki kontrol konfigürasyonu vardır.

2.3.1. Açık Döngü Konfigürasyonu

Bir interferometrik fiber optik jiroskop saat yönünde ve tersi yönde özdeş yollara sahiptir [37,38].

Bu şekilde tanımlanan açık döngü FOJ için minimum yapılandırma Şekil 2.24'te gösterilmektedir.



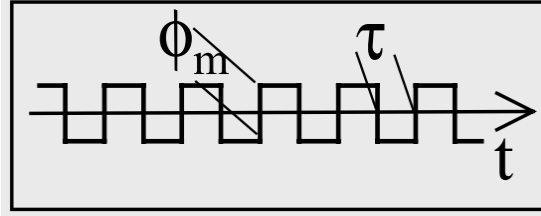
Şekil 2.24. Açık Döngü IFOJ [34]

Işık kaynağından polarizöre gelen ışık dalgaları burada polarize edilerek sadece tek modda olan ışık dalgaları geçirilir. Bunun temel nedeni CW ve CCW dalgalarının farklı modda ilerlemesini engelleyerek karşılıklı yapısının sağlanmasıdır. Kuplöre (optik bölücü) gelen ışık ikiye bölünerek saat yönü (CW) ve saat yönünün tersi (CCW) olmak üzere birbirine ters yönde ilerleyen iki ışık dalgasına eşit şekilde bölünür. Fiber sargıda yolculuğunu tamamlayan dalgalar dedektöre ulaştıktan sonra elektrik akımına çevrilir [39,40]. Açık döngü konfigürasyonunda ana problem çıkış sinyalinin küçük rotasyonların için lineer olmamasıdır. Bu da yüksek hassasiyette ölçüm yapılması için engel teşkil etmektedir [41]. Açısızlığa bağlı çıkış sinyali lineer olmadığı için çalışma aralığı sınırlıdır çünkü kullanılan faz modülatörünün dinamik çalışma formu sinüzoidal dalga formundadır [42]. Çoğu faz modülatörü piezoseramik bir tüp (PZT) içerisinde bulunan kısa fiber sargıdan meydana gelir. PZT'ye uygulanan modülasyon gerilimi ile elastik stres altına giren optik yol değişim göstererek faz kayması meydana getirir [43]. CW ve CCW dalgalarının faz gecikmeleri sırasıyla ϕ_{ccw} ve ϕ_{cw} olmak üzere, $\tau = L/v$ fiber hat boyunca yolculuk süresi ve ϕ_s Sagnac faz kayması ise, dedektördeki bağıl faz farkı Eşitlik 2.43'teki gibi ifade edilir.

$$\phi_{ccw} - \phi_{cw} = \phi_s + \phi(t) - \phi(t + \tau) \quad (2.43)$$

ω_m açısal frekansında faz modülasyonu Eşitlik 2.44 ile verilen denklem formunda uygulanmalıdır.

$$\phi(t) = \phi_{m0} \cos \omega_m t \quad (2.44)$$



Şekil 2.25. Modülasyon Genliği

Şekil 2.25'te görüldüğü gibi $\phi_m = 2\phi_{m0} \sin \omega_m \frac{\tau}{2}$ faz modülasyon genliğidir ve bu değeri maksimum yapmak için modülasyon frekansı $f_m = \frac{\omega_m}{2\pi} = 1/2\tau$ olan bir PZT seçilebilir. Bu durumda Eşitlik 2.43 ve 2.44 beraber çözümlenirse;

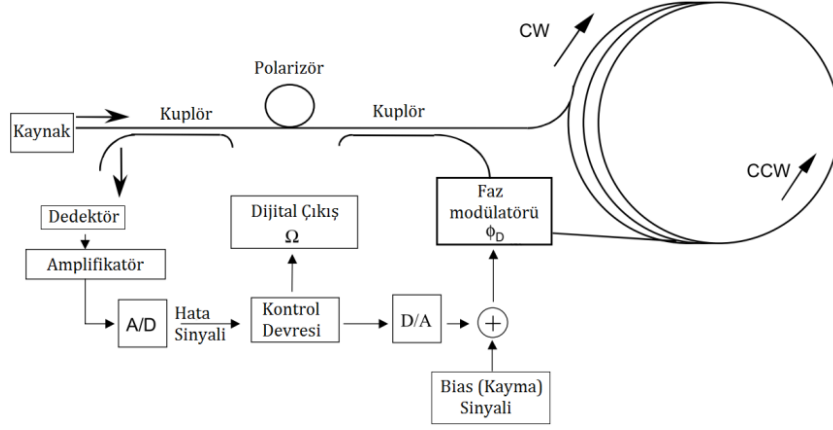
$$\phi_{ccw} - \phi_{cw} = \phi_s + 2\phi_{m0} \sin \omega_m t \sin \omega_m \frac{\tau}{2} = \phi_s + \phi_m \sin \omega_m t \quad (2.45)$$

Eşitlik 2.45 elde edilir. Dedektördeki sinyal I_1 Eşitlik 2.46'daki gibidir. I_{01} sinyalin harmoniklerini ifade etmektedir, denklem Bessel fonksiyonları kullanılarak çözümlenebilir.

$$I_1 = I_{01} [1 + \cos(\phi_{ccw} - \phi_{cw})] \quad (2.46)$$

2.3.2. Kapalı Döngü Konfigürasyonu

Önceki bölümde bahsedilen sistem özelliklerine göre dizayn edilmiş açık döngü yapısına sahip fiber optik jiroskop ile iyi bir çalışma noktası elde edilebilir. Fakat elde edilen bu çalışma noktası sıfır bölgesinde olduğu için çalışma aralığı kısıtlıdır.



Şekil 2.27. Kapalı Döngü Diyagramı [47]

Şekil 2.27’de gösterilen kapalı döngü diyagramında amplifikatör çıkışı örneklenir ve hata sinyaline dijital geri besleme sinyalini sıfıra yakın tutacak şekilde eşzamanlanır. Örnekleme frekansı rampa ve kayma sinyallerini için gerekli senkronizasyonu sağlamak amacıyla, geçiş süresi olan τ ’ nun tersi olarak alınır. Hata sinyali alındıktan sonra, kontrol devresi modülâtörü sürerek genliği Sagnac faz kayması sinyaline ve geçiş süresine eşit kademeli (step) sinyal oluşturmasını sağlar. Dijital analog çevirici sinyal aşımını (overflow) engellemek için rampa sinyalinde sıfırlama (reset) noktası oluşturur. Geri besleme yapılan bir devredeki anlık güç fonksiyonu Eşitlik 2.47’de verilmiştir.

$$P(t) = \frac{I_0}{2} [1 + \cos(\Delta\phi_s + \Delta\phi_m(t) - \Delta\phi_f)] \quad (2.47)$$

Sisteme yapılan geri besleme fazı Eşitlik 2.48 ile verilmiştir. ϵ modülasyon voltajından kaynaklanan faz hatasıdır. Modellenen sistemde bu hata göz ardı edilmiştir ve Eşitlik 2.49’a göre işlem yapılmıştır.

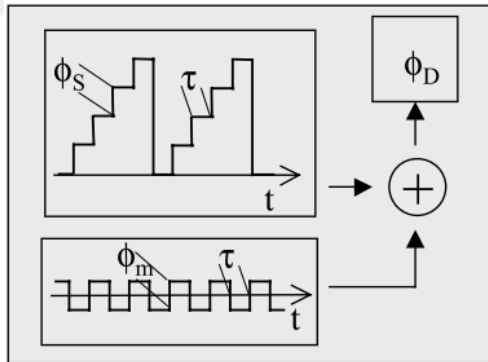
$$\Delta\phi_f = \Delta\phi_s - 2\pi(1+\epsilon) \quad (2.48)$$

$$\Delta\phi_f = \Delta\phi_s - 2\pi \quad (2.49)$$

Kosinüs fonksiyonu 2π katlarında kendini tekrarladığı için geri besleme fazı ve Sagnac faz farkı birbirine eşit olur ($\Delta\phi_f = \Delta\phi_s$). Bu sonuçla birlikte ideal sistemlerde istenildiği gibi, hesaplanan gücün sadece modülasyon fazına endeksli olduğunu ortaya çıkarır. Modülasyon için kullanılan faz kaymasının anlık değişimi Eşitlik 2.50'de verilmiştir.

$$\Delta\phi_m(t) = \begin{cases} +\frac{\pi}{2} & 0 < t < \tau \\ -\frac{\pi}{2} & \tau < t < 2\tau \end{cases} \quad (50)$$

Sıfırlama basamağı faz varyasyonunun 2π radyan aşmasını engeller ve daima doğru Sagnac faz kayması okunması için önemli bir işlemdir ve Şekil 2.28'de gösterilmiştir. Bu işlemlerle dönme oranı hata sinyali kullanılarak dijital formatta basitçe tespit edilebilir. Bu yapının analog çözümlere göre diğer bir avantajı ise sinyal düzeltme sırasındaki faz kararlılığıdır.



Şekil 2.28. Modülasyon Basamak Aralığı [47]

Kapalı devre yapısının iyi sonuç verebilmesi için geniş bant kullanılan faz modülasyonu gerekmektedir. Kesikli ve yavaş sinyal üreten PZT yerine içerisinde koplör ve modülatör barındıran entegre optik çipler kullanılması daha iyi sonuç elde etmekte yararlı olmaktadır [48-49].

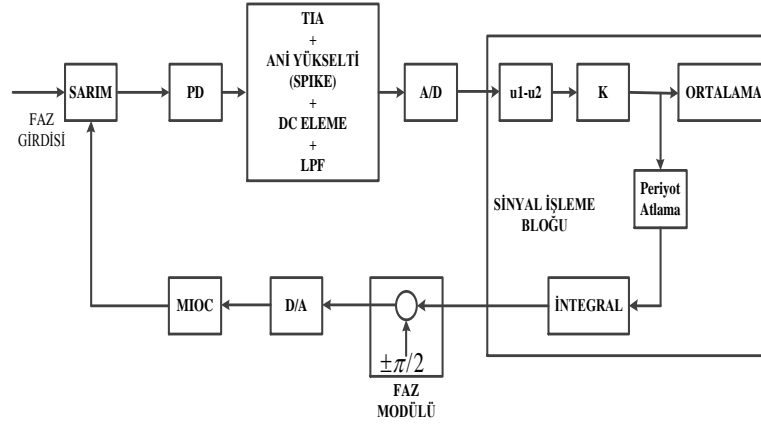
3. MODEL TASARIMI

Tezin bu bölümünde ilk olarak sinyal fazlarının ölçümü için tasarlanan optik alıcı ve geribesleme elektronik modelleri anlatılacaktır. Sonrasında bu devrelerin modelleri oluştururken gerçekleştirilen aşamalardan bahsedilecektir. Bu tez çalışmasının benzer çalışmalar göre farkını sağlayan periyot atlama algoritmasının model içerisindeki yeri ve işlevi detaylı bir şekilde incelenecek. Son bölümde ise tasarlanan FOJ modelinin simülasyon sonuçları değerlendirilecektir.

3.1. Fiber Optik Jiroskop Faz Ölçüm Sistemi

Bölüm 2.1’de Fiber Optik Jiroskopun Bileşenleri, Bölüm 2.2’de Fiber Optik Jiroskopun Çalışma Prensipleri ve Bölüm 2.3’de Fiber Optik Jiroskop Konfigurasyonları detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Anlatılan Fiber Optik Jiroskop sisteminden açısız hız bilgisinin ölçümünün yapılabilmesi için, fiber optik jiroskop sisteminden optik güç girdisini alıp açısız hız bilgisine çevirecek ölçüm elektroniği kullanılmak zorundadır. Aksi takdirde, Bölüm 2’de anlatılan optik sistemden anlamlı bir veri almak mümkün olmayacaktır.

Fiber Optik Jiroskop optik bütünü Bölüm 2’de anlatıldığı üzere fiber sarımı, ışık kaynağı, kuplörler, polarizör (kutuplayıcı), fotodedektör ve faz modülatöründen oluşmaktadır. İlk olarak, ışık kaynağından üretilen ışık sinyaline, faz modülatörü yardımı ile modülasyon uygulanır daha sonra modüle edilmiş ışık sinyali fotodedektör yardımı ile ışık gücünün yoğunluğuna bağlı olarak elektrik akımına çevrilir. Fiber Optik Jiroskop sisteminden açısız hız bilgisinin ölçümünün yapılabilmesi için kullanılacak elektronik sistem, fotodedektör tarafından oluşturulan akım bilgisini girdi olarak kullanılır ve bu akım bilgisinden açısız hız bilgisine ulaşır. Fiber Optik Jiroskop Elektronik Ölçüm sisteminin blok diyagramı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

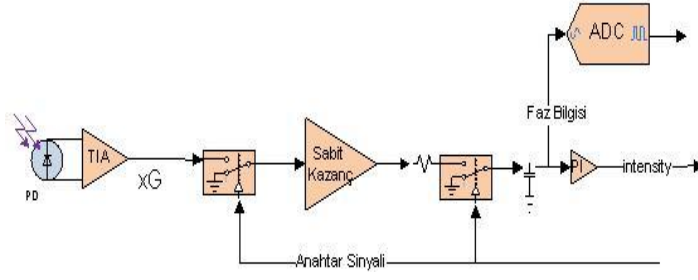


Şekil 3.1. Elektronik Ölçüm Sistemi Blok Diyagramı

Blok diyagramdan görüldüğü üzere, elektronik ölçüm sistemini iki ana bloğa böleriz. İlk blok fotodedektörün ürettiği akım bilgisini girdi olarak alıp bundan faz bilgisini üreten bloktur. Bu blok, optik alıcı elektronik sistemi olarak adlandırılır. İkinci blok ise, ilk bloğun ölçmüş olduğu faz bilgisini, faz modülatörüne besleyerek, fiber optik jiroskop sisteminin kapalı döngü sistem olarak çalışmasını sağlamaktadır. Bu blok da, geri besleme elektronik sistemi olarak adlandırılır.

3.1.1. Optik Alıcı Elektronik Sistemi

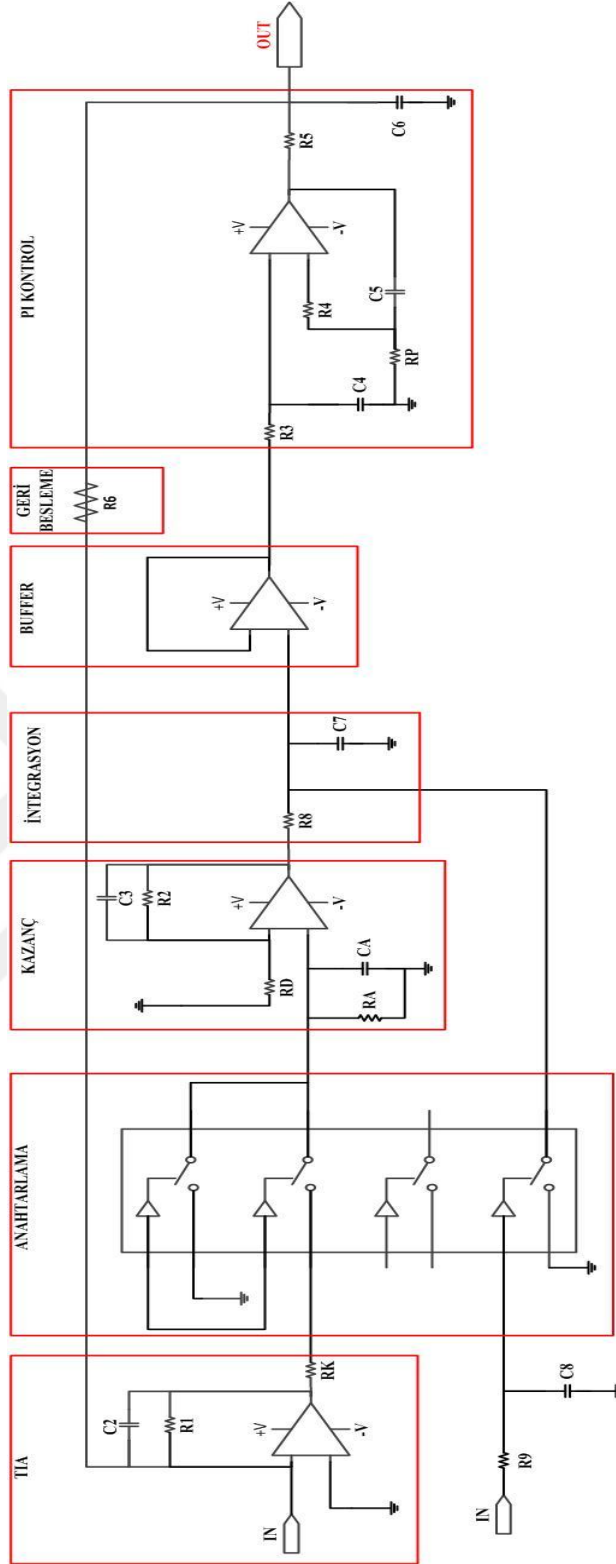
Optik alıcı devresi blok diyagramı **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Optik Alıcı Devresi Blok Diyagramı

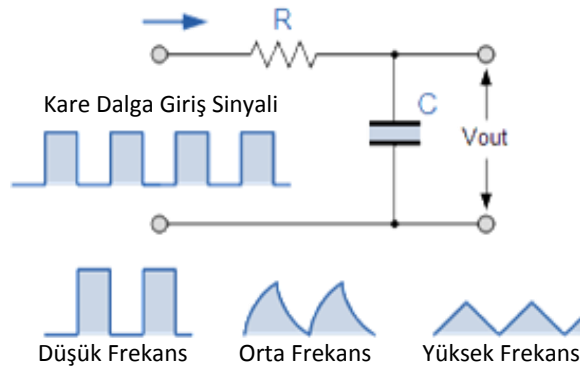
Şekil 3.2’deki blok diyagramda görüldüğü üzere, optik alıcı elektronik devreleri, akımdan voltaja çevirici, anahtarlama, sabit kazanç, analog integrasyon ve dc silme devrelerinden oluşur. Fotodedektör tarafından elektrik akım bilgisine çevrilen optik güç bilgisi, optik alıcı devresine girdi olur.

İlk olarak akımdan voltaja çevirici elektroniği kullanılarak, fotodedektör üzerinden gelen akım bilgisi voltaja çevrilir. Böylelikle, optik alıcı devresindeki diğer birimler için anlamlı bir voltaj girdisi oluşturulmuş olur. Akımdan voltaja çevirici işleminin yapılması için Trans Impedance Amplifier (TIA) entegresi kullanılır. Bu devrenin elektronik şeması Şekil 3.3’te gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere, bu devre bir kazanç devresi olarak düşünülebilir. Kazanç direncinin değerine göre, fotodedektör üzerinden gelen akım bilgisi kazançlandırılıp voltaj bilgisine çevrilir.



Şekil 3.3. Elektronik Devre Modeli

İkinci olarak, voltaja çevrilen fotodedektör sinyali, analog anahtar üzerinden geçirilir. Bu analog anahtar üzerinden geçirme işleminin amacı, $-\pi/2$ ve $+\pi/2$ kare dalga modülasyonu işlemi sonrası optik güç sinyali üzerinde oluşan istenmeyen zıplamaların silinmesidir. Analog anahtardan geçirilen fotodedektör sinyali üzerindeki istenmeyen zıplamalar silinmiş olur. Bu devrenin elektronik şeması Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Analog anahtardan geçirilen sinyal, sabit kazanç devresine sokulur. Sabit kazanç devresinin amacı, analog anahtarlama yapılmış sinyale sabit bir kazanç vermektir. Bu amaçla kullanılacak devrenin elektronik şeması Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Bu işlemden sonra, fotodedektör sinyali üzerindeki gürültünün silinmesi amacı ile analog integrasyon işlemi uygulanır. İntegratör devresi basit bir alçak geçiren filtre devresi olarak düşünülebilir. İntegratör devresinde kullanılan kapasitenin dolup boşalması ile kare dalga sinyalini zaman bölgesinde üçgen dalga sinyaline dönüştürür. RC integrasyon devresinde, oluşacak dalga çıktısı, devrenin zaman sabitine bağlıdır. Zaman sabiti, integratör devresinin giriş sinyalinin periyoduna göre kısa ise, integratör devresinde kullanılan kapasite tamamen dolup boşalacaktır. Bundan dolayı, düşük frekanslarda, integrasyon devresinin oluşturacağı sinyal, genliği yüksek kare sinyal olmaktadır. Giriş sinyalinin frekansı yükseldikçe bu sinyal genliği az üçgen sinyale dönüşür. Fiber Optik Jiroskop sisteminde kullanılacak integrasyon devresi orta dereceli frekansa sahip olduğundan, integrasyon devresinin çıktısı yelken dalgalı sinyale benzeyecektir. İntegrasyon devresi ve olası çıktıları Şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.4. İntegrasyon Devresi ve Olası Çıktıları

İntegrasyon devresinin çıktısı, son değerinin %63'lük kısmına bir zaman sabitlik sürede ulaşmaktadır. İntegrasyon devresinin çıktısı, son değerine ise yaklaşık 5 zaman sabitlik bir sürede ulaşmaktadır. 5 zaman sabitlik süre çok uzun olduğundan dolayı ve %63'lük kısmı yeterli olacağından dolayı, Fiber Optik Jiroskop sisteminde integratör devresinin %63 kısmına dolması beklenir ve bu durumda örnekleme yapılıp faz bilgisinin hesaplanması sağlanır. Bu işlem ile optik sinyal üzerindeki beyaz gürültüler belli bir frekansa kadar silinmiş olur. Bu devrenin elektronik şeması Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Şekil 3.4'te grldğu üzere, analog integrasyon için basit bir RC filtre devresi kullanılmıştır. Bu filtre devresinde kullanılan kapasitenin belli zamanlarda dolması sağlanarak filtreleme işlemi yapması sağlanır. Filtreleme işlemi bitirildikten sonra belirli bir frekans ile kapasite toprağa bağlanır ve boşalması sağlanır. Bu zamanlamanın yapılabilmesi için ve fotodedektör sinyali üzerinde istenilen sinyalin integrasyon işlemine sokulabilmesi için, RC filtre devresinin analog anahtara bağlantısı bulunmaktadır. Analog anahtar, filtreleme işlemi yapılacağı zaman açılır ve kapasitenin dolmasını sağlar. Filtreleme işlemi bitirildikten sonra analog anahtar kapanır ve kapasitenin toprağa bağlanıp boşalmasını sağlar.

Beyaz gürültüsü azaltılmış fotodedektör sinyali daha sonra analog/sayısal çeviricilere (A/D) iletir. Fotodedektör sinyalinin sayısal bir bilgiye dönüştürülmesi için analog/sayısal çevirici analog integrasyona uğramış sinyal üzerinden örnekleme yapmaktadır. Yukarıda da anlatılan sebeplerden dolayı, integrasyona sokulmuş sinyalin kapasite tarafından %63'  doldurulduğu zaman A/D evirici örnekleme yapmaktadır. Bu eviriciler ile fotodedektör sinyali sayısal bilgiye çevrilmiş olur ve geri besleme elektronik sisteminde kullanılan sinyal işleme elektroniğine iletilir. Sinya işleme elektroniği bu sayısal bilgiyi kullanarak fotodedektör sinyalinden anlamlı açısal hız bilgisini üretir.

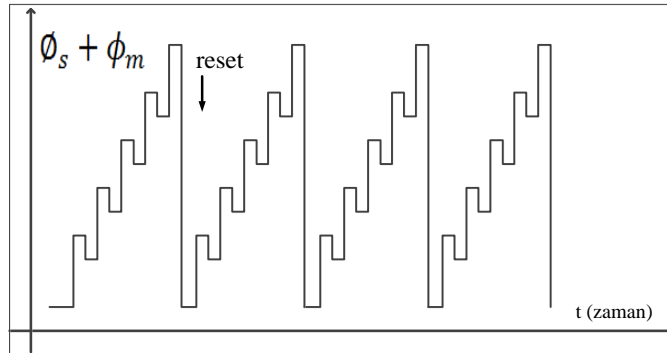
Bu elektronik blokların dışında, optik alıcı elektroniği dc silme devresi de içermektedir. Bu devrenin elektronik şeması Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Fotodedektör sinyali üzerinde , $-\pi/2$ ve $+\pi/2$ kare dalga modulasyonu işlemi sonrasında belli bir DC offset değerinin bulunmasıdır. Bu devrenin kullanılmasının amacı, fotodedektör sinyali üzerinde oluşan bu sabit DC değerini silmektir. Bu sabit DC

değeri silinmediği takdirde, optik alıcı elektroniğindeki elektronik devreler satürasyona uğrayacaktır ve sistem çalışmaz duruma gelecektir. DC silme devresi olarak PI kontrolcü kullanılmıştır. Analog anahtarlama işlemi yapılan fotodedektör sinyali, PI kontrolcü iletilir ve sabit DC değerinin silinmesi sağlanır. Bu PI kontrolcünün çıktısı silmiş olduğu DC offset değeridir. Bu değer de $-\pi/2$ ve $+\pi/2$ kare dalga modülasyonu işlemi yapıldığı için maksimum optik gücün yarısına denk gelmektedir.

3.1.2. Geri Besleme Elektronik Sistemi

Geri besleme elektronik sistemi, optik alıcı elektronik sistemi tarafından oluşturulan faz bilgisinin Fiber optik Jiroskop sisteminde bulunan faz modülatörüne geri beslenmesini sağlar. Bu geri besleme işlemi sayesinde Fiber Optik Jiroskop sinyalinin kapalı döngü çalışması sağlanmaktadır. Fiber Optik Jiroskop üzerinde oluşan faz bilgisinin silinebilmesi için fotodedektör sinyali üzerinden ölçülen faz bilgisi, ters işaretli olacak şekilde faz modülatörüne geri beslenmelidir. Bu sayede faz modülatörü, Fiber Optik Jiroskop sisteminde optik sinyalleri o anki faz değeri kadar yavaşlatacak ve faz bilgisinin sıfırlanmasını sağlayacaktır. Bu şekilde sistem, kapalı döngü olarak çalışmış olacaktır. Geri besleme elektroniği sistemi, sinyal işleme elektroniği ve sayısal/analog (D/A) çeviricilerden oluşmaktadır. Optik alıcı elektronik sistemi tarafından ölçülen faz bilgisi son olarak analog/sayısal (A/D) çeviriciler yardımı ile sayısal bilgiye çevrilip sinyal işleme elektroniğe aktarılmaktadır. Sinyal işleme elektroniği tarafından çeşitli işlemler sonrasında anlamlı açısal hız bilgisine çevrilen faz bilgisi, sayısal/analog (D/A) çeviricilere aktarılarak sinyalin tekrardan analog bilgiye dönüştürülmesi sağlanır. Analog bilgiye dönüştürülmüş sinyal, faz modülatörüne aktarılır. Sinyal işleme elektroniği tarafından yapılan işlemler bölüm 3.2.2’de detaylı olarak anlatılmıştır. Bölüm 2.1.6 ‘da Fiber optik Jiroskopta kullanılan faz modülatörü detaylı olarak anlatılmıştır. Bu amaçla, ÇFOE bileşeni kullanılmaktadır. ÇFOE bileşeninin çalışma prensibi uygulanan voltaja göre sinyaller arasında faz kayması yaratmasıdır. ÇFOE içerisinde bulunan dalga kılavuzlarına voltaj farkı uygulandığı zaman, dalga kılavuzları arasından geçen ışığın hızında uygulanan voltaj seviyesine göre bir azalma meydana

gelir. Bundan dolayı, yavaşlayan ışıklar arasında belli bir faz farkı oluşturur. Bu şekilde modülasyon işlemini gerçekleştirir. CFOE bileşeninin çalışma prensibi voltaj farkına göre olduğu için geri besleme işlemi integrasyon işlemi yapılarak yapılmalıdır. Yani optik alıcı elektroniği tarafından ölçülen ve sinyal işleme bloğuna iletilen faz bilgisi, sinyal işleme bloğu tarafından entegre edilerek geri besleme elektronik sistemine aktarılır. Bu şekilde, daha önce ölçülmüş faz bilgileri hafızada tutulur ve yeni ölçülen faz bilgisi ile toplanarak geri besleme elektroniğine iletilir. Geri besleme elektroniği de bu bilgiyi D/A'lar kullanarak sayısalan analog bilgiye çevirip faz modülatörüne aktarır. Yapılan integrasyon işlemi sonrasında, faz modülatörü, her faz ölçüldükten sonra, ölçülen faza denk gelen voltaj bilgisini görmüş olur ve bu bilgiye göre optik sinyali yavaşlatarak kapalı döngü sisteminin çalışmasını sağlar. Fiber optik Jiroskop sisteminde uygulanması gereken kare dalga modülasyonu 2.2.4'te ayrıntılı şekilde anlatılmıştır. Kare dalga modülasyonu üzerine integrasyon işlemi eklenerek, geri besleme elektroniği tarafından faz modülatörüne geri besleme yapılır. Bu sayede, Fiber optik Jiroskop sisteminin hem kapalı döngü çalışması sağlanır hem de $-\pi/2$ ve $+\pi/2$ kare dalga modülasyonu işlemi yapılması sağlanır. Bu iki işlem sonrasında oluşan ve faz modülatörüne eklenen sinyal Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Faz Modülasyon Sinyali

Ayrıca, geri besleme elektroniklerinde kullanılan D/A çeviricilerden kaynaklı bir satürasyon noktası bulunmaktadır. Bundan kaynaklı sinyal aşımını (overflow) engellemek için rampa sinyalinde sıfırlama (reset) noktası oluşturur. Bu durum bölüm 2.3.2’de detaylı olarak anlatılmıştır. Oluşturulan reset noktası da Şekil 3.5’te görülmektedir. Bu reset kontrolü, sinyal işleme elektronikleri tarafından yapılmaktadır.

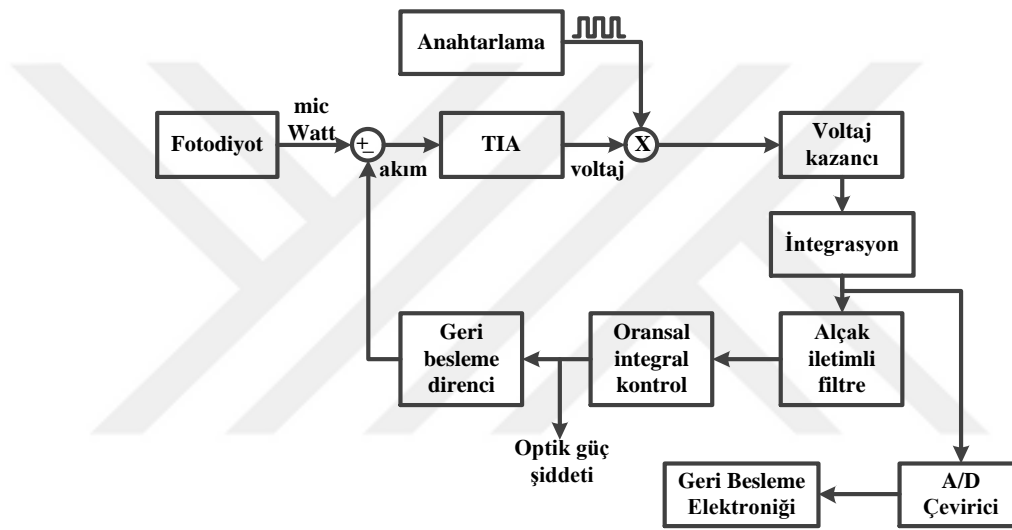
3.2. Fiber Optik Jiroskopun Modellenmesi

Bu tez çalışmasında, Fiber Optik Jiroskopun elektronik tasarımının modellenmesi yapılmıştır. Fiber Optik Jiroskoptan faz ölçümü yapılabilmesi için kullanılacak elektronik sistemler Bölüm 3.1’de detaylı olarak anlatılmıştır. Bu aşamada ise modelleme yapılırken kullanılan sinyal işleme teknikleri ve şimdiye kadarki yapılan çalışmalardan farklı olarak FOJ hassasiyetini artıracak metotlardan bahsedilmiştir. Bu elektronik tasarım iki aşamalı olacak şekilde yapılmıştır. İlk aşamada fiber optik sisteminden elektronik ölçüm sistemine aktarılan optik güç sinyalinden faz bilgisinin bulunması için kullanılan elektronik devreler modellenmiştir. Bu kısım optik alıcı devreleri olarak adlandırılır. İkinci kısımda ise, kapalı döngü Fiber Optik Jiroskop sisteminin yapılabilmesi için kullanılan elektronik sistem modellenmiştir. Bu kısım ise geri besleme devreleri olarak adlandırılır. Bu kısım, optik alıcı devreleri kullanılarak ölçülen faz bilgisini fiber optik sisteminde kullanılan faz modülatörüne geri besleyerek Fiber Optik Dönüölçer sisteminin kapalı döngü çalışmasını sağlar. Bu iki elektronik kısmın modellenmesi amacı ile MATLAB-Simulink ortamında sistemin benzetimi yapılmaya çalışılmıştır. Yapılan modelleme çalışmalarında optik sistemden kaynaklı gürültüler göz ardı edilmiştir. Oluşturulan fiber optik jiroskop modeli optik alıcı ve geri besleme sistemi olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır.

3.2.1. Optik Alıcı Sistem Modeli

Optik alıcı kısmı, fotodiyot üzerinden dönü ve ortalama optik güç bilgilerinin alınıp sayısal veriye çevrilmesi işlemini gerçekleştirmektedir. Optik alıcı kısmı, fotodiyot sinyalini alarak dönüölçer çıkışı oluşturan birimdir. Fotodiyottan gelen

dönüyle orantılı optik güç (μW 'lar seviyesinde) sinyali, TIA (Trans Impedance Amplifier)'dan geçirilerek yükseltilir ve voltaj seviyesine dönüştürülür. TIA çıkışı bir analog anahtar ile anahtarlanarak atlama (spike) olan kısımlar sinyalden atılır. Analog anahtar çıkışının integrali alınır ve faz bilgisinin elde edilebilmesi için analog/sayısal çeviricilere iletilir. Ayrıca, analog anahtardan çıkan sinyal DC silme devresine iletilir ve TIA devresine geri besleme yapılarak fotodiyot sinyali üzerindeki DC bileşenin atılması sağlanır. Modellenen optik alıcı devresinin blok diyagramı Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Optik Alıcı Modeli Blok Diyagramı

3.2.1.1. Foto Diyot Bloğu

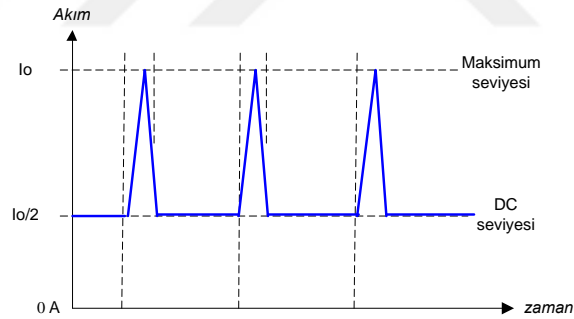
Dönü ölçer, girdi ekseninde uygulanan dönüyü faz farkına çeviren bir yapıya sahiptir. Uygulanan dönüye bağlı oluşan faz farkı Eşitlik 3.1'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi.L.D.\Omega}{\lambda.c} \quad (3.1)$$

Oluşan faz farkı fotodetektör ile Eşitlik 3.2'deki gibi güce çevrilir.

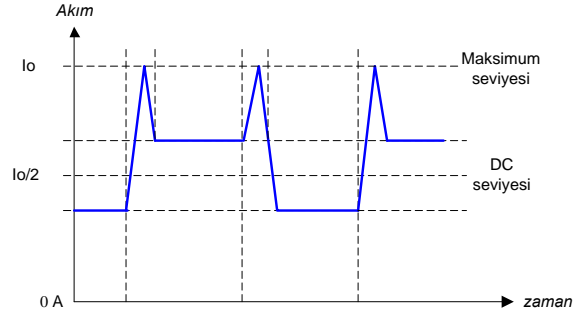
$$P = \frac{1}{2}(1 + \cos\Delta\phi) \quad (3.2)$$

Fiber optik dönüölçer sisteminin kararlılığının ve doğrusallığının artırılması ve sistemde oluşan faz farkının yönünün belirlenmesi için kare dalga modülasyonu işlemi yapılmaktadır. Kare dalga modülasyonu ile belirli periyotlarda fiber optik dönüölçer sistemine $\pm \pi/2$ faz farkı uygulanmaktadır. Bu durumda, sistemde faz farkı olmadığı varsayıldığında, fotodiyot üzerine $I_0/2$ optik güç oluşacaktır. Bu durum interferogram eğrisinde de görülmektedir. Kare dalga modülasyonu sonucu fotodiyot üzerinde oluşması beklenen optik güç sinyali Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, kare dalga modülasyonu sonrasında fotodiyot sinyali üzerinde I_0 maksimum optik güce denk gelen istenmeyen zıplamalar bulunmaktadır. Bu kare dalga modülasyonu işleminden kaynaklanır ve faz bilgisi hesaplanmadan önce sinyal üzerinden silinmelidir.



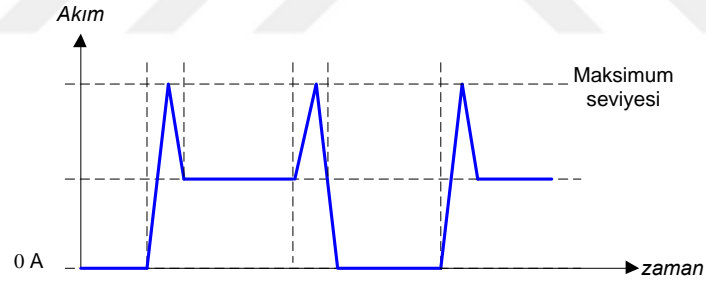
Şekil 3.7. Fotodiyot Üzerinde Oluşan Optik Güç

Fiber optik dönü ölçer sistemi üzerinde herhangi bir faz farkı oluşması durumunda fotodiyot sinyali Şekil 3.8'deki gibi olacaktır.



Şekil 3.8. Faz Farkı Durumunda Fotodiyot Üzerinde Oluşan Optik Güç

Şekil 3.8'de görüldüğü üzere fotodiyot sinyali, $I_0/2$ DC seviyesine sahiptir. Bu durum, elektronik açıdan yüksek faz farkı değerlerinde satürasyona sebep olacağı için sistemde istenmemektedir. Bunun için optik alıcı devresinde DC eleme bloğu kullanılmaktadır. DC seviyesi elenen fotodiyot sinyali Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

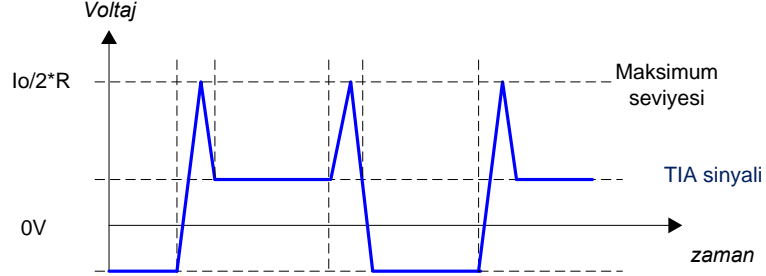


Şekil 3.9. DC Bileşeni Elenen Fotodiyot Sinyali

Tasarlanan fotodiyot bloğu Şekil 3.9'teki durumu modellemektedir. Fotodiyot sinyali üzerinde görülen zıplamalar, kare dalga modülasyonunda kullanılan ve faz modülatörüne aktarılan kare dalga sinyalinin yükselme ve alçalma zamanlarından kaynaklıdır. Bundan dolayı, bu durum fotodiyot bloğunda elenmiş olarak modellenmiştir.

3.2.1.2. TIA Bloğu

TIA bloğu sonrasında elde edilmesi beklenen sinyal Şekil 3.10'da g6sterilmiŐtir.

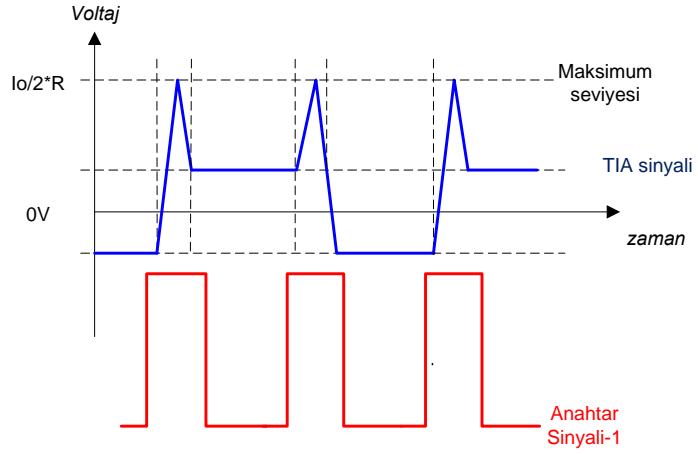


Şekil 3.10. TIA ıkıŐ Sinyali

TIA bloğunda fotodiyottan gelen sinyali kullanarak, ortalama optik g6c6n ve d6n6 bilgisinin hesaplanabileceği uygun sinyaller elde edilmesi amaçlanmaktadır. Burada, fotodiyottan gelen akım sinyali, TIA yardımıyla belli bir direnç ile çarpılarak gerilime çevrilmiŐtir.

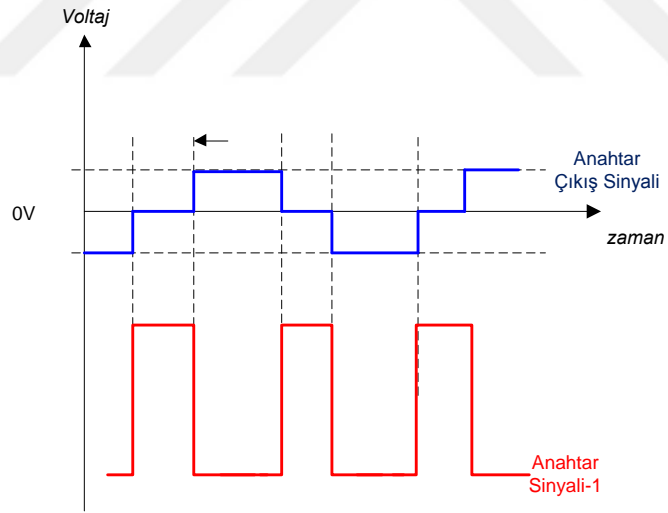
3.2.1.3. Analog Anahtarlama Bloğu

Bu blok, fotodiyot sinyali 6zerinde kare dalga mod6lasyonu sonucunda oluşan istenmeyen zıplamaların silinmesi durumunu modellemektedir. Bunun için optik alıcı devresinde analog anahtar kullanılmıştır. Analog anahtarlama sinyalinin toprak seviyesine d6Őmediđi anlarda, analog anahtarın çıkışı toprağa bağlanacaktır ve bu Şekilde istenmeyen zıplamalar silinecektir. TIA çıkışında oluşan sinyalin analog anahtar bloğu ile çarpılması işlemi Şekil 3.11'de g6r6lmektedir.



Şekil 3.11. TIA Çıkış Sinyali ve Anahtarlama İşlemi

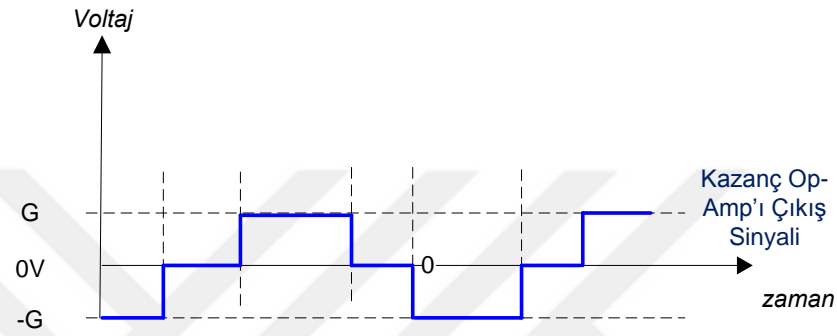
Bu işlem sonrasında oluşması beklenen sinyal Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Anahtarlama Sonrası Çıkış Sinyali

3.2.1.4. Voltaj Kazanç Bloğu

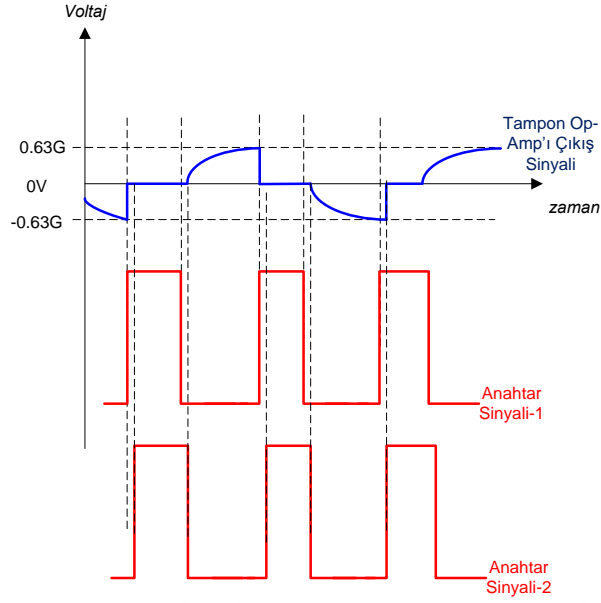
Bu blok, analog anahtar bloğu sonrasında oluşan sinyale sabit bir kazanç ile çarpmak amaçlı yapılmıştır. Fiber optik dönü ölçer sisteminde, küçük faz farkı oluşumu durumunda ölü bölge oluşmaması için sinyalin genliğinin artırılması amaçlanmaktadır. Bu blok sonrasında oluşan sinyal Şekil 3.13'te görülmektedir.



Şekil 3.13. Kazanç OpAmp Çıkış Sinyali

3.2.1.5. İntegratör

Bu blok, fotodiyot sinyaline sabit kazanç verildikten sonra fotodiyot sinyali üzerindeki gürültünün silinmesi amacı ile kullanılır. Bu işlem ile optik sinyal üzerindeki beyaz gürültüler belli bir frekansa kadar silinmiş olur. Bu filtre devresinde kullanılan kapasitenin belli zamanlarda dolması sağlanarak filtreleme işlemi yapılması sağlanır. Filtreleme işlemi bitirildikten sonra belirli bir frekans ile kapasite toprağa bağlanır ve boşalması sağlanır. Bu zamanlamanın yapılabilmesi için ve fotodiyot sinyali üzerinde istenilen sinyalin integrasyon işlemine sokulabilmesi için, analog anahtar kullanılmaktadır. Analog anahtar, filtreleme işlemi yapılacağı zaman açılır ve kapasitenin dolmasını sağlar. Filtreleme işlemi bitirildikten sonra, analog anahtar kapanır ve kapasitenin toprağa bağlanıp boşalmasını sağlar. Bu blok sonrasında oluşacak sinyal Şekil 3.14'te gösterilmiştir.

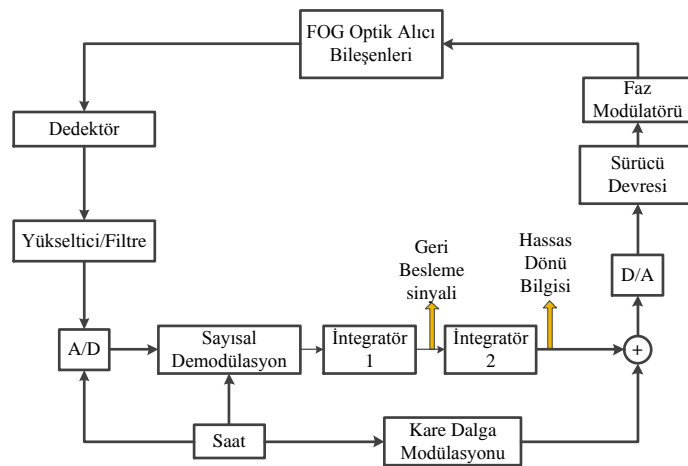


Şekil 3.14. İntegratör Çıkışı

Şekilde görüldüğü üzere, kazanç verilen sinyalin %63'üne denk gelecek bir yelken sinyali elde edilecektir. Bu durum bölüm 3.1.1'de detaylı anlatılmıştır. Şekilde iki adet analog anahtarlama sinyali görülmektedir. Bunlardan ilki, fotodiyot sinyali üzerinde istenmeyen zıplamaların silinmesi için kullanılan sinyaldir. İkinci ise analog integrasyon işlemi sırasında kapasitenin dolup boşalmasını kontrol edecek sinyaldir. İlk analog anahtarlama sinyali ile ikinci analog anahtarlama sinyali arasında küçük bir öteleme farkı uygulanmıştır. Bunun sebebi, ikinci anahtarlama işleminin, ilk anahtarlama işleminin yük püskürtme işleminden etkilenmesi engellemektir. Analog anahtarlama sinyalinin toprak seviyesine düştüğü anlarda, analog integrasyon işlemi kullanılan kapasitenin toprak bağlantısı kesilecek ve bu şekilde integrasyon işlemi yapılması sağlanacaktır. Analog anahtarlama sinyalinin toprak seviyesine düşmediği anlarda ise, integrasyon kapasitesi toprağa bağlanacak ve boşaltım işlemi yapılacaktır.

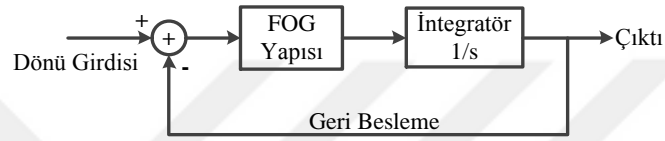
3.2.2. Geri Besleme Devresi Modeli

Geri besleme devresi modeli, bölüm 3.1.2’de anlatılan elektronik sistem modelini içermektedir. Bu model iki ana bölümden oluşmaktadır. Bunlardan ilki, optik alıcı elektronik sisteminin ölçtüğü faz bilgisini geri beslenecek anlamlı hale getiren sinyal işleme elektroniği bloğu, ikincisi ise faz modülatörüne geri besleme işlemini gerçekleştiren sayısal/analog çevirici bloğudur. Sinyal işleme bloğu, ölçülen faz bilgisinin faz modülatörüne geri besleme işlemi yapılmadan önce anlamlı hale getirilmesini sağlayan işlemlerden oluşur. Bunlar tamamen sayısal işlemlerdir. Bu işlemler sonrasında üretilen rampa sinyali sayısal/analog çevirici sayesinde voltaj bilgisine çevrilir ve faz modülatörüne geri beslenir. Bu şekilde fiber optik jiroskop sisteminin kapalı döngü olarak çalışması sağlanır. Kapalı döngü FOJ’ların en önemli özelliği sistemde yer alan gürültüyü kullanarak ölçüm aralığını genişletmesi ve bileşen kalitesinin daha alt düzeylere çekilmesidir. Klasik FOJ’larda 24 bitlik A/D ve D/A gerekmesine rağmen aynı performans sayısal faz rampalı kapalı döngü FOJ’larda 16 civarında bit sayılı A/D - D/A ile gerçekleştirilebilmektedir [50]. Ayrıca yüksek performans ve düşük bant aralıklı analog yükselticiler yerine daha düşük seviye yükselticiler kullanılmaktadır. Sayısal FOJ mimarisi Şekil 3.15’te görülmektedir. Dedektörden akım şeklinde çıkan optik çıktı yükseltici ile voltaj haline çevrilir A/D’nin ölçüm aralıklarına denk düşecek şekilde yükseltilir.



Şekil 3.15. FOJ Sayısal İşleme Yapısı

A/D ile sayısal ortama alınan sinyal sayısal olarak demodüle edilir ve süzgeçlenir. Süzgeçlenme düşük geçirgenli filtre mantığına uygun olacak şekilde ortalama alma işlemi şeklinde gerçekleştirilir. İntegratör 1 sayesinde geri besleme sinyali oluşturulur, integratör 2 ile daha önce hesaplanan dönülerin ortalaması alınarak süzgeçleme yapılır. İntegratör 1 kontrolcü görevini görmektedir. Uzun vadede kalıcı durum (steady state) hatasını sıfıra çekerek, çıktıda gerçek girdinin değerini gösterir. Şekil 3.16'da blok şeması gösterilmiştir. Çıktı dönüsü bir süre sonra girdi dönüsüne eşit olur.



Şekil 3.16. Geri Besleme Kontrol Diyagramı

İnterferogramı $\pm\pi/2$ etrafında çalıştırmak için kare dalga modülasyonu uygulanmıştır. Kare dalga modülasyonu yaratacak sinyal sayısal işaret işleme ve kontrol birimi tarafından oluşturulup kontrol sinyali içerisine eklenir. Kare dalga modülasyonu ayrı olarak faz modülatörüne analog olarak girmeyip D/A'den faz modülatörüne eklendiği için bit kaybı oluşmaktadır. Bit kaybının olmaması için kare dalga modülasyonu analog olarak yaratılması gerekmektedir. Kare dalga modülasyonu, sayısal işaret işleme ve kontrol biriminde yaratıldığı için her an kontrol edilebilir niteliktedir. Ayrıca sayısal faz rampasından kaynaklı reset durumu sayısını da düşürdüğü için kontrol sinyaliyle birlikte faz modülatörüne girmesi bir başka avantajdır.

3.2.2.1. Kapalı Döngü FOJ Periyot Analizi

Bu tezdeki, daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak, FOJ sinyal işleme yapısına yenilik katacak bölümlerden birisi periyot atlama ile örnekleme tekniğidir. Bu güne kadar FOJ hassasiyetini ve ölçüm aralığını artırmak adına bazı çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan bazıları fiziksel bileşenleri geliştirerek bazıları ise sinyal işleme teknikleri ile hassasiyeti artırmak olmuştur [14-16]. Bu çalışmada bahsedilen metot, sinyal işleme tekniği kategorisinde daha önce uygulaması yapılmamış bir tekniktir. Kapalı döngü FOJ $\pm \pi / 2$ noktaları etrafında çalıştırılır (sabit kayma modülasyonu). İnterferogramın kullanılabilir alanı ise $\pm \pi$ arasında değişir (periyodik olduğu için). Ölçüm erimini (range) aşmamak kaydıyla büyüklüğü doğru ölçülebilecek girdi fazının büyüklüğü $\pm \pi / 2$ arasında olabilir.

Pozitif girdi dönülerinin oluşturabileceği faz farkı, $0 < \text{Girdi Faz Farkı} \leq \pi/2$,
Negatif girdi dönülerinin oluşturabileceği faz farkı, $-\pi/2 < \text{Girdi Faz Farkı} \leq 0$,
 K_s orantı katsayısı ise bu faz aralığın kapsayacağı dönünün büyüklüğü Eşitlik 3.3'teki gibidir.

$$-\frac{\pi/2}{K_s} \leq \text{Girdi Dönüsü} \leq +\frac{\pi/2}{K_s} \quad (3.3)$$

Bu tasarımda kullanılmak istenen optik bileşen parametrelerinden bazıları aşağıda verilmiştir.

Fiber uzunluğu: $L = 2000\text{m}$

Fiber sarım çapı: $D = 10\text{cm}$

Dalga boyu: $\lambda = 1550\text{nm}$

Bu değerlere göre orantı katsayısının değeri 2,7024 saniyedir. Belirtilen değerler Eşitlik 3.3'teki girdi dönüşü denkleminde yerine konulduğu zaman azami ölçüm aralığı $-33,303175^\circ/\text{saniye} < \text{Girdi Faz Farkı} \leq +33,303175^\circ/\text{saniye}$ olur. Hesaplamalar sonrasında görüldüğü üzere 2000 m sarım uzunluğuna sahip ve 10 cm fiber sarım çapına sahip bir sistemde ölçülebilecek maksimum dönü bilgisi $\pm 33,303175^\circ/\text{saniye}$ 'dir. Bu değer gerçek zamanlı sistemler açısından düşünüldüğü zaman kabul edilebilir bir değer değildir. Bundan dolayı sistemin ölçüm aralığının

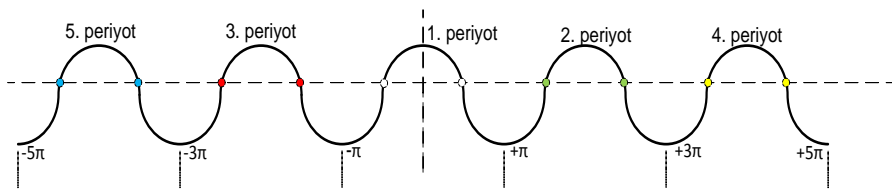
artırılması gerekmektedir. Bunun için, bu tez çalışmasında periyot atlama algoritması ismi verilen algoritma tasarımı yapılmıştır. Bu algoritma sayesinde, ölçüm aralığı teorik olarak limitsiz seviyeye ulaşmıştır. Gerçek zamanlı sistemdeki kısıtların izin verebileceği seviyeye kadar dönü bilgisi ölçüm yapılabilecektir. Periyot sayma algoritması akışı aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
 & \text{Eğer } faz < \pi \\
 & \quad faz_{fb} = faz \\
 & \quad \text{Değilse,} \\
 & \quad faz > \pi \text{ ve } faz < 2\pi \text{ ise,} \\
 & \quad \quad faz_{fb} = 2\pi - faz \\
 & \quad \quad \text{Değilse,} \\
 & \quad \quad faz > 2\pi \text{ ve } faz < 3\pi \text{ ise,} \\
 & \quad \quad \quad faz_{fb} = faz - 2\pi \\
 & \quad \quad \quad \text{Değilse,} \\
 & \quad \quad \quad faz > 3\pi \text{ ve } faz < 4\pi \text{ ise,} \\
 & \quad \quad \quad \quad faz_{fb} = 4\pi - faz
 \end{aligned}$$

Dedektör üzerinde oluşan güç ile faz farkının birbirine göre ilişkisini gösteren “İnterferogram” eğrisi Şekil 2.17’de ve ilgili eşitliği Eşitlik 2-31’de gösterilmiştir. Bu eşitlik dikkate alındığı zaman interferogram eğrisi Şekil 3.17’deki gibi gösterilebilmektedir. İnterferogram eğrisindeki her bir kosinüs dalgasını periyot olarak adlandırdığımızı varsayarsak, Şekil 3.17’deki gibi farklı periyot noktalarından oluşan bir interferogram eğrisi karşımıza çıkar. Bu periyot sayıları teorik olarak limitsizdir. Bundan dolayı, periyot atlama algoritması ile ölçüm aralığı da limitsiz olacaktır. Fakat, gerçek zamanlı sistemlerdeki kısıtlardan Fiber Optik sarım üzerinde oluşacak güç-faz eğrisindeki periyot sayıları limitli olacaktır. Bu limit de, ölçüm aralığını limitleyecektir.

2000 metre sarım uzunluğuna sahip bir Fiber Optik Jiroskop sisteminde, $\pm \pi/2$ değerlerine sahip faz farkları, yukarıda yapılan hesap sonrasında $\pm 33,303175$ %/saniye’ye denk geldiği bulunmuştur. Sistemde periyot atlama algoritması olmadığı zaman bu faz değerleri aralığına sahip faz ile sistem çalışabilmektedir. Bunlardan büyük bir faz sisteme etki ettiği zaman Şekil 3.17’de görüldüğü üzere etki eden faz değerinin işaretine göre optik güç bilgisi 2. periyota

veya 3. periyota doğru kayacaktır. Bundan dolayı kapalı döngü kontrolcüsü bunu kapatamayacaktır ve Fiber Optik Jiroskop sistemi doğru bir ölçüm yapamayacaktır. Bu problemin ortadan kaldırılması için, bu tez çalışmasında periyot atlama algoritması tasarlanmıştır. Bu algoritmaya göre anlık ölçülen faz bilgisinin değeri kontrol edilmekte ve bu değere göre ÇFOE bileşenine uygun geri besleme yapılmaktadır. Örneğin; eğer anlık faz bilgisi π ve 2π arasında bir değere sahip ise, kapalı döngü sistemi bu değeri ÇFOE bileşenine geri besleme yapmadan önce ölçülen faz değerini 2π 'lik faz değerinden çıkarmaktadır ve bu değeri ÇFOE bileşenine geri beslemektedir. Bu şekilde, Fiber Optik Jiroskop sisteminin, faz eğrisinin 2. periyotunun üzerinde işlem yapması sağlanmaktadır. Bu şekilde anlık ölçülen faz değeri kontrolü yapılarak kapalı döngü sisteminin büyük faz değerlerini π 'den küçük olacak şekilde ÇFOE bileşenine geri beslemesi sağlanmaktadır. Periyot atlama algoritmasıyla beraber $\pm \pi$ değerindeki faz farkı $\pm 66,60635$ °/saniye'ye, algoritma 4π değerine kadar yapıldığı için $\pm 266,4254$ °/saniye'ye aralığına kadar ölçüm yapılabilmektedir. Algoritmanın aralığı artırılarak devam edilirse ölçüm aralığı teorik olarak sonsuz olabilmektedir. Yani, Fiber Optik Jiroskop sistemi güç-faz eğrisinde periyotlar üzerinde gezerek büyük faz değerlerinin de kapalı döngü algoritması tarafından kapatılması sağlanmıştır. Bu periyot algoritması sayesinde, hassas ölçüm yapabilen yüksek sarım uzunluklu Fiber Optik Jiroskop sistemlerindeki oluşan ölçüm aralığı problemi giderilmiştir.



Şekil 3.17. Periyot Atlama Algoritması

3.2.2.2. Geribesleme Fazı Oluşturulması ve Reset Kontrolü

Geribesleme fazı ölçüm sonucuna bakılarak yapılır. Negatif ve orantılı bir geribesleme uygulanır. Geribesleme fazının değeri sayısal/analog çeviricinin satürasyon noktalarına ulaştığı anda reset durumu vardır demektir.

- Ölçüm sonucu, ölçüm
- Bir önceki adımda sisteme verilen fazın büyüklüğü, faz_{n_1}
- Bir önceki adımdaki faz yükselmesi, $ramp_{n_1}$
- Faz modülatörünün durumu, faz_d
- Faz modülatörü sabit kayma noktası, faz_s

Olmak üzere, yukarıdaki değişkenler kullanılarak bir sonraki adımda geri besleme fazı, faz_n , ve faz yükselmesi miktarı, $ramp_n$, oluşturulur. Sisteme verilecek fazın (faz_n) büyüklüğü sabit kayma modülatörünün durumu da gözetilerek hesaplanır. Sabit kayma modülatörü, sabit kayma modülasyon noktalarına bağlı olarak 2 farklı durumda olabilir, $+\pi/4$ ve $-\pi/4$, $faz_s = \{0, -1\}$. Sabit kayma noktaları, $kayma = \pi/4$. Sabit kayma modülasyonun değeri her bir yarım periyotta değiştirilir. Faz modülatörünün her adımda alacağı değer Eşitlik 3.4'te verilmiştir.

$$faz_m = (faz_s - 1) \times (2 \times kayma) + kayma \quad (3.4)$$

Faz modülatörünün durumu her aşamada değiştirilmelidir. Bu durum Eşitlik 3.5 ile gösterilmiştir.

$$\begin{cases} faz_s = 0, & faz_s = 1 \\ faz_s = 1, & faz_s = 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

Böylece her bir ardışık çevrimde (cycle) interferogram $\pi/2$ veya $-\pi/2$ noktalarında çalıştırılır. Sisteme verilecek geribesleme fazının büyüklüğü ise Eşitlik 3.6'daki gibi hesaplanır.

$$faz_n = -ölçüm + faz_{n_1} + ramp_{n_1} + faz_d \quad (3.6)$$

Yükselme miktarı ise Eşitlik 3.7'deki gibi hesaplanır.

$$ramp_n = -ölçüm + ramp_{n_1} \quad (3.7)$$

faz_n 'nin büyüklüğüne bakılarak reset durumu olup olmadığı kontrol edilmelidir. faz_n 'nin değeri sayısal/analog çeviricinin saturasyon noktalarına ulaşırsa reset vardır denir. Reset olduğunda bir sonraki çevrimde bu ölçüm kullanılmamalıdır. Reset durumu varsa yükselme miktarı bir önce yükselme durumuna ayarlanır. Sisteme verilecek faz ise daha önce belirlenmiş olan değerler verilir. Sisteme verilecek faz değeri bir önceki adımda yükseliş (faz_{n_1}) miktarının işaretine göre değişir. faz_{n_1} 0'dan küçükse $faz_{artı}$, değilse faz_{eksi} değeri faz_n olarak alınır. Bu değerler reset miktarını asgari düzeye çekmek için seçilmiştir. Bu tasarımda, $faz_{artı} = 2\pi$, $faz_{eksi} = 0$ olarak kabul edilmiştir. Reset durumunu içeren algoritma aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} & \text{Eğer } faz_n > 2\pi \text{ veya } faz_n < 0 \\ & \quad \text{Eğer } ramp_{n_1} < 0 \\ & \quad \quad faz_n = faz_{artı}; \\ & \text{Değil ise} \\ & \quad faz_n = faz_{eksi} \\ & \quad reset\ durmu = var \end{aligned}$$

Geribesleme fazı her saat dilimi yerine 2 saat diliminde bir hesaplanır. Hesaplanan geribesleme fazı sisteme verilir ve bir sonraki dilimde aynı geribesleme fazı sisteme eklenir. Bu dilimden bir sonraki çevrim için gerekli geri besleme fazı oluşturulur ve sistem yukarıda anlatılan mantıkla çalıştırılmaya devam eder. Her adımda yeni bir geribesleme fazı oluşturmak demodülasyon yapısını değiştirir. Hesaplanan geri besleme fazı $\Delta\phi_f$ ise, ardışık iki çevrimde ölçülecek güç Eşitlik 3.8'de gösterildiği gibidir.

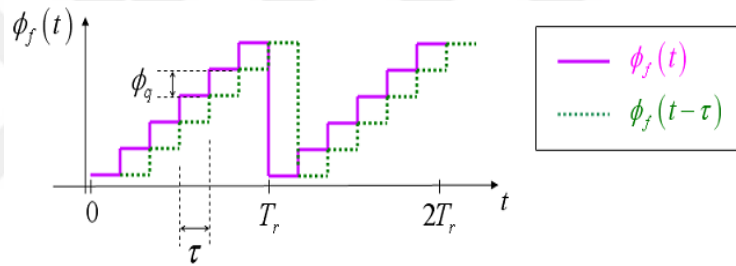
$$\left(\begin{aligned} \langle P \rangle &= \frac{I_0}{2} \begin{pmatrix} 1 + \cos(\Delta\phi_{sagnac} - \Delta\phi_f) \cos(2\phi_0) \\ -\sin(\Delta\phi_{sagnac} - \Delta\phi_f) \sin(2\phi_0) \end{pmatrix}, & (n-1)\tau \leq t \leq n\tau \\ \langle P \rangle &= \frac{I_0}{2} \begin{pmatrix} 1 + \cos(\Delta\phi_{sagnac} - \Delta\phi_f) \cos(-2\phi_0) \\ -\sin(\Delta\phi_{sagnac} - \Delta\phi_f) \sin(-2\phi_0) \end{pmatrix}, & n\tau \leq t \leq (n+1)\tau \end{aligned} \right) \quad (3.8)$$

Demodülasyon sonucu elde edilecek ortalama güç ise Eşitlik 3.9 ve 3.10 ile tanımlanır.

$$\Delta\langle P \rangle = \Delta\langle P(t) \rangle - \Delta\langle P(t - \tau) \rangle \quad (3.9)$$

$$\Delta\langle P \rangle = \frac{I_0}{2} (2\sin(\Delta\phi_{\text{sagnac}} - \Delta\phi_f)\sin(\Delta\phi_m)) \quad (10)$$

Geribesleme oluşturmaktaki amaç dedektör gücünü sıfırlamak olduğuna göre $\Delta\phi_f = \Delta\phi_s$ alınırsa ölçülen güç sıfırlanır. Bunun yanında dönünün yönü de kestirilebilir (yükselişin yönüne göre). Doğru geri besleme fazı bulunduğu Şekil 3.18’de görüldüğü gibi sisteme sabit artışlarla ($ramp_n$) faz verilir (faz_n).

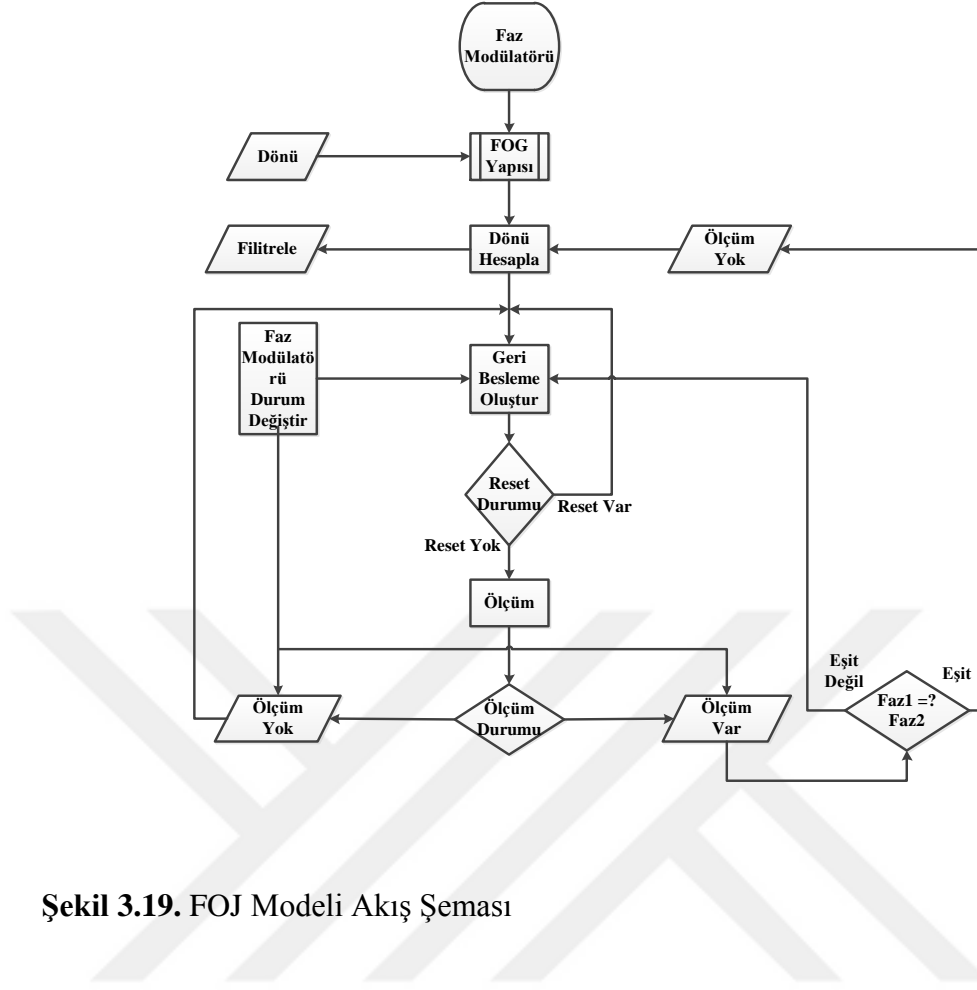


Şekil 3.18. Faz Rampası

Burada $\phi_f = faz_n$ ve ϕ_q adım uzunluğu veya Sagnac faz farkının negatif değeri olmak üzere sisteme verilen net faz farkı Eşitlik 3.11’deki gibi olur.

$$ramp_n = \Delta\phi_f = \phi_q = \phi_f(t) - \phi_f(t - \tau) \quad (3.11)$$

Sayısal faz rampalı kapalı döngü sistemin işlev akış şeması Şekil 3.19’da görülmektedir.



Şekil 3.19. FOJ Modeli Akış Şeması

Sayısal demodülasyon fikrinin geçerliliğini koruyabilmesi için sabit kayma modülasyonunun durumunun ve A/D'nin dedektör sinyalini sistem saatine göre nerelerde örneklediğinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Gerçek dönünün bulunabilmesi için interferogramın $\pi/2$ ve $-\pi/2$ noktaları etrafında örnekler alınmalıdır. Örnekler alındıktan sonra sinyal demodüle edilip sistemde dolanan faz miktarı bulunmalıdır. Sistemde sıfırdan farklı faz dolandığı tespit edildiğinde bu fazı sıfırlamak için bu faza eşit geribesleme fazı sisteme verilmelidir. Dedektör sinyali fiber sarım geçiş süresi, τ , aralıklarla örneklenmelidir. Örnekler göre sistemde dolanan faz veya dönü tespit edilir. Tespit edilen fazı Sıfırlamak için geribesleme fazı oluşturulur. Reset durumu olmayıncaya kadar her saat çevriminde geribesleme fazı sisteme verilir. Reset yoksa ölçüm alınır. Faz tespiti için en az İki güç ölçümüne ihtiyaç vardır. İki güç ölçümü alındığında yeni faz hesabı yapılır ve bulunan faza

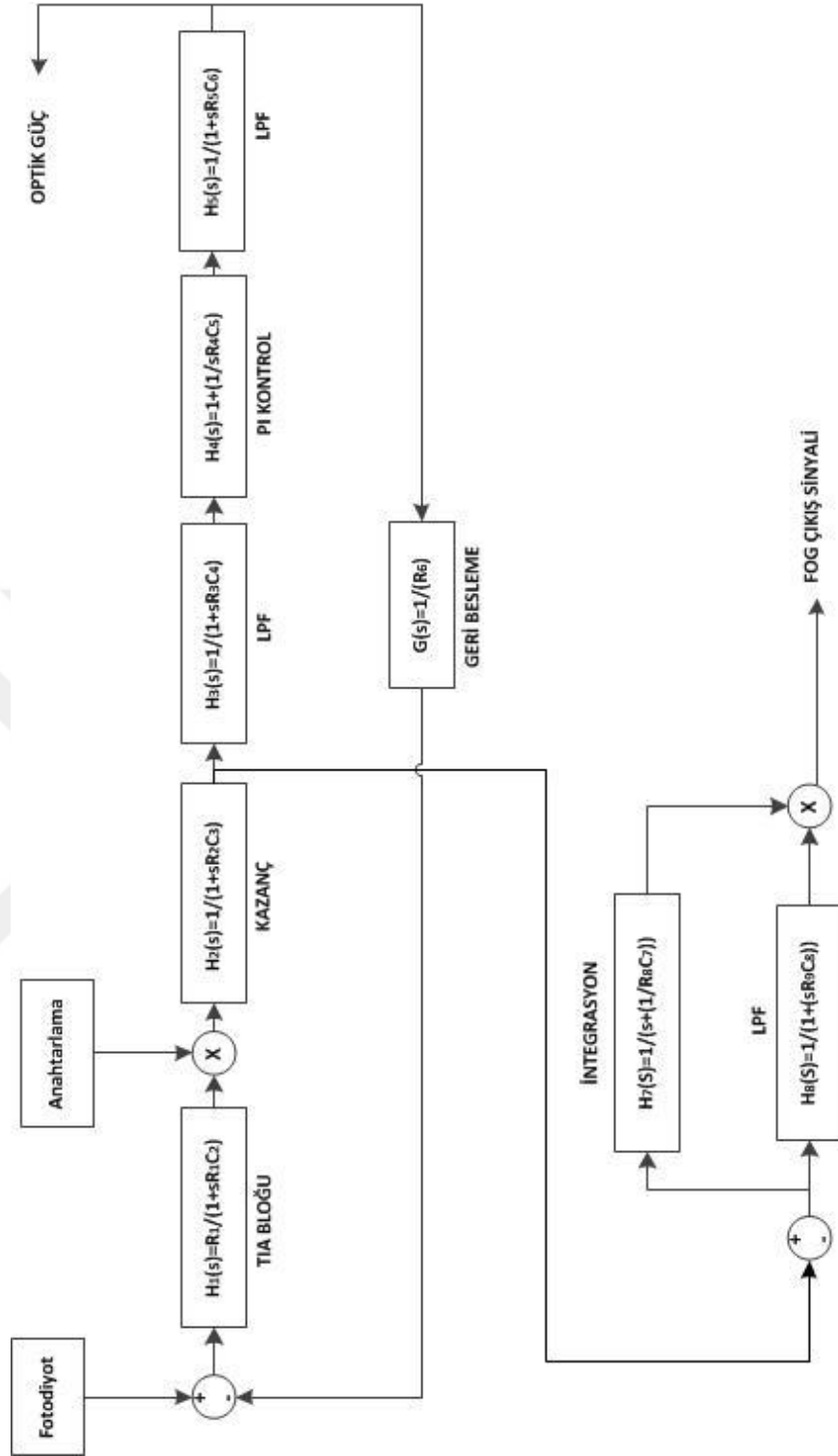
göre yeni geribesleme fazı oluşturulur. Hesaplanan dönüye süzgeçleme yapılarak gürültü indirilmesi yapılarak çıktı olarak dışarıya verilir.

3.3. Simülasyon Çıktıları

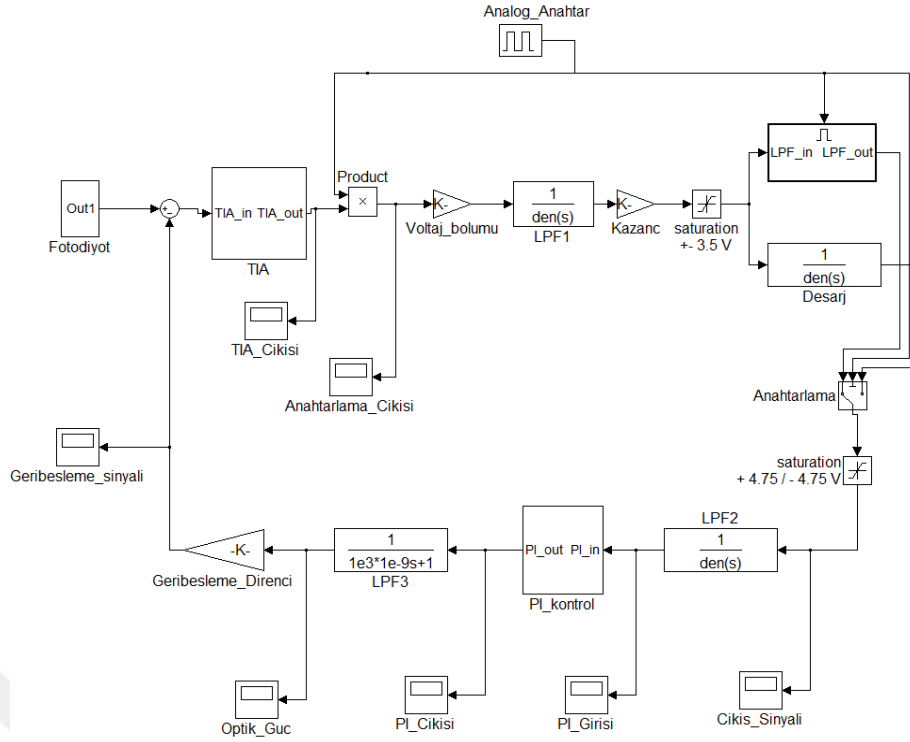
Bu kısımda FOJ sistemine giren sinyalden başlayarak, kullanılan bileşenlerden geçen sinyalin sırasıyla her bir bileşen için çıktıları grafiksel olarak verilecektir. Son bölümde teorik olarak beklenen ve benzetim çalışması sonucunda çıkan modülasyon sinyali karşılaştırılması yapılacaktır.

3.3.1. Optik Alıcı Benzetimi

Bu çalışmada, Fiber Optik Jiroskop tasarımı çalışmaları kapsamında örnek bir FOJ tasarımının optik alıcı kısmı incelenmiştir ve örnek Fiber Optik Jiroskopların optik alıcı kısmı devre şemaları incelenmiştir. Devre elemanları s-bölgesinde (domain)'de modellenerek optik alıcı kısmın blok şeması oluşturulmuştur, Şekil 3.20. Şekil 3.21 ile gösterilen model ile simülasyonlar yapılmıştır ve modelin beklenen şekilde çalıştığı gözlenmiştir.

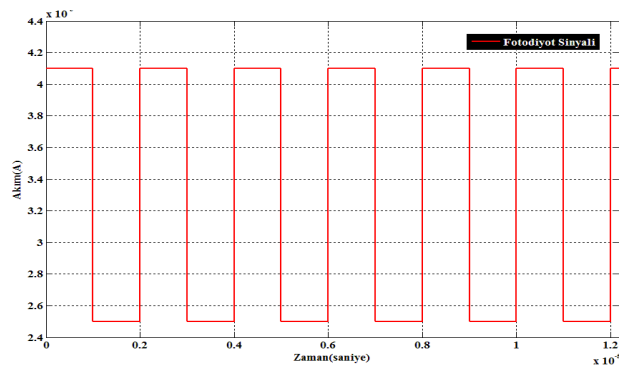


Şekil 3.20. Optik Alıcı Transfer Fonksiyon Blok Şeması



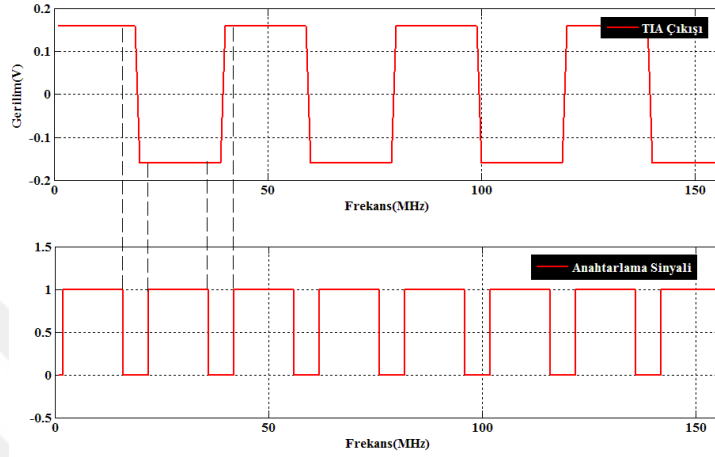
Şekil 3.21. Optik Alıcı Simulink Modeli

Şekil 3.22'deki fotodiyot sinyali çıktı olarak kare sinyal formunda akım üretecek şekilde, sistemde sabit dönü var sayılarak modellenmiştir. Şekil 3.22'de görüldüğü üzere sabit dönü bilgisi belli bir DC seviye üzerinde sisteme uygulanmıştır.



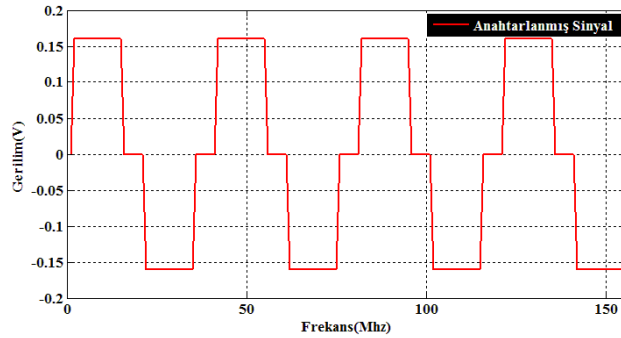
Şekil 3.22. Fotodiyot Sinyali

Fotodiyottan gelen sinyalin μA düzeyindedir, bu kadar küçük genlikteki bir sinyalde işlem yapmak zor olacağı için TIA fotodiyottan aldığı sinyali voltaja çevirirken belirli bir kazanç ile çarparak genliğini de artırır. TIA çıkışında kare sinyal formunun korunduğu Şekil 3.23’de görülmektedir.



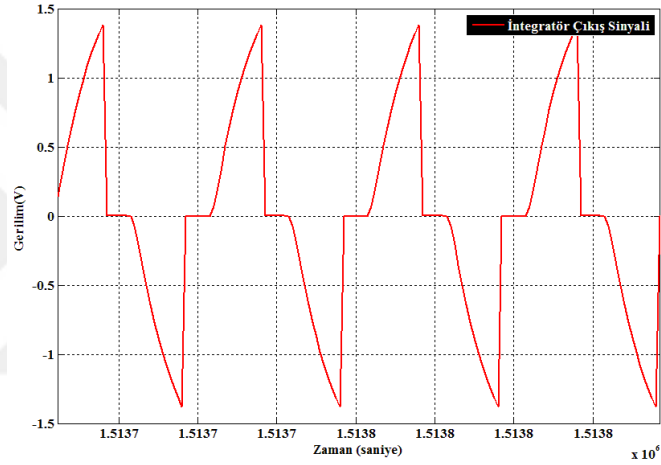
Şekil 3.23. TIA Çıkış Sinyali

Gerçek koşullarda fotodiyot sinyalinin iniş ve çıkış noktalarında atlamalar görülür fakat idealde bu atlamalar modellenemediği için gösterilememiştir. Anahtarlama sinyali ve çıkışında oluşan, atlamaları filtrelenmiş sinyal Şekil 3.24’te gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Anahtar Sinyali ve Anahtarlama Çıkış Sinyali

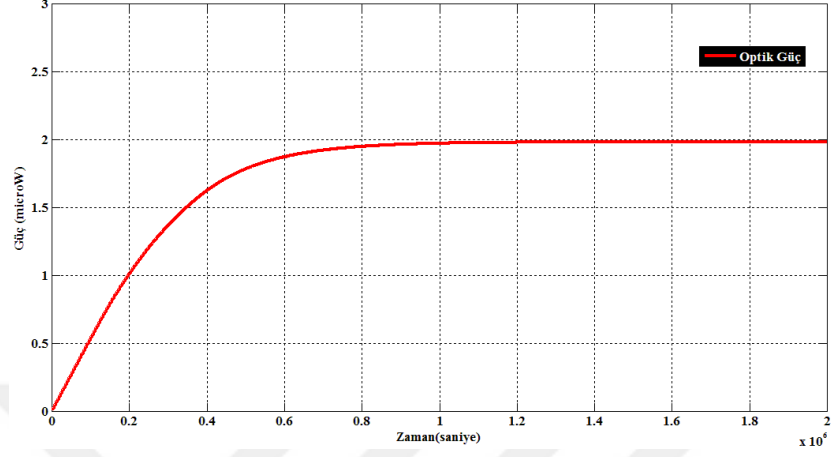
İniş çıkış noktalarındaki atlamaları elemek için analog anahtarlama devresi TIA çıkışına bağlanarak atlama noktaları 0V seviyesine çekilmiştir. TIA'dan voltaja çevrilen fotodiyot sinyaline, sabit kazanç devresinde kullanılarak sabit bir kazanç verilir. Sabit 25 kat kazanç uygulanmıştır. Sabit kazanç verilen sinyal analog integrasyon işlemine sokulmaktadır. Bu işlem için, RC integrasyon modeli s tabanında modellenmiş ve sisteme eklenmiştir. Fotodiyot sinyali üzerinde istenmeyen zıplamaları silmek için kullanılan analog anahtarlama sinyali bu integrasyon işlemi içinde kullanılmıştır. İntegrasyon işlemi sonrasında oluşan sinyal Şekil 3.25'te görülmektedir.



Şekil 3.25. İntegratör Çıkış Sinyali

Şekilde de görüldüğü üzere, integrasyon işlemi sonrasında oluşması beklenen yelken sinyali doğru bir şekilde oluşmuştur. Optik alıcı elektronik modelinde ayrıca, sabit DC sinyalinin silinmesi içinde DC sinyal silme elektronik devresinin MATLAB modeli sisteme eklenmiştir. Bunun için DC silme devresi amacı ile kullanılan PI devresi s domain de modellenmiş ve MATLAB modeline eklenmiştir. Bu model eklendikten sonra, Şekil 3.22'de görülen fotodiyot sinyali üzerindeki DC sinyal silinecek ve silinen sinyal optik güç bilgisi olarak dışarı verilecektir. Şekil 3.23'te fotodiyot sinyali üzerindeki sabit DC seviyenin silindiği görülmektedir. Ayrıca Şekil 3.26'da DC silme devresinin çıkışı olan optik güç sinyali görülmektedir. DC silme

devresi yaklaşık 1 saniyede kararlı hale gelmektedir ve silmiş olduğu optik güç bilgisini çıktı olarak vermektedir.

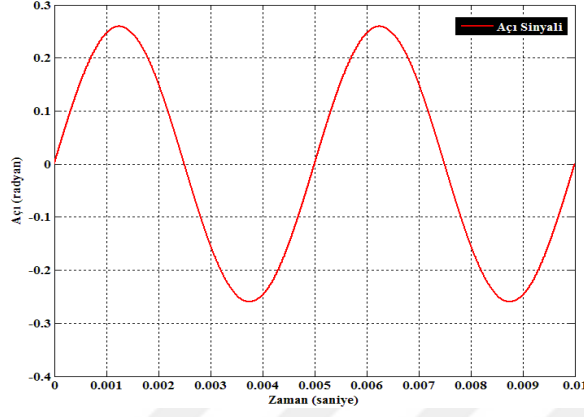


Şekil 3.26. Optik Güç

3.3.2. Geri Besleme Benzetimi

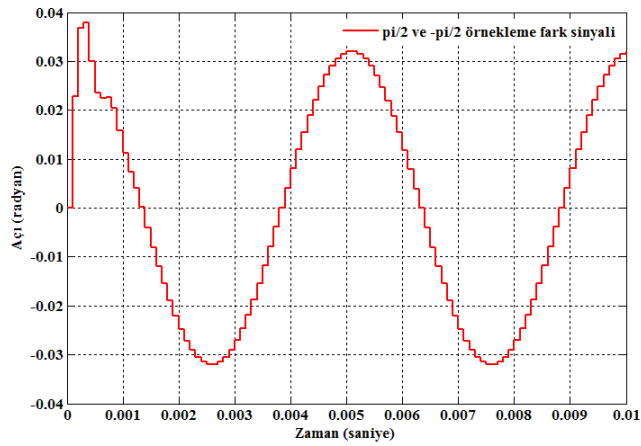
Yapılan modelleme çalışmalarında ilk etapta gürültüler göz ardı edilmiş; fotodetektör, işlemci üzerinde yapılan örnekleme ve geri besleme fazı oluşturma işlemleri modellenmeye çalışılmıştır. Örnekleme fazı; kare dalga modülasyonuna bağlı olarak $\pi/2 + \Delta\Phi_{sagnac}$ ve daha sonra $-\pi/2 - \Delta\Phi_{sagnac}$ alınmakta ve örnekler farkları alınıp işlenmektedir. Oluşan fark doğrultusunda sisteme geri besleme uygulanmaktadır. Oluşturulan sistem modeli Şekil 3.27'de gösterilmektedir.

Şekil 3.29’da dönü girdisi Sagnac faz farkı için daha önceki bölümlerde bahsedilen Eşitlik 2.31’de verilen denklem ile faz farkına çevrilir.



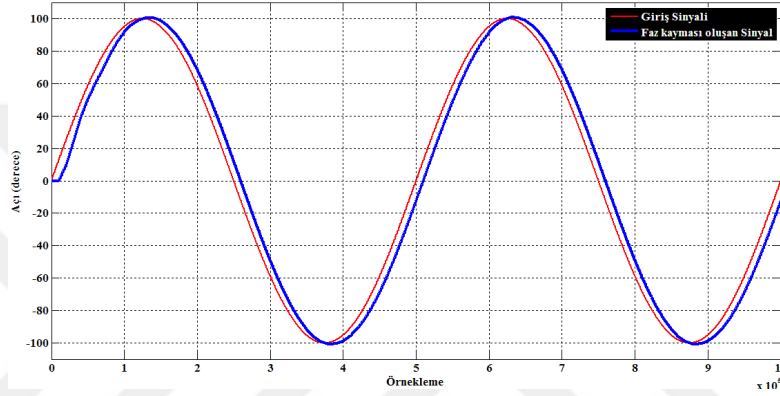
Şekil 3.29. Sagnac Faz Farkı

Kare dalga modülasyonuna bağlı olarak $\pi/2$ modülasyonu esnasında 2us’de 1 örnek alınmasını sağlamaktadır. Alınan örneklerin 50’li gruplar halinde ortalama değerleri alınmaktadır, Örnekleme grafiği Şekil 3.30’da gösterilmiştir.



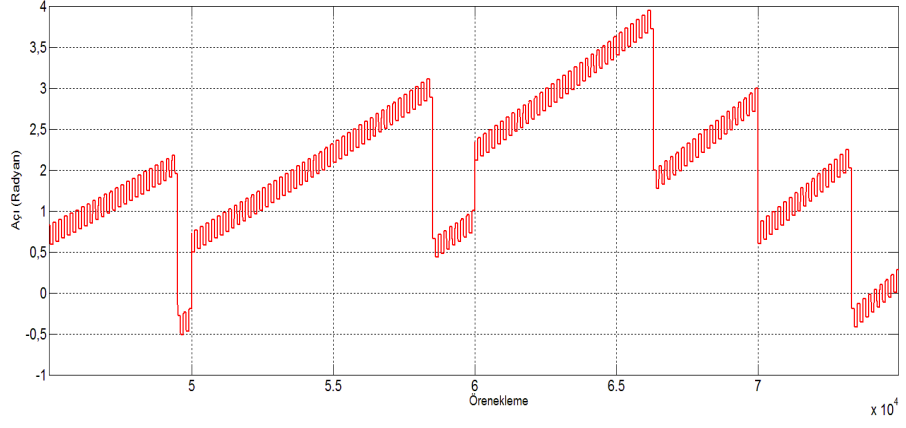
Şekil 3.30. Pi/2 ve -Pi/2 Fark Grafiği

- $\pi/2$ örnek alımı $\pi/2$ modülasyonu bloğuna göre 1us gecikmeli olarak gerçekleşmektedir. Geri Besleme fazı reset bloğu ile $\pi/2$ modülasyonu, geri besleme için basamaklı faz yapısı ve reset oluşturulmuştur. Faz modülatörünün V_{max} değerinin 4π olduğu varsayılarak oluşan fazın 4π 'yi geçtiği yerlerde resetlenmesi sağlanmıştır. Oluşturulan modelin; genliği 100 derece/s, frekansı 200 Hz olan bir Sinüs girdi dönüşü ile benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonucu elde edilen girdi-çıkı grafiği Şekil 3.31'de gösterilmiştir.

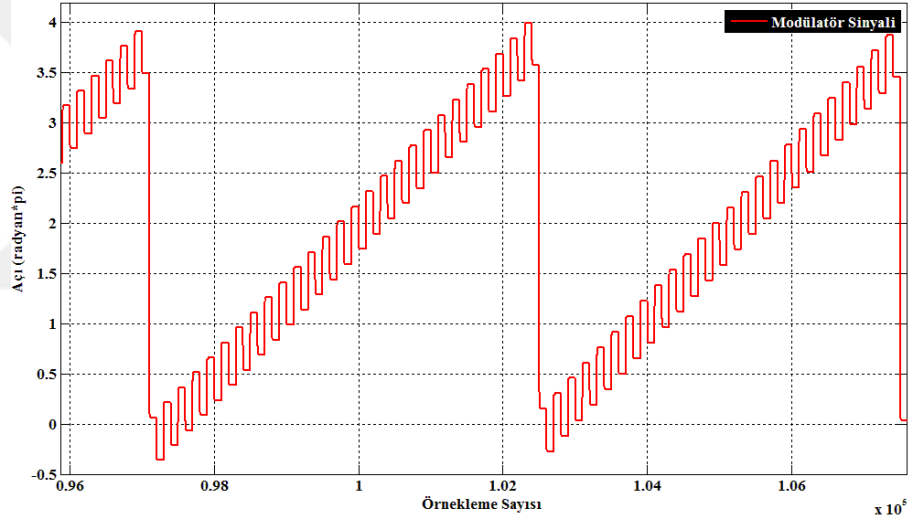


Şekil 3.31. Giriş Sinyali ve Fazı Kaydırılan Sinyal

Şekil 3.32'de Algoritma uygulanmamış sinyalin yüksek dönü seviyelerinde kararsız veri oluşturduğu görülmekte iken, oluşturulan FOJ modeli ile sistemin kapalı döngü çalışma prensibine uygun olarak faz modülatörü sinyalinin teorik hesaplamalarda ortaya çıkan Şekil 3.5'teki sinyale, yani istenilene yakın çalıştığı Şekil 3.33'de görülmüştür, [51].



Şekil 3.32. Algoritma Eklenmemiş Faz Modülatörü Sinyali



Şekil 3.33 Algoritma Eklenmiş Faz Modülatörü Sinyali

4. SONUÇLAR

Bu tezde FOJ çalışma prensibi, bileşenleri, mimarileri, elektronik yapısı incelenmiştir. Bunlara ek olarak tüm sayısal kapalı döngü FOJ benzetim yapılmıştır. FOJ'nin sinyal yapısı, sinyal demodülasyonu, geribesleme sinyali oluşturulması gibi kavramlar benzetici kullanılarak sınanmıştır. Elektronik bileşenlerin özelliklerinin nasıl olması gerektiği farklı senaryolar kullanılarak tespit edilmiştir. Bazı parametrelerin hesabı matematiksel olarak kolayca elde edilebildiği için simülasyon aracı bunu kullanıcı desteği olmaksızın yapabilmektedir. Sistem parametreleri yanlış bilinse bile kapalı döngü işletimi doğru sonucu bulabilmektedir. Bu olay benzetim sonuçları içinde yer almaktadır. FOJ tasarımıdaki önemli noktalardan biri de faz modülatörü reset kontrolüdür. Bazı FOJ tasarımcıları kontrol döngüsüne ek olarak reset kontrol döngülerini de uygulamaktadırlar. Bu tasarımda farklı blok olarak bir reset kontrolü uygulanmaktadır. Bu kontrol sayısal ortamda yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Fiber Optik Jiroskop sisteminin teorisi ve optik bileşenleri detaylı olarak anlatılmıştır. FOJ tasarımında kullanılacak bileşenlerin teknik özellikleri ve gereksinimleri teorik bilgiler ışığında tanımlanmıştır. FOJ sisteminin teorik olarak temelini oluşturan Sagnac etkisi detaylı bir şekilde incelenmiş, açık ve kapalı döngü FOJ konfigürasyonları ve farkları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Bu bilgiler ışığında, Fiber Optik Jiroskop optik bütünü kullanılarak açısal hız ölçümü yapılması için kullanılması gereken elektronik devreler detaylı olarak anlatılmıştır. Daha sonra anlatılan bu elektronik devrelerin, MATLAB ortamında modellenmesi çalışması yapılmış ve beklenen şekilde çalıştığı doğrulanmıştır. Kapalı döngü FOJ benzetim ortamı olarak Matlab Simulink tercih edilmiştir. Bu tezde şimdiye kadar yapılan çalışmalardan farklı olarak ölçüm aralığını ve ölçüm hassasiyetini artırmak için periyot atlama analizi adını verdiğimiz bir sinyal işleme tekniği kullanılmıştır. Bu işlem sayesinde, ölçüm aralığı teorik olarak limitsiz seviyeye ulaştırmak ve gerçek zamanlı sistemdeki kısıtların izin verebileceği seviyeye kadar dönüş açısı bilgisi ölçüm yapılabildiği simülasyon sonuçları ile gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] W, Macek., D, Davis., Rotation Rate Sensing with a Travelling Wave Laser. Appl. Phys. Lett. 2, 67-69, 1963.
- [2] V, Sanders., R, Kiehn., Dual Polarized Ring-Lasers. J. Quant. Electr. QE-13, 739-745, 1977.
- [3] V, Vali., W, Shorthill., Fiber Ring Interferometer. Appl. Optics. 15, 1099-1100, 1976.
- [4] R, Ulrich., M, Johnson., Fiber-Ring Polarization Analysis. Optics Lett. 4, 152-154, 1979.
- [5] Bergh, R.A., Lefevre, H.C., Shaw, H.J., All single mode Fiber optic Gyroscope. Optics Lett. 6, 198-200, 1981.
- [6] Lefevre, H.C., The Fiber Optic Gyroscope. Artech House, Boston, 1993.
- [7] E. Udd., Fiber Optic Gyros 10th Anniversary Conference. SPIE vol. 719, Proc. Fiber/LASE Conf., 1986.
- [8] Reza Nasiri, M., Soleimani, V., Mazrae-Khoshki, R., Comparative Assessment on the Performance of Open Loop and Closed Loop IFOJs. Optics and Photonics Journal. 2, 17-29, 2012.
- [9] Nouredm, A., Mintched, M., Irvine-Halliday, D., Tabler, H., Computer Modelling Of Microelectronic Closed Loop Fiber Optic Gyroscope. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Edmonton, Alberta, Canada May 9-12, 1999.

- [10] Junliang, H., Shengmin, G., Yi, S., Xiangjun, L., Modeling and Simulation of Digital Closed-loop Fiber Optic Gyroscope. 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China, June 21-23, 2006.
- [11] Ebrahim, A., Alireza, K., Modelling and Simulation of the Fiber Optic Gyroscope in Measurement-While-Drilling Processes. 9th WSEAS International Conference on signal processing, computational geometry and artificial vision, 2010.
- [12] Vinod, G., Manjusha, R., A, Bhatnagar., Modeling and simulation of closed loop fibre-optic gyroscope. International Conference on Optics and Photonics CSIO, Chandigarh, India, 30 Oct.-1 Nov., 2009.
- [13] Stephan, S., Feasibility of giant fiber optic gyroscopes. Institut für Experimentalphysik, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Germany, 2013.
- [14] Vladimir, V., Interferometric Fiber Optic Gyroscope Principle of Operation and Basic Parameters Determination. Scientific Technical Review, Vol. LVIII, No.3-4, 2008.
- [15] Feng, S., Lihui, W., Gang, W., Gang, L., Study on the Drift of Modulated Phase in Interference Fiber Optic Gyroscope. Journal of computers, vol. 5, no.3, March, 2010.
- [16] B. Seçmen, Simulation on Interferometric Fiber Optic Gyroscope with Amplified Optical Feedback. Post Graduate Thesis. Middle East Technical University, ANKARA, 2003.
- [17] Wysocki, P.F., Digonnet, M.J.F., Kim, B.Y., Spectral characteristics of high power 1.55um broad band superluminescent fiber sources. IEEE Photon. Technol. Lett, Vol. 2, 178-180, 1990.

- [18] Pavlath, A., Challenges in the Development of the IFOG. Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Austin, Texas AIAA, 2003.
- [19] Eickhoff, W., In line fiber optic polarizer. Electronics Letters, Vol. 16, pp. 762-764, 1980.
- [20] John, C., Introduction to Fiber Optics. Oxford, Newness, 2001.
- [21] Saleh, B.E.A., Teich, M.C., Fundamentals of Photonics. New Jersey, 2007.
- [22] Korkishko, Y.N., Fedorov, V.A., Feoktistova, O.Y., LiNbO₃ optical waveguide fabrication by high temperature proton exchange. IEEE J. Lightwave Technol. 18, 562-568, 2000.
- [23] Sagnac, G.C.R., L'ether lumineux demontre par l'effet du vent relatif d'ether dans un interferometre en rotation uniforme. Compte-rendus de l'Academie des Sciences, 708-710, 1913.
- [24] Liu, R.Y., Adams, J.W., Interferometric Fiber Optic Gyroscopes A Summary of Progress. Las Vegas, NV, IEEE, 1990.
- [25] Steven, J.S., Into the FOG A Course on Fiber-Optic Gyroscopes. Honeywell Technology Center, Ankara, 2000.
- [26] Lefevre, H., The Fiber Optic Gyroscope. Artech House Inc, London, 1993.
- [27] Lefevre, H., Ultimate Performance Fiber Optic Gyroscope. OECC, Taiwan, July, 2011.
- [28] Bergh, R., Lefevre H.C., Shaw J., An Overview of Fiber-Optic Gyroscopes. Journal of Lightwave Technology, vol.2, no.2, April 1984.

- [29] Burns, W.K., Optical Fiber Rotation Sensing. Academic Press, Boston, 1994.
- [30] Pollock, C.R., Fundamentals of Optoelectronics. Irwin, 1995.
- [31] Kaminow, I.P., Polarization in Optical Fibers. IEEE J. Quantum Electron, Vols. QE-17, 1984.
- [32] Ulrich, R., Fiber-optic rotation sensing with low drift. Opt. Lett., Vol. 5, 173-175, 1980.
- [33] Lefevre, H.C., Bergh, R.A., Shaw, J., All-fiber gyroscope with inertial navigation short term sensitivity. Opt. Lett. Vol. 7, 454-456, 1982.
- [34] Hotate, K., Fiber Optic Gyros. in Optical Fiber Sensors. 1 ed. vol. 4, Artech House, Inc, Boston, London, 1997.
- [35] Sansone, A., Emslie, C., Special Developments in Fiber Sensing. Fiber Optic Technology, 20, 2004.
- [36] Böhm, K., Low-Drift Fiber Gyro Using a Superluminescent Diode. Electronics Letters, Vol. 17, 352-353, 1987.
- [37] Nasiri, M., Open Loop Interferometric Fiber Optic Gyroscope Analysis and Methods to Implement. M.Sc. Thesis, Semnan University, Semnan, 2006.
- [38] Emge, S., Bennett, S.M., Dyott, R.B., Allen, D., Reduced Minimum Configuration Fiber Optic Gyro for Land Navigation Application. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol. 12, No. 4, 1997.
- [39] Armenise, M.N., Ciminelli, C., Leonardis, F., Diana, R., Passaro, V., Gyroscope Technologies for Space Applications. Nano Technologies for Space Conference Noordwijk, The Netherlands, 2002.

- [40] I, Kim., Noise Reduction in Fiber Optic Gyroscopes. PhD Thesis, A&M University, Texas, 1995.
- [41] Perlmutter, M.S., A Tactical Fiber Optic Gyro with All-Digital Signal Processing. Proceeding of Position Location and Navigation Symposium, Northrop, 170-175, 1994.
- [42] Merlo, M.N., Orgia D., Fiber Gyroscope Principles Handbook of Fibre Optic Sensing Technology. John Wiley & Sons, Ltd., Hoboken, 1-23, 2000.
- [43] Martini, G., Analysis of a single mode optical fibre piezoceramic phase modulator. J. Opt. Quantum Electron, Vol. 19, 179–190, 1987.
- [44] Aronowitz, F., Fundamentals of the ring laser gyro. Optical Gyros and Their Application, Dograph, 339, 3-1 to 3-45, 1999.
- [45] Davis, J.L., Ezekiel, S., Closed loop low noise fiber optic rotation sensor. Opt. Lett. Vol. 6, 505–507, 1987.
- [46] Lefevre, H.C., Graindorge, P., Arditty, H.J., Vatoux S., Papuchon, M., Double closed loop hybrid fiber gyroscope using digital phase ramp. Proc. of OFS. PDS, 7-1-4, 1985.
- [47] Sabina, M., Michele, N., Silvano, D., Fiber gyroscope principles. Electrooptics Group University of Pavia, Italy, 2000.
- [48] Lefevre, H.C., Vatoux, S., Papuchon M., Puech, C., Integrated optics a practical solution for the fiber optic gyroscope. Proc. SPIE, vol. 719, 101-12, 1986.
- [49] Wulf-Mathies, C., Integrated Optics for fiberoptic sensors. Laser und Optoelektronik, vol. 21, 57-63, 1989.


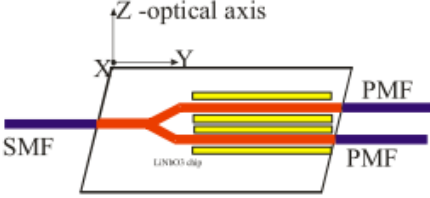
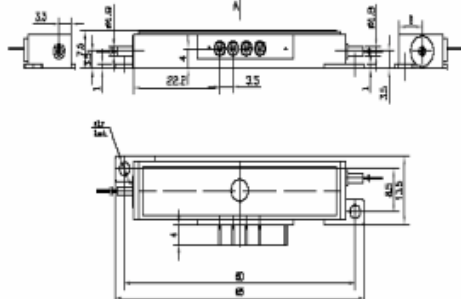
- [50] Zhu, L., Wang, J., Yang, S., All digital closed loop FOG detection system. Signal Processing, 6th International Conference, Vol. 2 , 26-30, 2002.
- [51] Üstünoğ, Y., am, E., Arıkan, Y., Modelling and simulation of high precision closed loop fiber optic gyroscope. Acceptance to 8th International Ege Energy Symposium and Exhibition, Afyon, 2016.



EKLER

EK 1. Çok Fonksiyonlu Optik Entegre (ÇFOE) Teknik Dokümanı

Lithium Niobate Multi-functional Integrated Optical Chip (MIOC) for Phase Sensitive Applications


	Key Features	<ul style="list-style-type: none"> • High polarization extinction • Low drive voltage • Low fiber-to-fiber insertion loss • 1550 nm operation
Applications: <ul style="list-style-type: none"> • fiber-optic gyroscope • fiber-optic electric current sensor • combiner • any phase sensitive application 	<p>MIOC is state-of-the art waveguide device on X-cut LiNbO₃ substrate fabricated by High-Temperature Proton Exchange method (HTPE). It includes a linear polarizer, Y-junction coupler and two pairs of electro-optic phase modulators. The light coming from the optical fiber coupler is linearly polarized within the MIOC to greater than 60 dB extinction ratio. This high degree of polarization minimizes bias uncertainty due to polarization non-reciprocity. The Y-junction coupler within the MIOC splits up the light into equal amplitude waves, each directed along a separate waveguide within the MIOC. In a fiber gyro application, either of the resulting waves traverses an electro-optical phase modulator and propagates along a PM optical fiber sensor coil which length should be about 1 km for the low random walk-off and bias to be achieved.</p>	
Device schematic		
Dimensions Diagram (specifications in mm unless otherwise noted)		

Specifications	
Parameter	Specification
General	
Material	Lithium Niobate
Crystal orientation	α -cut, y-propagating
Optical	
Maximum input optical power	40 mW
Operating wavelength	1550 nm
Total fiber-to-fiber optical power loss at depolarized light	<8 dB
Total fiber-to-fiber optical power loss at polarized light	<5 dB
Splitting Ratio	50/50 with 4% tolerance.
Polarization Extinction Ratio	better than 25 dB
Residual Intensity Modulation	better than 0.1 %
Rise and fall time	50 ns
Electrical	
Half-wave voltage	< 5 V
Mechanical	
Rugged packaging	
SM input fiber	Optolink SMF mode field diameter : 7.9 μm cladding diameter : 80 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ coating diameter : 200 $\mu\text{m} \pm 5\%$ coating layer : dual layer acrylate NA : 0.13 \pm 0.15 cut-off wavelength : 1250 nm optical loss: < 1 dB/km
PM output fiber	Fibercore (UK) BOWTIE cut-off wavelength : 1230 – 1520 nm mode field diameter : 7.9 μm cladding diameter : 80 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ coating diameter : 175 $\mu\text{m} \pm 5\%$ coating layer : dual layer acrylate NA : 0.14 – 0.18 attenuation : < 2 dB/km polarization cross talk : - 25 dB b - parameter : $1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$
Environmental	
Operating temperature	-20° to 50° C
Storage temperature	-40° to 80° C

High Power 980nm Pump Laser Module - Grating Stabilized, 600mW

LC96

Features:

- Fiber Bragg Grating wavelength stabilization
- High output power, up to 600mW kink free
- Polarization maintaining fiber pigtail
- Internal thermoelectric heatpump and monitor photodiode
- Hermetically sealed 14 pin butterfly package
- Telcordia GR-468-CORE compliant
- Field proven high reliability
- RoHS compliant 

Applications:

- Low noise erbium doped fiber amplifiers (EDFAs)
- Dense wavelength division multiplexing (DWDM) EDFAs
- CATV Applications



These lasers are designed as pump sources for erbium doped fiber amplifier (EDFA) applications. Processes and techniques of coupling the fiber to the laser allow high output powers that are very stable with both time and temperature. The grating is located in the pigtail to stabilize the wavelength.

Devices are available with kink free output powers to 600mW.

The LC96 series pump module utilizes a Fiber Bragg Grating design for enhanced wavelength and power stability performance. This product has been designed to ensure superior wavelength locking over drive current, temperature and optical feedback changes.

Characteristics

Conditions unless otherwise stated: Case temperature -20 to 75°C
 Submount temperature 25°C
 Monitor diode bias -5V
 CW operation

Kink-free fiber-coupled output power	LC96A7*-20R	400mW	LC96L7*-20R	500mW
LC96*74-20R - 974nm	LC96B7*-20R	410mW	LC96M7*-20R	510mW
LC96*76-20R - 976nm	LC96C7*-20R	420mW	LC96N7*-20R	520mW
	LC96D7*-20R	430mW	LC96P7*-20R	530mW
	LC96E7*-20R	440mW	LC96R7*-20R	540mW
	LC96F7*-20R	450mW	LC96S7*-20R	550mW
	LC96G7*-20R	460mW	LC96T7*-20R	560mW
	LC96H7*-20R	470mW	LC96U7*-20R	570mW
	LC96J7*-20R	480mW	LC96V7*-20R	580mW
	LC96K7*-20R	490mW	LC96W7*-20R	590mW
			LC96AA7*-20R	600mW

Parameter	Min	Typ	Max	Unit
Threshold current (I _{th})		40	55	mA
Operating drive current (I _r)			950	mA
Forward voltage		2.2	2.5	V
Centre wavelength (λ _c)		974 976		nm nm
Spectrum stability (t = 60 secs)			±0.2	nm
Temperature dependence of peak wavelength			0.02	nm/°C
Wavelength tolerance			±1.0	nm
Monitor detector responsivity	1.0		10	µA/mW
Monitor dark current			50	nA
Thermistor resistance (at 25°C)	9.5	10	10.5	kΩ
Thermistor BETA value		3575±1%		K
Power Stability Peak-to-peak, T = 60s, DC to 50kHz sampling, T _c = 25°C				
>30mW			0.15	dB
20 – 30mW			0.25	dB
10 – 20mW			0.50	dB
Heatpump current (ΔT = 50°C, I _r = I _r max)			1.8	A
Heatpump voltage (ΔT = 50°C, I _r = I _r max)			3.0	V