

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AÇIK-DÖNGÜ FİBER OPTİK DÖNÜÖLÇER SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ VE
GÖRECELİ YOĞUNLUK GÜRÜLTÜSÜ ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdulkadir YENTÜR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. İbrahim Tuna ÖZDÜR

AĞUSTOS 2024

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.



Abdulkadir YENTÜR

İMZA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AÇIK-DÖNGÜ FİBER OPTİK DÖNÜÖLÇER SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ VE GÖRECELİ YOĞUNLUK GÜRÜLTÜSÜ ANALİZİ

Abdulkadir YENTÜR

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İbrahim Tuna ÖZDÜR

Tarih: Ağustos 2024

Fiber optik dönüölçer sistemleri özellikle yüksek hassasiyet ve doğruluk gerektiren uygulamalarda, örneğin askeri platformlarda, havacılık ve navigasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, açık döngü bir fiber optik dönüölçer sisteminin geliştirilmesi ve bu sistemlerdeki göreceli yoğunluk gürültüsü analizine odaklanılmıştır. Navigasyon seviyedeki bir fiber optik dönüölçer sistemi deneysel ve simülasyon ortamında kurulmuş ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Kurulan fiber optik dönüölçer sisteminde yaklaşık olarak 1 km uzunluğunda fiber sarım bulunmakta ve benzetim çalışmalarının deneysel sisteme uygun olarak optimize edilmiştir. Simülasyon çalışmaları, VPI Photonics yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. VPI Photonics, optik ve fotonik sistemlerin tasarımı ve analizi için güçlü bir simülasyon platformu sunmaktadır. Bu çalışmada, fiber optik dönüölçerlerde yaygın olarak kullanılan yükseltilmiş kendiliğinden emisyonlu ışık kaynağı tasarımları oluşturulmuş ve farklı konfigürasyonlar ile elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçlar incelenmiştir. Farklı ışık kaynağı tasarımlarının göreceli yoğunluk gürültüsü

üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Bu gürültü analizlerinde, sistemde kullanılan ışık kaynağının optik spektral bant genişliğinin gürültü seviyesine etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar teorik hesaplamalarla desteklenmiştir. Daha sonra açık döngü bir fiber optik dönüölçer tasarımı yapılarak simülasyon ve deneysel sistem modelleri hazırlanmıştır. Dünya dönü hızlarının algılanması için sensör biriminin farklı açısall konumlandırılması göre 0 derece/saat ile 15 derece/saat hız aralığında ölçümler yapılmış ve elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Laboratuvar ortamında optik masa üzerinde yapılan deneysel dünya dönüsü testleri ile simülasyon modeli sonuçlarının büyük oranda uyduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra fiber optik dönüölçer performansını belirleyen bir değer olan açısall rastgele yürüyüş katsayısını iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu değeri etkileyen en önemli faktörlerden biri de sistemdeki ışık kaynağının göreceli yoğunluk gürültüsüdür. Fiber optik dönüölçer sistemlerinin performansını etkileyen göreceli yoğunluk gürültüsünü düşürmek için yarı iletken optik amplifikatörler kullanılarak yenilikçi bir ışık kaynağı tasarımı yapılmış ve sistem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Gürültü düşürme yapılmamış ışık kaynağı ve gürültü seviyesi düşürülmüş ışık kaynağının testleri laboratuvar ortamında uzun süreli veri toplayarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar analiz edilerek fiber optik dönüölçer sisteminin performansında önemli iyileştirmeler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fiber optik dönüölçer, ASE ışık kaynağı, SOA ile RIN düşürme, VPI Photonics

ABSTRACT

Master of Science

DEVELOPMENT OF AN OPEN-LOOP FIBER OPTIC GYROSCOPE SYSTEM AND RELATIVE INTENSITY NOISE ANALYSIS

Abdulkadir YENTÜR

TOBB University of Economics and Technology

Institute of Natural and Applied Sciences

Electrical and Electronics Engineering Science Programme

Supervisor: Assoc. Prof. İbrahim Tuna ÖZDÜR

Date: August 2024

Fiber optic gyroscope systems are widely used in applications requiring high precision and accuracy, such as military platforms, aviation, and navigation systems. This thesis focuses on the development of an open-loop fiber optic gyroscope system and the analysis of relative intensity noise in these systems. A navigation-grade fiber optic gyroscope system was established in an experimental and simulation environment and the obtained results were examined. The established fiber optic gyroscope system has approximately 1 km of fiber coil and the simulation studies were optimized by the experimental system. Simulation studies were performed using VPI Photonics software. VPI Photonics offers a powerful simulation platform for the design and analysis of optical and photonic systems. In this study, amplified spontaneous emission light source designs, widely used in fiber optic gyroscopes, were established, and simulation and experimental results with different configurations were examined. The effects of varying light source designs on relative intensity noise were also investigated. In these analyses, the impact of the optical spectral bandwidth of the light source on the noise level was investigated and the obtained results were supported by

theoretical calculations. Then, an open-loop fiber optic gyroscope design was built, and simulation and experimental system models were prepared. In order to detect the Earth's rotation speeds, measurements were made between 0 degrees/hour and 15 degrees/hour according to different angular positioning of the sensor unit, and the obtained results were analyzed. It was observed that the experimental Earth rotation tests performed on the optical table in the laboratory environment and the simulation model results were largely similar. Later, studies were carried out to improve the angular random walk coefficient, which is a value that determines the performance of the fiber optic gyroscope. One of the most important factors affecting this value is the relative intensity noise of the light source in the system. An innovative light source design was made using semiconductor optical amplifiers to reduce the relative intensity noise affecting the performance of fiber optic gyroscope systems and its effects on the system performance were investigated. The tests of the light source without noise reduction and the light source with reduced noise level were carried out by collecting long-term data in the laboratory environment and the obtained results were analyzed and significant improvements were made in the performance of the fiber optic gyroscope system.

Keywords: Fiber optic gyroscope, ASE light source, SOA based RIN suppression, VPI Photonics

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca katkılarıyla beni her zaman yönlendiren değerli Hocam Doç. Dr. İbrahim Tuna Özdür'e,

Destekleriyle her zaman yanımda olan kıymetli Anneme, Babama ve Kardeşlerime,

Zor günlerimde hep yanımda olan biricik Eşime,

Motivasyon kaynağım, ailemizin neşesi oğlum Ahmet Faruk'a,

Dostluğuyla hep yanımda olan Mehmet Ziya Keskin'e, Murat Karakuş'a, Furkan Atasoy'a ve tüm değerli arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Tevfik Allah'tandır.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ BİLDİRİMİ.....	iii
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ixi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
KISALTMALAR	xxi
SEMBOL LİSTESİ	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. DÖNÜÖLÇER TEKNİKLERİ.....	5
2.1 Mekanik Dönüölçer.....	5
2.2 Optik Tabanlı Dönüölçer.....	6
2.2.1 Halka Lazer Dönüölçer	6
2.2.2 Fiber Optik Dönüölçer	7
2.3 MEMS Tabanlı Dönüölçer	8
2.4 Kuantum Tabanlı Dönüölçer	9
2.5 Dönüölçer Uygulamaları	9
2.6 Dönüölçer Çeşitlerinin Karşılaştırılması	10
2.7 Teknolojik Gelişim Haritası	11
3. FIBER OPTİK DÖNÜÖLÇER.....	13
3.1 Sagnac Etkisi	14
3.2 Çalışma Prensipleri.....	14
3.3 Yarı Bütünleşik Fiber Optik Dönüölçer	17
4. FIBER OPTİK DÖNÜÖLÇER MODELLEME ÇALIŞMALARI.....	19
4.1 VPI Photonics Simülasyon Programı	19
4.1.1 Sinyal Gösterimi	20
4.1.2 Bölünmüş Adım Yöntemi	21
4.2 Işık Kaynağı Modelleme Çalışmaları.....	22
4.2.1 Normal ASE Işık Kaynağı	23
4.2.2 Faraday Mirror ile ASE Işık Kaynağı	26
4.2.3 Filtre Erbium Fiber ile ASE Işık Kaynağı	29
4.2.4 Faraday Mirror ve Filtre EDF ile ASE Işık Kaynağı	30
4.2.5 Faraday Mirror, FBG ve Filtre EDF ile ASE Işık Kaynağı	32
4.3 Fiber Optik Dönüölçer Sistemi Modelleme Çalışmaları.....	33
4.3.1 Fiber Optik Dönüölçer Simülasyon Modeli.....	34
4.3.2 Fiber Optik Dönüölçer Masaüstü DeneySEL Model.....	37
5. FIBER OPTİK DÖNÜÖLÇER RIN GÜRÜLTÜ ANALİZİ	41
5.1 RIN Ölçüm Metodu.....	41
5.2 Spektrum genişliğine bağlı RIN ölçümü	42

5.3 ASE Işıık Kaynağı SOA ile RIN Düşürme Çalışmaları	47
5.3.1 Tek SOA ile RIN Düşürme Çalışması	48
5.3.2 Çift SOA ile RIN Düşürme Çalışması	49
5.3.3 SOA ile RIN Düşürme Sonuçları	50
5.4 Fiber Optik Dönüölçer RIN Düşürme Çalışması	53
5.5 ARW Performansı Karşılaştırma Sonucu.....	54
6. SONUÇLAR VE SONRAKİ ÇALIŞMALAR.....	55
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	59



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Mekanik dönüölçer [1].....	6
Şekil 2.2 Halka lazer dönüölçer [2].....	7
Şekil 2.3 Örnek interferometrik fiber optik dönüölçer konfigürasyonu [12].....	7
Şekil 2.4 Örnek bir MEMS tabanlı dönüölçer yapısı [13]	8
Şekil 2.5 Örnek bir kuantum tabanlı dönüölçer şeması [13].....	9
Şekil 2.6 Günümüz dönüölçer teknolojisi ve uygulamaları [15]	11
Şekil 2.7 Yakın Dönem dönüölçer teknolojisi [15]	12
Şekil 2.8 Gelecek dönem dönüölçer teknolojisi [15]	12
Şekil 3.1 Fiber optik dönüölçer yapısı	13
Şekil 3.2 Dönme hızına duyarlılığı göstermek için kurulan bir Sagnac sistemi [2] ..	14
Şekil 3.3 İdeal bir kapalı optik döngü	15
Şekil 3.4 Yarı bütünleşik fiber optik dönüölçer şematığı [18].....	17
Şekil 3.5 Üç ekseninde algılama yapan yarı bütünleşik FOD sistemi şeması [19].....	18
Şekil 3.6 Yarı bütünleşik FOD sistemi [20].....	18
Şekil 4.1 VPI Photonics yazılımı örnek bir ana ekran görüntüsü	20
Şekil 4.2 Noise Bin sinyal gösterimi.....	21
Şekil 4.3 Simetrik Bölünmüş Adım yöntemi	22
Şekil 4.4 Temel ASE ışık kaynağı şematığı.....	23
Şekil 4.5 VPI Photonics ASE ışık kaynağı model şematığı.....	24
Şekil 4.6 Farklı pompa sürüş akımlarına göre simülasyon ve test sonuçları	26
Şekil 4.7 (a) Pompa sürüş akımına ve (b) erbiyum katkılı fiber uzunluğuna bağlı ASE ışık kaynağı çıkış gücü	26
Şekil 4.8 Faraday Mirror ile ASE ışık kaynağı konfigürasyonu.....	27
Şekil 4.9 Faraday Mirror konfigürasyonuna ait simülasyon şematığı	27
Şekil 4.10 Deneysel ve simülasyon optik spektrum sonuçları.....	28
Şekil 4.11 EDF uzunluğu ve ASE çıkış gücü grafiği.....	28
Şekil 4.12 1 metre filtre Erbiyum katkılı fiber kullanılarak oluşturulan konfigürasyon	29

Şekil 4.13 VPI Photonics programında 1 metre EDF kullanılarak oluşturulan model	29
Şekil 4.14 Filtre EDF optik spektrum karşılaştırma grafiği	30
Şekil 4.15 Faraday mirror ve filtre EDF ile ASE ışık kaynağı	30
Şekil 4.16 Faraday mirror ve filtre EDF ile ASE ışık kaynağı VPI Photonics simülasyon modeli.....	31
Şekil 4.17 Faraday mirror ve filtre EDF ile ASE ışık kaynağı optik spektrum karşılaştırma grafiği.....	31
Şekil 4.18 EDF uzunluğu ve ASE çıkış gücü grafiği	32
Şekil 4.19 Deneysel konfigürasyon.....	32
Şekil 4.20 VPI Photonics simülasyon modeli	33
Şekil 4.21 Optik spektrum karşılaştırma grafiği	33
Şekil 4.22 Açık-döngü FOD VPI Simülasyon modeli	34
Şekil 4.23 FOD çıkış sinyali gösterimi	36
Şekil 4.24 Açık-Döngü FOD deneysel çalışmaya ait sistem yapısı	37
Şekil 4.25 TIA modülü.....	38
Şekil 4.26 TIA modülü iç yapısı	38
Şekil 4.27 Sinyal işleme blok diyagramı.....	38
Şekil 4.28 Bir periyot boyunca iki kol arası voltaj farkının alınmasının gösterilmesi	39
Şekil 4.29 Dünya üzerinde konumlandırma	39
Şekil 4.30 Dönüölçer konumlandırma görselleri	40
Şekil 4.31 FOD sistemi deneysel ve VPI simülasyon ölçüm sonuçları karşılaştırılması	40
Şekil 5.1 RIN ölçüm düzeneği	42
Şekil 5.2 Gaussian ASE ışık kaynağı VPI Photonics şematığı	43
Şekil 5.3 Gaussian ASE ışık kaynağı VPI Photonics optik spektrum grafikleri.....	43
Şekil 5.4 VPI Photonics Gaussian ASE ışık kaynağı RIN ölçüm sonucu ve teorik hesaplama	44
Şekil 5.5 VPI Photonics Er-doped ASE ışık kaynağı.....	44
Şekil 5.6 VPI Photonics SLD ışık kaynağı	45
Şekil 5.7 VPI Photonics ASE, Faraday Mirror ve 1m Er-doped Filter ışık kaynağı .	45
Şekil 5.8 Farklı konfigürasyonların OSA karşılaştırma grafiği	45
Şekil 5.9 VPI Photonics eşit optik spektral genişlikli ASE ışık kaynakları	47
Şekil 5.10 SOA çalışma prensibi.....	48

Şekil 5.11 Tek SOA ile RIN düşürme deneysel konfigürasyonu	49
Şekil 5.12 Thorlabs BOA1004S optik spektrum ve kazanç-çıkış gücü grafikleri [26]	49
Şekil 5.13 Çift SOA ile RIN düşürme deneysel konfigürasyonu	50
Şekil 5.14 Thorlabs BOA1004P optik spektrum ve kazanç-çıkış gücü grafikleri [27]	50
Şekil 5.15 SOA ile RIN düşürme optik spektrum grafikleri.....	51
Şekil 5.16 SOA ile RIN düşürme RFSA ölçümleri	51
Şekil 5.17 SOA ile RIN düşürme RFSA ölçümleri ve gürültü tabanı	52
Şekil 5.18 Çift SOA ile RIN düşürme zaman ekseninde gürültü karşılaştırması	52
Şekil 5.19 Çift SOA ile RIN düşürme metodu ile fiber optik dönüölçer test blok şeması	53
Şekil 5.20 FOD test sonucu.....	54
Şekil 5.21 Allan deviation karşılaştırma sonucu.....	54

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Performans seviyesine göre dönüölçer uygulamaları ve teknolojileri ..	10
Çizelge 2.2: Dönüölçer çeşitlerinin karşılaştırılması	10
Çizelge 4.1 Erbiyum katkılı fiberin parametreleri	24
Çizelge 5.1 Farklı spektrum genişliğine bağlı RIN hesaplanması	46
Çizelge 5.2 Eşit optik spektrum genişliğine sahip ASE RIN karşılaştırması	47
Çizelge 5.3 RIN düşürme metotlarına ait FOD SNR performansları	53

KISALTMALAR

FOD	: Fiber Optik Dönüölçer
ANS	: Ataletsel Navigasyon Sistemleri (Inertial Navigation Systems)
IMU	: Atalet Ölçüm Sistemi (Inertial Measurement Unit)
RLG	: Halka Lazer Dönüölçer (Ring Laser Gyroscope)
ASE	: Amplified Spontaneous Emission
SLD	: Super Luminescent Diode
MIOC	: Multifunctional Integrated Optical Chip
CW	: Clock-wise
CCW	: Counter clock-wise
WDM	: Wavelength division multiplexer
ARW	: Açısal Rastgele Yürüyüş (Angle Random Walk)
PM	: Polarization Maintaining
EDF	: Erbiyum Doped Fiber
NB	: Noise Bin
PS	: Parameterized signal
MEMS	: Micro Electro Mechanical Systems
VOA	: Ayarlanabilir optik güç düşürücü
SNR	: Signal to Noise Ratio
TIA	: Transimpedance amplifier
RBW	: Resolution Bandwidth
RFSA	: RF Sinyal Analizör

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
λ	Işık Dalga Boyu
f	Işık Frekansı
λ_0	Işık Vakum Dalgaboyu
Δt	Zaman farkı
c	Işık Hızı
n	Kırılma İndisi
$\Delta\Phi$	Faz farkı
ΔL	Optik yol farkı
Ω	Açısal dönme hızı
N	Sarım tur sayısı
A	Alan
R	Fiber sarım yarı çapı
D	Fiber sarım çapı
$\mathcal{R}$	Foto detektör duyarlılık değeri

1. GİRİŞ

Dönüölçerler (gyroscopes), ataletsel navigasyon sistemlerinde (ANS), uçak, denizaltı ve füzeler için, atalet ölçüm sistemlerinde (IMU) temel kontrol elemanı olarak insansız kara, hava ve su altı araçları için ise yönlendirme ve hareket durum kontrolü için kullanılır. Ayrıca hassas anten yönlendirme ve izleme, madencilik ve tünel açma işlemleri gibi daha birçok alanda da kullanılır [1, 2]. 1970'lerde, düşük kayıplı fiber optik kabloların yapılmasıyla, fiber optik kabloların sarımı ile Sagnac etkisini kullanarak dönmenin algılanabilmesi fikri oluştu. Bu yöntemle, 1970'lerin ortasına gelindiğinde, çok sarımlı bir fiber optik kablonun içerisinde zıt yönlerde ilerleyen ışığın girişimi ile dönmenin algılanabileceği sistemler geliştirildi.

1913'te Georges Sagnac [3, 4] deneysel olarak, hareketli parçası olmayan bir optik sistemle eylemsizlik uzayına göre dönmenin tespitinin mümkün olduğunu gösterdi. Bir halka interferometresi kullandı ve dönmenin, iki karşı yayılma yolu arasında bir faz farkına neden olduğunu gösterdi. Ancak orijinal kurulum, çok sınırlı hassasiyeti nedeniyle pratik bir dönüş hızı sensöründen uzaktı. 1925'te Michelson ve Gale [5], duyarlılığı artırmak için çevresi neredeyse 2 km olan devasa bir halka girişimölçerle Dünya'nın dönüşünü ölçebildiler, ancak Sagnac etkisi onlarca yıldır nadiren gözlemlenen bir fizik merakı olarak kaldı, çünkü henüz bilinmiyordu.

Dönen mekanik dönüölçerin yerine hareketli parçaları olmayan bir optik dönüölçer alma olasılığı ilgi çekiciydi ve 1962'de Rosenthal, karşıt yayılan dalgaların kapalı rezonans boyunca birçok kez yeniden dolaştığı bir halka lazer döngüsü [6] ile hassasiyeti arttırmayı önerdi. Orijinal Sagnac interferometrede bir kez tur atma yerine yol birden fazla kez döngüye girmektedir. Bu, ilk kez 1963 yılında Macek ve Davis [7] tarafından gösterilmiştir. Seksenli yılların başında pazara giren, halka lazer dönüölçer (RLG) teknolojisi ataletsel rehberlik ve navigasyon için kullanılan bir dönüölçer teknolojisidir [8, 9].

Daha sonra, telekomünikasyon uygulamaları için 1970'lerde kullanılmaya başlayan, düşük kayıplı optik fiberler ve katı hal yarı iletken ışık kaynakları ve dedektörlerinin geliştirilmesine yönelik büyük teknolojik ilerlemeler nedeniyle, çok turlu fiber optik sarımın kullanılması mümkün hale geldi. 1967'nin başlarında Pircher ve Hepner [10] tarafından önerilen ve 1976'da Vali ve Shorthill tarafından deneysel olarak gösterilen [11], fiber optik dönüölçer (FOD), katı hal konfigürasyonu nedeniyle benzersiz avantajlar sağladığından beri büyük ilgi görmüştür.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar 6 bölümde ele alınmış ve elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Giriş bölümünde dönüölçerlerin kısa tarihi açıklandıktan sonra, ikinci bölümde dönüölçer teknikleri hakkında bilgi verilmiştir. Farklı dönüölçer teknikleri ve temel çalışma prensiplerinden bu bölümde bahsedilmiş ve dönüölçer uygulamaları konusunda bilgi verilmiştir. Daha sonra bu dönüölçer çeşitlerinin farklı parametrelere göre karşılaştırması yapıp, teknolojik gelişim haritasına değinilmiştir. Ayrıca gelecekte beklenen performans ve teknolojik perspektifler incelenmiştir.

Üçüncü bölümde ise fiber optik dönüölçerlerin temelleri ve çalışma prensibi hakkında bilgi verilmiştir. Sagnac etkisi adı verilen açısal hız hesaplama yönteminin nasıl gerçekleştiği bu bölümde teorik hesaplamalar ile açıklanmıştır. Ayrıca bu bölümde gelecekte daha fazla yaygınlaşacağı ön görülen yarı bütünleşik fiber optik dönüölçer teknolojisine de yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde ise fiber optik dönüölçer modelleme çalışmaları yer almaktadır. İlk olarak simülasyon çalışmalarının yapıldığı VPI Photonics yazılımı hakkında bilgi verilerek, FOD sistemlerinde yaygın olarak kullanılan ışık kaynakları hakkında yapılan çalışmalar ele alınmıştır. Farklı ışık kaynağı konfigürasyonları ile hem simülasyon hem de deneysel çalışmalar yapılmıştır. Daha sonra açık döngü bir fiber optik dönüölçer tasarımı yapılarak simülasyon ve deneysel sistem modelleri hazırlanmıştır. Dünya dönü hızlarının algılanması için sensör birimim farklı açısal konumlandırılması göre 0-15 derece/saat hız aralığında ölçümler yapılmış ve elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir.

Beşinci bölümde ise FOD sistemlerinin performansını limitleyen RIN gürültüsü üzerinde yapılan çalışmalar açıklanmıştır. RIN gürültüsünün nasıl ölçüldüğü hakkında

bilgi verilerek, optik spektrum genişliğinin RIN gürültüsüne etkisi incelenmiştir. VPI Photonics kullanılarak RIN gürültüsü üzerinde analizler yapılmış ve düşük gürültülü bir ışık kaynağı tasarımının yapılması hedeflenmiştir. Daha sonra RIN düşürme çalışmalarından bahsedilerek, tek ve çift konfigürasyonlu SOA (Semiconductor Optical Amplifier) ile oluşturulan ışık kaynaklarının testleri açıklanmıştır. Son olarak bu bölümde, RIN düşürme çalışması yapılan ışık kaynağının FOD sistemine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın son bölümünde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.





2. DÖNÜÖLÇER TEKNİKLERİ

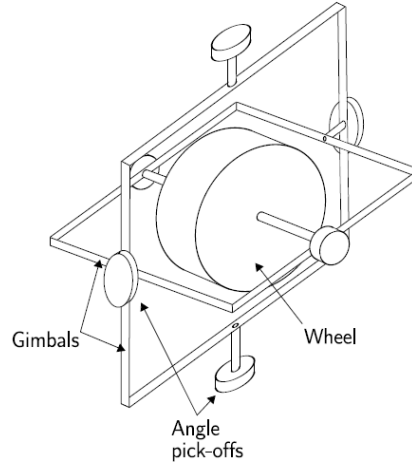
Bir dönüölçer veya jiroskop (gyroscope), platformların veya herhangi bir cihazın açısal hızını ya da dönme miktarını ölçmek için kullanılan sistemlerdir. Temel çalışma prensipleri bakımından dönüölçerler dört kategoriye ayrılabilir. Bunlar;

- 1- Mekanik dönüölçer
- 2- Optik tabanlı dönüölçer
- 3- MEMS tabanlı dönüölçer
- 4- Kuantum tabanlı dönüölçer

2.1 Mekanik Dönüölçer

Mekanik dönüölçerler, esas olarak kendi eksenini etrafında dönen bir çarktan oluşur. Açısal momentumun korunumunun etkisiyle, herhangi bir eksen üzerinde meydana gelen yön değişikliklerine karşı bir kuvvet göstererek konumunu korur. Mekanik bir dönüölçer bir dönüş maruz kaldığında, tekerlek sabit bir konumda kalacak ve bitişik yalpalar (gimbals) arasındaki açılar değişecektir. Meydana gelen dönme miktarı, açılardaki değişim okunarak ölçülmüş olur. Örnek bir mekanik dönüölçer şeması Şekil 2.1’de verilmiştir.

Mekanik dönüölçerlerin bazı dezavantajları bulunmaktadır. En önemli sorunu yapısında bulunan hareketli parçalar ve meydana gelen sürtünmedir. Sürtünme sebebiyle hesaplanan açıda kaymalar meydana gelebilir. Ayrıca mekanik dönüölçerler, kullanılması için bir miktar ısınma süresine ihtiyaç duyarlar [1].



Şekil 2.1 Mekanik dönüölçer [1]

2.2 Optik Tabanlı Dönüölçer

1913 yılında, George Sagnac bir optik sistem ile dönmenin ışıık kullanılarak ölçülebileceğini bulmuştur. Optik bir sistemi esas alan dönüölçerler, ışıığın girişimini kullanarak açısal hızın ölçülmesini temel alır. Bu optik sistemlerde, karşılıklı iki ışının birbiriyle etkileşimi sonucu oluşan girişimin algılanması ile dönme miktarı ölçülür. Temeli Sagnac etkisi prensibine dayanır. Dönme yönüne ters ilerleyen ışın çıkışa daha erken ulaşır ve ışıığın dalga özelliği sebebiyle ışık yoğunluğunda değişim meydana gelir.

İki çeşit optik tabanlı dönüölçer vardır:

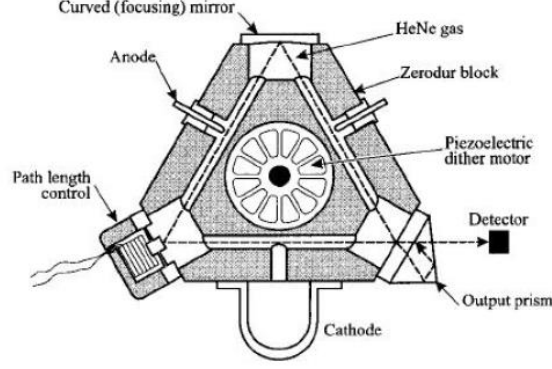
1- Halka lazer dönüölçer (Ring laser gyroscope)

2- Fiber optik dönüölçer (Fiber optic gyroscope)

2.2.1 Halka Lazer Dönüölçer

1960'ta ilk lazer ışık kaynağının yapılmasından kısa bir süre sonra 1963 yılında ilk halka lazer dönüölçer (RLG) Macek ve Davis tarafından kurulmuştur. Şekil 2.2'de örnek bir halka lazer dönüölçer konfigürasyonu gösterilmektedir. Bir lazer ışını ikiye bölünerek, optik bir yol etrafında zıt yönlerde ilerler. Lazerden gelen ışın, bazı özel gazlardan geçer ve aynalardan yansıtılır. Lazer ışık demetleri detektörde yeniden birleştiğinde, açısal dönüşü belirlemek için girişim deseni ölçülür [2].

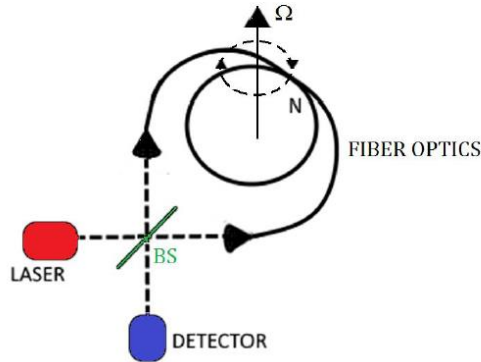
Çok yüksek hassasiyete sahip halka lazer dönüölçerler yapılabilir fakat bazı dezavantajları bulunmaktadır. Zamanla cam boşluktaki HeNe gazı kaçabilir ve yeniden doldurulması için bakım yapılması gerekir. Ayrıca, çalışma ömürleri fiber optik dönüölçerlere kıyasla daha azdır [12].



Şekil 2.2 Halka lazer dönüölçer [2]

2.2.2 Fiber Optik Dönüölçer

1970’lerde, düşük kayıplı fiber optik kabloların yapılmasıyla, halka lazer dönüölçerler yerine fiber optik kabloların sarımı ile, Sagnac etkisini kullanarak dönmenin algılanabilmesi fikri oluştu. Bu yöntemle, 1970’lerin ortasına gelindiğinde, çok sarımlı bir fiber optik kablonun içerisinde zıt yönlerde ilerleyen ışığın girişimi ile dönmenin algılanabileceği sistemler geliştirildi. Literatürde bu sistemlere Interferometrik Fiber Optik Dönüölçer (IFOD) denir. Örnek bir IFOD konfigürasyonu Şekil 2.3’te verilmiştir.



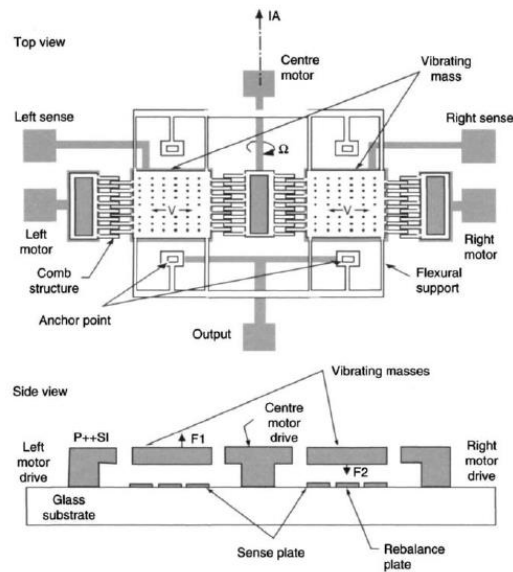
Şekil 2.3 Örnek interferometrik fiber optik dönüölçer konfigürasyonu [13]

Fiber optik dönüölçerlerin diğler dönüölçerlere nispeten bazı avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlar şu şekilde belirtilebilir [2, 14];

- Hareketli parça bulunmuyor
- Daha yüksek hassasiyet ve kararlılık
- Ayarlanabilir hassasiyet (Fiber uzunluğu ve sarım çapı ile)
- Kitleme problemi yok
- Daha düşük güç tüketimi
- Hafif ve daha küçük boyut
- Yüksek ‘‘G’’ direnci (Bir mühimmat içinde fırlatılabilir)
- RLG'lere kıyasla daha düşük maliyet ve kolay üretim

2.3 MEMS Tabanlı Dönüölçer

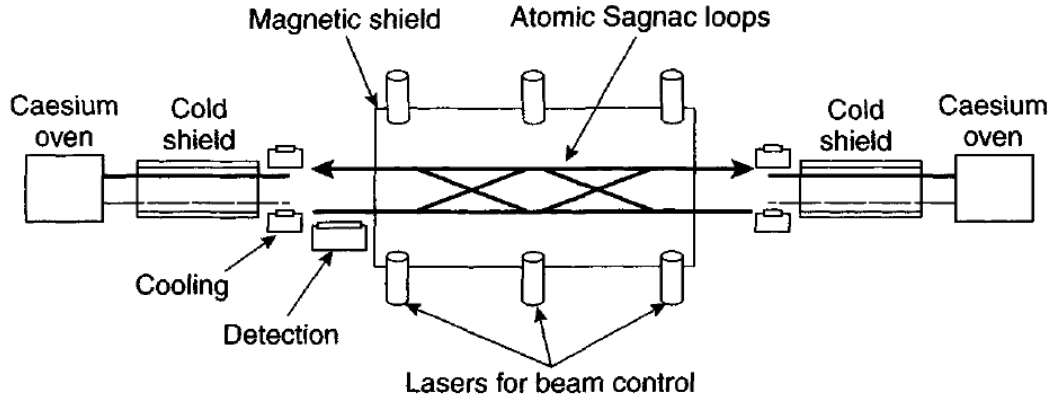
MEMS (Mikro Elektro Mekanik Sistem) tabanlı dönüölçerler, açısı dönmei tespit etmek için Coriolis ivmesi efekti adı verilen bir prensibi kullanır. Dönmeden kaynaklanan hareket sebebiyle açığa çıkan Coriolis kuvveti sensörlerde bulunan bir kütleye titreşime sebep olur ve bu kuvvetin tespiti ile dönme algılanır. Örnek bir MEMS dönüölçer şeması Şekil 2.4'te verilmiştir [15]. MEMS tabanlı dönüölçerlerin hareketli parçaları yoktur ve boyutları oldukça küçüktür, bu sebeple üretimleri kolaydır. Fakat hassasiyetleri diğler dönüölçer çeşitlerine kıyasla oldukça düşüktür.



Şekil 2.4 Örnek bir MEMS tabanlı dönüölçer yapısı [15]

2.4 Kuantum Tabanlı Dönüölçer

Kuantum tabanlı dönüölçerler, soğuk atom interferometresi yöntemini kullanarak açısal hızı ölçmek için kullanılan, çok yüksek hassasiyette ölçüm yapabilen aletlerdir. Henüz başlangıç aşamasında olan bu teknoloji, potansiyel olarak uzun vadede umut verici sonuçlar ortaya koyması beklenmektedir [16]. Şekil 2.5'te, soğuk atom teknolojisi kullanılan bir kuantum tabanlı dönüölçer uygulaması gösterilmektedir. Yapıları oldukça karmaşık olan bu uygulamada, Sezyum atomları soğutularak lazer kaynaklar yardımıyla kontrol edilir. Daha sonra atomik Sagnac döngüsünde girişime uğrayan atomların faz farkı hesaplanarak dönme algılanır [15].



Şekil 2.5 Örnek bir kuantum tabanlı dönüölçer şeması [15]

2.5 Dönüölçer Uygulamaları

Dönüölçerler özellikle savunma sanayi alanında oldukça kritik bir öneme sahiptir. Aşağıda verilen Çizelge 2.1'de bazı uygulama alanları ve kullanılan dönüölçer tekniği gerekli performans düzeyine göre verilmiştir. Dönüölçerler balistik füzelerde ve havacılıkta yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca, deniz altı navigasyonu uygulamalarında platformların konumunun bilinmesi açısından hayati bir öneme sahiptir [13].

Çizelge 2.1: Performans seviyesine göre dönüölçer uygulamaları ve teknolojileri

Performans Seviyesi	Bias Stabilite (°/h)	Uygulama	Teknoloji
Tüketici	30 - 1000	Hareket algılama	MEMS
Endüstri - Düşük Seviye Taktik	1 - 30	Mühimmat ve roket yönlendirme	MEMS
Taktik	0.1 - 30	Platform stabilizasyonu	FOG/RLG
Yüksek Seviye Taktik	0.1 - 1	Füze navigasyonu	FOG/RLG
Navigasyon	0.01 – 0.1	Havacılık navigasyonu	FOG/RLG
Stratejik	0.0001 – 0.01	Denizaltı navigasyonu	FOG/RLG

2.6 Dönüölçer Çeşitlerinin Karşılaştırılması

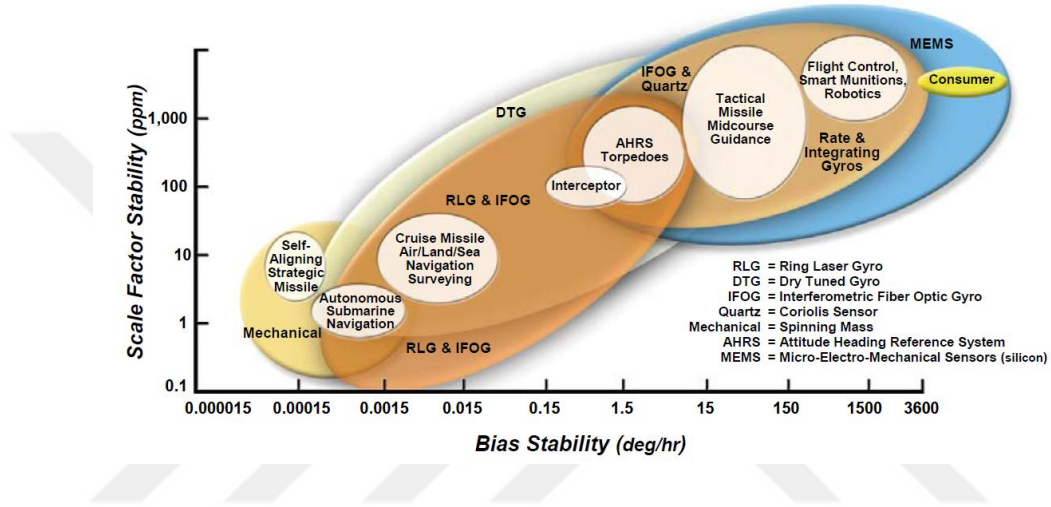
Dönüölçerler, hassasiyet, titreşim direnci ve fiyat gibi birçok açıdan karşılaştırılabilir ve ihtiyaca göre gerekli dönüölçer tipi belirlenebilir. Çizelge 2.2’de bahsedilen dönüölçer çeşitlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Genel olarak bir değerlendirme yapılacak olursa fiber optik dönüölçerlerin fiyat performans açısından diğer dönüölçerlere kıyasla öne çıktığı görülmektedir.

Çizelge 2.2: Dönüölçer çeşitlerinin karşılaştırılması

Özellik	Mekanik	Optik Tabanlı		MEMS	Kuantum Tabanlı
		Fiber	Halka Lazer		
Hassasiyet	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük	Çok yüksek
Kararlılık	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük	Çok yüksek
Titreşim direnci	Normal	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek
Boyut	Küçük-Normal	Küçük-Normal	Normal	Küçük	Büyük
Güç tüketimi	Yüksek	Normal	Yüksek	Düşük	Çok yüksek
Fiyat	Yüksek	Normal	Yüksek	Düşük	Çok yüksek

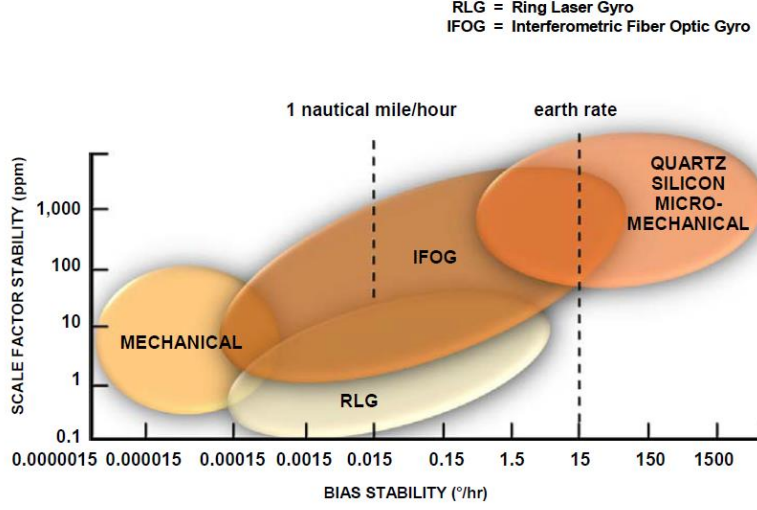
2.7 Teknolojik Gelişim Haritası

Dönüölçer teknolojilerinin günümüz, yakın dönem ve uzak dönem teknolojik gelişim haritası ifade edilecek olursa, dönüölçerler performans ihtiyacına göre farklı uygulama alanlarına göre gösterilebilir. Şekil 2.6 günümüz dönüölçer teknolojilerinin kapsamlı bir uygulama ve performans kapasitelerinin görünümünü göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi günümüzde uygulamanın performans ihtiyacına göre farklı dönüölçer teknolojileri kullanılabilir.



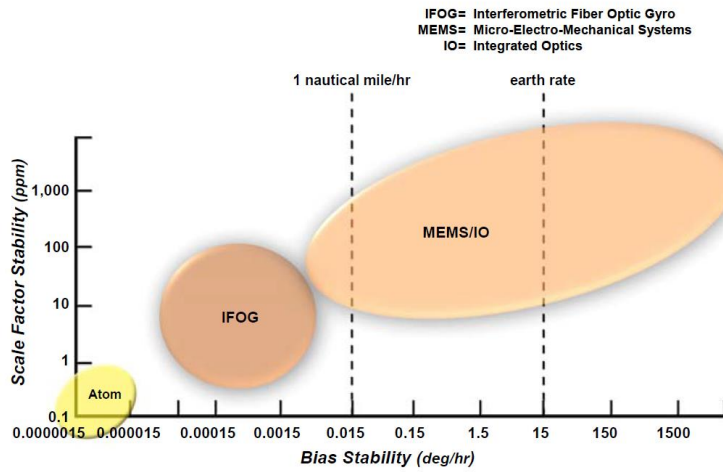
Şekil 2.6 Günümüz dönüölçer teknolojisi ve uygulamaları [17]

Şekil 2.7 ise, yakın dönem dönüölçer teknolojisinin performansa göre görünümünü ifade etmektedir. Bu grafiğe göre özellikle fiber optik dönüölçerler (IFOD) birçok uygulamada yer alabilecek kapasiteye sahiptir. Halka lazer dönüölçerlerin (RLG) fiyatlarının oldukça yüksek olması sebebiyle yerini daha düşük maliyetli IFOD teknolojisine zamanla bırakacaktır. Özellikle birçok stratejik öneme sahip uygulamalarda bu teknoloji yüksek performansları sebebiyle öne çıkacaktır.



Şekil 2.7 Yakın Dönem dönüölçer teknolojisi [17]

Şekil 2.8 ise, gelecek dönemde dönüölçer teknolojisinin yeni uygulamalarda nasıl yer alacağını göstermektedir [17]. Bu çalışma, MEMS ve bütünleşik optik (IO) sistem teknolojisinin düşük ve orta performans gerektiren uygulamalara hâkim olacağını göstermektedir. Yüksek performans gerektiren uygulamalarda ise IFOD ve atom (kuantum tabanlı) dönüölçerler öne çıkacaktır. Yarı bütünleşik fiber optik dönüölçer teknolojisi bu noktada kritik bir öneme sahiptir. Bu teknoloji ile, özellikle savunma sanayi uygulamalarında, düşük maliyetli, yüksek güvenilirliğe sahip, küçük boyutlu ve hafif dönüölçerler birçok platformda kullanılabilecektir.

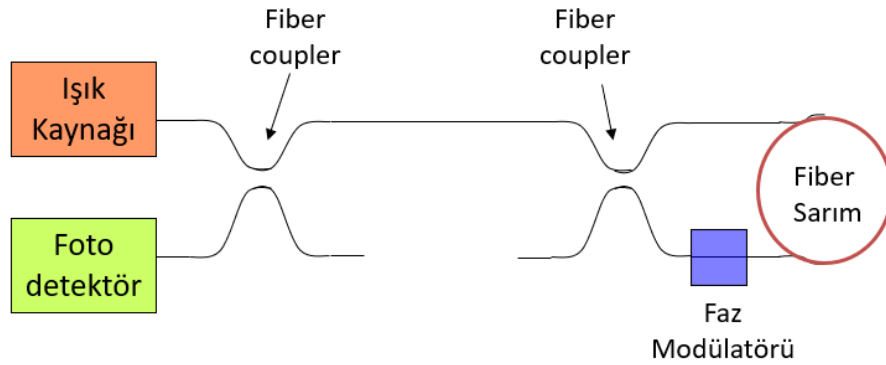


Şekil 2.8 Gelecek dönem dönüölçer teknolojisi [17]

3. FIBER OPTİK DÖNÜÖLÇER

Fiber Optik Dönüölçer (FOD) fikri ilk olarak 1967 yılında Pircher ve Hepner tarafından önerilmiştir. Fakat ilk deneysel çalışma, 1976 yılında Vali ve Shorthill tarafından 950m fiber optik kablo kullanılarak yapılmıştır. FOD sistemleri ataletsel navigasyon sistemlerinde (INS), platform stabilizasyonunda, uçaklar, denizaltılar ve füzeler için atalet ölçüm sistemlerinde (IMU) ve Boeing 777 için rehberlik sistemi olarak kullanılır [2, 18].

Örnek bir FOD şematığı Şekil 3.1’de verilmiştir [19, 20]. Burada kullanılan lazer ışık kaynağı önce bir optik kuplör (Coupler 1) ve polarizör (polarizer) üzerinden geçer. Daha sonra ikinci bir optik kuplör (Coupler 2) aracılığıyla iki kola ayrılan sinyal, fiber optik döngüye girer. Ayrıca, genel olarak sistemlerde hassasiyeti artırmak için fiber döngüye giren sinyale faz modülasyonu uygulanır. Bu aşamada piezo-elektrik veya elektro-optik faz modülatörleri kullanılabilir. Daha sonra, fiber döngüden ayrılan sinyaller foto detektöre aynı yolu izleyerek döner ve burada faz kayması olup olmadığı ölçülür. Eğer cihazda veya sistemde faz kayması bulunuyorsa foto detektörde algılanan sinyalde değişim meydana gelir ve dönme tespit edilmiş olur.



Şekil 3.1 Fiber optik dönüölçer yapısı

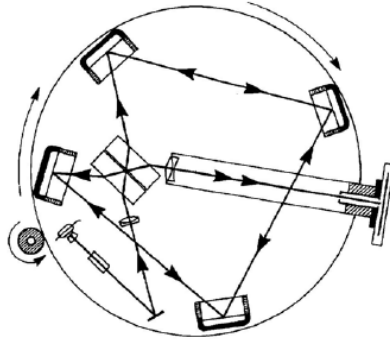
3.1 Sagnac Etkisi

Neredeyse tüm optik dönüölçerlerin altında yatan çalışma prensibi Sagnac etkisidir. 1913 yılında George Marc Sagnac tarafından keşfedilmiştir [13]. Genel görelilik kuramının bir türevi olan Sagnac ilkesi, halka yapıya sahip bir platformda aynı yolu zıt yönde takip eden iki optik ışının, eğer platform dönüyorsa görelî fazlarının değiştiğini belirtir. Bu faz değişimini platformun açısal hızıyla ilişkilendirmek mümkündür. Bu yöntem kullanılarak, 1925 yılında Michelson ve Gale tarafından çevresi yaklaşık olarak 2km uzunluğunda bir sistem kurularak faz farkı gözlemlenmiş ve dünyanın dönüşü algılanmıştır [5].

Sagnac'a ait orijinal sistem kurulumu Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Kapalı döngüde karşılıklı olarak ilerleyen optik ışınlar dönmeden kaynaklanan hareket sebebiyle girişime uğrar ve faz kaymasına sebep olur. Kapalı bir döngüdeki dönmeden kaynaklanan faz farkı aşağıda verilen formül ile hesaplanır.

$$\Delta\Phi = \frac{4\omega A}{c^2} \Omega \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte, A optik yolun oluşturduğu alanı, ω açısal frekansı, c ışık hızını ve Ω gerçekleşen açısal dönme hızını ifade etmektedir [21].



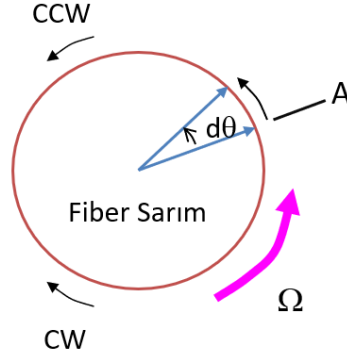
Şekil 3.2 Dönme hızına duyarlılığı göstermek için kurulan bir Sagnac sistemi [2]

3.2 Çalışma Prensibi

Fiber optik dönüölçerler, kapalı bir döngü içerisindeki birbirine zıt yönlerde ilerleyen iki ışın arasındaki yol farkını esas alır. Örneğin, Şekil 3.3'te verilen dairesel yapıya

sahip, R yarıçaplı sabit duran bir optik döngüyü ele alalım. Burada, A noktasından bir ışın ayırıcı (beam splitter) vasıtasıyla döngüye giren eş iki lazer ışını birbirine zıt yönlerde döngüyü tamamlar ve tekrar A noktasına ulaşır. Işık hızında (c) ilerleyen optik ışının döngüyü tamamlaması için geçen süre (t) aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$t = \frac{2\pi R}{c} \quad (3.2)$$



Şekil 3.3 İdeal bir kapalı optik döngü

Fakat, sabit durumdaki bu döngü, saat yönünün tersinde Ω açısal hızıyla dönecek olursa, birbirine zıt ilerleyen ışınların çıkışa ulaşmaları için geçen süre aynı olmayacaktır. Bunun sebebi, ışığın daire çevresini tamamlaması için geçen süre boyunca ışın ayırıcının da hareketidir. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, ışın ayırıcı A konumundan belirtilen yere doğru hareket etmiş olacaktır, bu bir bakıma da göreceli bir prensiptir. Saat yönünde ilerleyen ışın ilk duruma göre daha kısa bir yol, ters yönde ilerleyen ışın da daha uzun bir yol almış olacaktır. Bu iki ışının çıkışa ulaşması için geçen süreler aşağıdaki eşikliklerde sırasıyla verilmiştir.

$$\text{Saatin yönünde (CW),} \quad t_1 = \frac{2\pi R - \Delta L_-}{c} \quad (3.3)$$

$$\text{Saatin tersi yönde (CCW),} \quad t_2 = \frac{2\pi R + \Delta L_+}{c} \quad (3.4)$$

Bu eşitliklerden yola çıkılarak meydana gelen zaman farkı (Δt) hesaplanacak olursa, aşağıdaki gibi bir eşitlik söz konusu olur.

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 2\pi R \left[\frac{1}{c - \Omega R} - \frac{1}{c + \Omega R} \right] \quad (3.5)$$

Sonra, birinci dereceden yaklaşım alınacak olursa eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta t = \frac{4\pi R^2 \Omega}{c^2} \quad (3.6)$$

Sinyaller arasında oluşan faz farkını veya girişimi belirlemek için meydana gelen optik yol farkı hesaplanmalıdır. Optik yol uzunluğu farkı $\Delta L = c\Delta t$ olacak şekilde yazılabildiği için, optik döngüde oluşan yol farkı aşağıdaki gibi olur.

$$\Delta L = \frac{4\pi R^2 \Omega}{c} \quad (3.7)$$

Optik döngünün bulunduğu alan $A = \pi R^2$ olacak biçimde yukarıdaki eşitlikte yerine yazılırsa, optik yol farkı eşitliği şu şekilde yazılabilir:

$$\Delta L = \frac{4A\Omega}{c} \quad (3.8)$$

Ω açısal hızıyla dönen, tek tur sarım sayısına sahip bir fiber optik dönüölçerde, zıt yönde ilerleyen ışınlar arasındaki faz farkı ($\Delta\Phi$), optik yol farkı (ΔL) kullanılarak şu şekilde yazılır:

$$\Delta\Phi = 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda} \quad (3.9)$$

Bu eşitlikte, λ ışığın dalga boyunu ifade etmektedir. Bu denklemde, ΔL yerine Eşitlik 3.8 yazılırsa faz farkı aşağıdaki gibi yazılır.

$$\Delta\Phi = \frac{8\pi A\Omega}{c\lambda} \quad (3.10)$$

Eğer sistemde hassasiyeti artırmak için N tur sarım sayısına sahip bir fiber optik kablo döngüsü kullanılacak olursa, eşitlik aşağıdaki gibi olur.

$$\Delta\Phi = \frac{8\pi AN\Omega}{c\lambda} \quad (3.11)$$

Bu eşitlik, $L = 2\pi RN$ olacak şekilde tekrar yazılırsa oluşan faz farkı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta\Phi = \frac{8\pi RL\Omega}{c\lambda} \quad (3.12)$$

Faz farkı sebebiyle girişime uğrayan sinyalin sistemde oluşturduğu yoğunluk ölçümü aşağıda verilen eşitlikle hesaplanabilir.

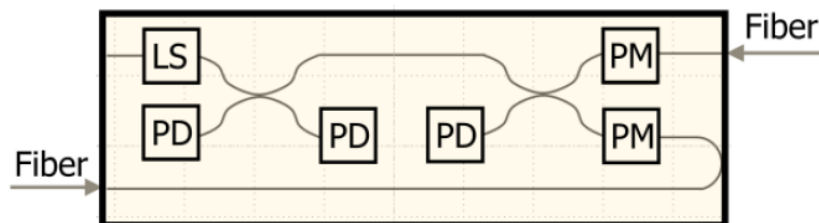
$$I = I_1[1 + \cos\Delta\Phi] \quad (3.13)$$

3.3 Yarı Bütünleşik Fiber Optik Dönüölçer

Yarı bütünlüştik fiber optik dönüölçerler, bir sistemde kullanılan parçaların sayısının azaltılmasını, bu sayede daha küçük boyutlara ve ağırlığa sahip olabildiğini, daha düşük güç tüketimini ve sistemin maliyetinin düşürülmesini hedeflemektedir. Temel çalışma prensibi standart dönüölçerlere çok benzemektedir. Fakat standart bir dönüölçerden farklı olarak, bir veya birkaç parçanın Photonic Integrated Circuit (PIC) yani Fotonik Bütünlüştik Devre yöntemiyle daha küçük ve kompakt bir yapıda üretilmesini esas alır. Bu yöntem, FOD'ların boyutunda, ağırlığında, güç tüketiminde ve maliyetinde (SWaP-C) önemli bir azalma sağlar.

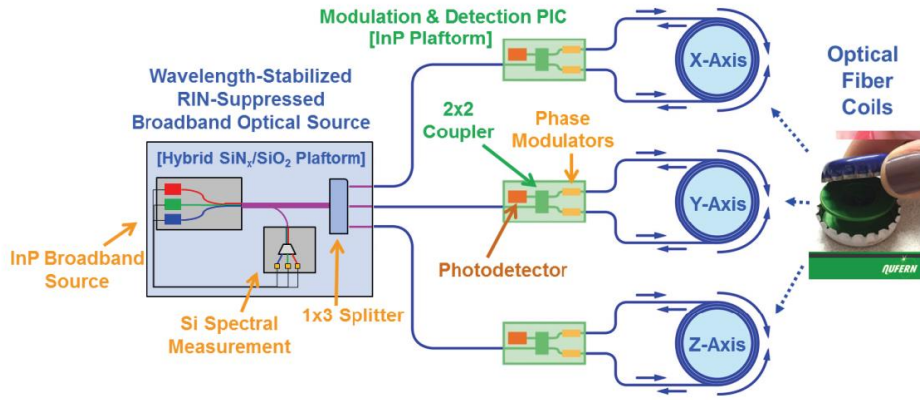
Bir interferometrik fiber optik dönüölçer (IFOD), üç temel bileşenden oluşur: bir fiber optik algılama döngüsü veya bobini, bir dizi aktif optik bileşen ve elektronik kontrol birimi [9]. Fakat, üretim maliyetleri ve güç tüketimi, IFOD'ların robotik ve otomotiv gibi birçok büyüyen alanda kullanılmasını engelledi. Son yıllarda yapılan çalışmalarla, IFOD'ların boyut olarak çok daha kompakt hale getirilmesinde önemli gelişmeler oldu.

Şekil 3.4’te şematiği verilen çalışmada, bir lazer ışık kaynağı (LS), üç adet foto diyot (PD) ve iki adet faz modülatörünün (PM) bir çip üzerine entegre edilerek yarı bütünleşik bir fiber optik dönüölçer üretilmiştir [22]. Bu çalışmada, tasarımı ve üretimi yapılan bütünleşik optik çip oldukça başarılı sonuçlar vermiş ve yeni nesil fiber optik dönüölçer teknolojisine ilham kaynağı olmuştur.



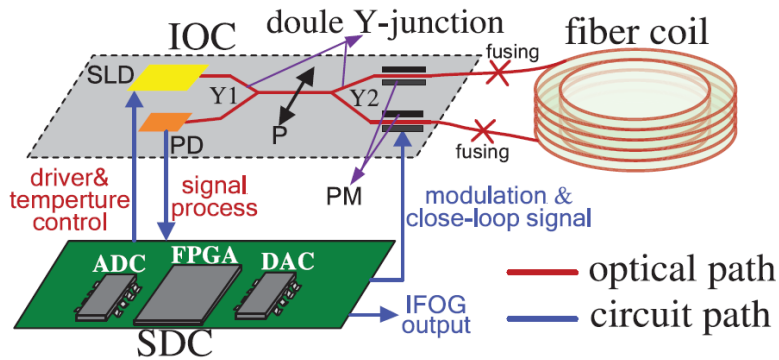
Şekil 3.4 Yarı bütünleşik fiber optik dönüölçer şematiği [22]

Şekil 3.5'te şeması verilen bir diğer çalışmada, iki ayrı fotonik bütünleşik devre bulunmaktadır. İlk devrede optik kaynağın kararlılığını korumak için gereken spektral ölçüm ve geri besleme sistemi kurulmuştur. Bu devrede, bir silikon nitrür fotonik devre platformu kullanılmıştır. İkinci devre ise, IFOD'u kontrol etmek ve optik sinyali ölçmek için kullanılan bütünleşmiş faz modülatörlerini ve foto detektörleri içerir. Bu kısımda yer alan fotonik çip, bir InP platformuna kurulmuştur [23]. Düşük güç gerektiren bu sistem, üç eksende dönme algılaması yapabilmektedir.



Şekil 3.5 Üç eksenli algılama yapan yarı bütünleşik FOD sistemi şeması [23]

Başka bir çalışmada ise IFOD uygulaması için bir ışık kaynağı, bir foto diyot, bir polarizör, bir çift Y-bağlantısı ve bir faz modülatörünü birleştiren bir bütünleşik optik çip (IOC) sistemi önerilmiştir [24]. Önerilen sistemin şematığı Şekil 3.6'da verilmiştir. Bu çalışma, taktiksel seviyede çalışabilen bir dönüölçer uygulamasının tasarım, üretim ve test sonuçlarını içermektedir. Kurulan sistem sonuçlarına göre bu dönüölçer, 1000 dakikanın üzerinde 0,12 derece/saat sapma kararsızlığı ile çalışabilmektedir.



Şekil 3.6 Yarı bütünleşik FOD sistemi [24]

4. FIBER OPTİK DÖNÜÖLÇER MODELLEME ÇALIŞMALARI

Bu bölümde açık döngü bir fiber optik dönüölçer sisteminin, ilk olarak ışık kaynağı modelleme çalışmalarından hem deneysel hem de VPI Photonics programı kullanılarak yapılan simülasyon çalışmalarından, daha sonra da masaüstü açık döngü bir FOD sistemi ile yapılan deneysel ve simülasyon çalışmalarından bahsedilmiştir. FOD sistemi testlerinde dünya dönüşünün etkisi ile farklı dönü hızlarında ölçümler yapılmış olup, sonuçlar VPI simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

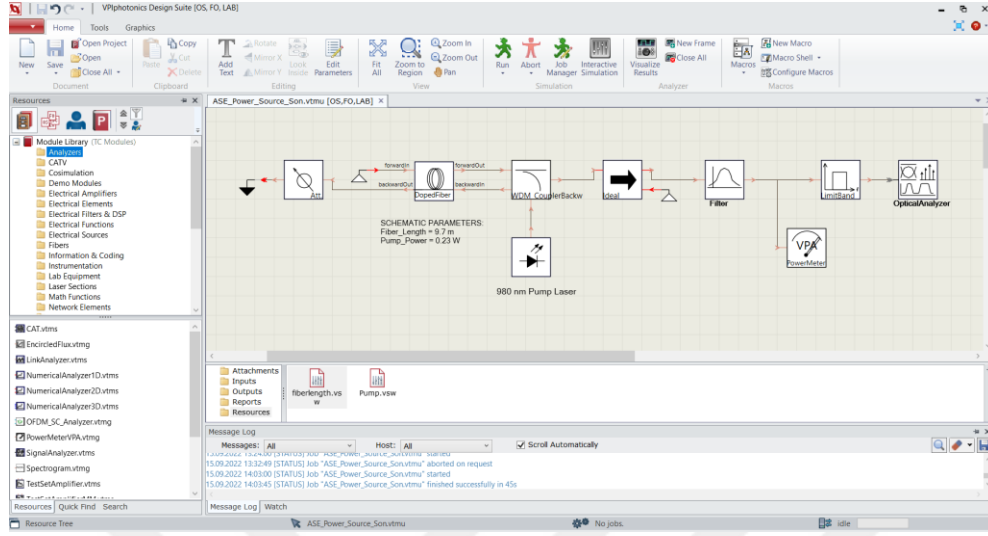
Fiber optik dönüölçer sistemlerinde yaygın olarak kullanılan normal ASE ışık kaynağı konfigürasyonuna ek olarak yeni ışık kaynağı çalışmaları ve modellemeleri yapılmıştır. Yeni ışık kaynağı araştırmalarında Faraday Mirror, Filtre erbiyum katkılı fiber ve FBG (fiber bragg grating) filtre kullanılarak konfigürasyonlar kurulmuş ve testleri yapılmıştır.

4.1 VPI Photonics Simülasyon Programı

VPI Photonics, optik bileşenlerin, sistemlerin ve ağların analizine, değerlendirilmesine ve tasarımına olanak sağlayan birinci sınıf yazılımlar ve simülasyon ortamları sunar. VPI Photonics, fiber optik tabanlı optik bileşenlerin, Er/Yb/Tm katkılı yükselteçlerin ve ışık kaynaklarının, sürekli dalga ve darbeli fiber optik kaynakların, telekomünikasyon için optik sinyal işleme, yüksek güç ve ultra hızlı uygulamalar için simülasyon olanağı sağlar. Sabit ve dinamik Er/Yb/Tm/kodlanmış fiber ve dalga kılavuzu modelleri, tek veya çoklu dalga boylarında çekirdek veya kaplama pompalamalı konfigürasyonlarda sinyal amplifikasyonunu, gürültü oluşumunu ve daha yüksek mertebeden sınırlama etkilerini simüle eder. Ayrıca katkısız fiber modeli, kromatik dağılım ve PMD, Kerr doğrusal olmama, Raman, Brillouin ve Rayleigh saçılması nedeniyle doğrusal ve doğrusal olmayan optik etkileri simüle etme kapasitesine sahiptir [25].

VPI Photonics programının örnek bir tasarım ekran görüntüsü Şekil 4.1’de verilmiştir. Yazılımın içerisinde yer alan örnek demolar sayesinde birçok optik ve fiber optik tabanlı sistemlerin örnek simülasyonları bulunabilir. Komponentlerin bulunduğu

kütüphane sayesinde simülasyonlar için gerekli elektriksel ve optik tabanlı birçok modül ve ekipman kolayca bulunabilir.



Şekil 4.1 VPI Photonics yazılımı örnek bir ana ekran görüntüsü

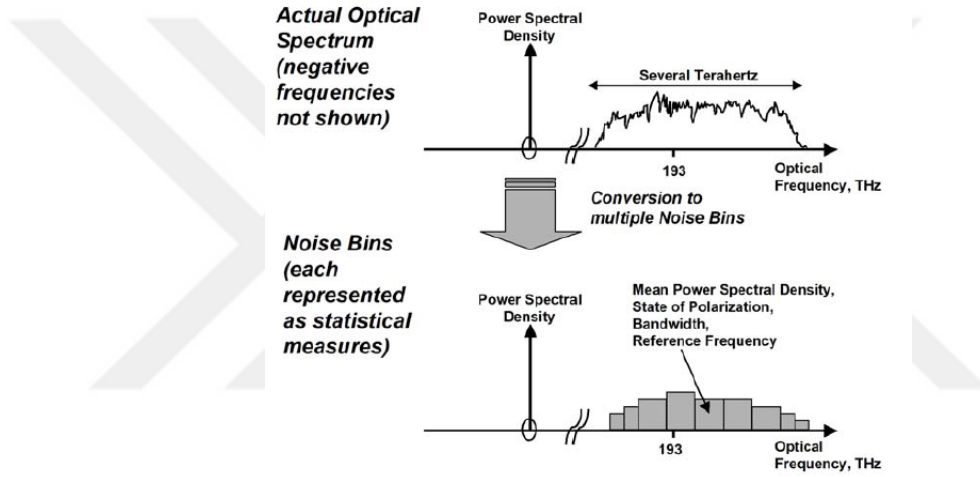
Simülasyon programında her bir komponentin gerekli özellikleri ve parametreleri ayarlanabilmektedir. Ayrıca, birçok modül için laboratuvar ortamında alınmış verilerin girişi sağlanabilmektedir, bu sayede verileri elimizde bulunan komponentlerin gerçeğe en yakın şekilde simülasyonu yapılabilir.

Simülasyon özelliklerinin düzenlenebilmesi sayesinde oluşturulan simülasyonların çözme yöntemleri ve çözünürlükleri ayarlanabilmektedir. Çözme yöntemi olarak genellikle Bölünmüş Adım metodu kullanılmaktadır. Ayrıca, simülasyonlarda sweep, tuning ve transient gibi birçok analiz ve optimizasyon yöntemleri yapılabilir.

4.1.1 Sinyal Gösterimi

Simülasyon programında, zaman ve frekans alanındaki hesaplamalar arasındaki dualitenin güçlü bir şekilde kullanılması ve her durumda en verimli modelin uygulanması için farklı sinyal gösterimleri yapılabilir. Örneğin, yükseltilmiş bir sistemde, modüle edilmiş taşıyıcıların bant genişliği, sistem boyunca yayılan ASE (yükseltilmiş kendiliğinden emisyon) gürültüsünün bant genişliğinden çok daha dar olabilir. Ancak, foto algılamadan sonra elektriksel gürültüye yol açacağından, tüm gürültü bant genişliğini simüle etmek önemlidir. ASE gürültüsü 5 THz'den fazlasını kapsar ve bunu bir SFB (Single Frequency Band) sinyali olarak tanımlarsak, ns başına veya gerçek zamanlı olarak 5.000 örnek veren 5 THz'lik bir örnekleme hızı gerekli

olacaktır. Sistemin sinyal bant genişliği 5 THz'den az olsaydı bu verimsiz olurdu. Bu sebeple, spektrumdaki gürültü ve optik veri sinyallerini ayırarak ve gürültüyü parametrelili sinyal gösteriminin özel bir formuyla tanımlamak için Noise Bins (NB) tanımıyla daha karmaşık bir yaklaşım verilir. Noise Bins, gürültü spektral yoğunluğunun bir veri bloğu üzerinde sabit olduğunu varsayar (TimeWindow global parametresi tarafından ayarlanır). Böylece gürültü, ortalama spektral yoğunlukla (iki polarizasyonda) temsil edilebilir. NB, Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, kaba fakat verimli bir spektral çözünürlük sağlamak için bant genişliğine uyum sağlar. Beyaz gürültü sınırında, tek bir gürültü kutusu tüm gürültü spektrumunu temsil edebilir. Bu sayede örnekleme sayısını düşürülerek daha hızlı çözümlemeler ve analizler yapılabilir.



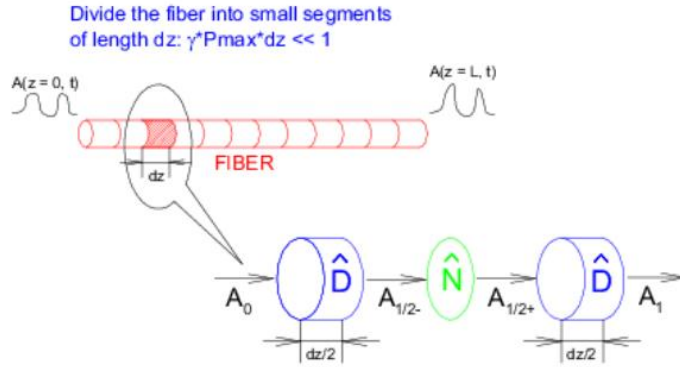
Şekil 4.2 Noise Bin sinyal gösterimi

4.1.2 Bölünmüş Adım Yöntemi

VPI Photonics, optik sistem simülasyonlarında fiberin bölümlere veya parçalara ayrıldığı Bölünmüş-Adım Yöntemi'ne (Split-Step Method) dayanmaktadır [26]. Her bölümde, dağılım (dispersion) ve doğrusal olmama (nonlinearity) etkileri ayrı ayrı ele alınır. Dağılım, frekans alanında frekansa bağlı bir faz kayması ve zaman alanındaki doğrusal olmama, anlık güce bağlı bir faz kayması olarak ele alınır. Adım uzunluğu, adım başına maksimum faz kayması verecek şekilde uyarlanabilir. Bölünmüş Adım yöntemi, periyodik olmayan veya periyodik sınır koşulları (aperiodic or periodic boundary conditions) için sağlanır.

Doğrusal olmayan Schrödinger denklemleri, doğrusal ve doğrusal olmayan etkilerin farklı alanlarda ele alınmasına izin veren bölünmüş adımlı Fourier yöntemi

kullanılarak çözülür. Bu yöntemde iki tür bölünmüş adım algoritması kullanılır: asimetrik ve simetrik algoritma. İlk aşamada doğrusal olmayanlık (nonlinearity) tek başına etki eder (yani, $D = 0$). İkinci aşamada ise, dağılım tek başına etki eder ($N = 0$). Daha sonraki durumda, dz segmentinin ortasında doğrusal olmama durumu açılır (bkz. Şekil 4.3). Simetrik yöntem daha yüksek doğruluk sağlar, bu nedenle simülasyonlarda kullanması önerilir.



Şekil 4.3 Simetrik Bölünmüş Adım yöntemi

4.2 Işık Kaynağı Modelleme Çalışmaları

ASE ve SLD ışık kaynakları fiber optik dönüölçerlerde en yaygın kullanılan ışık kaynaklarıdır [9]. SLD ışık kaynakları geniş bantta yayılım yaptığı ve oldukça simetrik spektruma sahip olmaları sebebiyle FOD uygulamaları için oldukça uygundur. FOD'larda kullanılan ışık kaynaklarının dalga boyu kararlı olmalıdır. Fakat, SLD'lerdeki temel problem onların zayıf spektrum kararlılığıdır. SLD'lerde, uygun sıcaklık kontrolü ve sürücü ile yaklaşık olarak 100 ppm ortalama dalga boyu kararlılığı elde edilebilir [27]. Fakat yüksek performanslı dönüölçerler için yüksek dalga boyu kararlılığı gerektirir. SLD'lerde oluşan bu dalga boyu kararlılığı probleminin üstesinden gelmek için alternatif bir geniş bant ışık kaynağı olarak nadir toprak katkılı fiber kaynaklar kullanılabilir. ASE ışık kaynağı olarak isimlendirilen bu kaynaklar, yüksek güçte ve geniş bantta yayılım sağlayabilirler [21].

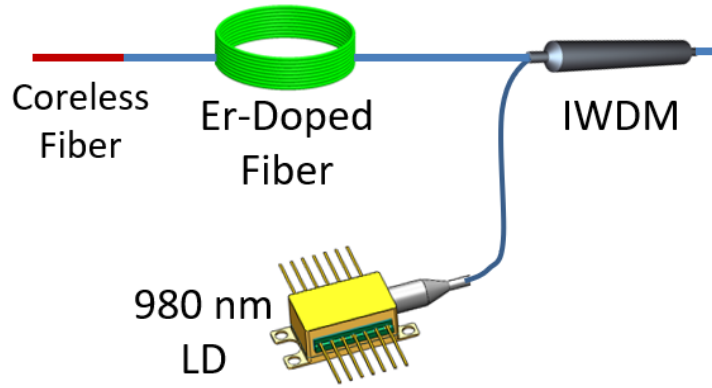
ASE ışık kaynaklarının enerji seviyeleri yarıiletkenlerinkinden daha kararlıdır ve dalga boyu kararlılığı gelişmiştir. Yüksek güçlü lazerlerle pompalanabilirler. Özellikle iki katkı malzemesi etkin olarak kullanılır: 800 nm ile pompalanan ve 1060 nm civarında yayılım yapan Neodymium (Yb) ve 980 nm ya da 1480 nm ile pompalanan ve 1550

nm de yayılım yapan Erbiyum (Er). Fiyat performans açısından Erbiyum katkılı ışık kaynakları daha fazla tercih edilmektedir [28].

4.2.1 Normal ASE Işık Kaynağı

FOD uygulamalarında en çok tercih edilen ışık kaynağı olan Erbiyum katkılı ASE ışık kaynakları, geniş bantta ışıma yapabilme özelliği sayesinde FOD uygulamalarında kullanımı oldukça uygundur [29, 30]. 980 nm veya 1480 nm’de çalışan bir pompa lazerin erbiyum katkılı fiber optik kabloya pompalanması ve yükseltilmiş kendiliğinden emisyon (ASE) sonucu 1550 nm civarında ışıma meydana gelir [31]. Yüksek güçlere ulaşabilmesi ve mükemmel dalga boyu kararlılığına sahip olabilmesi mümkün olan bu ışık kaynakları SLD ile karşılaştırıldığında yüksek performanslı FOD’lar için oldukça avantajlıdır. Fakat, tutarlılık uzunluğu (coherence length) bakımından SLD’lere kıyasla dezavantajı da bulunmaktadır.

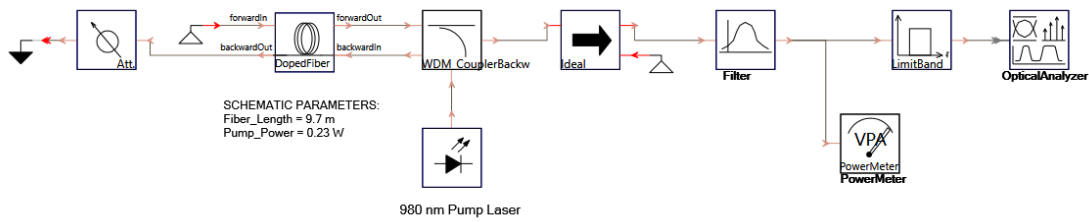
Şekil 4.4’te temel bir ASE ışık kaynağının şematik modeli verilmiştir. Burada, bir IWDM aracılığı ile lazer diyottan çıkan sinyaller erbiyum katkılı fibere pompalanır. Daha sonra, geri yönde kendiliğinden emisyon sonucu açığa çıkan ışık IWDM üzerinden çıkışa verilir. Ayrıca, terminasyon amacı için erbiyum katkılı fiberin diğer ucuna Coreless Fiber (çekirdeksiz fiber) eklenir.



Şekil 4.4 Temel ASE ışık kaynağı şematiği

VPI Photonics simülasyon modeli için oluşturulan ASE ışık kaynağı model şematiği Şekil 4.5’te verilmiştir. Benzer bir yöntem kullanılan modelde 980 nm’de bir pompa lazer WDM ile geriye pompalanır ve açığa çıkan ASE sinyali bir izolatör ve filtre üzerinden geçerek çıkışa verilir. Burada terminasyon amacı için erbiyum katkılı fiberin

diğer ucunda bir *Attenuator* bloğu kullanılır. Ayrıca, ek kayıpları (splice loss) için kullanılan izolatörün kaybı bir miktar yükseltilmiştir. Sağ tarafta yer alan optik güç ölçer ve optik analizör aracılığıyla çıktı sinyali incelenebilir. Ayrıca, bu modelde dikkat edilmesi gereken modelin çözüm adım uzunluğu (sayısal parametreler) ve erbiyum fiberin kazanç profili gibi birçok parametre bulunmaktadır. Modelde kullanılan bu parametreler raporun son kısmında bulunan ek bölümünde belirtilmiştir.



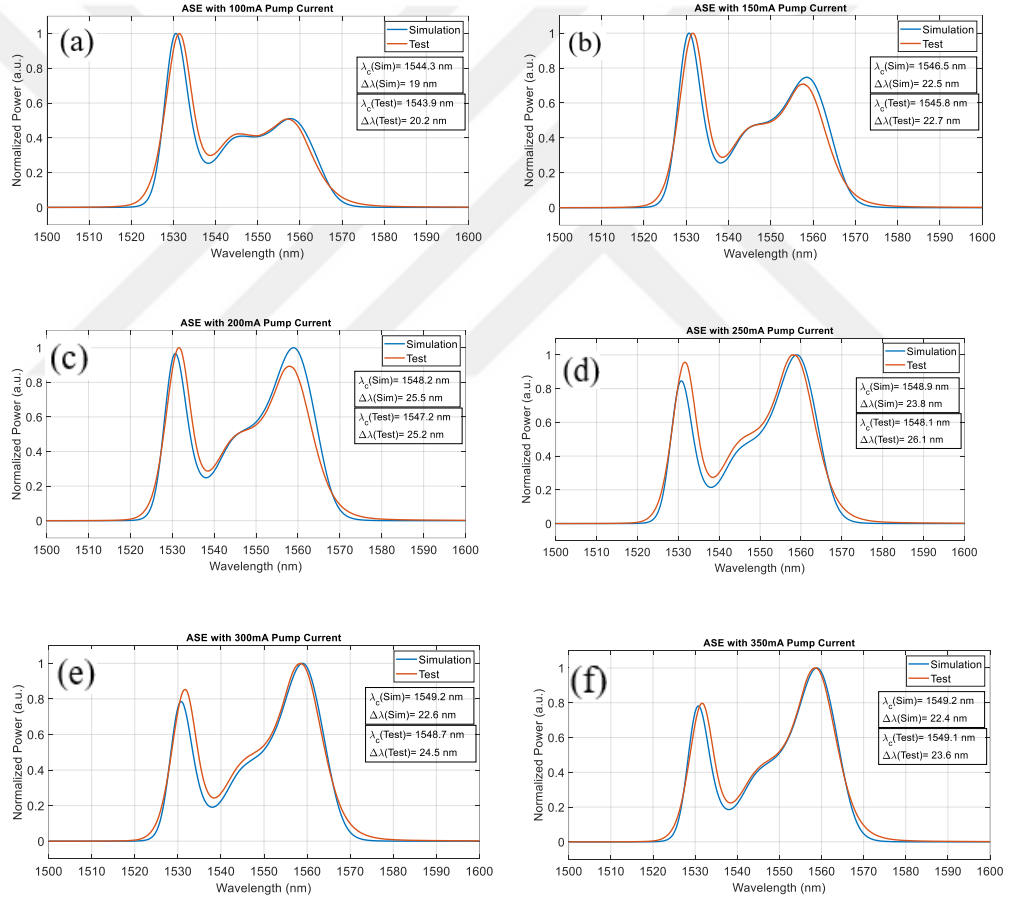
Şekil 4.5 VPI Photonics ASE ışık kaynağı model şematığı

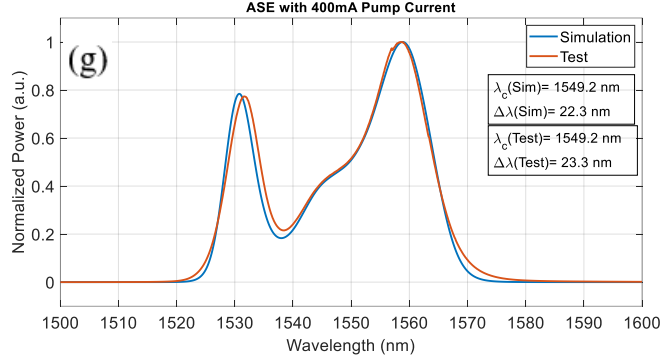
Simülasyon modelinin gerçeğe en yakın olması için her bir parçanın özellikleri araştırılmış ve deneysel çalışmada kullanılan birimlerin parametreleri bloklara uygun biçimde girilmiştir. Modelin en önemli parçalarından olan erbiyum katkılı fiberin bilgileri firmalar ile iletişime geçilerek temin edilmiştir. Örneğin, IXblue firmasına ait IXF-EDF-FGL-L2 kodlu erbiyum katkılı fiberin özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir [32].

Çizelge 4.1 Erbiyum katkılı fiberin parametreleri

Özellik	Birim	Değer
Peak absorption at 1530 nm	[dB/m]	30
MFD at 1550 nm	[10 ⁻⁶ m]	5,9
Core NA	-	0,25
Erbium concentration	[ions/m ³]	1,28E+25
Core diameter	[10 ⁻⁶ m]	6,3
Overlap Factor	-	0.92 0.91 0.9

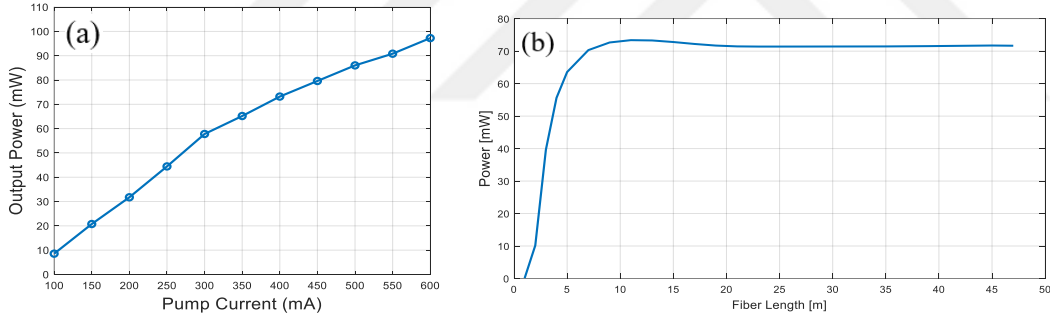
Yapılan optimizasyonlar ve test ölçümleri karşılaştırmalarından sonra erbiyum katkılı fiberin uzunluğu 9,7 m, pompa lazerin gücü 0,23 W olarak belirlenmiştir. Bu değerler sonucu, çıkışta yaklaşık olarak 68 mW gücünde bir optik sinyal elde edilmektedir. Farklı pompa lazeri sürüş akımlarına bağlı simülasyon ve laboratuvarda yapılan test sonuçlarına ait spektrum karşılaştırma grafikleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 4.6, a-g). Elde edilen karşılaştırma grafikleri incelenecek olursa optik spektrumların neredeyse mükemmel bir şekilde uyuştukları açıkça görülmektedir. Merkez dalga boyları ve bant genişlikleri de iyi bir şekilde uyuşmaktadır. Örneğin 400 mA pompa sürüş akımına sahip olan grafik incelendiğinde (FOD sisteminde kullanılan sürüş akımı) neredeyse ideal bir şekilde benzer sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 4.6-g).





Şekil 4.6 Farklı pompa sürüş akımlarına göre simülasyon ve test sonuçları

Ayrıca artan sürüş akımına bağlı çıkış gücü ve fiber uzunluğuna bağlı çıkış gücü Şekil 4.7-a ve Şekil 4.7-b’de sırasıyla verilmiştir. Erbiyum katkılı fibere verilen pompa gücü arttıkça çıkış gücü sürekli artarken, fiber uzunluğunun artmasına bağlı çıkış gücü bir miktar arttıktan sonra stabil hale gelmektedir. Bu sabitlenmenin sebebi, fiberin çıkışa uzak kısımlarında uyarılan atomların enerjilerinin çıkışa ulaşacak kadar yeterli olmamasıdır.

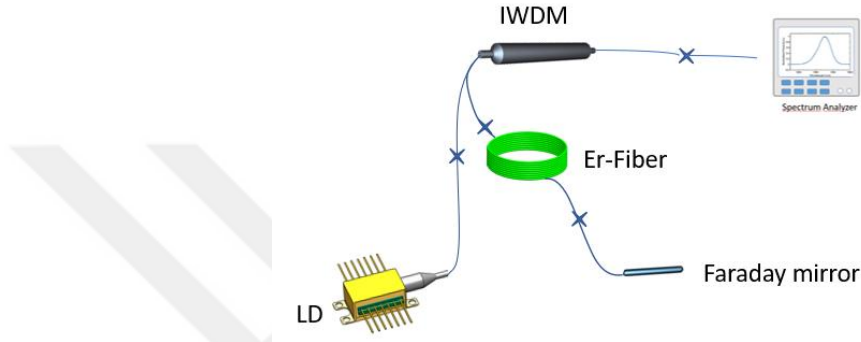


Şekil 4.7 (a) Pompa sürüş akımına ve (b) erbiyum katkılı fiber uzunluğuna bağlı ASE ışık kaynağı çıkış gücü

4.2.2 Faraday Mirror ile ASE Işık Kaynağı

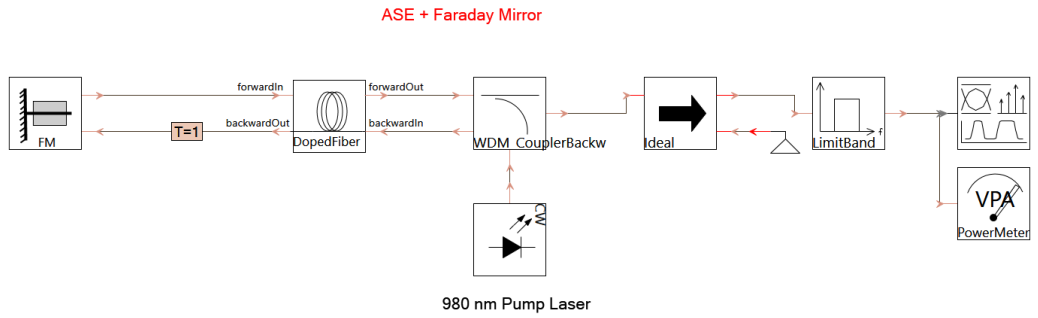
Double-pass ASE ışık kaynakları genel olarak erbiyum katkılı fiberin termine edilen ucuna bir yansıtıcı ekipman veya ayna yerleştirilerek oluşturulur [14]. Bunlar klasik fiber aynalar (fiber mirror), Faraday aynaları veya Faraday Rotator aynaları olabilmektedir. Bu aynalar sayesinde pompa lazerden erbiyum fibere giren 980 nm dalga boyundaki ışık 1550 nm civarında ASE ışması yaptıktan sonra aynadan yansyarak tekrar erbiyum fibere girer ve bu şekilde daha fazla ışımaya yapabilmesine

olarak sağlanır. Şekil 4.8’de deneysel şematiği verilen, Faraday Mirror kullanılarak oluşturulan konfigürasyonda, 980 nm dalga boyunda ve 400mA pompa sürüş akımı ile çalışan bir lazer diyot, 10 metre EDF ve hibrit bir WDM (IWDM) kullanılmıştır. Burada kullanılan Faraday Mirror 1550 nm’de ± 15 nm bant genişliğine ve 0.5 dB ekleme kaybı (insertion loss) değerine sahiptir. Bu konfigürasyon kurularak elde edilen ASE sinyalinin çıkış gücü ve spektrumu incelenmiş, VPI Photonics programında oluşturulan model ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.8 Faraday Mirror ile ASE ışık kaynağı konfigürasyonu

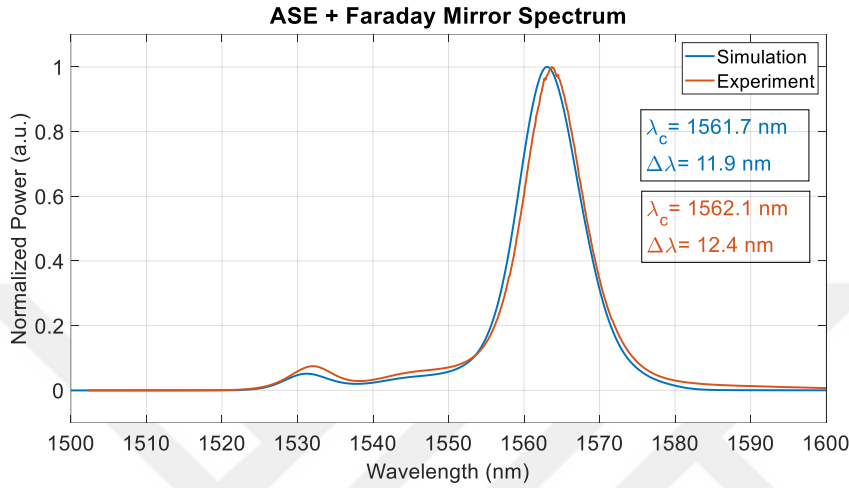
Şekil 4.9’da ise VPI Photonics fiber optik modelleme programında oluşturulan ASE ışık kaynağı konfigürasyonu verilmiştir. Benzer bir yapıda oluşturulan bu modelde Faraday Mirror bloğu için bir adet yansıtıcı (reflector), bir adet zayıflatıcı (attenuator) ve bant genişliğini ayarlamak için bir adet optik filtre kullanılmıştır.



Şekil 4.9 Faraday Mirror konfigürasyonuna ait simülasyon şematiği

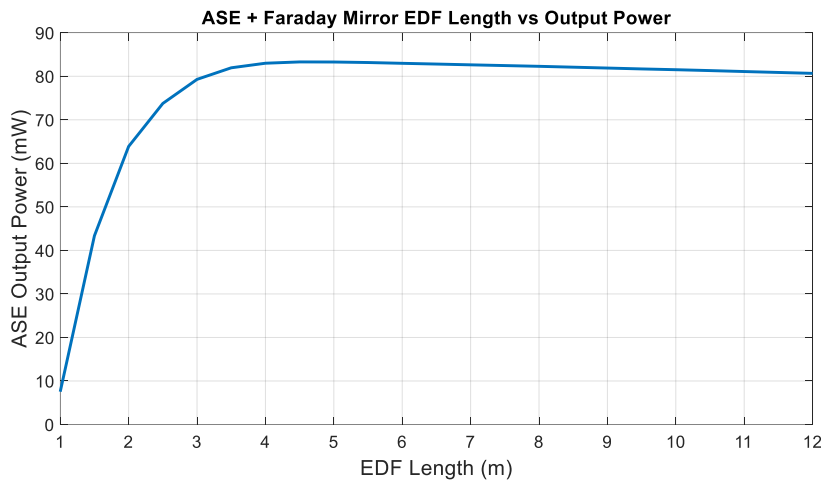
Şekil 4.10’da ise deneysel ve simülasyon modeline ait spektrum karşılaştırma grafiği verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere model ve deneysel sonuçlar oldukça başarılı bir şekilde uyumaktadır. Bu sonuçlara göre simülasyon ve deneysel modelde sırasıyla

1561.7 nm ve 1562.1 nm merkez dalga boyu, 11.9 nm ve 12.4 nm bant genişliği elde edilmiştir. Klasik ASE ışık kaynağı spektrumuna göre merkez dalga boyunun L bandına doğru kaydığı görülmüş ve bu kaymanın sebebinin double-pass konfigürasyon olduğu bilinmektedir. Deneysel ışık kaynağında çıkış gücü 82.4 mW, simülasyon modelinde ise çıkış ASE optik gücü 81.5 mW olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.10 Deneysel ve simülasyon optik spektrum sonuçları

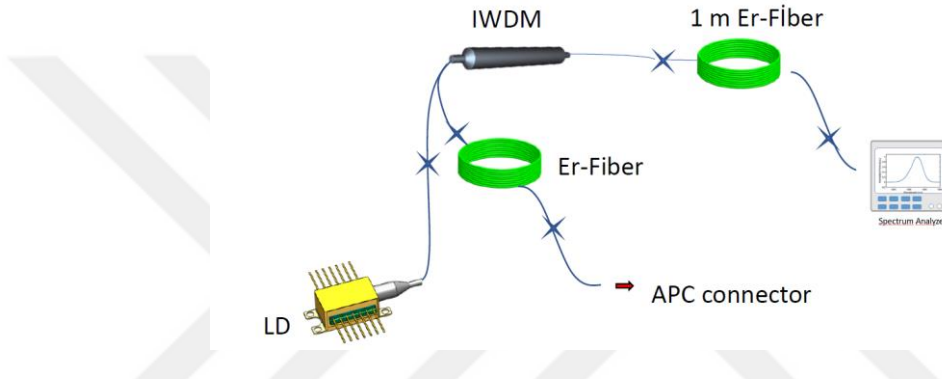
Şekil 4.11’de verilen grafikte ise bu konfigürasyona ait kullanılan erbiyum katkılı fiberin uzunluğunun değiştirilerek elde edilen ASE çıkış gücü gösterilmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre yaklaşık 4 metre erbiyum katkılı fiber kullanılsa da benzer çıkış güçleri elde edilecektir.



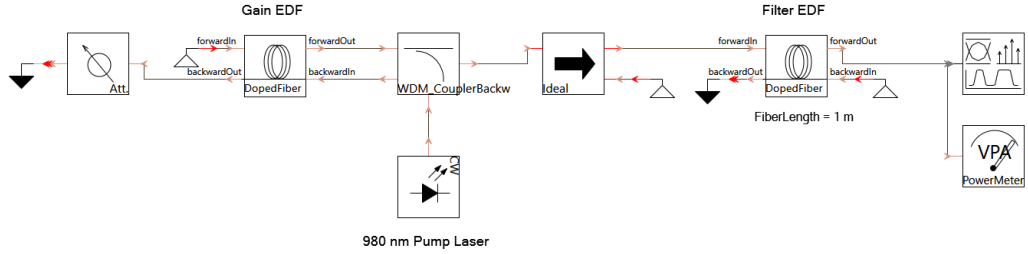
Şekil 4.11 EDF uzunluğu ve ASE çıkış gücü grafiği

4.2.3 Filtre Erbiyum Fiber ile ASE Işık Kaynağı

Aşağıda Şekil 4.12’de konfigürasyonu verilen ASE ışık kaynağı, klasik ASE ışık kaynaklarına ek olarak çıkıştan önce 1 metre erbiyum katkılı fiber (EDF) eklenerek oluşturulmuştur. 1 metrelik ek erbiyum katkılı fiber, spektrum üzerinde bir filtre etkisi meydana getirerek klasik ışık kaynağı konfigürasyonunda 1530 nm civarında oluşan tepe noktasını bastırarak sinyali L banda doğru kaydırmaktadır. Şekil 4.13’te ise VPI Photonics programında hazırlanan konfigürasyon verilmiştir. Benzer şekilde burada da ek olarak 1 metre EDF kullanılarak model oluşturulmuştur.

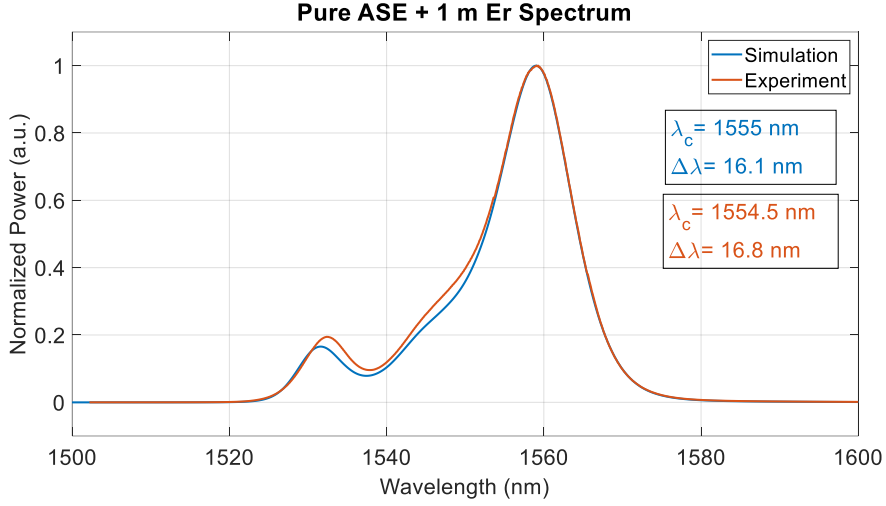


Şekil 4.12 1 metre filtre Erbiyum katkılı fiber kullanılarak oluşturulan konfigürasyon



Şekil 4.13 VPI Photonics programında 1 metre EDF kullanılarak oluşturulan model

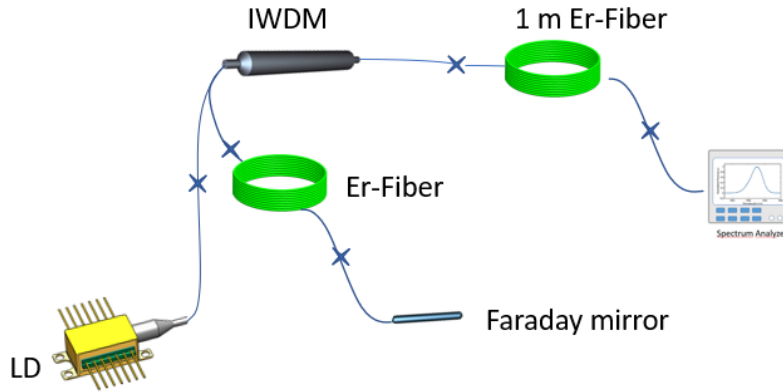
Şekil 4.14’te deneysel çalışma ve simülasyon ortamında hazırlanan modele ait sonuçların yer aldığı optik spektrum ölçümleri verilmiştir. Sonuçlar incelenecek olursa deneysel ve simülasyon modelinin sonuçları oldukça başarılı bir şekilde uyuşmaktadır. Bu sonuçlara göre simülasyon ve deneysel modelde sırasıyla 1555 nm ve 1554.5 nm merkez dalga boyu, 16.1 nm ve 16.8 nm bant genişliği elde edilmiştir. Simülasyon modelinde elde edilen çıkış optik güç 68.6 mW, deneysel modelde ise çıkış gücü yaklaşık 70 mW olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.14 Filtre EDF optik spektrum karşılaştırma grafiği

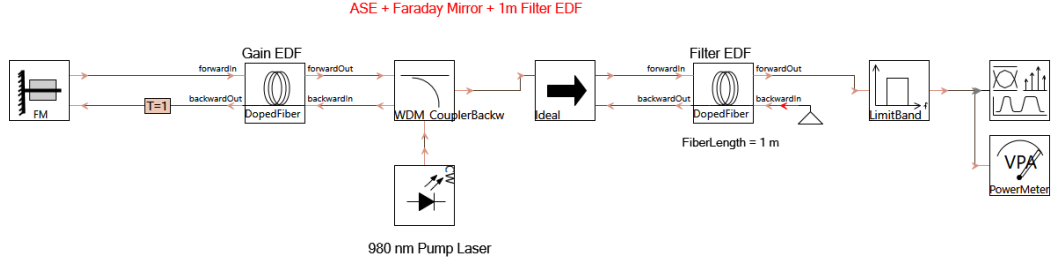
4.2.4 Faraday Mirror ve Filtre EDF ile ASE Işık Kaynağı

Bir başka ASE ışık kaynağı konfigürasyonunda ise faraday aynası ve filtre erbiyum katkılı fiber kullanılarak deneysel ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Şekil 4.15'te yapısı verilen bu ışık kaynağında hem faraday aynası ile double-pass yapısı hem de 1 metre uzunluğundaki EDF ile filtre etkisi incelenmiştir. Benzer şekilde bu konfigürasyonda da 10 metre Gain EDF kullanılmış ve pompa lazeri 400 mA sürüş akımı ile beslenmiştir.



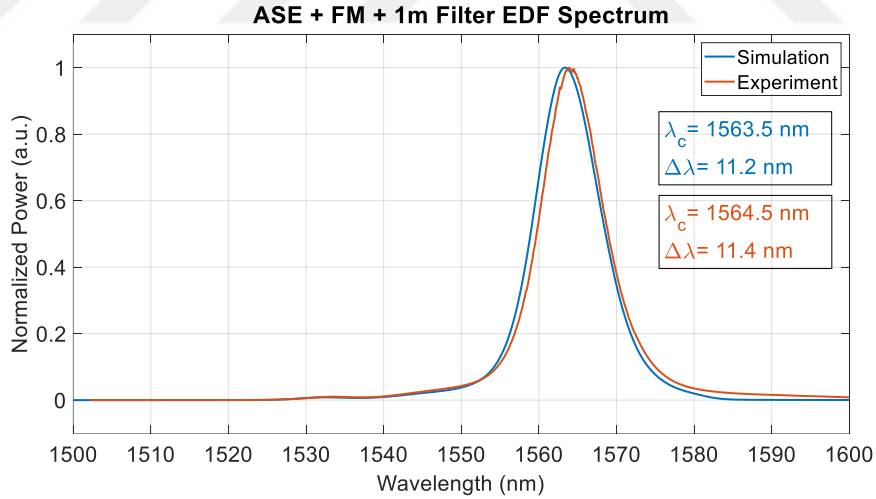
Şekil 4.15 Faraday mirror ve filtre EDF ile ASE ışık kaynağı

Şekil 4.16'da ise VPI Photonics programında oluşturulan ASE ışık kaynağı modeli verilmiştir



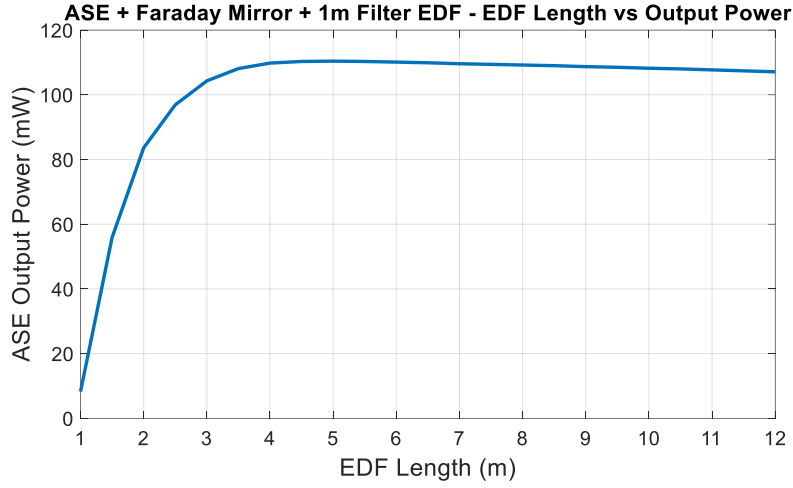
Şekil 4.16 Faraday mirror ve filtre EDF ile ASE ışık kaynağı VPI Photonics simülasyon modeli

Şekil 4.17’de deneysel çalışma ve simülasyon ortamında hazırlanan modele ait sonuçların yer aldığı optik spektrum ölçümleri verilmiştir. Deneysel ve simülasyon modelinin sonuçları oldukça başarılı bir şekilde uyuşmaktadır. Bu sonuçlara göre simülasyon ve deneysel modelde sırasıyla 1563.5 nm ve 1564.5 nm merkez dalga boyu, 11.2 nm ve 11.4 nm bant genişliği elde edilmiştir. Grafikte de görüldüğü üzere merkez dalga boyu L banda doğru kaymıştır. Simülasyon modelinde elde edilen çıkış optik güç 108 mW, deneysel modelde ise çıkış gücü yaklaşık 108.1 mW olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.17 Faraday mirror ve filtre EDF ile ASE ışık kaynağı optik spektrum karşılaştırma grafiği

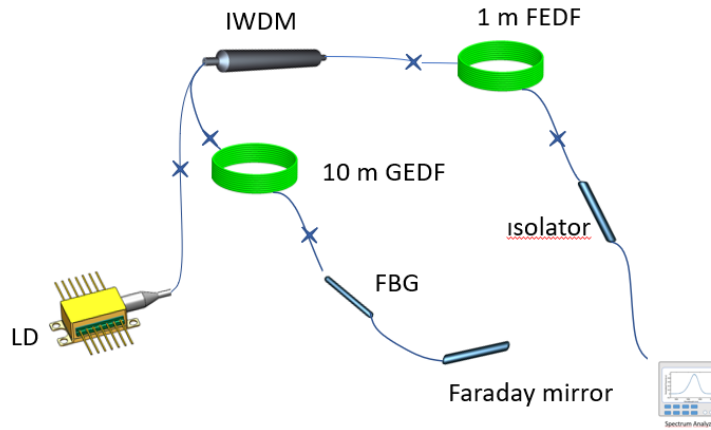
Şekil 4.18’de verilen grafikte ise bu konfigürasyona ait kullanılan erbiyum katkılı fiberin uzunluğunun değiştirilerek elde edilen ASE çıkış gücü gösterilmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre yaklaşık 4 metre erbiyum katkılı fiber kullanılsa da benzer çıkış güçleri elde edilecektir.



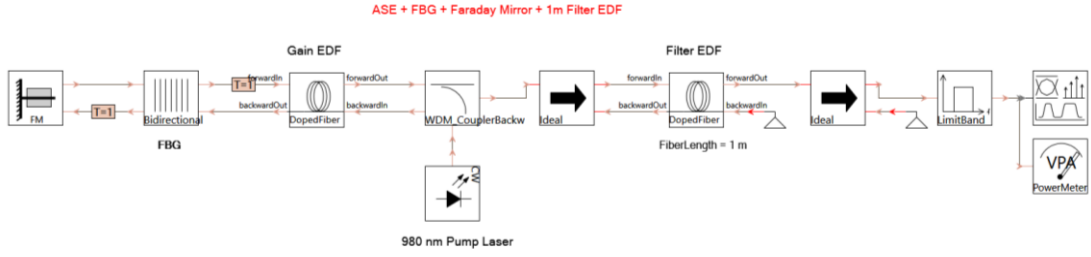
Şekil 4.18 EDF uzunluğu ve ASE çıkış gücü grafiği

4.2.5 Faraday Mirror, FBG ve Filtre EDF ile ASE Işık Kaynağı

Bir başka ASE ışık kaynağı konfigürasyonunda ise Faraday Mirror filtre FBG ve filtre EDF kullanılarak deneysel ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de deneysel yapısı ve VPI Photonics modeli verilen bu ışık kaynağında ek olarak çıkıştan önce bir adet izolatör kullanılmıştır. Bu konfigürasyonda 1 metre uzunluğunda filtre EDF ve 10 metre Gain EDF kullanılmış ve pompa sürüş akımı 400 mA olacak şekilde ayarlanmıştır.

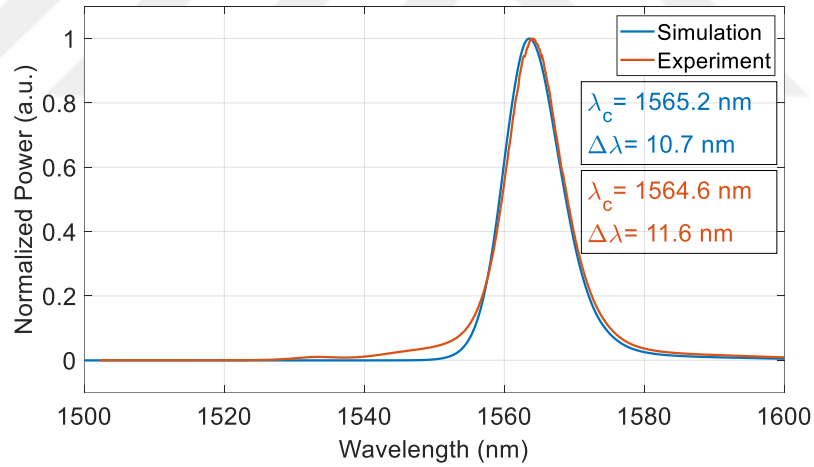


Şekil 4.19 Deneysel konfigürasyon



Şekil 4.20 VPI Photonics simülasyon modeli

Şekil 4.21’de deneysel çalışma ve simülasyon ortamında hazırlanan modele ait sonuçların yer aldığı optik spektrum ölçümleri verilmiştir. Deneysel ve simülasyon modelinin sonuçları oldukça başarılı bir şekilde uyuşmaktadır. Bu sonuçlara göre simülasyon ve deneysel modelde sırasıyla 1565.2 nm ve 1564.6 nm merkez dalga boyu, 10.7 nm ve 11.6 nm bant genişliği elde edilmiştir. Simülasyon modelinde elde edilen çıkış optik güç 86 mW, deneysel modelde ise çıkış gücü yaklaşık 88.4 mW olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.21 Optik spektrum karşılaştırma grafiği

4.3 Fiber Optik Dönüölçer Sistemi Modelleme Çalışmaları

Bu bölümde açık döngü bir fiber optik dönüölçer sisteminin, ilk olarak VPI Photonics programı kullanılarak yapılan simülasyon çalışmalarından, daha sonra da masaüstü açık döngü bir FOD sistemi ile yapılan deneysel çalışmalardan bahsedilmiştir.

kayması meydana gelir. Gerçekleşen bu faz kayması aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi LD}{c\lambda} \Omega \quad (4.1)$$

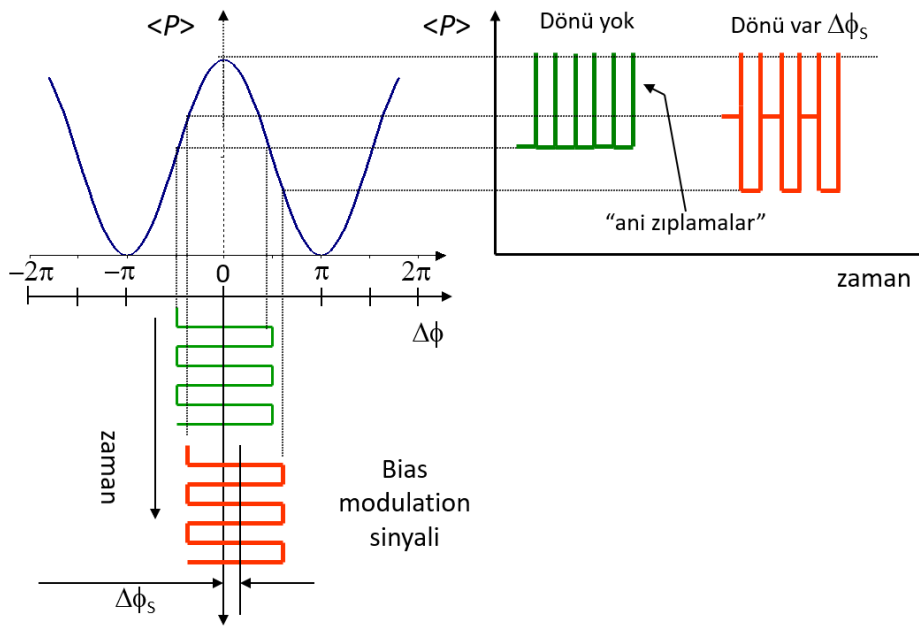
Burada, Ω açısal hızı (derece/saniye), L fiber sarım uzunluğunu (m), D sarımın çapını (m), c ışık hızını (m/s) ve λ merkez dalga boyunu (m) ifade etmektedir. Bu hesaplama sonucu elde edilen faz kayma bilgisi ($\Delta\Phi$) derece cinsinden faz kayması olarak elde edilir. Bu faz kaymasının sistemde uygulanması için bir *DelaySignal* bloğu kullanılır ve blok içerisine optik faz kayması bilgisi bölümüne girilir. Bu faz kayması her iki kol için de uygulanmalıdır. Çünkü, Sagnac etkisi sebebiyle oluşan faz kayması bir kol için saatin dönme yönüne (CW) pozitif olarak etki ederse diğer kol için saatin tersi yönde (CCW) yani negatif olarak etki eder.

Sagnac etkisi sebebiyle oluşan faz kayması aslında fiber döngü içerisinde meydana gelir fakat simülasyon modelinde bu etki yukarıda açıklandığı gibi hesaplanarak yapılmaktadır. Bu faz kayma etkisi fiber döngüden önce veya sonra olması simülasyon sonuçlarını etkilememektedir. Bu sebeple oluşturulan bu modelde *DelaySignal* blokları fiberden önce yerleştirilmiştir. Fiber döngüde yer alan polarizasyon korumalı fiberi modellemek için *UniversalFiber* blok modeli kullanılmıştır. Bu blok kullanılarak Raman, Brillouin ve Rayleigh saçılmaları, Kerr nonlinearity, dispersion, PMD etkisi, local insertion loss, ve reflectance gibi birçok etki ve parametre bilgisi girilebilmektedir. FOD sistemlerinde kullanılan fiberlerin polarizasyon korumalı olması sebebiyle, yapılan simülasyon modelinde de polarizasyonun korunması gerekmektedir. Bu nedenle kullanılan fiber bloğunda PolarizationAnalysis parametresi ‘Scalar’ iki yönlü analiz yapıldığı için de FieldAnalysis parametresinin ‘Bidirectional’ olarak seçilmesi gerekmektedir. Döngüye girmeden bir doğrusal polarizör kullanıldığı için gelen sinyallerin polarizasyonu *ExtractSOP* bloğu kullanılarak incelendiğinde hesaplanan Stokes parametre değerleri (state of polarization (SOP)) $[S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3] = [1 \ 1 \ 0 \ 0]$ olarak oluşmakta ve fiberden sonra da bu değerler sabit kalmaktadır. Belirtilen şekilde polarizasyonun korunup korunmadığı incelenebilmektedir.

Fiberden çıkan sinyaller geri dönerek kuplör üzerinden bir foto diyot bloğuna girer. Burada fotodiyot modeli olarak PIN seçilmiş ve hassasiyet (Responsivity) parametresi

Lumentum firmasına ait EPM635-75 modelinin 0,95 A/W değeri girilmiştir [33]. Fotodiyot kullanılarak elektrik sinyaline çevrilen optik sinyal daha sonra 2 kOhm direnç değerine sahip bir TransImpedance Amplifier (TIA) bloğundan geçerek akımdan voltaja çevrilir ve düşük geçiren elektriksel filtreden geçerek yüksek frekanstaki gürültü filtrelenmiş olur. Daha sonra bir elektriksel yükselteçten geçerek güçlendirilir. Son olarak, çıkış sinyali sinyal işleme bölümünde bulunan bir integration yapısı ve DC blok modülünden geçerek çıkışa gelir. Çıkışta elde edilen sinyal bir *SignalAnalyzer* bloğu kullanılarak zaman ekseninde veya frekans ekseninde görüntülenerek analiz edilebilir. Elde edilen sonuçlar Matlab kullanılarak veya çıkışta elde edilen grafik üzerinden analiz edilebilir ve dönü miktarını verecek olan voltaj farkı gözlemlenebilir.

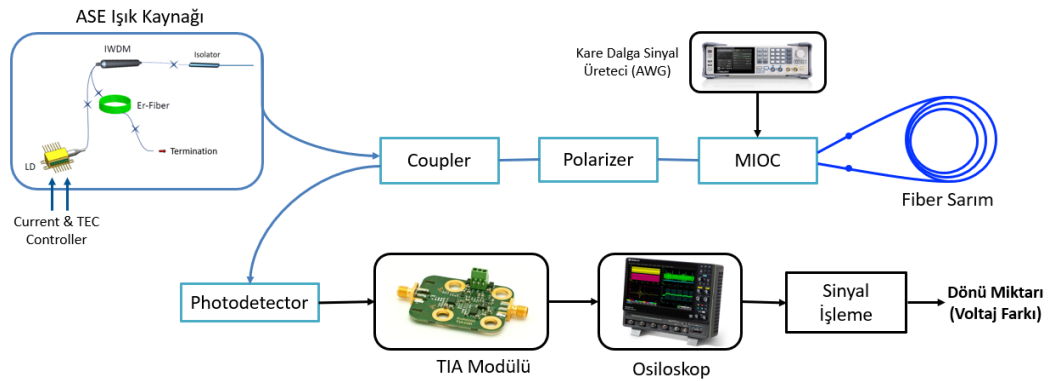
Örneğin, dönüölçer sistemde herhangi bir dönü olmadığı Şekil 4.23'te verilen çıkış sinyali zaman grafiğinde sol tarafta görüldüğü üzere sadece anlık ani zıplamalar (glitch) görülür ve her bir yarım periyot arasında voltaj farkı olmaz sadece gürültü görülür [21]. Fakat grafiğin sağ tarafında görüldüğü gibi eğer sistemde bir dönü oluşursa periyodun iki kolu arasında bir açıklık oluşur ve bu dönü sebebiyle bir voltaj farkına açığa çıkar. Bu voltaj farkının büyüklüğü bize dönü hızı hakkında bilgi verir. Yani dönü hızı bu voltaj farkının büyüklüğü ile orantılıdır.



Şekil 4.23 FOD çıkış sinyali gösterimi

4.3.2 Fiber Optik Dönüölçer Masaüstü Deneysel Model

VPI yazılımında hazırlanan dönüölçer modelinin test edilmesi ve deneysel çalışma ile elde edilecek sonuçların karşılaştırılması için Şekil 4.24'te verilen masaüstü FOD sistemi laboratuvar ortamında kurulmuştur. İlk olarak, 400 mA sürüş akımı ve bir TEC kontrolcüsü ile beslenen ASE ışık kaynağı kurulmuş ve bu ışık kaynağı 65 mW optik çıkış gücüne sahiptir. Daha sonra, bir optik kuplör ve polarizör üzerinden MIOC'a giden sinyaller iki kola ayrılarak MIOC'ta faz modülasyonuna uğrar. MIOC'ta sadece bir kola kare dalga faz modülasyonu uygulanır. Kare dalga oluşturmak için bir AWG (Arbitrary Waveform Generator) yani rastgele sinyal üretici kullanılmıştır. Bu sinyal üreticinde 10.38 us periyoda ve 1.77 Vpp voltaj değerine sahip kare dalga elektrik sinyali üretilir. Sistemde kullanılan fiber sarım uzunluğu ise yaklaşık olarak 1038 metredir. Üretilen kare dalganın periyodu her bir sinyal modülasyonu yapıldığında fiber sarım içerisinde bir tam tur yapabilecek şekilde ayarlanmıştır. Fiber sarımda iki koldan ilerleyen sinyaller herhangi bir dönü gerçekleştiğinde faz kaymasına uğrar. Geri dönen sinyaller bir fotodiyota girer ve optik sinyaller elektrik akımına çevrilir. Bir TIA modülü aracılığıyla elektrik akımı voltaja çevrilir ve filtrelenir. Veri toplanması, izlenmesi ve bazı sinyal işleme işlemleri için yüksek hızlı bir osiloskop kullanılır. Daha sonra bu veriler Matlab ortamına aktarılarak dönü miktarını veren voltaj farkı hesaplanır.



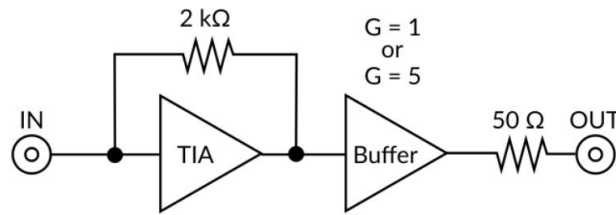
Şekil 4.24 Açık-Döngü FOD deneysel çalışmaya ait sistem yapısı

Deneysel çalışmalarda kullanılan TIA modülü Koheron firmasının TIA100-2k-SMA modelidir [34]. Şekil 4.25'te modüle ait görsel verilmiştir. Şekil 4.26'de ise bu modülün iç şematik yapısı gösterilmiştir. Bu modül ± 12 V besleme ile kullanılmakta

olup, 2 MHz bant genişliğine ve 2 kV/A veya 10 kV/A ayarlanabilir TIA kazancına sahiptir. TIA kazancı modülün üzerinde yer alan bir pin ile ayarlanabilmektedir.



Şekil 4.25 TIA modülü



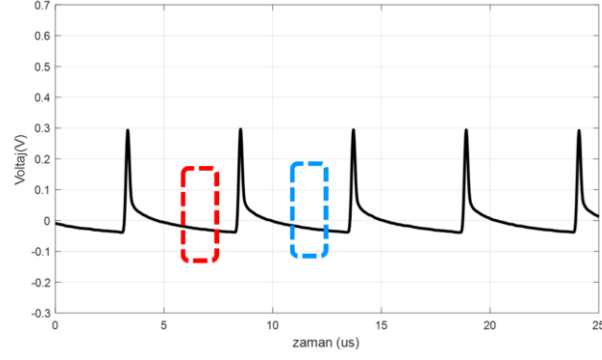
Şekil 4.26 TIA modülü iç yapısı

Masaüstü sisteminde yapılan ölçümlerde kullanılan hesaplama algoritmasına ait blok diyagram Şekil 4.27’de verilmiştir. Bu yapıya göre ilk olarak düşük geçiren filtreleme ve zaman ekseninde 100 ortalama alınarak sinyaller üzerindeki gürültü bastırılmıştır. Daha sonra, bir kare dalga periyodu sonucu oluşan sinyal çıktısının iki taraftan birer bölümün alınıp ortalaması alındıktan sonra bu ortalamalar arası voltaj farkı hesaplanmıştır. Son olarak iki kol arasında oluşan voltaj farkının izlenmesi yapılmış ve 1000 verinin fark ortalaması alınarak dönü miktarını veren voltaj farkı gösterilmektedir.



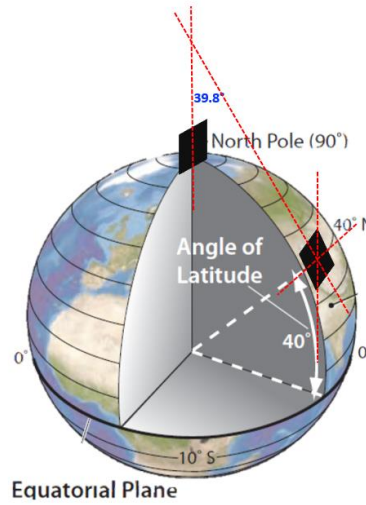
Şekil 4.27 Sinyal işleme blok diyagramı

Şekil 4.28’de örnek bir dönü ölçümüne ait zaman çıkış voltajı gösterilmektedir. Burada masaüstünde sabit durmakta olan sistem sadece dünya dönüşüne maruz kalmaktadır. Algoritmada belirtildiği gibi bir periyodun iki kolu arasındaki voltaj farkı hesaplanmakta ve dönü hızına göre bu fark artıp azalmaktadır.



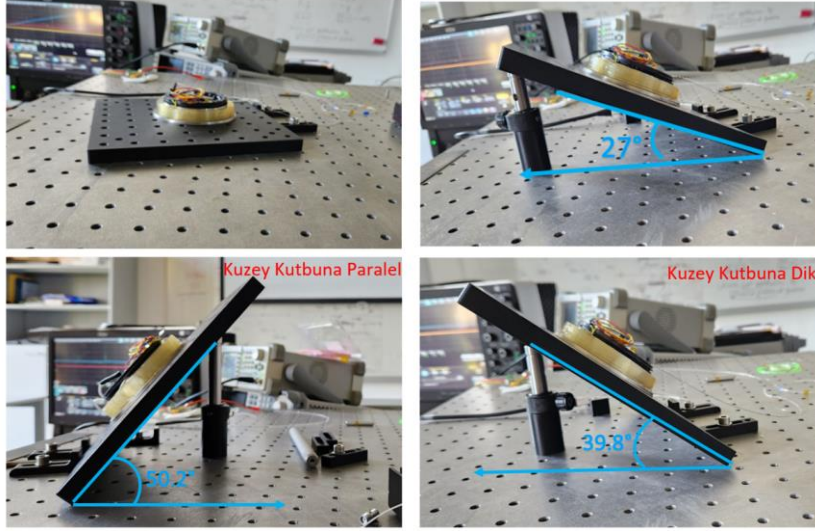
Şekil 4.28 Bir periyot boyunca iki kol arası voltaj farkının alınmasının gösterilmesi

FOD sisteminin farklı dönü hızlarında nasıl bir voltaj çıktısı verdiğini incelemek için dünya dönüşü ölçülmeye çalışılmıştır. Ankara’da zemine paralel olarak yerleştirilen FOD sistemi yaklaşık olarak 9,7 derece/saat büyüklüğünde bir dönü hızı ölçer ve buna bağlı olarak test sistemimizin çıkışında bir voltaj farkı oluşur. Sistemin konumlandırma açısı değiştirilerek 0 derece/saat ile 15 derece/saat arasında farklı dönü hızları algılanabilir. FOD testlerini yaptığımız Ankara şehri yaklaşık olarak $39,2^\circ$ Kuzey paralelinde yer almaktadır. Dünya dönüşü etkisini sıfırlamak için fiber sarımın üzerinde bulunduğu tablayı kuzey kutbuna dik konumlandırmamız gerekmektedir. Şekil 4.29’da dünyamızın bir kesiti verilmiştir, burada 40° Kuzey paraleli üzerinde zemine paralel olarak konumlandırılmış platform siyah renk ile gösterilmiştir. Dönü etkisini sıfırlamak için bu platformun kuzey kutbunda görüldüğü gibi dik olması gerekmektedir. Bunun için testlerin yapıldığı yerde platform yaklaşık olarak $39,8^\circ$ açıyla Kuzey kutbuna dik olacak şekilde yerleştirilmiştir.



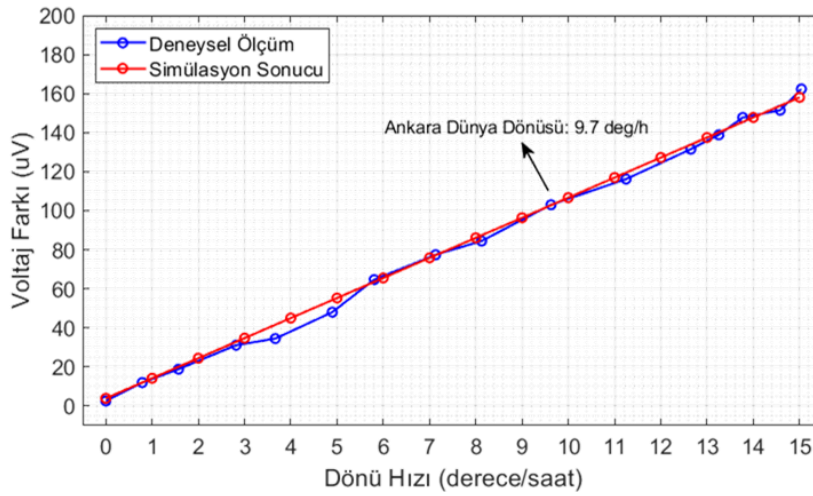
Şekil 4.29 Dünya üzerinde konumlandırma

Şekil 4.30’da konumlandırmaya ait örnek görseller verilmiştir. Testlerde dönü hızının dünya dönüşü etkisi kullanılarak ölçülmesi için FOD sistemi platform üzerinde farklı açılarda konumlandırılmıştır. Kuzey kutbuna dik konumlandırmada minimum dönü hızı, paralel konumlandırmada ise en yüksek dönü hızı ölçülmüştür.



Şekil 4.30 Dönüölçer konumlandırma yapısı

Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçlar Şekil 4.31’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlarda dönü hızının artması ile voltaj farkı değerinin arttığı başarılı bir şekilde gözlemlenmiştir. Oluşturulan simülasyon modeli deneysel FOD sistemi ile aynı bileşenlere sahip olup, farklı dönü hızlarında yapılan testlerde modelden elde edilen sonuçlar deneysel ölçümlerle yüksek oranda uyushmaktadır [35].



Şekil 4.31 FOD sistemi deneysel ve VPI simülasyon ölçüm sonuçları karşılaştırılması

5. FIBER OPTİK DÖNÜÖLÇER RIN GÜRÜLTÜ ANALIZI

Bu bölümde, fiber optik dönüölçer sistemlerinin performansını yakından ilgilendiren Bağıl Gürültü Yoğunluğu (Relative Intensity Noise, RIN) ölçümleri ve bu gürültünün bastırılması çalışmaları hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca RIN bastırma çalışması sonucu oluşturulan ışık kaynağının dönüölçer çıkış sinyaline etkisi gözlemlenmiştir. Son olarak, RIN düşürülmüş ASE ışık kaynağı ile yapılan performans testlerinin sonuçları incelenmiştir.

5.1 RIN Ölçüm Metodu

Bir fiber optik dönüölçer sisteminde Açısal Rastgele Yürüyüşe (Angular Random Walk, ARW) foton atış gürültüsü, termal gürültü ve RIN dahil olmak üzere katkıda bulunan en önemli gürültü çeşitleridir [36]. Dedektöre ulaşan optik güce bağlı olmayan RIN, optik spektrumun farklı frekans bileşenlerinin foto detektöre çarpmasından kaynaklanmaktadır [37]. RIN ölçümü temel olarak aşağıdaki eşitlikte verildiği gibi hesaplanabilir.

$$RIN = \frac{PSD_{noise}(f)}{P_e} [dB/Hz] \quad (5.1)$$

Burada, $PSD_{noise}(f)$ frekansa bağlı güç gürültü yoğunluğunu (Power Spectral Density) ifade eder ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

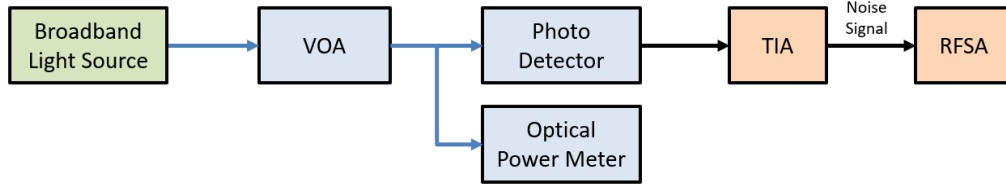
$$PSD_{noise}(f) = \frac{\langle P_f \rangle}{RBW} [dBm/Hz] \quad (5.2)$$

$PSD_{noise}(f)$ ölçümü, bir RF spektrum analizör (RFSA) kullanılarak yapılabilir. Frekans ve çözünürlük bant genişliği (RBW) ayarlanarak ortalama bir $PSD_{noise}(f)$ değeri elde edilir. Burada RBW değerinin dB birimine çevrilmesi gerekmektedir ve bu değer örneğin 100 Hz için 20 dB olmaktadır. Eşitlik 5.3'te verilen P_e değeri ise elektriksel gücü ifade etmektedir ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_e = (\mathcal{R} * I(t))^2 * R_s [dBm] \quad (5.3)$$

Bu eşitlikte, $\mathcal{R}$: foto detektör duyarlılık (responsivity) değeri, $I(t)$: foto detektöre giren optik güç ve R_s : RFSA giriş direncidir. P_e dB cinsinden hesaplandıktan sonra Eşitlik 5.3'te yerine yazılır ve yaklaşık ilgili frekans bandında RIN hesaplaması yapılabilir.

RIN ölçümleri yapılırken Şekil 5.1'de verilen yapı kullanılmıştır. Burada Geniş Bant bir ışık kaynağından çıkan ASE gürültü sinyali ilk olarak bir VOA'dan (Variable Optical Attenuator) geçerek optik güç ayarlanır ve bu bir optik güç ölçer ile ölçülür. Daha sonra foto detektöre giren sinyal elektrik akımına çevrilip TIA'dan geçerek voltaja çevrilir. Son olarak, gürültü sinyali RFSA'ye girerek ışık kaynağının gürültü seviyesi ölçülür.



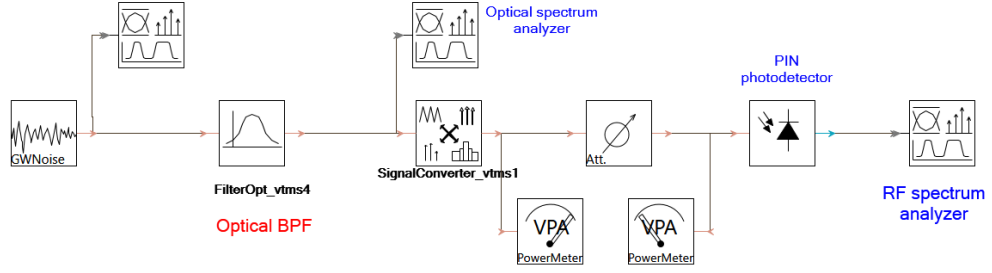
Şekil 5.1 RIN ölçüm düzeneği

5.2 Spektrum Genişliğine Bağlı RIN Ölçümü

ASE ışık kaynaklarında RIN, ışık kaynağının optik spektrum genişliği ile de orantılıdır. Aşağıdaki eşitlikte bu ilişki verilmiştir. Işık kaynağının genişliği arttıkça RIN değeri düşmektedir.

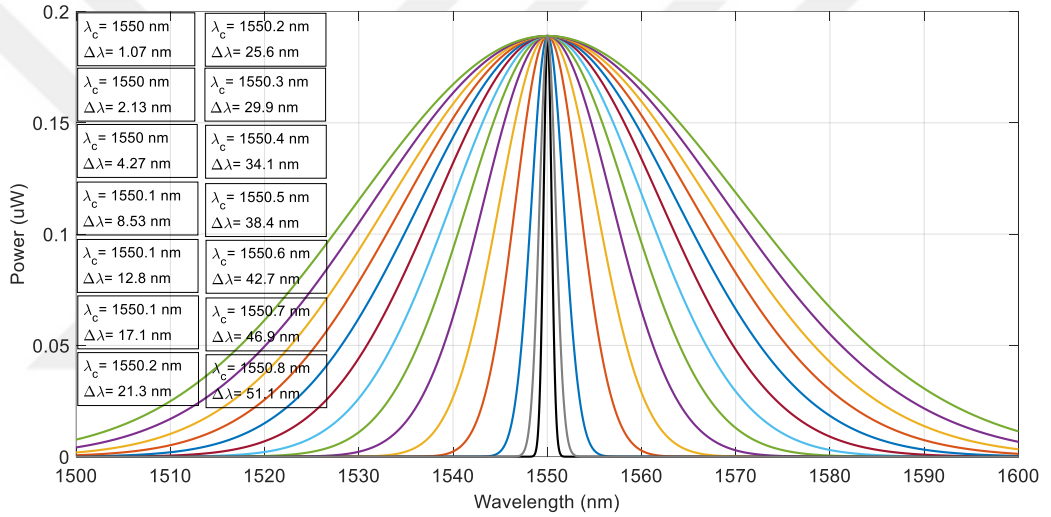
$$PSD_{RIN} \cong \frac{1}{\Delta f_{FWHM}} \quad (5.4)$$

Spektrum genişliğine bağlı RIN karşılaştırması yapmak için VPI Photonics simülasyon programında Gaussian dağılıma sahip yapay bir ASE ışık kaynağı oluşturularak test edilmiştir. Şekil 5.2'de VPI simülasyon programında oluşturulan modelin şematigi verilmiştir. Burada optik bant geçiren bir filtre kullanılarak ışık kaynağının spektrum genişliği ayarlanabilmektedir. Daha sonra bir VOA'dan geçerek optik güç ayarlanır ve foto detektörden geçerek bir RFSA ile gürültü seviyesi ölçülmektedir. Burada foto detektöre giren optik güç yaklaşık 10 mW olacak şekilde ayarlanmış ve foto detektör duyarlılık değeri ($\mathcal{R}$) ise 0,78 A/W olduğu bilinmektedir.



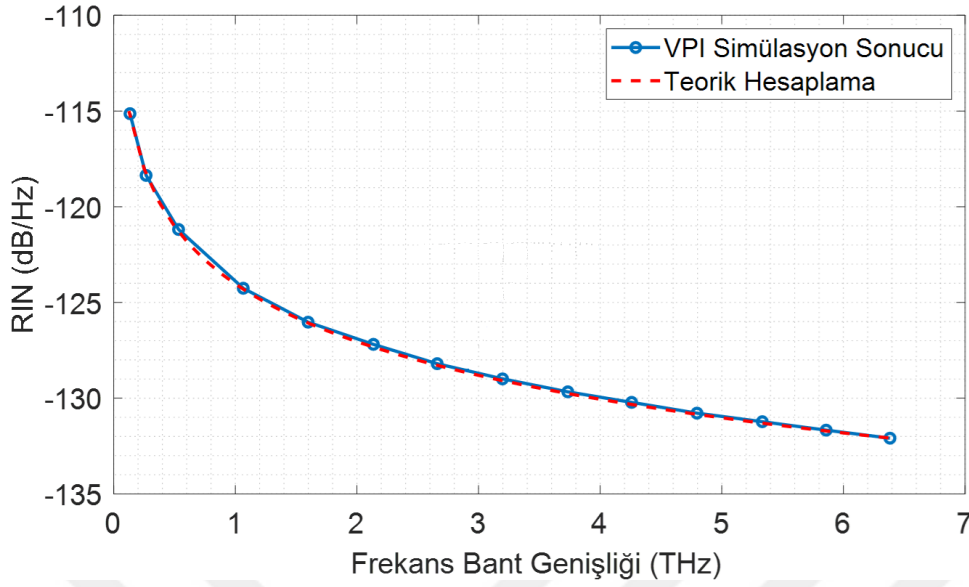
Şekil 5.2 Gaussian ASE ışık kaynağı VPI Photonics şematiği

Şekil 5.3'te yaklaşık 1 nm bant genişliği aralığından 51 nm aralığa kadar oluşturulan ASE ışık kaynağı optik spektrum grafikleri verilmiştir.



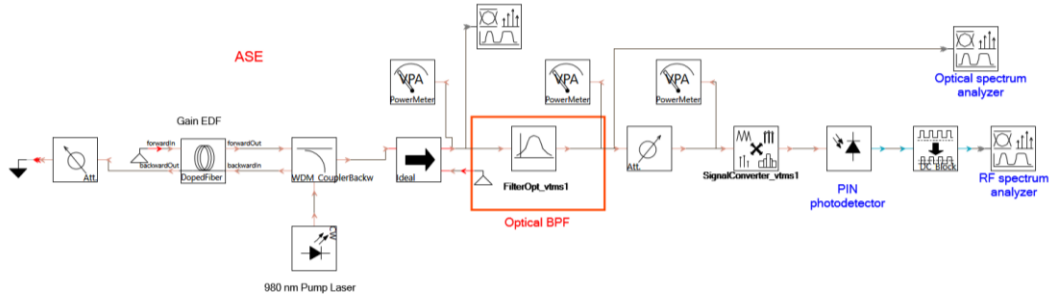
Şekil 5.3 Gaussian ASE ışık kaynağı VPI Photonics optik spektrum grafikleri

VPI programında oluşturulan her bir ışık kaynağının RIN değerleri hesaplanarak elde edilen sonuçlar Şekil 5.4'te verilmiştir. Bu şekilde de görüldüğü üzere ASE ışık kaynağının bant genişliği arttıkça RIN değeri azalmaktadır. Normal bir ASE ışık kaynağının yaklaşık spektrum genişliği 23 nm'dir ve buna karşılık gelen RIN değeri yaklaşık olarak -129 dB/Hz olarak hesaplanmıştır. Ayrıca grafikte teorik hesaplama sonucu elde edilen RIN değerleri de gösterilmiştir.



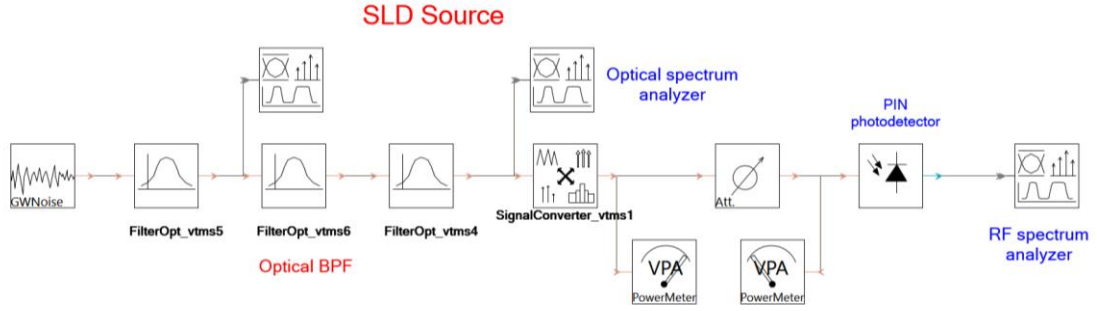
Şekil 5.4 VPI Photonics Gaussian ASE ışık kaynağı RIN ölçüm sonucu ve teorik hesaplama

Bir başka VPI Photonics simülasyon ölçümünde ise Şekil 5.5'te verilen Er-doped ASE ışık kaynağı oluşturularak bir bant geçiren filtre ile spektrum genişliği ayarlanmış ve farklı spektrum genişliklerinde RIN hesaplamaları yapılmıştır. Burada 980 nm pompa lazerin sürüş akımı 400mA olacak şekilde ve erbiyum katkılı fiberin uzunluğu ise 10m olacak şekilde ayarlanmıştır. Burada optik filtrenin geçirgenliği 5 nm ve 10 nm'ye ayarlanarak farklı spektrumlar da elde edilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır.



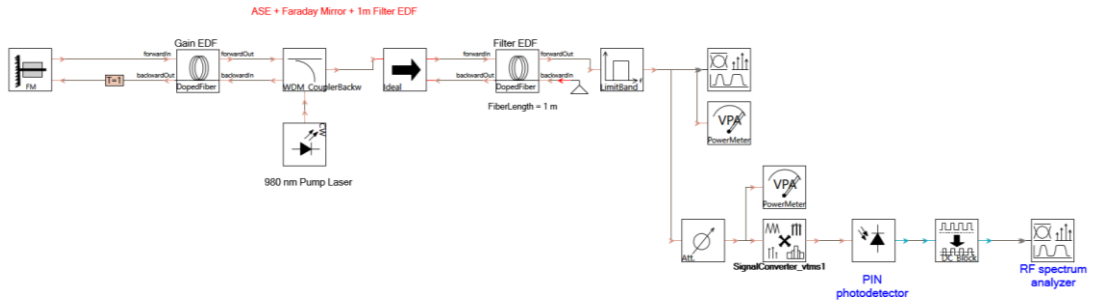
Şekil 5.5 VPI Photonics Er-doped ASE ışık kaynağı

Şekil 5.6'da ise bir SLD (Super Luminescent Diyot) ışık kaynağının VPI modeli verilmiştir. Burada yaklaşık olarak Gaussian dağılıma sahip 43 nm bant genişliğinde bir ışık kaynağı oluşturulmuştur ve RIN hesaplaması 10 mW optik güç ile yapılmıştır.



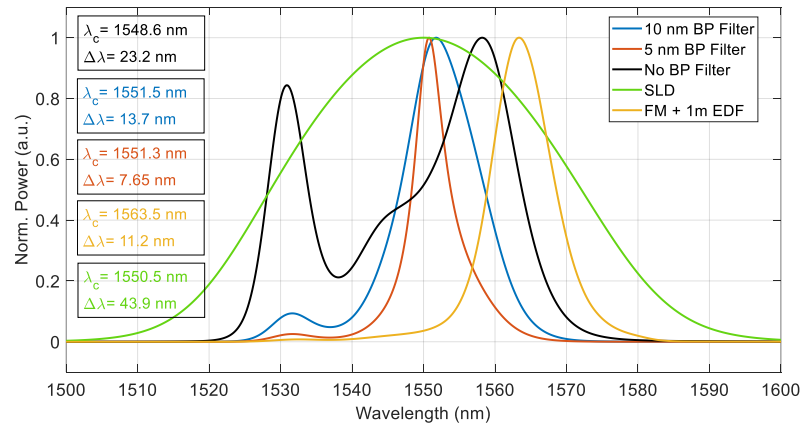
Şekil 5.6 VPI Photonics SLD ışık kaynağı

Şekil 5.7’de ise ASE, Faraday Mirror ve 1m Er-doped Filter konfigürasyonu ile oluşturulan bir ışık kaynağının VPI modeli gösterilmiştir. Bu model de ise oluşturulan ışık kaynağının optik spektrum genişliği yaklaşık olarak 13.7 nm’dir.



Şekil 5.7 VPI Photonics ASE, Faraday Mirror ve 1m Er-doped Filter ışık kaynağı

Yukarıda VPI simülasyon modelleri oluşturulan ışık kaynaklarının optik spektrum grafikleri ise Şekil 5.8’de verilmiştir. Burada oluşturulan her bir ışık kaynağının farklı dalga boyu spektral genişlikte olduğu görülmektedir.



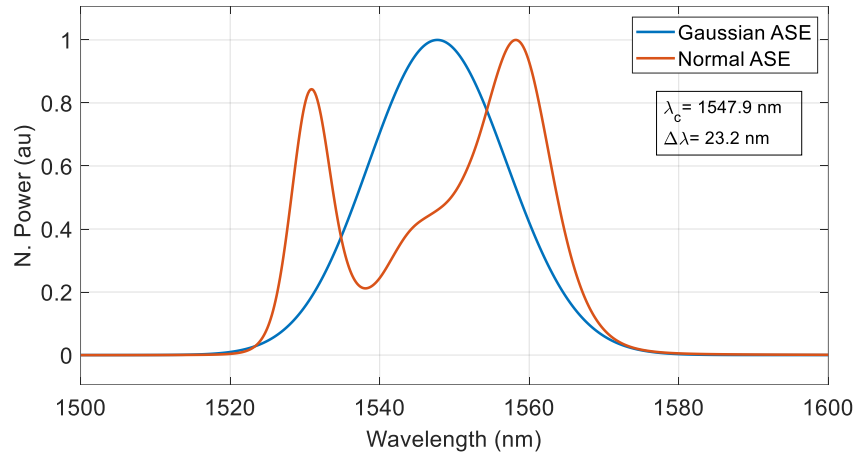
Şekil 5.8 Farklı konfigürasyonların OSA karşılaştırma grafiği

Simülasyon modeli oluşturulan ASE ışık kaynaklarının RIN değerleri hesaplanarak Çizelge 5.1’de verilen sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre teoride de olduğu gibi spektrum genişliği arttıkça RIN değerinin azaldığı görülmüştür.

Çizelge 5.1 Farklı spektrum genişliğine bağlı RIN hesaplanması

Konfigürasyon	Bant Genişliği (nm)	Output Power (dBm)	RIN (dB/Hz)
ASE (No BP Filter)	23.2	10	-129.16
ASE (10 nm BPF)	13.7	10	-126.12
ASE (5 nm BPF)	7.65	10	-124.88
ASE + FM + 1m Filter EDF	11.2	10	-125.79
SLD ışık kaynağı	44	10	-131.13

Son olarak, Normal dağılıma sahip bir Er-katkılı ASE ışık kaynağı eğer Gaussian optik spektrum dağılımlı bir ASE ışık kaynağı gibi çalışsaydı bu değişimin RIN ölçümüne etkisi nasıl olur olur bu gözlemlendi. Şekil 5.9’te VPI Photonics simülasyon programında oluşturulan bu ışık kaynaklarının optik spektrumları verilmiştir. Burada her bir ışık kaynağı da eşit spektral genişliğe ve merkez dalga boyuna sahiptir.



Şekil 5.9 VPI Photonics eşit optik spektral genişlikli ASE ışık kaynakları

Çizelge 5.2’de eşit optik spektrum genişliğine sahip ASE ışık kaynaklarının RIN karşılaştırması verilmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre Er-katkılı ASE Gaussian dağılıma sahip bir ışık kaynağı gibi davranırdı RIN değerinde neredeyse herhangi bir değişiklik olmayacaktı. Bu da böyle bir ASE ışık kaynağının farklı spektrum genişliğine sahip olmasının RIN açısından herhangi bir dezavantaja sebep olmayacağını ifade etmektedir.

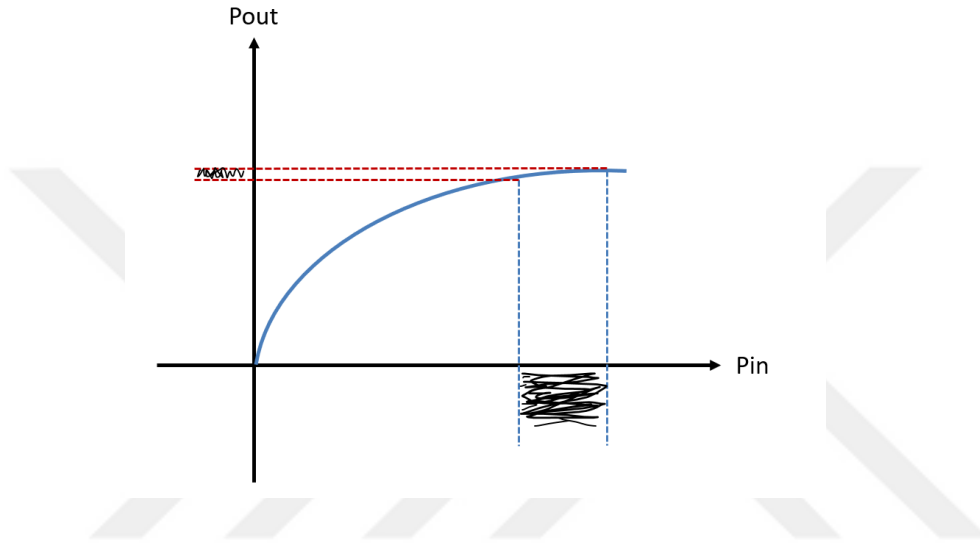
Çizelge 5.2 Eşit optik spektrum genişliğine sahip ASE RIN karşılaştırması

Konfigürasyon	Bant Genişliği (nm)	Çıkış Gücü (dBm)	RIN (dB/Hz)
Normal ASE ışık kaynağı	23.2	10	-129.16
Gaussian dağılıma sahip ASE ışık kaynağı	23.2	10	-128.58

5.3 ASE Işık Kaynağı SOA ile RIN Düşürme Çalışmaları

SOA (Semiconductor Optical Amplifier), uyarılmış emisyon yoluyla giriş optik sinyalini güçlendirir. Giriş gücü arttığında, giriş ışığının uyarılmış emisyonunun tüketimi nedeniyle SOA’daki taşıyıcı yoğunluğu azalır, bu da SOA kazancının azalmasına yol açar. Bu kazanç azalır, yani SOA’nın kazanç doygunluğu,

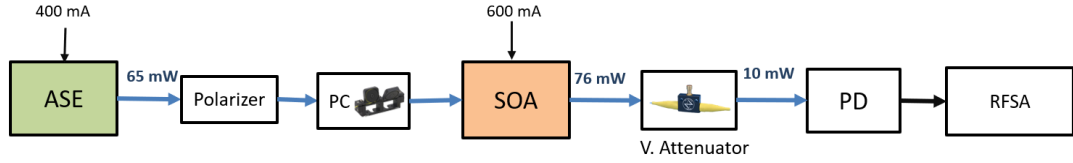
amplifikasyon özelliklerinin doğrusal olmamasına neden olur [38]. Şekil 5.10 RIN gürültüsünü bastırmak için kazançla doyurulmuş (gain saturated) SOA'nın kullanılmasına ilişkin prensibi göstermektedir. Giriş optik sinyal, kazanç doygunluğunun neden olduğu doğrusal olmayan bölgede güçlendirildiğinde, optik güçteki dalgalanma sıkıştırılır ve bu etki ile RIN bastırılmış olur. Burada giriş gücünün yükselmesi durumunda çıkış gücü yaklaşık olarak aynı kalacak ve yüksek güçlere çıkan gürültü sinyalleri bastırılmış olacaktır [37, 38, 39].



Şekil 5.10 SOA çalışma prensibi

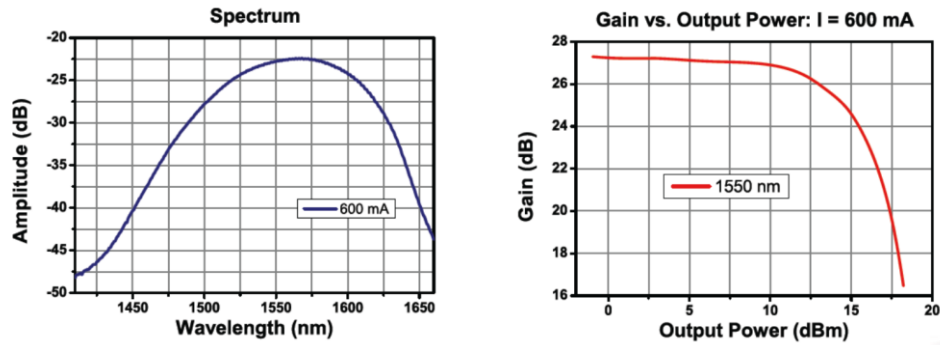
5.3.1 Tek SOA ile RIN Düşürme Çalışması

Şekil 5.11’de tek SOA kullanılarak deneysel ölçümleri yapılan ASE ışık kaynağının konfigürasyonu verilmiştir [40]. Burada klasik bir ASE ışık kaynağından çıkan sinyaller ilk önce polarizer ve PC’den (Polarization Controller) geçerek SOA’ya girer. SOA polarizasyona bağlı bir aktif bileşen olduğu için giren sinyalin polarizasyonu kontrol edilir ve optimum giriş polarizasyonu ayarlanır. SOA bir akım & TEC kontrolcüsü ile beslenir ve kontrol edilir. Bu konfigürasyonda SOA sürüş akımı 600mA, TEC sıcaklığı ise 25°C olarak ayarlanmıştır. Optik gücü 65 mW olan ASE ışık kaynağı çıkış gücü polarizer ve PC’den geçerek zayıflamakta ve yaklaşık olarak 29 mW güç SOA’ya ulaşmaktadır. SOA çıkış optik gücü ise yaklaşık 76 mW olarak ölçülmüştür. RIN karşılaştırmasının kolay yapılabilmesi için 10mW optik güç referans alınmış ve bir VOA kullanılarak foto detektöre gelen optik güç ayarlanmıştır. Kullanılan foto alıcının (PD) duyarlılık değeri ($\mathcal{R}$) 0,78 A/W ve RFSA giriş empedansı 50 Ω ’dur.



Şekil 5.11 Tek SOA ile RIN düşürme deneysel konfigürasyonu

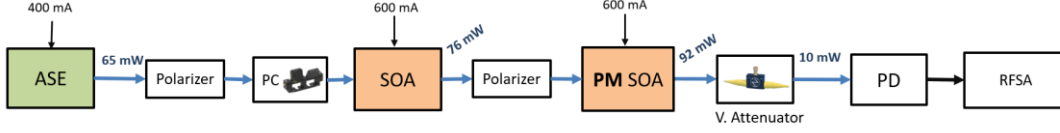
Bu konfigürasyonda Thorlabs BOA1004S model tek modlu bir SOA kullanılmış olup, bu yükseltecin merkez dalga boyu 1550 nm, 3 dB bant genişliği yaklaşık 85 nm, doymuş çıkış gücü 15 dBm küçük sinyal kazancı (Small Signal Gain) 27 dB (@ Pin = -20 dBm) ve gürültü katsayısı (Noise Figure) 7.5 dB'dir. Şekil 5.12'de bu SOA'nın optik spektrum ve kazanç-çıkış gücü grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.12 Thorlabs BOA1004S optik spektrum ve kazanç-çıkış gücü grafikleri [41]

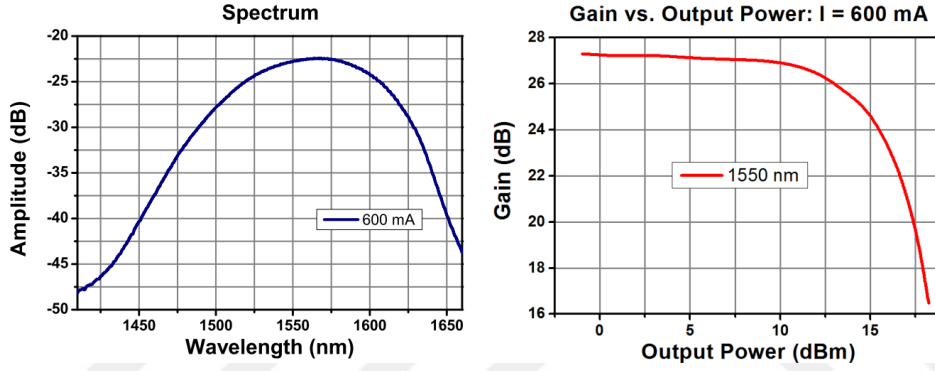
5.3.2 Çift SOA ile RIN Düşürme Çalışması

Bir diğer deneysel çalışma ise iki adet SOA kullanılarak ASE ışık kaynağı RIN bastırma üzerine yapılmıştır. Yenilikçi bir yaklaşım olan bu çift SOA ile RIN düşürme metoduna literatür ve patent çalışmalarında rastlanılmamıştır. Şekil 5.13'te konfigürasyon blok şeması verilen bu metotta, tek SOA'lı konfigürasyondan sonra bir polarizer ve bir PM SOA kullanılmıştır. Kullanılan ilk SOA polarizasyon korumalı bir bileşen olmadığı için bundan sonra bir tane daha polarizer kullanılması gerekmektedir çünkü SOA polarizasyona bağımlı bir aktif bileşendir. İkinci SOA'dan sonra optik çıkış gücü yaklaşık 92 mW olarak ölçülmüştür. Daha sonra benzer şekilde RIN karşılaştırmasının kolay yapılabilmesi için 10mW optik güç referans alınmış ve bir VOA kullanılarak foto detektöre gelen optik güç ayarlanmıştır.



Şekil 5.13 Çift SOA ile RIN düşürme deneysel konfigürasyonu

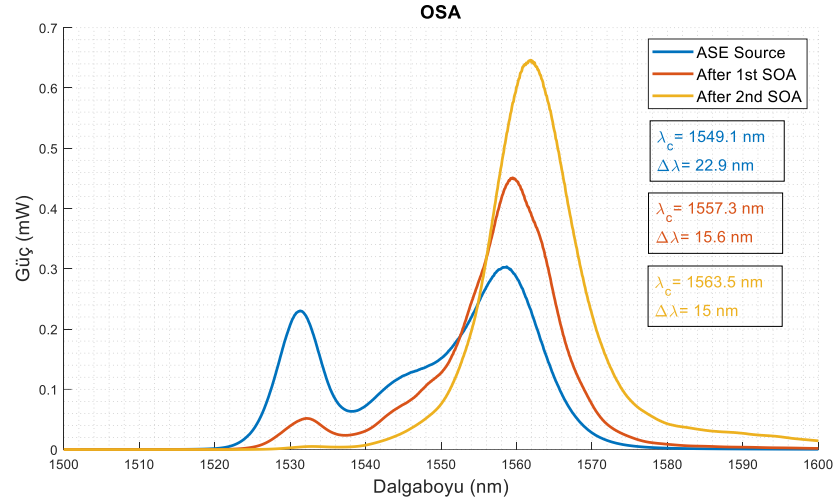
Bu konfigürasyonda kullanılan ikinci SOA Thorlabs BOA1004P model polarizasyon korumalı bir SOA olup, merkez dalga boyu 1550 nm, 3 dB bant genişliği yaklaşık 85 nm, doymuş çıkış gücü 15 dBm küçük sinyal kazancı 27 dB (@ Pin = -20 dBm) ve gürültü katsayısı yaklaşık 7.5 dB'dir. Şekil 5.14'te kullanılan PM SOA'nın optik spektrum ve kazanç-çıkış gücü grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.14 Thorlabs BOA1004P optik spektrum ve kazanç-çıkış gücü grafikleri [42]

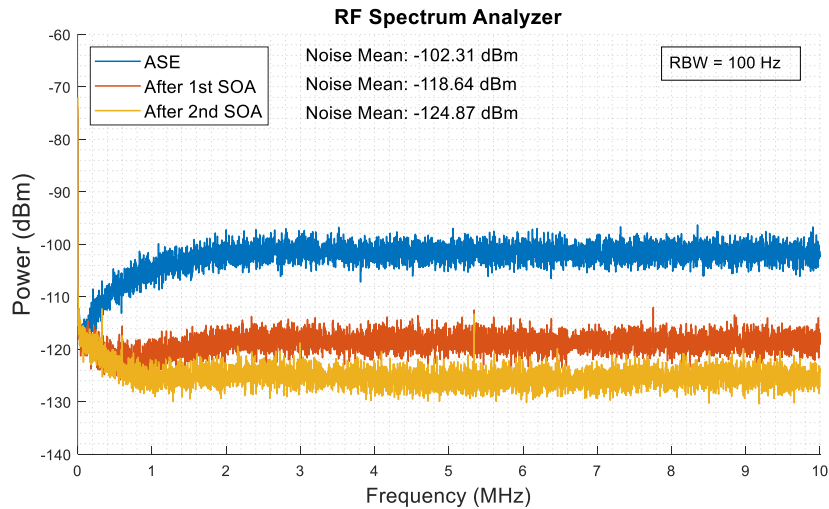
5.3.3 SOA ile RIN Düşürme Sonuçları

Şekil 5.15'te sadece ASE ışık kaynağının kullanıldığı optik spektrum, tek SOA kullanılarak elde edilen optik spektrum ve çift SOA kullanılarak elde edilen optik spektrum grafikleri verilmiştir. Burada sadece ASE ışık kaynağının kullanıldığı durumda optik spektrum genişliği 22,9 nm, tek SOA ile elde edilen optik spektrum bant genişliği 15,6 nm ve çift SOA'lı konfigürasyonda elde edilen optik spektrum bant genişliği 15 nm olarak ölçülmüştür. Optik spektrum grafikleri Anritsu MS9740B model bir OSA kullanılarak ölçülmüştür. SOA'lı konfigürasyonlar görüldüğü üzere optik spektrumların daraldığını ve L-bandına doğru kaydığını göstermektedir. Bu spektrum daralması RIN açısından olumsuz olsa da SOA'lı konfigürasyonlarda RIN performansı oldukça iyileşmiştir.



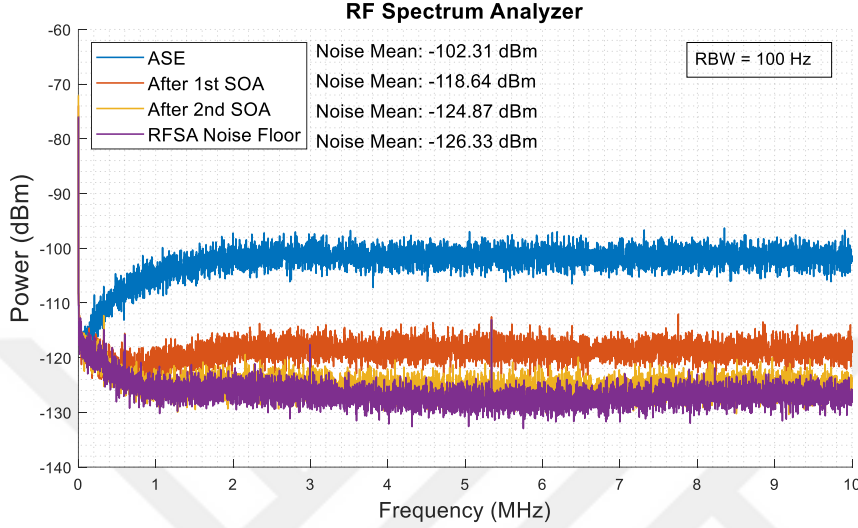
Şekil 5.15 SOA ile RIN düşürme optik spektrum grafikleri

Şekil 5.16’da ASE ışık kaynağı, tek SOA ve çift SOA kullanılarak elde edilen RFSA gürültü spektrumları verilmiştir. 0-10 MHz arası 100 Hz RBW ile alınan bu ölçümlerde elde edilen gürültü ortalamaları şu şekildedir; ASE ışık kaynağı = -102,31, tek SOA = -118,64 ve çift SOA = -124,87 dBm. Burada her bir konfigürasyon için RF spektrum ölçümleri alınmış ve tek SOA’lı konfigürasyonda yaklaşık 16 dB, çift SOA’lı konfigürasyonda ise yaklaşık 22.5 dB değerinde gürültü seviyeleri aşağı düşmüştür. Test koşulları ve ölçümler için kullanılan optik ve elektriksel bileşenlerin aynı olduğu için RIN seviyesi hakkında direk düşüş olduğu söylenebilir. Burada ikinci SOA’nın kullanıldığı durumda ek olarak yaklaşık 6 dB iyileşme gözlemlenmiştir. Bu da literatürde olmayan bir yaklaşım olup ilk kez böyle bir çalışma yapılmıştır.



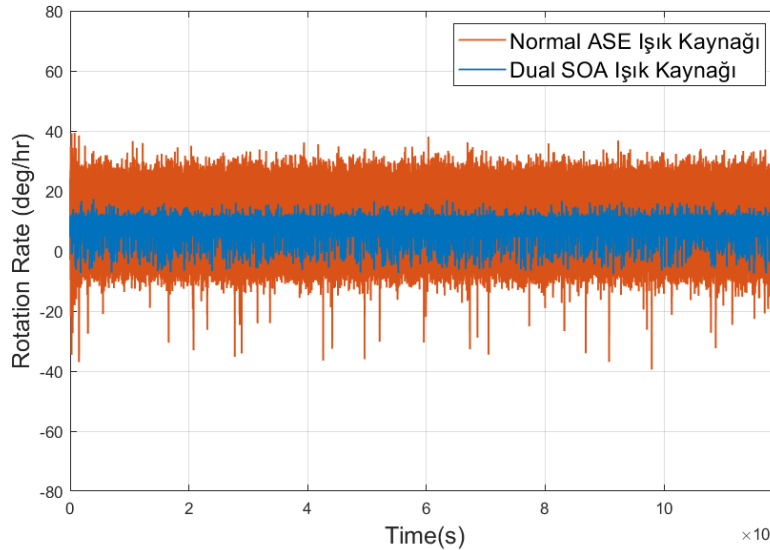
Şekil 5.16 SOA ile RIN düşürme RFSA ölçümleri

Ayrıca Şekil 5.17’de yukarıda verilen RFSA ölçümüne ek olarak bu ölçümlerde kullanılan Rohde&Schwarz FSV sinyal analizörünün gürültü tabanı gösterilmiştir. Burada görüldüğü üzere çift SOA’lı konfigürasyona ait ölçüm neredeyse cihazın gürültü tabanına ulaşmaktadır.



Şekil 5.17 SOA ile RIN düşürme RFSA ölçümleri ve gürültü tabanı

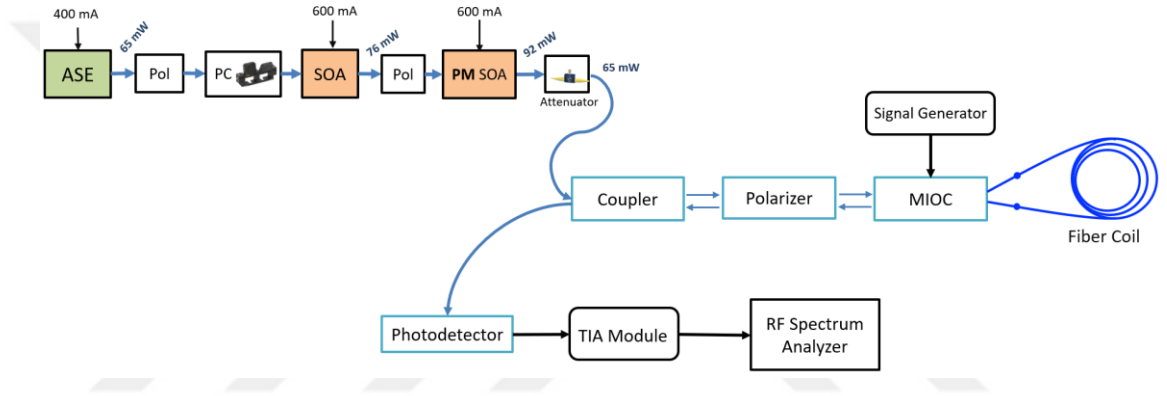
Şekil 5.18’de ise zaman ekseninde çift SOA’lı ışık kaynağının ve normal bir ASE ışık kaynağının gürültü dalgalanmaları gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere çift SOA’lı ASE ışık kaynağı yoğunluk dalgalanmalarını oldukça etkili bir şekilde bastırmaktadır.



Şekil 5.18 Çift SOA ile RIN düşürme zaman ekseninde gürültü karşılaştırması

5.4 Fiber Optik Dönüölçer RIN Düşürme Çalışması

Son olarak ASE ışık kaynağı, tek SOA ve çift SOA konfigürasyonları kullanılarak bir fiber optik dönüölçer test düzeneğı kurulmuştur. Şekil 5.19’da bu testin blok şeması verilmiştir. Burada her bir ışık kaynağı konfigürasyonu ayrı ayrı dönüölçer sistemine entegre edilerek ölçümler yapılmıştır. Her bir ışık kaynağının çıkış güçlerinin aynı seviyede olması için VOA kullanılarak 65 mW gücündeki ASE optik sinyalleri dönüölçer sistemine gönderilmiştir. Burada kare dalga modülasyonu kullanılmış ve bu yapı 4.3.2 numaralı bölümde yapılan deneysel düzenek ile aynıdır. Bu testte TIA çıkışında elde edilen sinyaller bir RFSA’e girerek SNR ölçümleri yapılmıştır.

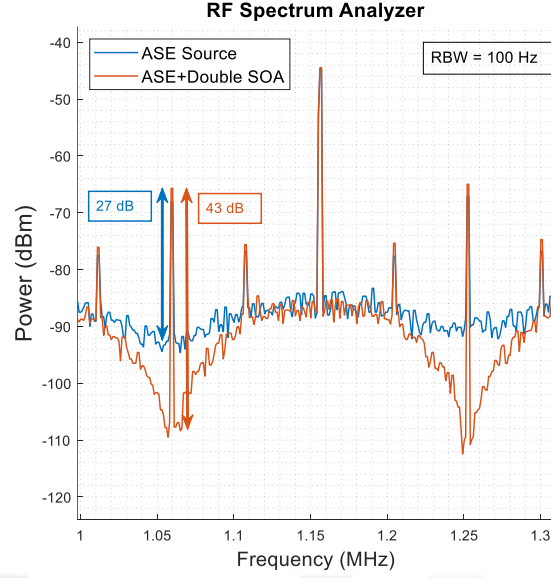


Şekil 5.19 Çift SOA ile RIN düşürme metodu ile fiber optik dönüölçer test blok şeması

Çizelge 5.3 ve Şekil 5.20’de ASE ışık kaynağı ve çift SOA konfigürasyonuna ait RFSA SNR ölçümleri verilmiştir. Sadece ASE ışık kaynağının kullanıldığı durumda elde edilen SNR değeri yaklaşık olarak 27 dB olmuştur. Çift SOA’lı konfigürasyonda ise elde edilen SNR değeri ise yaklaşık 43 dB olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu sonuçlara göre çift SOA konfigürasyonu SNR değerini 16 dB daha iyileştirmiştir.

Çizelge 5.3 RIN düşürme metotlarına ait FOD SNR performansları

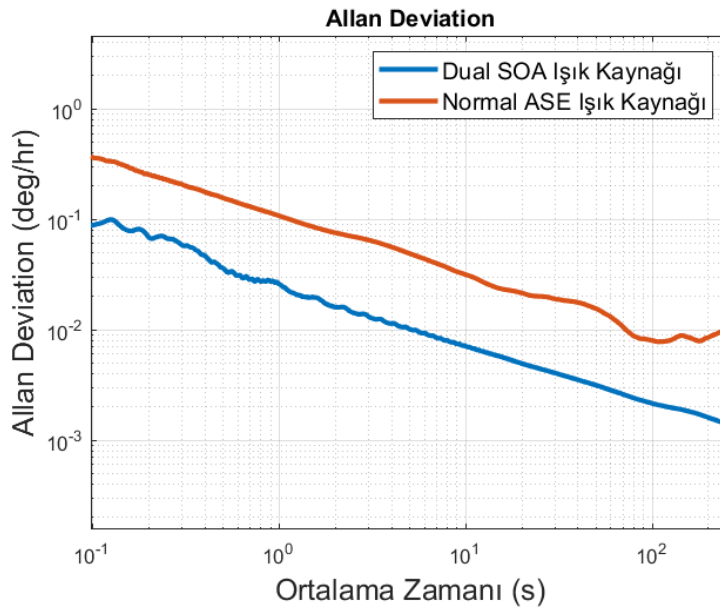
Işık Kaynağı Yapısı	SNR
ASE ışık kaynağı	27 dB
ASE + Çift SOA	43 dB



Şekil 5.20 FOD test sonucu

5.5 ARW Performansı Karşılaştırma Sonucu

Şekil 5.21’de çift SOA’lı ışık kaynağı ve normal bir ASE ışık kaynağı kullanılarak elde edilen Allan Deviation dönü performans sonuçları verilmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre normal bir ASE ışık kaynağı kullanılırsa ARW performans sonucu 0.0018 deg/sqrt(hr), çift SOA’lı ışık kaynağı kullanılırsa ARW değeri yaklaşık 0.0004 deg/sqrt(hr) olarak ölçülmektedir. Böylelikle normal bir ASE ışık kaynağına kıyasla ARW performansı navigasyon seviye bir FOD için 4,5 kat iyileştirilmiştir.



Şekil 5.21 Allan deviation karşılaştırma sonucu

6. SONUÇLAR VE SONRAKİ ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, açık-döngü bir fiber optik dönüölçer sistemi geliştirilmiş ve dönüölçer sistemlerindeki RIN gürültüsü düşürme çalışmaları yapılmıştır. VPI Photonics yazılımı kullanılarak geliştirilen simülasyon modelleri ile farklı ASE ışık kaynağı tasarımları ele alınmış ve RIN üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan ASE ışık kaynağı modellemeleri deneysel çalışmalar ile desteklenmiş ve masatüstü navigasyon seviye bir fiber optik dönüölçer sistemi kurulumu ile dünya dönüş etkisi ile testler yapılmıştır. Dünyamızın şeklinin ve testlerin yapıldığı laboratuvarın konumun etkisi ile fiber sargının farklı açısai şekillerde konumlandırılması ile farklı dünya dönüş hızlarında hassas bir şekilde testler yapıp, elde edilen sonuçların simülasyon sonuçları ile büyük oranda uyuştuğu gözlemlenmiştir. Böylelikle farklı hızlarda ve diğeri değıştirilebilir parametreler ve konfigürasyonlar ile simülasyonların yapılabileceğı başarılı bir model ortaya çıkmıştır.

RIN gürültüsü fiber optik dönüölçer sisteminin performansı önemli ölçüde etkileyen bir parametredir. Bu sebeple yapılan bu çalışmada ikili bir SOA konfigürasyonu ile RIN düşürölmüş ASE ışık kaynağı tasarımı yapılmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir. ARW testleri ile RIN düşürölmüş ışık kaynağının fiber optik dönüölçer sistemi performansına etkisi gözlemlenmiş ve elde edilen sonuçlar ile daha yüksek performanslı bir sistem elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında elde edilen bu başarılı sonuçların ilerletilmesi planlanmaktadır. Fiber optik dönüölçer sistemlerinin iyileştirilmesi ve çevresel koşullara bağıli performansının ilerletilmesi planlanmaktadır. Örneğinin sıcaklığa bağıli sistem performansının değışiminin incelenmesi ve en iyileştirilmesi planlanmaktadır. Sıcak ve soğuk performans testleri ile geliştirilen düşük gürültölü ışık kaynağının performansı da incelenecek bir diğeri önemli çalışma konusudur. Ayrıca, manyetik alanın sistem performansına etkisinin incelenmesi de planlanmaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] **O. J. Woodman**, “An introduction to inertial navigation. University of Cambridge,” Computer Laboratory, Tech. Rep., 2007.
- [2] **I. F. Saglar**, “Interferometric fiber optic gyroscope,” *M.S. Thesis, Istanbul Technical University*, 2007.
- [3] **G. Sagnac**, “L’ether lumineux demontre par l’effet du vent relatif d’ether dans un interferometre,” *Comptes rendus de l’Academie des Sciences*, cilt 95, pp. 708-710, 1913.
- [4] **G. Sagnac**, “Sur la preuve de la realite de l’ether lumineux par l’experience de l’interferographe,” *Comptes rendus de l’Academie des Sciences*, cilt 95, pp. 1410-1413, 1913.
- [5] **A. A. Michelson ve H. G. Gale**, “The Effect of the Earth’s Rotation on the Velocity of Light,” *Journal of Astrophysics*, cilt 61, p. 401, 1925.
- [6] **A. H. Rosenthal**, “Regenerative Circulatory Multiple Beam Interferometry for the Study,” *J.O.S.A.*, cilt 52, pp. 1143-1148, 1962.
- [7] **W. M. Macek ve D. T. Davis**, “Rotation-Rate Sensing with Traveling-Wave Ring Laser,” *Applied Physics Letters*, cilt 2, pp. 67-68, 1963.
- [8] **S. Ezekiel ve G. E. Knausenberger**, “Laser Inertial Rotation Sensors,” *SPIE Proceedings*, cilt 157, 1978.
- [9] **W. W. Chow, J. Gea-Banacloche, L. M. Pedrotti, V. E. Sanders, W. Schleich ve M. O. Scully**, “The ring laser gyro,” *Review of Modern Physics*, cilt 57, p. 61, 1985.
- [10] **G. Pircher ve G. Hepner**, “Perfectionnements aux dispositifs du type gyrometre interferometrique a laser”. Fransa Patent: 1.563.720, 1967.
- [11] **V. Vali ve R. W. Shorthill**, “Fiber Ring Interferometer,” *Applied Optics*, cilt 15, pp. 1099-1100, 1976.
- [12] **KVH Industries**, “An update on KVH fiber optic gyros and their benefits relative to other gyro technologies,” White Paper , 2012.
- [13] **V. M. Passaro, A. Cuccovillo, L. Vaiani, M. De Carlo ve C. E. Campanella**, “Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective,” *MDPI Sensors*, cilt 17, no. 2284, 2017.
- [14] **Z. Wang**, “Dual-Polarization Two-Port Fiber-Optic Gyroscope”, Springer Theses, 2017.
- [15] **D. H. Titterton ve J. L. Weston**, “Strapdown Inertial Navigation Technology,” *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2004.
- [16] **J. C. Fang ve J. Qin**, “Advances in Atomic Gyroscopes: A View from Inertial Navigation Applications,” *MDPI*, 2012.
- [17] **G. T. Schmidt**, “INS/GPS Technology Trends,” NATO Report, from MIT, 2011.
- [18] **M. Ozdemir**, “Design and analysis of an open loop fiber-optic gyroscope,” *MS Thesis, METU*, 2012.

- [19] **S. J. Sanders**, “Into the FOG: A course on fiber optic gyroscopes,” Lecture Notes, 2000.
- [20] **S. Ögüt**, “Implementation of Digital Detection Scheme for Fiber Optic Gyroscope,” MS Thesis Bilkent University, Ankara, 2013.
- [21] **H. C. Lefevre**, “The Fiber-Optic Gyroscope”, Artech House, 2022.
- [22] **M. A. Tran, J. C. Hulme ve ., T. Komljenovic**, “The First Integrated Optical Driver Chip for Fiber Optic Gyroscopes,” *IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, 2017.
- [23] **S. Bramhavar ve J. J. Plant**, “Photonic Integrated Navigation-Grade Gyroscope (PING): FY17 Line-Supported Advanced Devices Program,” *Lincoln Laboratory MIT*, 2017.
- [24] **K. Shang , M. Lei, Q. Xiang, Y. Na ve L. Zhang**, “Tactical-grade interferometric fiber optic gyroscope based on an integrated optical chip,” *Elsevier*, 2021.
- [25] **V. Photonics**, “VPIphotonics Design Suite,” [Çevrimiçi]. Available: <https://www.vpiphotonics.com/Tools/DesignSuite/>. [Erişildi: 2024].
- [26] **G. P. Agrawal**, “Nonlinear Fiber Optics”, San Diego: Academic Press, 3rd edition, 2001.
- [27] **D. C. Hall, W. K. Burns ve R. P. Moeller**, “High-Stability Er³⁺ Doped Superfluorescent Fiber Sources,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol.13, No. 7, Temmuz 1995.
- [28] **M. F. Digonnet**, “Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers,” Optical Engineering Series, Marcel Dekker Inc. 2nd ed., 2001.
- [29] **J. L. Wagener, M. J. F. Digonnet ve H. J. Shaw**, “A high-stability fiber amplifier source for the fiber optic gyroscope,” *Journal of Lightwave Technology*, cilt 15, no. 9, pp. 1689-1694, 1997.
- [30] **W. Burns, C. Chin-Lin ve R. Moeller**, “Fiber-optic gyroscopes with broadband sources,” *Journal of Lightwave Technology*, cilt 1, no. 1, pp. 98-105, 1983.
- [31] **H. C. Su ve A. Wang**, “A Highly Efficient Polarized Superfluorescent Fiber Source for Fiber Optic Gyroscope Applications,” *IEEE Photonics Technology Letters*, cilt 15, pp. 1357-1359, 2003.
- [32] **IXBlue**, “IXF-EDF-FGL-L2,” [Çevrimiçi]. Available: <https://www.ixblue.com/store/ixf-edf-fgl-l2/>. [Erişildi: 2024].
- [33] **L. LLC**, “C-Band, L-Band, Pass-Band Low-Leakage PIN Photodiodes,” [Çevrimiçi]. Available: <https://www.lumentum.com/en/products/c-band-l-band-pass-band-low-leakage-pin-photodiodes>. [Erişildi: 2024].
- [34] **Koheron**, “Transimpedance amplifier,” [Çevrimiçi]. Available: <https://www.koheron.com/photonics/tia100-transimpedance-amplifier/>. [Erişildi: 2024].
- [35] **A. Yentur, M. Z. Keskin, E. E. Akbaş, T. Andaç, A. Yertutanol, E. Ozbay ve İ. Ozdur**, “Açık-Döngü Fiber Optik Dönüölçer Simülasyon ve Deneysel Analizi,” *Fotonik 2023 Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı*, İstanbul, 2023.

- [36] **IEEE**, “IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis,” IEEE Std 952-1997.
- [37] **X. Suo, H. Yu, Y. Yang, W. Feng, P. Xie, Y. Chang, Y. He, M. Tang ve Z. Xiang**, “Ultralow-noise broadband source for interferometric fiber optic gyroscopes employing a semiconductor optical amplifier,” *Applied Optics*, Vol. 60, pp. 3103-3107, 2021.
- [38] **X. Chen, H. Yu ve C. Li**, “Design of erbium-doped fiber source with low relative intensity noise of FOG,” *Proc. SPIE 11569, AOPC 2020: Optical Information and Network*, 2020.
- [39] **F. Hakimi ve J. D. Moores**, “RIN-reduced light source for ultra-low noise interferometric fibre optic gyroscopes,” *Electronics Letters* vol. 49, no 3, pp. 205-207, 2013.
- [40] **A. Yentur, M. Z. Keskin ve İ. Ozd r**, “SOA-Based Broadband Light Source Relative Intensity Noise Suppression,” *International Conference on Light and Light-Based Technologies (ICLLT)*, Ankara, 2024.
- [41] **Thorlabs**, “Thorlabs.com,” [ evrimi i]. Available: <https://www.thorlabs.com/drawings/b9213cfde1c59e73-1B4438C2-B995-17E8-29208C548AA71E15/BOA1004S-SpecSheet.pdf>. [Erişildi: 2024].
- [42] **Thorlabs**, “Thorlabs.com,” [ evrimi i]. Available: <https://www.thorlabs.com/drawings/b9213cfde1c59e73-1B4438C2-B995-17E8-29208C548AA71E15/BOA1004P-SpecSheet.pdf>. [Erişildi: Mart 2024].





