

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OPTİK GERİ BESLEME İNTERFEROMETRİ İLE MEKANİK
JİROSKOPLARIN DÖNÜŞ DENGESİZLİĞİNİN KONTROLÜ

Mert KILTAR

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2024

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OPTİK GERİ BESLEME İNTERFEROMETRİ İLE MEKANİK JİROSKOPLARIN DÖNÜŞ DENGESİZLİĞİNİN KONTROLÜ

Mert KILTAR

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Hüseyin SARI
Eş Danışman : Prof. Dr. Halil BERBEROĞLU

Havacılık endüstrisi başta olmak üzere birçok alanda kullanılan mekanik jiroskopların denge ayarı önemli bir konu olup, bu işlem ticari olarak geliştirilen aletlerle yapılmaktadır. Denge ayarı bozulmuş jiroskopların dengelenmesi için izlenen geleneksel yöntem jiroskop diskinin uygun noktalarından belli miktarlarda kütle çıkarılarak dönüşünü dengelemek şeklindedir. Geleneksel yöntemine alternatif olarak mekanik jiroskopların Optik Geri Besleme İnterferometrisi (OGBİ) ile dengelenmesi bu tez çalışmasında araştırılmıştır. Yatay olarak döndürülen jiroskop diskinden elde edilen dengesizlik kütlesi ve kütlelerin konumu, ticari olarak kullanılan dengeleme cihazından elde edilen ölçüm verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, basit yapıya ve düşük maliyete sahip optik geri besleme interferometrelerinin mekanik jiroskopların veya rotorların dengesizliğinin ölçümünde ve dengesizliğin giderilmesi için jiroskop diskinden çıkarılacak kütle miktarının belirlenmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir. Elde edilen deneysel verilerden Optik Geri Besleme İnterferometresi, jiroskop diskinin 12 mg ile 1 g aralığında kütle çıkarımlarının dengelemeyi sağlayacağı durumlarda hassas sonuçlar verdiği görülmüştür. Daha hassas ölçümler için Optik Geri Besleme İnterferometresi düzeneğinde düşük dalga boylu lazer kaynaklarının ve farklı faz açma metotlarının kullanılması gerekmektedir.

Temmuz 2024, 51 sayfa

Anahtar Kelimeler: Optik geri besleme interferometri, mekanik jiroskoplar, optik kavite, lazer diyotlar, optik sensör, girişim

ABSTRACT

Master's Thesis

DETERMINATION OF BALANCE DEGREE OF SPINNING GYRO DISK BY USING OPTICAL FEEDBACK INTERFEROMETRY

Mert KILTAR

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

Supervisor : Prof. Dr. Hüseyin SARI

Co Supervisor : Prof. Dr. Halil BERBEROĞLU

The balance adjustment of mechanical gyroscopes, used primarily in the aviation industry and many other fields, is an important issue, and this process is carried out with commercially developed instruments. The traditional method followed to balance gyroscopes with disturbed balance is to balance the rotation by removing certain amounts of mass from appropriate points of the gyroscope disk. As an alternative to the traditional method, balancing mechanical gyroscopes with Optical Feedback Interferometry (OFI) is investigated in this thesis study. The imbalance mass and its location obtained from the horizontally rotating gyroscope disk were compared with the measurement data obtained from a commercially used balancing device. In this study, it has been shown that optical feedback interferometers, which have a simple structure and low cost, can be used in the measurement of the imbalance of mechanical gyroscopes or rotors and in determining the amount of mass to be removed from the gyroscope disk to eliminate the imbalance. From the experimental data obtained, it was observed that the Optical Feedback Interferometry provided precise results in cases where mass removals in the range of 12 mg to 1 g from the gyroscope disk would achieve balance. For more precise measurements, it is necessary to use low-wavelength laser sources and different phase unwrapping methods in the Optical Feedback Interferometry setup.

July 2024, 51 pages

Keywords: Optical feedback interferometry, mechanical gyroscopes, optical cavity, laser diodes, optical sensor, interference

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Lisans eğitimimden başlayarak tez çalışmamın sonuna kadar, bilgisini ve tecrübesini hiçbir zaman esirgemeyen, yoğun akademik çalışmaları arasında zamanını ayırarak bana yol gösteren saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Hüseyin SARI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımı gerçekleştirmemi sağlayan ve laboratuvar olanaklarını paylaşarak destek olan eş danışmanım Prof. Dr. Prof. Dr. Halil BERBEROĞLU'na bilimsel yaklaşım ve değerlendirmeleri için teşekkür ederim.

Her koşulda yanımda olduğunu bildiğim ve büyük bir özveriyle bugünlere gelmemi sağlayan, çalışmamın oluşmasındaki en büyük destekçilerim aileme en içten duygularla teşekkür ederim.

Yüksek lisansım boyunca iş yerimde bana sağladıkları kolaylıklar için yöneticilerimden Nedim TUÇ, Erol ÇETİNAKDOĞAN ve Ebru ÇETİNAKDOĞAN'a teşekkür ederim.

Fizik Mühendisliği alanında yetişmemde büyük katkıları olan tüm Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Deneysel çalışmaların bir kısmının yürütüldüğü T.C. Milli Savunma Bakanlığı 5. Ana bakım Fabrika Müdürlüğü, personeline ve Mehmet TİKEN'e sağlamış oldukları altyapı ve destekler için teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Hacı Bayram Veli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje Kodu: 01/2021-05) tarafından desteklenmiştir.

Mert KILTAR
Ankara, Temmuz 2024

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1 Optik Geri Besleme İnterferometreler.....	3
2.2 Ölçüm ve Sensör Uygulamaları	14
2.2.1 Yer değiştirme	14
2.2.2 Hız ölçümü	16
2.2.3 Mesafe ölçümü.....	16
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	18
3.1 CAB 690-R Balans Makinesi.....	18
3.2 Optik Geri Besleme ile Balans Ölçüm Sistemi	21
4. ARAşTIRMA BULGULARI.....	25
4.1 Balans Edilmiş Jiroskop Disk Ölçümü.....	28
4.2 26-60 ve 60-26 Dengesizlik Kütlesine Sahip Jiroskop Disk Ölçümü	30
4.2.1 26-60 Dengesizlik kütlesine sahip jiroskop disk ölçümü.....	30
4.2.2 60-26 Dengesizlik kütlesine sahip jiroskop disk ölçümü.....	34
4.3 50-100 ve 100-50 Dengesizlik Kütlesine Sahip Jiroskop Disk Ölçümü	37
4.3.1 50-100 Dengesizlik kütlesine sahip jiroskop disk ölçümü.....	37
4.3.2 100-50 Dengesizlik kütlesine sahip jiroskop disk ölçümü.....	41
5. TARTIşMA ve SONUÇ	46
KAYNAKLAR	48
EKLER.....	50
ÖZGEÇMİş	51

SİMGELER DİZİNİ

e	Elektron yükü
h	Planck sabiti
ν	Foton frekansı
c	Boşluktaki ışık hızı
P	Işıma Gücü
I	Akım şiddeti
I_{th}	Lazer Eşik Akımı
T	Son Sıcaklık
T_0	İlk Sıcaklık
E	Elektrik Alanı
n	Taşıyıcı Yük Yoğunluğu
$\omega(n)$	Taşıyıcı Yüke Bağlı Açısal Frekans
ω_0	Rezonatör Mod Frekansı
$G(n)$	Taşıyıcı Yüke Bağlı Ortam Kazancı
Γ_0	Aktif ortam kayıpları
R	Akım yoğunluğu
γ	Tersinim azalma oranı
a	Çizgi genişliği büyüme faktörü
κ	Kuplaj faktörü
P_c	Lazer kavitesinden çıkan güç
P_g	Lazer kavitesine giren güç
E_y	Lazer kavitesine geri yansıyan dalga
P_g	Lazer ön yüzüne gelen dalga
τ	Harici kavite gecikme süresi
k	Dalga sayısı
A	Optik güç zayıflama oranı
N	Rezonatör mod sayısı
η	Aktif Ortamın Kırılma İndisi

l_D	Lazer Diyot Kavite Uzunluğu
P_1	Lazer Arka Yüzü Yansıtıcılığı
P_2	Lazer Ön Yüzü Yansıtıcılığı
P_3	Harici Hedef Yansıtıcılığı
R	Pompalama Terimi
ω_s	Geri Beslemeli Açısal Frekansı
ω_0	Geri Beslemesiz Açısal Frekansı
$x_0(t)$	Geri Beslemesiz Faz Sinyali
$x_F(t)$	Geri Beslemeli Faz Sinyali
P_0	Geri Beslemesiz Çıkış gücü
m	Modülasyon İndeksi
$s(t)$	Harici Hedefin Değişken Mesafesi
$\varphi(t)$	Harici Hedef Mesafesinden Kay. faz
τ_c	Lazer Diyot Kavite Süresi
τ_e	Taşıyıcı Yaşam Süresi
τ_p	Foton Yaşam Süresi

Kısaltmalar

OGBİ	Optik Geri Besleme İnterferometrisi
NI	National Instruments
DAQ	Veri Yakalama (Data Acquisition)
LD	Lazer Diyot
DC	Direct Current
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Temel optik geri besleme interferometrisi yapısı	4
Şekil 2.2 Çok zayıf geri besleme durumunda ($C \ll 1$) optik geri besleme sinyali (Giuliani vd., 2002).....	12
Şekil 2.3 Zayıf geri besleme durumunda optik geri besleme sinyali (Yu vd., 2016).....	12
Şekil 2.4 Orta şiddetli geri besleme durumunda optik geri besleme sinyali (Zhang vd., 2019)	13
Şekil 2.5 Şiddetli geri besleme durumunda optik geri besleme sinyali	13
Şekil 2.6 Optik geri besleme interferometrisi deneysel dalga formu (Bosch vd., 2001)	14
Şekil 2.7 Optik geri besleme interferometrisi ile yer değiştirme ölçümünün osiloskop görüntüsü ve türevi (Giuliani vd., 2002).....	15
Şekil 2.8 Optik geri beslemeli girişim sinyali ve FFT analizi (Giuliani vd., 2002).....	16
Şekil 2.9 Bir FP LD'de mutlak mesafe ölçümü için optik geri besleme sinyali ve türevleri (Giuliani vd., 2002).	17
Şekil 3.1 Mekanik jiroskop	18
Şekil 3.2 Dönen rotor kütle dengesizliği.....	20
Şekil 3.3 CAB 690-R balans ölçüm ünitesi	21
Şekil 3.4 Optik geri besleme interferometrisi dengesizlik ölçüm sistemi düzeneği	22
Şekil 3.5 Optik geri besleme interferometrisi ölçüm sistemi için deney düzeneğinin blok diyagramı.	23
Şekil 4.1 Balans ölçümü için optik geri besleme interferometri düzeneği.	25
Şekil 4.2 Balans makinesi ve Optik geri besleme interferometri deney düzeneği.....	26
Şekil 4.3 CAB 690-R cihazı titreşim ölçüm sistemi.....	27
Şekil 4.4 National Instruments veri toplama cihazı (NI, USB-6003 Serisi)	28
Şekil 4.5 1. düzlem için balans edilmiş jiroskop disk optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.	29
Şekil 4.6 2. düzlem için balans edilmiş jiroskop disk optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir).....	29

Şekil 4.7 Balans edilmemiş jiroskop diskinin dengeleme makinesi ölçüm sonuçları. Dengesizlik kütlelerinin miktarı ve açısal konumu ile rpm değerleri görüntülenir.	30
Şekil 4.8 1. düzlem için 30 mg dengesizlik kütlelerinde optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir).....	31
Şekil 4.9 1. Düzlem ve 30 mg dengesizlik kütlesi için açısal konumunun hesaplanması (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir).....	32
Şekil 4.10 2. düzlem için 60 mg dengesizlik kütlelerinde optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir).....	32
Şekil 4.11 2. düzlem ve 60 mg dengesizlik kütlesi için açısal konumunun hesaplanması (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir).....	33
Şekil 4.12 26 - 60 mg dengesizlik kütlelerine sahip jiroskop diskinin dengeleme makinesi ölçüm sonuçları.	33
Şekil 4.13 1. düzlem için 60 mg dengesizlik kütlelerinde optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir).....	35
Şekil 4.14 1. düzlem ve 60 mg dengesizlik kütlesi için açısal konumunun hesaplanması (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir).....	35
Şekil 4.15 2. düzlem için 26 mg dengesizlik kütlelerinde optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir).....	36
Şekil 4.16 2. düzlem ve 26 mg dengesizlik kütlesi için açısal konumunun hesaplanması (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir).....	36
Şekil 4.17 60 - 26 mg dengesizlik kütlelerine sahip jiroskop diskinin dengeleme makinesi ölçüm sonuçları.	37
Şekil 4.18 1. düzlem için 50 mg dengesizlik kütlelerinde optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir).....	38
Şekil 4.19 1. düzlem ve 50 mg dengesizlik kütlesi için açısal konumunun hesaplanması (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir).....	39

Şekil 4.20 2. düzlem için 100 mg dengesizlik kütleinde optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir)	39
Şekil 4.21 2. düzlem ve 100 mg dengesizlik kütle için açısal konumunun hesaplanması (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir).....	40
Şekil 4.22 50 - 100 mg dengesizlik kütleine sahip jiroskop diskinin dengeleme makinesi ölçüm sonuçları.	40
Şekil 4.23 1. düzlem için 100 mg dengesizlik kütleinde optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir).....	41
Şekil 4.24 1. düzlem ve 100 mg dengesizlik kütle için açısal konumunun hesaplanması (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir).....	42
Şekil 4.25 2. düzlem için 50 mg dengesizlik kütleinde optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir).....	42
Şekil 4.26 2. düzlem ve 50 mg dengesizlik kütle için açısal konumunun hesaplanması (Turuncu çizgiler yer değiştirmeyi ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir).....	43
Şekil 4.27 100 - 50 mg dengesizlik kütleine sahip jiroskop diskinin dengeleme makinesi ölçüm sonuçları.	43
Şekil 4.28 2500-4000 rpm de optik geri besleme sinyali.....	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 CAB 690-R Balans makinesi ve optik geri besleme interferometri sonuçları	44
--	----

1. GİRİŞ

Lazerler, ışığın uyarılmış radyasyon ile yükseltilmesini sağlayan optik düzeneklerdir (Giuliani vd. 2002). Lazerler, keşfinden kısa süre sonra birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde lazerler tıpta, mühendislik çalışmalarında, bilimsel çalışmalarda, metrolojide, fiber optik sistemlerde, holografide ve savunma sanayinde sıkça kullanılmaktadır.

Lazerlerin kullanılmaya başlanmasıyla, hedefe çarpan ışığın geri yansıma sonrası lazer ışığının üretildiği kaviteye girmesi, lazer salınımlı alanın hem genliğini hem de frekansını güçlü bir şekilde etkileyen, istenmeyen bir olay ve gürültü kaynağı olarak görüldü. Bu sorun, yapılan araştırmalar sonrasında bir avantaja dönüştürülerek optik geri besleme interferometrisinin (OGBİ) keşfedilmesini sağladı. OGBİ temel olarak lazer diyot, lazer diyot içinde bulunan bir foto dedektör ve ölçüm yapılacak titreşen bir hedeften oluşur. Lazer diyotun iç kavitesinden çıkan ışık titreşen hedefe çarpar ve yansıyan ışığın bir kısmının kaviteye girerek, kavite içindeki lazer alanının hem genliğini hem de frekansını modüle edebilir. Kavite içindeki modüle edilen alan analiz edilerek hedef hakkında çeşitli bilgiler edinilebilir. OGBİ'si, Michelson ve Mach-Zehnder gibi interferometrelere göre daha basit, düşük maliyetli ve kurulumu kolaydır. OGBİ, yer değiştirme, hız ölçümü, mesafe ölçümü, açı belirleme, üç boyutlu görüntüleme ve titreşim ölçümü gibi birçok alanda ölçüm için kullanılmaktadır.

Özellikle havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılan mekanik jiroskoplar basit olarak üç eksene sahip bir düzenek üzerine yerleştirilmiş, rotor adı verilen bir diskten oluşan sistemlerdir. Çalışma prensibi açısal momentumun korunumuna dayanmaktadır. Jiroskopun ana uygulaması, hareketli nesnelerin veya araçların açısal konumunu ölçmektir. Jiroskop, uçaklar ve seyir aletleri için hayati bir cihazdır. Örneğin, duyularımızın güvenilir olmadığı sis veya bulutlu bir havada bile jiroskoplar pilotun düz bir rotada güvenli bir şekilde uçabilmesi için yapay bir ufuk sağlar (Kibble ve Berkshire 2004). Belli bir hızla, bir eksen etrafında dönen kütlelerin sahip olduğu açısal momentumun kararlılığı jiroskopun çalışma prensibinin temelini oluşturur. Temelde, eksenine desteğine göre serbestçe dönebilecek şekilde, yalpa çemberli bir çerçevede asılı

duran dönen bir kütlede oluşur. Taşıtlara takıldığında, dönen kütlede dönme eksenine hareket boyunca açısal konumunu korur (Passaro vd. 2017). Bu nedenle, desteği nasıl döndürürsek döndürelim, jiroskopun dönme eksenine uzayda aynı yönde yönlendirilmiş kalacaktır. Hareket eden bir aracın mutlak açı değişimi, kütlede dönme eksenine ile jiroskop çerçevesindeki sabit yön arasındaki açının görece değişimi ile ilişkilendirilebilir (Passaro vd. 2017). Jiroskop üzerindeki torku en aza indirmek için yataklardaki sürtünme mümkün olduğunca düşük yapılmalıdır. Dengesizlik, kütlede dönme eksenine göre asimetrik dağılımı nedeniyle dönen disklerin veya rotorların kütle merkezine geometrik merkeziyle kesişmemesinden kaynaklanır. Ataletsel yönlendirme ve navigasyon platformlarında mekanik jiroskopun kullanıldığı bazı durumlarda dengesizlik sorunu çok önemli olabilir. Bu nedenle, örneğin havacılıkta jiroskop gibi aletlerin hassas bir şekilde dengelenmesi gerekir, böylece tüm uçaklar için güvenli uçuş mümkün olur. Son yıllarda mekanik jiroskopların yerini daha hassas optik jiroskoplar almış olsa da mekanik jiroskoplar, özellikle hava araçlarında hala yaygın olarak kullanılmaktadır.

Jiroskoplarda zamanla dönme eksenlerinde aşınmalar olabilir. Bu aşınmalardan dolayı, jiroskopların balansları bozulur ve balans edilmeleri gerekir. Bu balans işlemi ticari CAB 690-R cihazı ile jiroskopun iki eksenindeki titreşim ölçülerek dengesizlik kütlede tespit edilir. Tespit edilen kütleler disk üzerinde uygun noktalardan ve uygun şekilde çıkarılarak jiroskop dengelenebilir.

Bu tez çalışmasında optik geri besleme interferometrelerinin farklı bir uygulama alanı olarak mekanik jiroskopların denge ölçümlerinde kullanılabileceği ilk kez gösterilmiştir. İki adet diyot lazer CAB 690-R cihazının platformu üzerine düşürülerek elde edilen optik geri besleme sinyalleri analiz edilerek dengesizlik kütleleri tespit edilmiş ve geleneksel yöntemlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde Optik Geri Besleme İnterferometreleri hakkında temel bilgiler verilmekte ve bu alanda daha önceden yapılmış çalışmalar incelenmektedir.

2.1 Optik Geri Besleme İnterferometreler

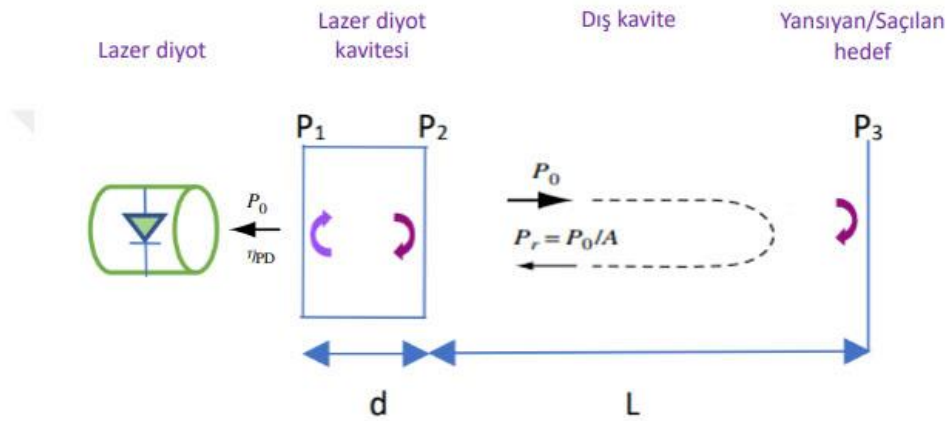
Yarı iletken lazerlerin optik geri besleme etkilerine yönelik çalışmalar, neredeyse yarı iletken lazerlerin kendisi kadar eski olup araştırmacıların ilgisini çekmiştir. 1970'te Broom, harici bir rezonatöre bağlı yarı iletken lazerlerde ortaya çıkan dinamik etkilerin gözlemlendiğini bildirdi (Broom vd. 1970). Daha sonra Morikawa, optik yansımalara maruz kalan yarı iletken lazerlerin çıkışındaki salınımların görünümünü tartıştı (Morikawa vd. 1976). Lazerlerin gürültü özelliklerini belirlemede optik geri besleme etkilerinin önemini tanıması, bu tür araştırmalar için özel bir erken odak noktası sağlamıştır. Hirota ve Suematsu tarafından yapılan teorik araştırmalar, özellikle güvenilirliği gürültü etkisi nedeniyle tehlikeye girmesi beklenen optik iletişim sistemlerinin gereksinimleri tarafından yönlendirildi (Hirota ve Suematsu 1979). İlginç bir şekilde bu makale, analog modülasyon sistemlerindeki gürültünün etkilerini vurguladı. Bu makale, lazerin davranışının, lazer ile ilgili harici yansıtıcı arasındaki mesafeye bağlı olduğuna işaret etmiştir. Bu durumda davranış, dış yansıtıcı ile olan mesafenin lazerin tutarlılık uzunluğundan daha küçük veya daha büyük olmasına bağlı olarak, bir "çift boşluk durumu" veya "dış enjeksiyon durumu" olarak sınıflandırıldı. Lazer ile harici bir yansıtıcı arasındaki mesafenin değişmesiyle ortaya çıkan zıt etkiler, Chinone ve diğerleri tarafından 1978'de rapor edilmiştir (Chinone vd. 1978). Bu çalışma, dış ayna lazerden birkaç santimetreden daha az mesafede iken, gevşeme salınımlarındaki azalmanın elde edildiğini, dış aynalara nispeten büyük mesafelerde gevşeme salınımlarında artışların meydana geldiğini gösterdi. Bu bağlamda NEC'de Lang ve Kobayashi tarafından Kawasaki adlı son derece önemli bir makale hazırlandı (Lang ve Kobayashi 1980). Bu makaleye göre yazarlar şu sonuca varmışlardır: "Geleneksel lazerlerdeki bileşik kavite etkileri iyi bilinmektedir. Bununla birlikte, yarı iletken lazerlerdeki harici geri besleme etkilerine ilişkin önceki deneysel gözlemler, basit bir yoruma izin vermiyor gibi görünmekteydi."

Bir yarıiletken lazere optik geri besleme, genellikle lazerin kullanıldığı herhangi bir uygulamanın kaçınılmaz bir sonucudur. Bu tür geri besleme, ışığın yolundaki optik bileşenlerden, örneğin bir optik fiberin kenarlarından veya spektroskopi deneylerinde bir buhar hücresinin pencerelerinden meydana gelebilir.

Geri besleme alanı, ışığın lazere yeniden enjekte edilmeden önce uzaktaki bir nesneden yansması için geçen süre nedeniyle gecikmelidir. Geri besleme ışığı, lazer boşluğuna enjekte edildikten sonra, mevcut boşluk içi alan üzerine bindirilir ve bu mevcut alana müdahale eder. Geri besleme alanı ile boşluk içi alan arasındaki faz farkı, lazer boşluğu içindeki toplam alanın yükseltilip veya bastırıldığını belirler. Genellikle, geri besleme alanı ile lazerin toplam çıktı alanı arasında basit bir doğrusal ilişki vardır.

Optik Geri Besleme İnterferometreler, bu olayların sonucu olarak ortaya çıkan bir interferometridir.

Bir yarıiletken lazer ile oluşturulmuş, optik geri besleme interferometrisinin tabi olduğu en basit deneysel düzenek **şekil 2.1**'de gösterilmektedir. Burada optik geri besleme interferometrisi basit olarak, lazerden çıkan ışığın, dış kavitede bulunan düzlem aynadan (hedef) yansarak lazer kavitesine girmesi ile elde edilmektedir.



Şekil 2.1 Temel optik geri besleme interferometrisi yapısı

Şekil 2.1'de yer alan görselde d iç kavite mesafesi, P_1, P_2, P_3 yansıtma katsayıları, L ise dış kavite mesafesidir. P_2 katsayısı lazer diyotun (LD) frekans değişimine göre hesaplanmaktadır (Bosch vd. 1998).

Burada P_0 , yayılan güçtür, $P_r = P_0/A$ uzak hedef tarafından geri yansıtılan güçtür. $A > 1$, harici boşluğun güç zayıflamasıdır ve $A = 1/P_3$ ile verilir.

Optik geri besleme interferometresinin analizi, standart Lang ve Kobayashi denklemleri kullanılarak yapılabilir (Lang ve Kobayashi 1980) fakat önce uzak hedeften gelen optik gecikmeli geri beslemenin etkileri özetlenmelidir. Geri yansıyan ışık, lazer boşluğunda mevcut olan ışıkla karşılaşır. Gecikmeye ve geri yansıyan ışığın fazına bağlı olarak, yarıiletken lazerin eşik koşulu değişir. Böylece, örneğin hedefin yeri değiştirilirken pompa akımı sabit tutulduğunda yayılan güç değişir. Eşikteki değişiklik, gerçek yarıiletken lazer taşıyıcı yoğunluğunda değişiklik anlamına gelir. Bu durumun sonucu olarak, geri yansımalara maruz kalan yarıiletken lazer tarafından yayılan dalga boyu da biraz değişir (Donati 1995).

Lang-Kobayashi denklemleri temelde yarıiletken bir lazere yakın bir mesafedeki bir hedeften geri yansıyan zayıf ışığın, tek modlu bir yarıiletken lazere dönerek, lazerin dinamik özelliklerini değiştirmesinin analizine dayanmaktadır. Zayıf optik geri beslemelerde çoklu yansımaların dikkate alınmayacak kadar az olduğu kabul edilir (Lang ve Kobayashi 1980).

Lang-Kobayashi, bileşik kaviteelerin elektrik alan değişimlerini açıklamak için, temel lazerler için tanımlanan elektrik alan oran denklemlerine, τ zaman gecikmeli olarak geri yansıyan ışığın elektrik alanını ekleyerek açıklamaktadır. Birleşik kavite içerisindeki elektrik alan için lazer oran eşitliği:

$$\frac{d}{dt}E(t)e^{i\omega_0 t} = \{i\omega_N(n) + \frac{1}{2}(G(n) - \Gamma_0)E(t)e^{i\omega_0 t} + \hat{K}E(t - \tau)e^{i\omega_0(t-\tau)}\} \quad (2.1)$$

olarak yazılır (Lang ve Kobayashi 1980). Burada, $w_N(n)$ aksenal mod frekansı, n taşıyıcı yoğunluğu, $G(n)$ optik kazanç, $E(t)$ yavaş değişen zarf fonksiyonu, w_0 merkezi frekans, Γ_0 kavite kayıpları ve N aksenal modu tanımlayan bir sayıdır.

P_2 yansıtma katsayısına sahip yüzeye çarpan ışığın alanı $E_g e^{i\omega_0 t}$ ve P_2 , P_3 yansıtma katsayısına sahip yüzeylerden yansıyan alanların toplamı $E_y e^{i\omega_0 t}$ olarak alınırsa,

$$E_y e^{i\omega_0 t} = [\sqrt{P_2} + (1 - P_2)\sqrt{P_3} e^{-i\omega_0 c} + (1 - P_2)R_3\sqrt{P_2} e^{-i2\omega_0} + \dots] E_g e^{i\omega_0 t} \quad (2.2)$$

eşitliği ortaya çıkar. Çoklu yansımaları ihmal edilirse, (2.2) denklemi şu şekilde yazılabilir (Lang ve Kobayashi 1980):

$$E_y e^{i\omega_0 t} = [\sqrt{P_2} + (1 - P_2)\sqrt{P_3} e^{-i\omega_0 c}] E_g e^{i\omega_0 t} \quad (2.3)$$

Lazerin P_2 yansıtma katsayılı yüzeyi ile P_3 yansıtma katsayısına sahip dış yüzeyinin bileşke yansıtıcılığı,

$$r_{eff} = \frac{E_y}{E_g} = \frac{[\sqrt{P_2} + (1 - P_2)\sqrt{P_3} e^{-i\omega_0 \tau}] E_g}{E_g} \quad (2.4)$$

olarak ifade edilebilir. Denklemden gerekli sadeleştirmeler yapılırsa:

$$r_{eff} = \sqrt{P_2} + (1 - P_2)\sqrt{P_3} e^{-i\omega_0 \tau} \quad (2.5)$$

haline gelmektedir. Ayna kayıpları için kullanılan ifade bileşke kavite kayıpları için kullanılırsa,

$$\Gamma = \Gamma_w - \frac{c}{\eta l_D} \ln(\sqrt{P_1} \cdot r_{eff}) = \Gamma_0 - \frac{c}{\eta l_D} \ln(1 + a e^{-i\omega_0 \tau}) \quad (2.6)$$

denklemleri elde edilir (Lang ve Kobayashi 1980). Burada, Γ_w dalga kılavuzu kayıplarını ve Γ_0 geri beslemesiz lazer diyotun kavite kayıplarınıdır. Lazer alanı sönümlenme değişimi $a \ll 1$ için $\frac{1}{2}\Gamma E e^{i\omega_0 t}$ 'e eşittir. Bu terimi (2.1)'deki eşitlik ile kullanıldığında,

$$\frac{1}{2}\Gamma E e^{i\omega_0 t} = \frac{1}{2}\Gamma_0 E e^{i\omega_0 t} - K E (t - \tau) e^{i\omega_0 (t - \tau)} \quad (2.7)$$

elde edilmiş olur (Lang ve Kobayashi 1980). Bu durumda, (2.6)'daki denklem (2.7)'de yerine konulursa,

$$\frac{c}{2\eta l} \ln(1 + a e^{-i\omega_0 \tau}) = K e^{-i\omega_0 \tau} \quad (2.8)$$

eşitliği elde edilir. $a \ll 1$ için $\ln(1 + a e^{-i\omega_0 \tau}) \approx a e^{-i\omega_0 \tau}$ olur. Bu eşitlik (2.8)'de yerine konulur ise, K 'nın değeri:

$$K = \frac{c(1 - P_2) \sqrt{\frac{P_3}{P_2}}}{2\eta l_D} \approx \frac{\varepsilon a}{\frac{2\eta l_D}{c}} = \frac{k}{\tau_c} \quad (2.9)$$

olarak ifade edilebilir. Burada, kaviteler arasındaki mod uyumsuzluğunu göstermek için ε terimi eklenmiştir. ε 'nin değeri 0.1-0.8 aralığındadır (Donati vd. 2005).

Bir diğer eşitlik, $n(t)$ taşıyıcı yoğunluk oran denklemi:

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\gamma n(t) - G(n) | E |^2 + R \quad (2.10)$$

Burada, γ taşıyıcı ömrünün tersi, $R = \frac{J}{ed}$ enjeksiyon kaynaklı taşıyıcı akım yoğunluğu artışı, J enjeksiyon akım yoğunluğu, e elektron yükü ve d aktif tabaka kalınlığıdır. $-\gamma n(t)$ terimi doğal salınım kaynaklı taşıyıcı kayıpları, $-G(n) |E|^2$ terimi uyarımlı salınım kaynaklı taşıyıcı kayıplarıdır (Meschede 2007).

Eşik değerindeki bir lazer diyotun taşıyıcı yoğunluğunu ifade eden n_{th} değerinin etrafında Δn kadar küçük değişimlerin olduğunu varsayılır ise kırılma indisinin değeri:

$$\eta(n) = \eta_{th} + \Delta n \frac{d\eta}{dn} \quad (2.11)$$

haline gelir. (2.11) denklemini kullanarak rezonans frekansı şu şekilde:

$$\omega_N = \omega_{th} - \frac{\omega_{th}}{\eta_{th}} \left(\Delta n \frac{d\eta}{dn} \right) \quad (2.12)$$

yazılabilir. Benzer olarak optik kazanç ise:

$$G(n) = G_{th} + \Delta n \frac{dG}{dn} \quad (2.13)$$

olarak ifade edilebilir. Lazer diyotun eşik değerine yakın değerlerde kazanç, kavitedeki kayıplar ile eş değerde olduğu için,

$$\Delta n = (G(n) - \Gamma_0) \frac{1}{\frac{dG}{dn}} \quad (2.14)$$

olarak yazılabilir. Bu eşitliği (2.12)'de yerine koyarsak,

$$\omega_N = \omega_{th} + \frac{a(G(n) - \Gamma_0)}{2} \quad (2.15)$$

elde edilir. Burada, a çizgi fonksiyonu genişleme faktörü olup

$$a = -\frac{2\omega_{th}}{\eta_{th}} \left(\frac{\frac{d\eta}{dn}}{\frac{dG}{dn}} \right) \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eşik değerine göre frekans farkı $\omega_N(n)$, $(\omega_N - \omega_{th})$ olarak yazılabilir. Bu durumda (2.1) denkleminin yeni hali:

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{1}{2(1 + ia)G_n(n(t) - n_{th})E(t)} + \kappa E(t - \tau)e^{i\omega_0(t-\tau)} \quad (2.17)$$

olur. Burada, $G_n = \frac{dG}{dn}$ ve $G_n(n(t) - n_{th}) = G(n) - G_0$ dir. $E(t)$ genlik ve faz bileşenleri ile birlikte yazılır ise:

$$E(t) = E_0(t)e^{i\varphi(t)} \quad (2.18)$$

elde edilir. Bu eşitlik (2.17)'de ki Lang Kobayashi denkleminde yerine yazılır ise:

$$\frac{dE_0(t)}{dt} = \frac{1}{2}G_n(n(t) - n_{th})E_0(t) + \left(\frac{\kappa}{\tau_c}\right)E_0(t - \tau) \cos(\omega_0\tau + \varphi(t) - \varphi(t - \tau)) \quad (2.19)$$

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{a}{2}G_n(n(t) - n_{th}) + \left(\frac{\kappa E_0(t - \tau)}{\tau_c E_0(t)}\right) \sin(\omega_0\tau + \varphi(t) - \varphi(t - \tau)) \quad (2.20)$$

denklemleri elde edilir. Böylece Lang-Kobayashi tarafından bir hedefe çarpıp lazere geri dönen ışığın lazer kavitesindeki dinamiklerini tanımlayan denklemler türetilmiş oldu. Bu denklemler:

$$\frac{dE_0(t)}{dt} = \frac{1}{2}G_n(n(t) - n_{th})E_0(t) + \left(\frac{\kappa}{\tau_c}\right)E_0(t - \tau) \cos(\omega_0\tau + \Delta(t)) \quad (2.21)$$

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{a}{2} G_n(n(t) - n_{th}) + \left(\frac{\kappa E_0(t - \tau)}{\tau_c E_0(t)} \right) \sin(\omega_0 \tau + \Delta(t)) \quad (2.22)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{n(t)}{\tau_e} - G_n(n(t) - n_{th}) |E|^2 + R \quad (2.23)$$

dir. Burada, taşıyıcı ömrü $\frac{1}{\tau_e} = \gamma$ eşittir. Bu türetilen denklemler ile bileşke kavitenin kararlı durumda çıkış gücü P ve faz \mathcal{X}_F bulunabilir.

Bileşke kavitenin kararlı durumunda, $E_0(t) = E_0(t - \tau) = E_s$, $n(t) = n_s$ ve $\varphi(t) = (\omega_s - \omega_0)t$ 'dir. $E_0(t)$ sabit değerde olduğu için (2.21) denklemi sıfıra eşitlenebilir. Bu durumda:

$$n_s = n_0 - \frac{2\kappa}{G_n \tau_c} \cos[\omega_s \cdot \tau] \quad (2.24)$$

olacaktır. Bu denklemde, geri yansiyarak lazer kavitesine giren ışığın optik alanın taşıyıcı modülasyonuna neden olduğu bilinmektedir. Bu eşitliği (2.22)'de yerine koyarsak,

$$\omega_s = \omega_0 - \frac{\kappa}{\tau_c} \{a \cdot \cos[\omega_s \cdot \tau] + \sin[\omega_s \cdot \tau]\} \quad (2.25)$$

denklemini elde edilir. Bu denklem sadeleştirilirse,

$$\omega_s = \omega_0 - \frac{\kappa}{\tau_c} \sqrt{1 + a^2} \cdot \sin[\omega_s(\tau) \cdot \tau + \text{atan}(a)] \quad (2.26)$$

şeklinde yazılabilir. (2.26) denklemindeki açısal frekans teriminin, faz cinsinden ifadesi,

$$\omega_s \cdot \tau = \omega_0 \cdot \tau - \frac{\kappa \cdot \tau}{\tau_c} \sqrt{1 + a^2} \cdot \sin[\omega_s \cdot \tau + \text{atan}(a)] \quad (2.27)$$

$$x_0(t) = x_F(t) - C \cdot \sin[x_F(t) + \text{atan}(a)] \quad (2.28)$$

şeklinde yazılabilir. Burada,

$$x_0(t) = \omega_0 \cdot \tau \quad (2.29)$$

ve

$$x_F(t) = \omega_s \cdot \tau \quad (2.30)$$

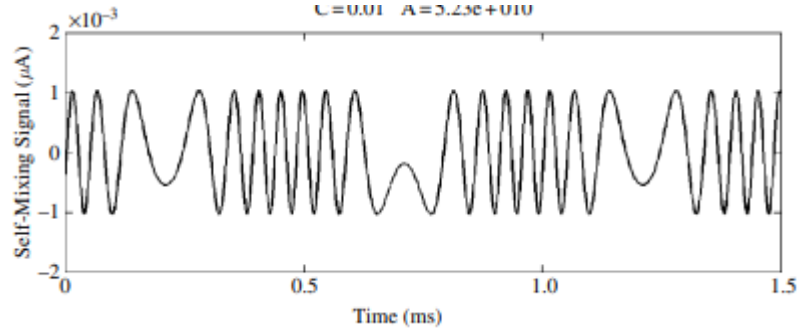
dir. Burada C, geri besleme parametresidir ve değeri:

$$C = \frac{\kappa \cdot \tau}{\tau_c} \sqrt{1 + a^2} \quad (2.31)$$

Optik geri besleme interferometresinde, lazer içine geri dönen ışının oluşturduğu girişim, genellikle geri besleme parametresi C'nin aldığı değere göre değişmektedir (Donati vd. 2005, Bosch 2004). Bu değerlere göre durumlar:

i- $C \ll 1$ – Çok zayıf geri besleme durumu

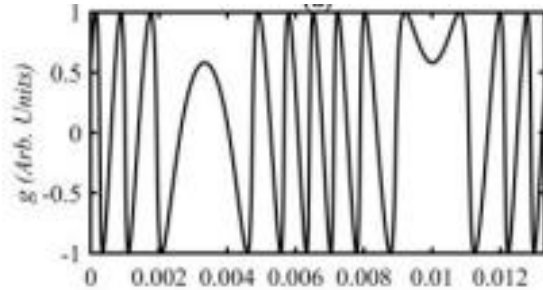
Fotodiyot tarafından ölçülen girişim sinyali, geri besleme sabiti çok küçük olduğu için sinüzoidal bir sinyaldir.



Şekil 2.2 Çok zayıf geri besleme durumunda ($C \ll 1$) optik geri besleme sinyali (Giuliani vd. 2002)

ii- $0.1 < C < 1$ – Zayıf geri besleme durumu

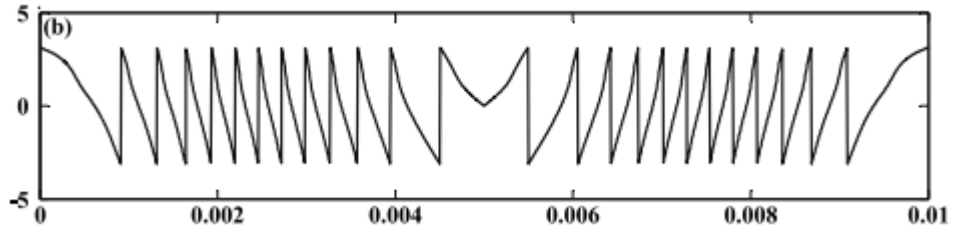
Fotodiyot tarafından ölçülen girişim sinyali bozuk yapıda sinüzoidaldir ve her sinyal birbirinden farklıdır, iki sinyal arasında simetri yoktur.



Şekil 2.3 Zayıf geri besleme durumunda optik geri besleme sinyali (Yu vd. 2016)

iii- $1 < C < 4.6$ – Orta şiddetli geri besleme durumu

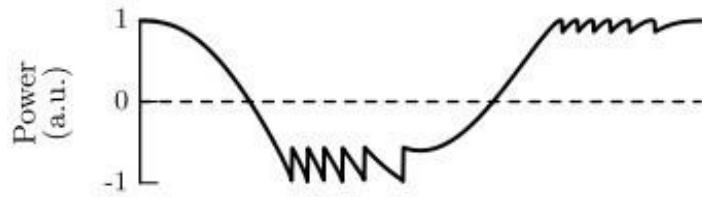
Girişim sinyali, fazın belli değerleri için üç değerli hale gelir; yani sistem iki kararlı ve bir kararsız durumla kararlı hale gelir ve sinyal testere dişi haline histerezis sergiler.



Şekil 2.4 Orta şiddetli geri besleme durumunda optik geri besleme sinyali (Zhang vd. 2019)

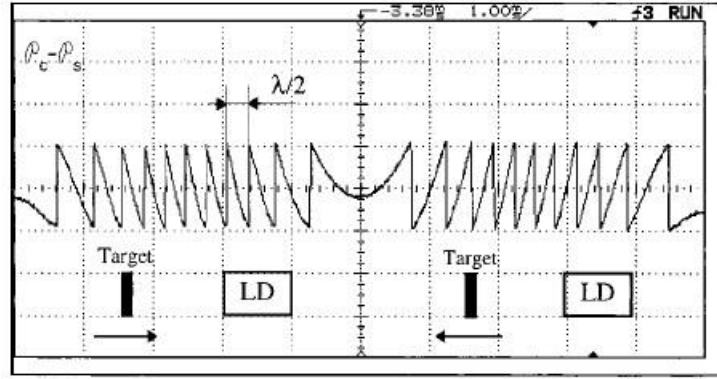
iv- $C > 4.6$ – Şiddetli geri besleme durumu

Girişim sinyali beş değerli hale gelebilir. Lazer diyot mod atlamalı rejime girer. Girişim sinyali bozulmaya başlar ve sinyal ölçümü mümkün olmaz.



Şekil 2.5 Şiddetli geri besleme durumunda optik geri besleme sinyali

Optik geri besleme interferometrilerinde lazer diyottan çıkan ışık, dış kavitede ilerleyerek titreşen hedefe çarpmakta ve yansyarak tekrar iç kaviteye girerek girişim oluşturmaktadır. Bu oluşan girişime örnek **şekil 2.6**'daki gibidir.



Şekil 2.6 Optik geri besleme interferometrisi deneysel dalga formu (Bosch vd., 2001)

Şekil 2.6’da görülen testere diş şeklindeki saçakların sayısı (N), saçakların eğimi ve saçaklar arası mesafe ($\lambda/2$) titreşen cismin titreşme miktarına bağlıdır. Bu şekildeki testere diş formundaki sinyallerin eğimleri, titreşen hedefin yönü hakkında bilgi vermektedir. Testere dişi benzeri dalga formunun eğimi, hedef hareket yönünü değiştirdiğinde tersine döner (Shimizu 1987). Bu nedenle, bu özellik titreşen cismin hareket yönünün tespiti için kullanılabilir.

2.2 Ölçüm ve Sensör Uygulamaları

2.2.1 Yer değiştirme

Hareket eden bir hedefin yer değiştirmesinin tespit edilebilmesi ve ölçülmesi için kullanılan tekniklerden biri de geri besleme interferometresidir. Bu uygulama için lazer diyot sabit bir akımla çalıştırılır. Lazer diyotun ışığının yansıtılarak tekrar lazer kavitesine dönmesi için yansıtıcı, retro reflektif veya dağıtıcı (yani pürüzlü yüzey) olabilen bir lens kullanılabilir. Hedef yüzeyi yansıtıcı özellikte ise (örn. Ayna), bu durumda aşırı optik geri besleme durumunu önlemek için ışık yolu boyunca bir ışık kırıcı koymak gerekir. Temel bir optik geri besleme interferometre sensörü, (2.32) denklemi göz önüne alınarak, elde edilen sinyallerdeki saçak sayıları basit bir şekilde sayılarak $\lambda/2$ hassasiyette ölçüm yapılabilir. Örneğin dalga boyu 970 nm olan bir lazer diyot kullanılırsa 485 nm hassasiyetle yer değiştirme tespit edilebilir.

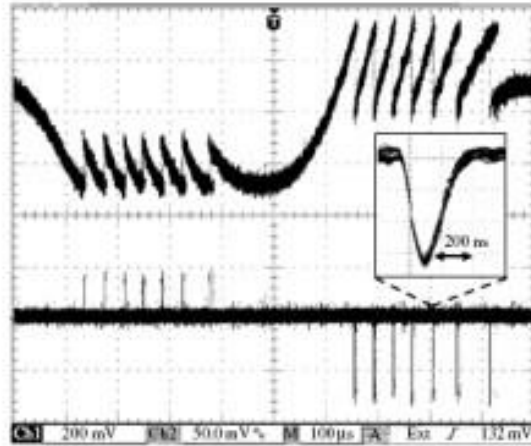
$$F(\phi) = \cos[\omega_F(\phi)\tau_{ext}] = \cos\left[\frac{\omega_F(\phi)\phi\lambda}{2\pi c}\right] \quad (2.32)$$

Bu denklem, modülasyon denklemi $F(\phi)$ 'dir ve

$$\phi = 2\pi\nu\tau = \frac{4\pi L}{\lambda} \quad (2.33)$$

dir. Burada ϕ girişim fazı, λ serbest çalışma koşulu altında lazer dalga boyu ve L lazer ile hedef arasındaki mesafenin uzunluğudur.

Optik geri besleme interferometrisi ile yer değiştirme ölçümü yapmanın en basit yolu, lazer diyotu orta şiddetli geri besleme rejimi ($1 < C < 4.6$) altında çalıştırmaktır. Bu rejimde sinyal testere dişine benzer durumdadır ve yönü ayırt etmek oldukça basittir.



Şekil 2.7 Optik geri besleme interferometrisi ile yer değiştirme ölçümünün osiloskop görüntüsü ve türevi (Giuliani vd. 2002)

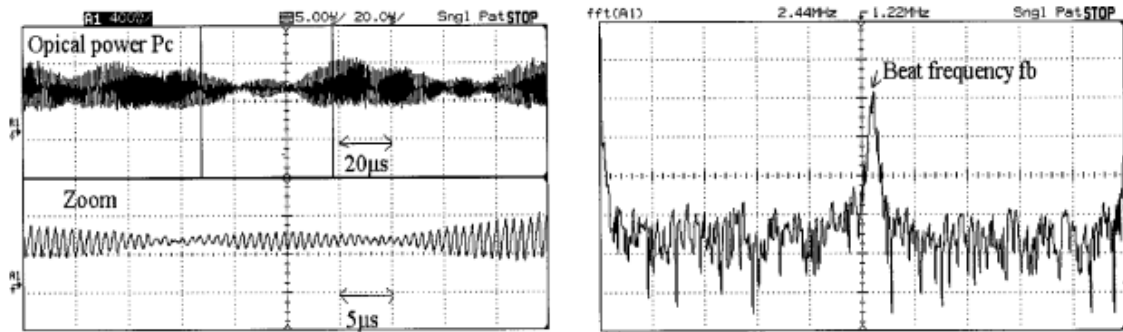
Şekil 2.7’de yer değiştirme ölçümünden elde edilen testere dişi benzeri optik geri besleme interferometrisi sinyalinin bir örneğini göstermektedir.

2.2.2 Hız ölçümü

Optik geri besleme interferometresi ile hareketli bir hedefin hız ölçümü, denklem (2.34) yardımı ile Doppler kaymasından hesaplanabilir.

$$v_c = \frac{\lambda_s}{2} f_b \quad (2.34)$$

Bu eşitlikte, f_b Doppler frekansıdır. Optik geri besleme interferometresi girişim sinyali ve FFT sinyal işleme aracılığı ile elde edilmiş sinyallerin osiloskop çıktıları **şekil 2.8**'de görülmektedir (Giuliani vd. 2002). Elde edilen FFT sinyalleri kullanılarak hesaplanan f_b değeri, (2.34) eşitliğinde yerine konularak hedefin hızı hesaplanabilir.



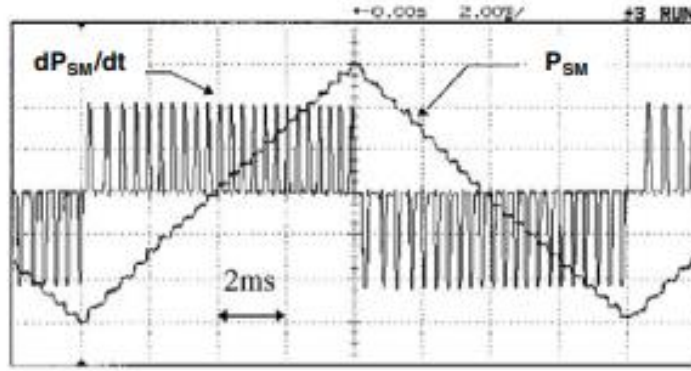
Şekil 2.8 Optik geri beslemeli girişim sinyali ve FFT analizi (Giuliani vd. 2002)

2.2.3 Mesafe ölçümü

Lazer diyot tabanlı optik geri besleme interferometre sisteminin diğer interferometrelere göre başka bir avantajı, bir hedefin mesafesinin basit bir şekilde ölçülmesidir. Optik geri besleme interferometre ile mutlak mesafe ölçümü yapmak için testere diş benzeri girişim sinyalinin türevini alınarak oluşturulan darbeli bir şema kullanılmalıdır.

Lazer diyot gücü üçgensel olarak modüle edilmelidir ve ek olarak dalga sayısı $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\Delta k = -\frac{2\pi\Delta\lambda}{\lambda^2}$ kadar değişeceği için sinyal de bu miktarda kayacaktır. Bilinen bir dalga boyu değişimi λ için meydana gelen interferometrik saçakların sayısı N sayılarak, hedef mesafe şu şekilde elde edilir:

$$s = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda} N \quad (2.35)$$



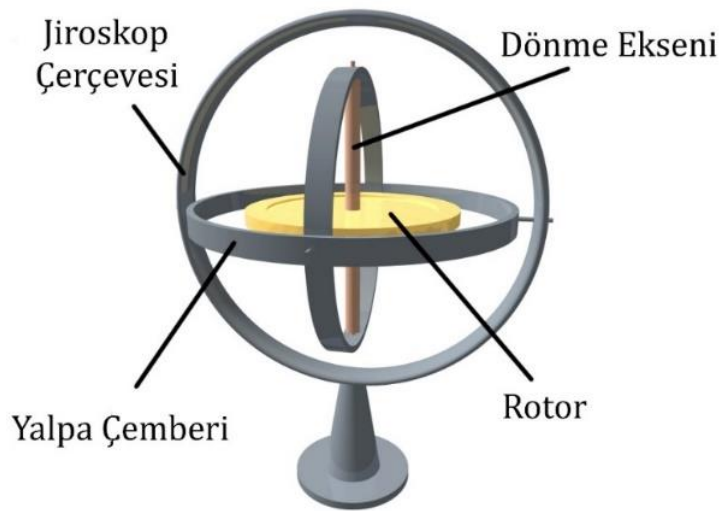
Şekil 2.9 Bir FP LD'da mutlak mesafe ölçümü için optik geri besleme sinyali ve türevleri (Giuliani vd. 2002)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan cihazlar ve yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. CAB 690-R balans cihazının çalışma mantığı, lazer ve fotodiyotların bu cihaza uyarlanması ve yükseltici kartların bağlantısı açıklanmıştır. Ek olarak, bu çalışmada kullanılan iki yöntemin çalışma prensipleri gözden geçirilmiştir. Bu nedenle dinamik balans makinesinin ve optik geri besleme interferometrisinin (OGBİ) ölçüm prensiplerini kısaca tartışılmıştır.

3.1 CAB 690-R Balans Makinesi

Mekanik jiroskoplar açısal momentum ve jiroskop kararlılık ilkelerine göre çalışmaktadır. Mekanik bir jiroskopun temel bileşeni çıkık veya rotordur. Bu rotor (**Şekil 3.1**), serbestçe dönmesine izin veren bir eksen üzerine monte edilmiştir. Rotor döndüğünde belli bir açısal momentuma sahiptir. Rotor, herhangi bir yönde dönmesine olanak veren bir sistem olan yalpa çemberleri içine monte edilmiştir. Jiroskop yönünü değiştirmeye çalışan bir dış kuvvetle karşılaştığında açısal momentumun korunumu nedeniyle jiroskop bu değişime direnir ve uygulanan kuvvete dik bir eksen etrafında dönerek tepki verir.

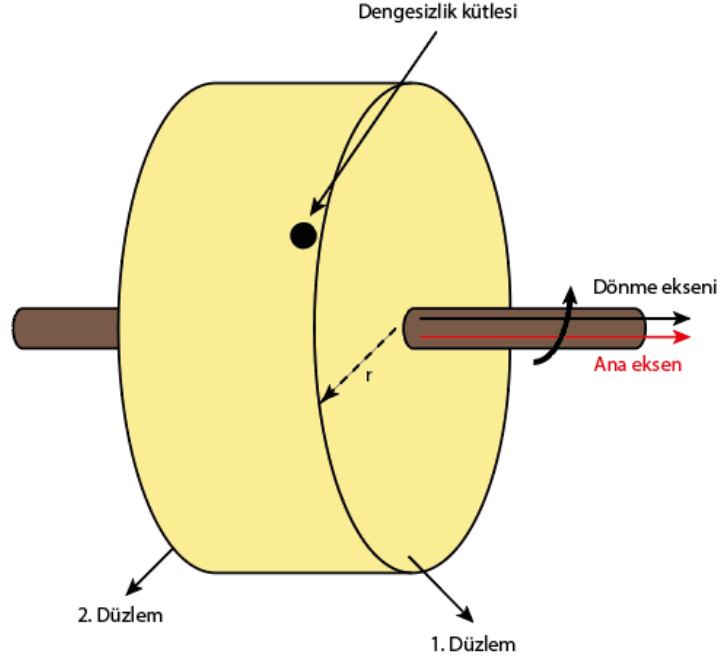


Şekil 3.1 Mekanik jiroskop

Jiroskoplar kullanıma bağlı olarak balansları zamanla bozulabilir. Jiroskop dengesizliği, jiroskop sistemin kütle veya kuvvetlerin eşit olmayan bir şekilde dağıldığı ve performansı üzerinde istenmeyen etkilere yol açtığı bir durumu ifade eder. Dengesizlik, jiroskop sistemde titreşimlere neden olarak sistemin kararlılığını ve doğruluğunu etkileyebilir. Titreşimler yapı boyunca yayılabilir ve diğer bileşenleri etkileyebilir; bu da potansiyel olarak ek aşınmaya neden olabilir ve jiroskopun ömrünü kısaltabilir. Bu nedenle jiroskoplardaki dönen rotorun belirli aralıklarla balans edilmesi gerekir. Balans işlemi için ilk olarak, balans kütlesi tespit edilmelidir.

Dengesizlik miktarı, dengesizlik kütlesi ile diskin yarı çapının çarpımı ile ifade edilebilir. **Şekil 3.2**'de görüldüğü gibi dönen jiroskop üzerindeki dengesiz kütle radyal yer değiştirmelere neden olmakta ve bu durum asal eksen ile dönme eksenini arasındaki uyumsuzluk nedeniyle jiroskopta yalpalamaya dönüşmektedir.

Bu tür jiroskopların dengesizliklerinin tespiti için üretilen Schenk marka, CAB 690-R model yatay dinamik dengeleme makinesi kullanılmaktadır (**Şekil 3.3**). Bu cihazda dinamik dengesizlik ölçümünü aynı anda iki farklı eksen üzerinde gerçekleştirilir. Cihazın platformuna iki noktadan sabitlenen mekanik jiroskop rotoru, dönmeye başladığında diskin dengesizliğinden dolayı platformu titreştirmeye başlar. Dönen disklerdeki dengesizliğin neden olduğu titreşim genlikleri, elektrik sinyalleri üreten yerleşik alıcılar tarafından ölçülür. Dengesizliğin miktarı (veya titreşim yer değiştirmesi) ve açısal konumu her iki düzlem için aynı anda gösterilir (Schenk). Dengesizliğin telafisi rotor kütlesinin delme veya kütle ekleme yoluyla yapılabilir, böylece titreşime neden olan kütle dengesizliği sönmelenmeye çalışılır. Dengeleme makinesi bir referans çerçevesi seçtikten sonra kalibrasyona başlar. Kalibrasyona dayalı denge ölçümü, düzlem 1 ve düzlem 2 olmak üzere iki düzlem tarafından gerçekleştirilir (**Şekil 3.2**). Bu nedenle sonuçlar bu iki düzlem için ayrı ayrı gösterilir.



Şekil 3.2 Dönen rotor kütle dengesizliği

Dönen disklerin (veya rotorların) μm cinsinden yer değiştirmesi veya eksantrikliği aşağıdaki formülle verilir (Schenk):

$$e (\mu m) = \frac{u (mg) \times r (mm)}{m (g)} \quad (3.5)$$

Burada, u miligram (mg) cinsinden dengesizlik kütesini, r milimetre (mm) cinsinden dönme ekseninden, dengesizlik kütesine olan uzaklığını (yani diskin yarıçapı), e dönen disklerin μm cinsinden yer değiştirmesi ve m gram (g) cinsinden dengelenecek rotor kütesini göstermektedir.

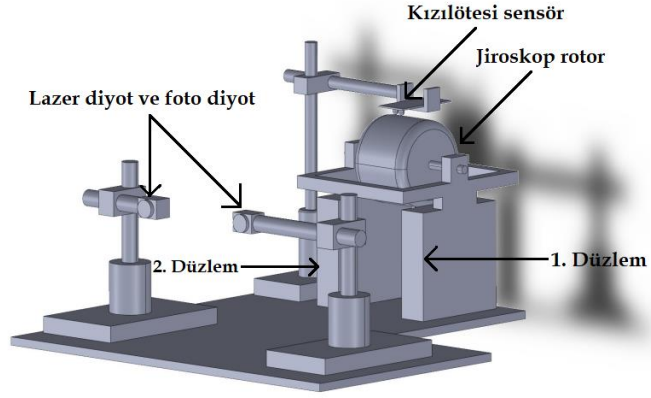
Jiroskoplar hassas alanlarda kullanıldığı için maksimum ölçüm hassasiyetine sahip olmalıdır ve bu nedenle çok hassas şekilde balans işlemi yapılmalıdır. Bu hassasiyeti sağlamak için disk belli rpm değerlerinin üzerinde dönmelidir. CAB 690-R cihazında balans işlemi yapabilmek için jiroskobun rotoru 18200 rpm'nin üzerinde olmalıdır. Bu rpm değerinde mikrometrik hassasiyet elde edilebilir.



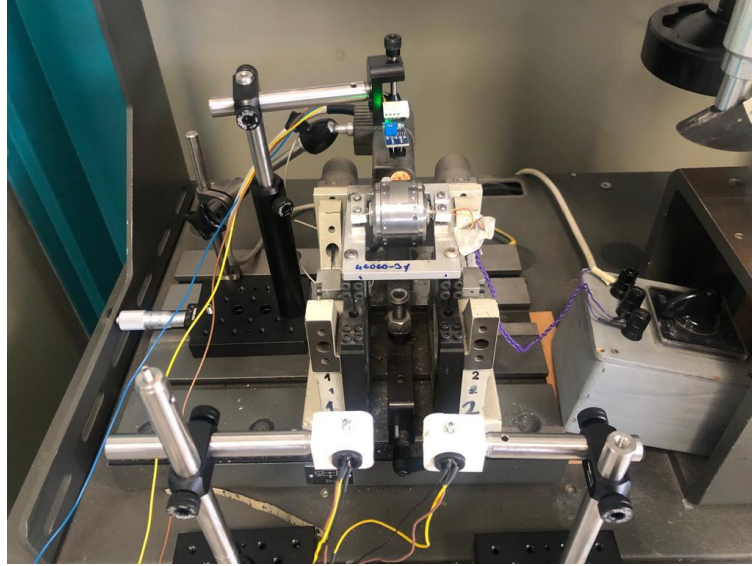
Şekil 3.3 CAB 690-R balans ölçüm ünitesi

3.2 Optik Geri Besleme ile Balans Ölçüm Sistemi

Optik geri besleme interferometrisi ile balans ölçümü uygulanması için CAB 690-R cihazının platformu kullanılmıştır. Sistemde lazer diyot olarak, 2 adet Thorlabs L785P090 lazer kullanılmıştır. Bu lazerin dalga boyu 970 nm'dir. Dengesizlik kütlelerinin disk üzerindeki açısal pozisyonunu derece olarak elde etmek için, TCRT5000 kızılötesi yansımaya sensör modülü kullanılmıştır. Lazerler balans cihazının platformundan 30 cm mesafeye konulmuştur. Lazerlerden biri 1. düzleme, diğer lazer ise 2. düzleme çarpıp yansıyarak lazer kavitesine girecek şekilde hizalama yapılmıştır.



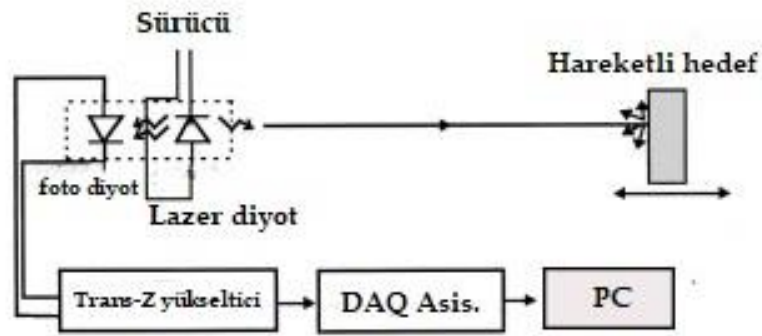
(a)



(b)

Şekil 3.4 Optik geri besleme interferometrisi dengesizlik ölçüm sistemi düzeneği
a) Deney düzeneği tasarımı, b) Deney düzeneği

Lazerler mekanik olarak sabitlendikten sonra, lazerin güç kabloları ve fotodiyot veri kabloları Trans-Z yükseltici kartına bağlanmaktadır. Bu kart, fotodiyotun çıkışını yükselterek daha anlaşılabilir veri, lazer kontrolü ve lazerin beslemesini sağlamaktadır. Diskin yer değiştirmesini tespit etmek için diskin üzerine 1 cm mesafeye TCRT50000 kızılötesi yansıma sensör modülü sabitlenmektedir. Bu modül disk dönmeye başladığı zaman diskin yüzeyindeki siyah ve beyaz konumları tespit ederek kare dalga şeklinde sinyal vermektedir. Bu sensör yardımı ile diskin açısal pozisyonu tespit edilmektedir.



Şekil 3.5 Optik geri besleme interferometrisi ölçüm sistemi için deney düzeneğinin blok diyagramı

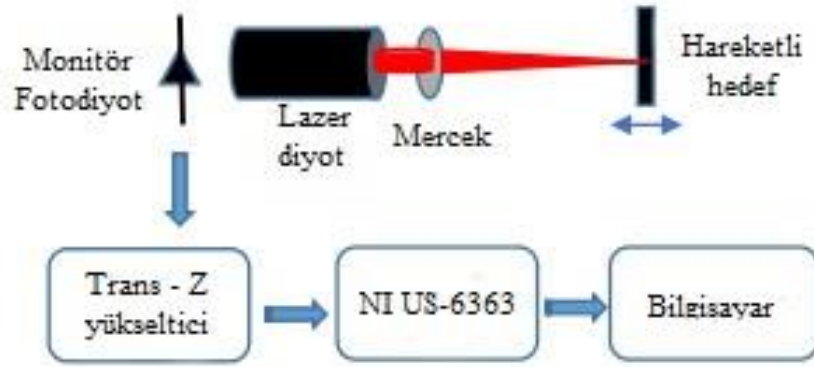
Mekanik kurulumun tamamlanmasının ardından yükseltici kartların ve kızılötesi sensör modülü çıkışlarından verilerin toplanması için sinyal veri toplama modülü (NI, USB-6363) kullanıldı. Bu modül USB kablosu yardımı ile bilgisayara bağlanarak Labview programı ile bağlantısı sağlandı. Labview'de gerekli kodlamalar yapılarak geri besleme interferometri ve yer değiştirme sinyalleri toplandı.

Optik geri besleme interferometrileri için yer değiştirme, elde edilen veriler incelenerek lazerin dalga boyunun yarısı ($\lambda/2$) çözünürlüğünde elde edilebilir. Bununla birlikte, çözünürlüğü lazerin yarı dalga boyundan çok daha iyi bir şekilde geliştirmek için faz açma yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır (Bernaş vd. 2013, Zabit vd. 2009).

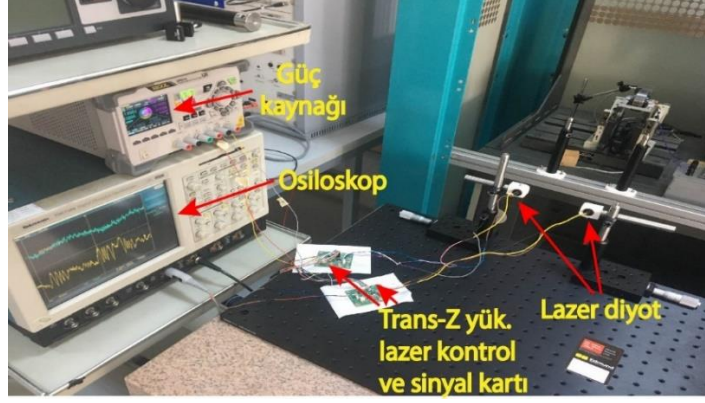
Faz açma, ölçülen faz değerlerinin belirli bir aralıkla sınırlı olduğu yaygın bir sorunu çözmek için sinyal işlemede kullanılan bir tekniktir. Belirli bir aralıktaki (örneğin $0, \pi$) elde edilen faz sinyaline, süreksizlik noktalarında 2π ekleme veya 2π çıkarma işlemi olarak tanımlanabilir. Faz açma işlemi için çeşitli yöntemler mevcuttur.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

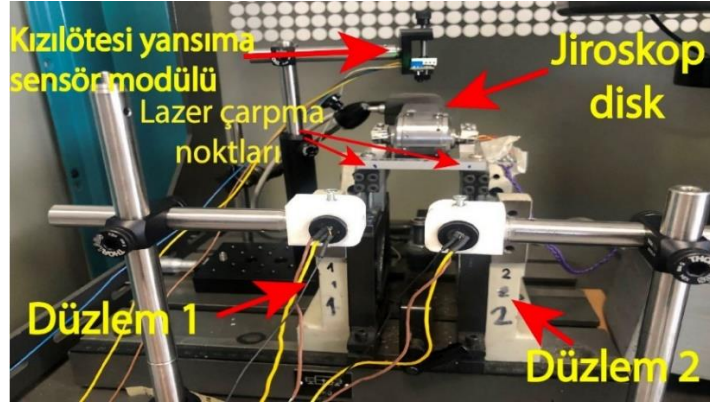
Şekil 4.1'de gösterilen optik geri besleme interferometre sistemi balans makinesine (CAB 690-R) entegre edilmiştir. Yatay olarak dönen jiroskop diski, CAB 690-R cihazının platformuna bağlanmıştır. Optik geri besleme interferometre düzeneği fiziksel olarak balans cihazına temas etmemektedir. Lazer diyotlardan çıkan ışıklar, jiroskop diskinin sabitlendiği yataklara çarpacak şekilde hizalanmıştır. Bu sistem **şekil 4.2**'de gösterilmektedir.



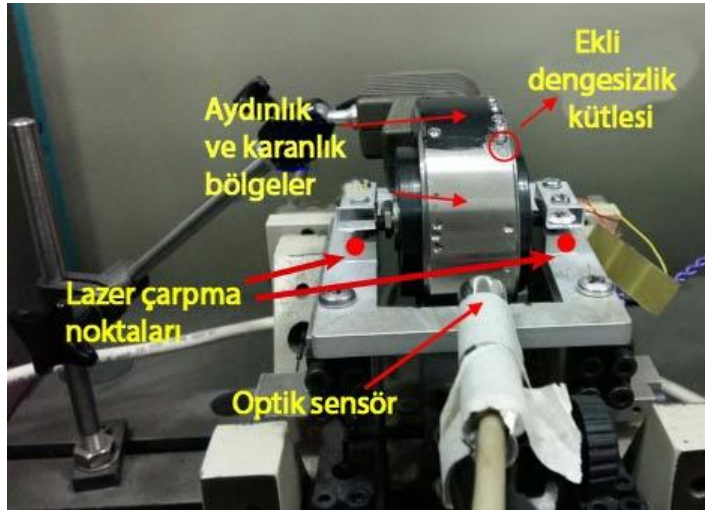
Şekil 4.1 Balans ölçümü için optik geri besleme interferometri düzeneği



(a)



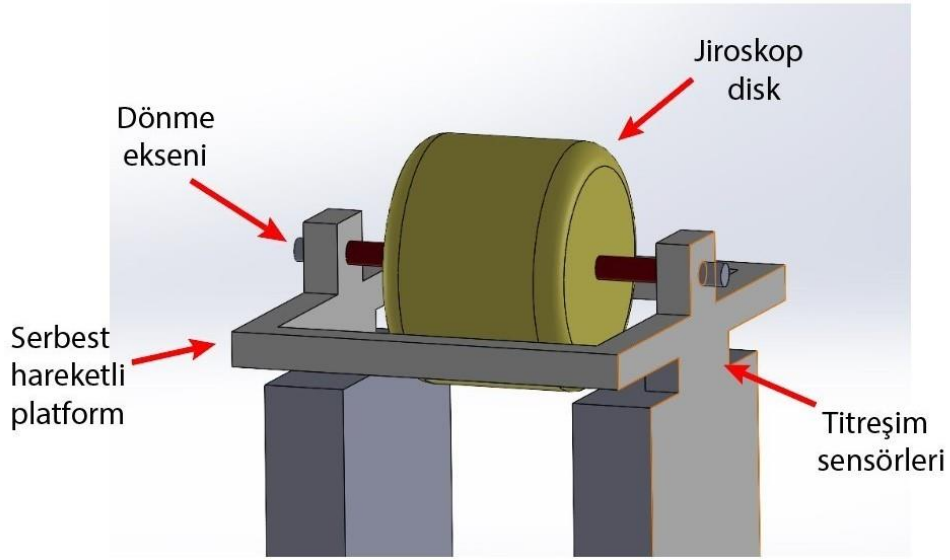
(b)



(c)

Şekil 4.2 Balans makinesi ve Optik geri besleme interferometri deney düzeneği

Balans edilmemiş bir jiroskop rotoru yatay olarak döndürülür ise, sahip olduğu dengesizlik kütlesi nedeni ile yalpalamaya başlar. Bu yalpalama, jiroskopun bağlı olduğu CAB 690-R cihazının platformunu titreştirmektedir (**Şekil 4.3**). CAB 690-R cihazının sahip olduğu sensörler ile titreşim ölçülmektedir. Ölçülen bu titreşim ile diskin dengesizlik kütlesinin miktarını ve sahip olduğu IR sensör ile açısız konumunun tespiti yapılmaktadır.



Şekil 4.3 CAB 690-R cihazı titreşim ölçüm sistemi

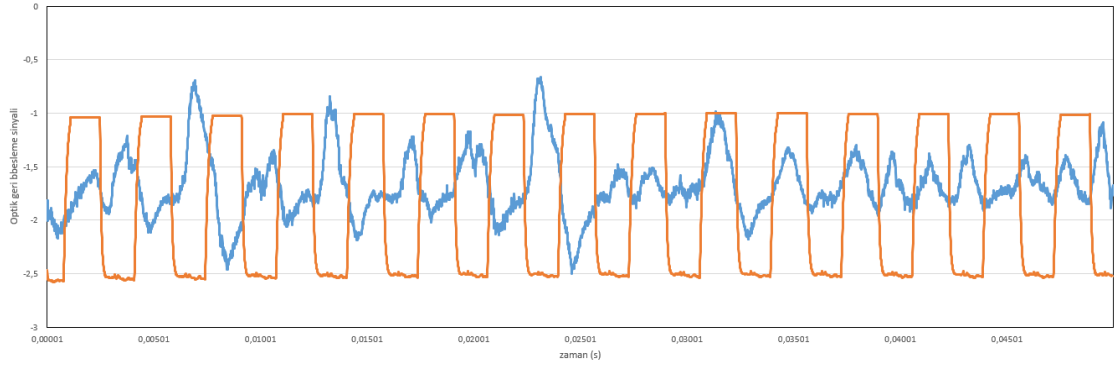
Bu deneyde kullanılan jiroskop diskinin kütlesi 580 g, yarıçapı ise 22.62 mm'dir. Ayrıca açısız konumun tespiti için diskin yarısı siyaha boyanmıştır. Fotoğraf tarama kafası, dönen disk üzerine mercek tarafından odaklanan bir ışık huzmesi yaymaktadır. Bu bilgi dengeleme makinesi tarafından dengesiz kütlenin açısız konumunu elde etmek için kullanılmaktadır. Bu deneyde de açısız konumun tespiti için benzer bir yöntem kullanılmaktadır. Bunun için TCRT5000 Kızılötesi Yansıma Sensör Modülünü sisteme entegre edilmiştir. Elde edilen dengesiz kütlenin açısız konumu ve optik geri besleme interferometre verileri, DAQ yardımı ile Labview tarafında 100 kHz frekans ile eş zamanlı olarak kaydedilmiş ve işlenmiştir. DaQ kaydı için gerekli Labview kodları **EK 1**'de yer almaktadır.



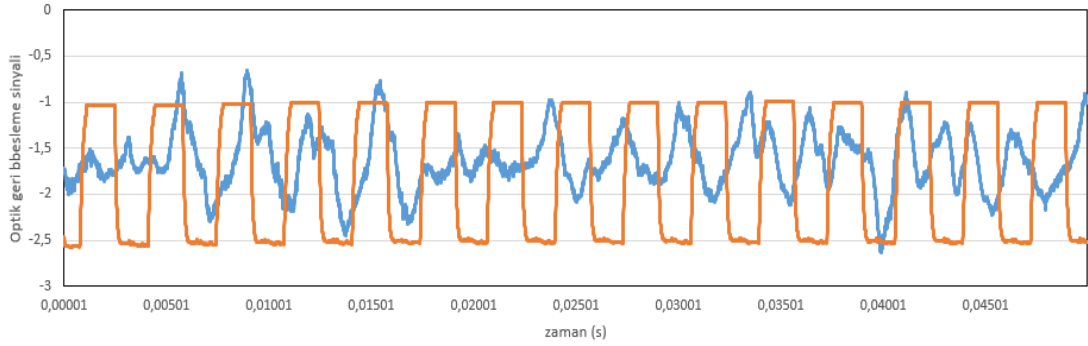
Şekil 4.4 National Instruments veri toplama cihazı (NI, USB-6363 Serisi)

4.1 Balans Edilmiş Jiroskop Disk Ölçümü

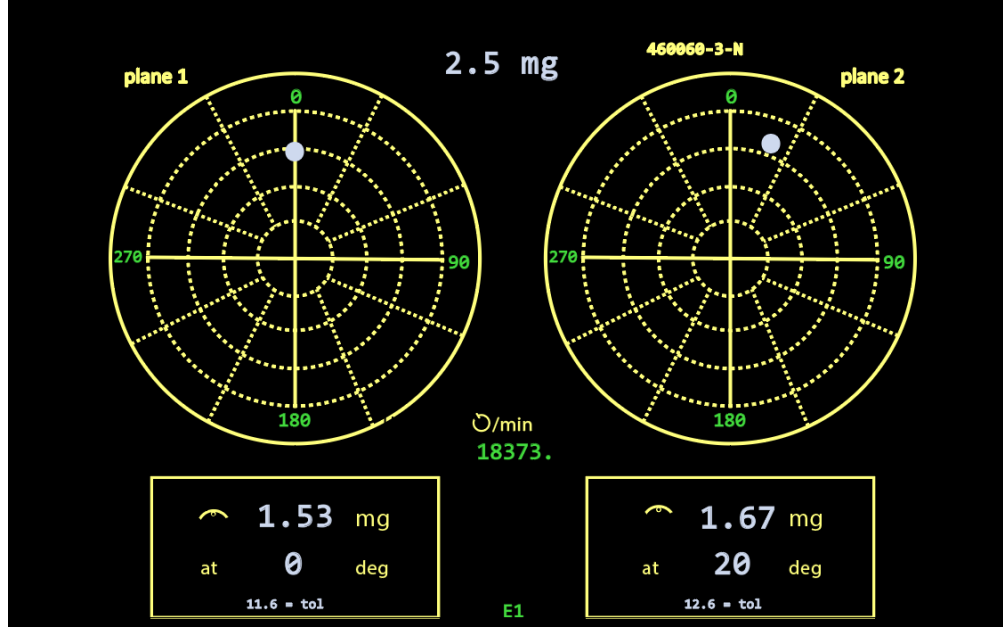
Ölçüm işlemine ilk olarak balans edilmiş bir jiroskop diskinden başlanmıştır. Balans cihazı ve optik geri besleme interferometrisi olmak üzere iki yöntemle dengesi ölçülmüştür. Elde edilen veriler incelendiğinde, sinyaller optik geri besleme interferometri gibi görünse bile olağan optik geri besleme interferometri sinyalleri gözlemlenememiştir. Bunun nedeni ölçüm alınan noktalarda bir titreşimin olmamasıdır. Optik geri besleme interferometri sonuçları **şekil 4.5** ve **şekil 4.6**'da, balans makinesi sonuçları **şekil 4.7**'de gösterilmektedir. Balans makinesinin ölçüm aralığı daha hassas olduğu için ihmal edilebilecek çok küçük miktarlardaki dengesizlikleri göstermektedir.



Şekil 4.5 1. düzlem için balans edilmiş jiroskop disk optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)



Şekil 4.6 2. düzlem için balans edilmiş jiroskop disk optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)



Şekil 4.7 Balans edilmemiş jiroskop diskinin 18000 rpm’de dengeleme makinesi ölçüm sonuçları

4.2 26-60 ve 60-26 Dengesizlik Kütlesine Sahip Jiroskop Disk Ölçümü

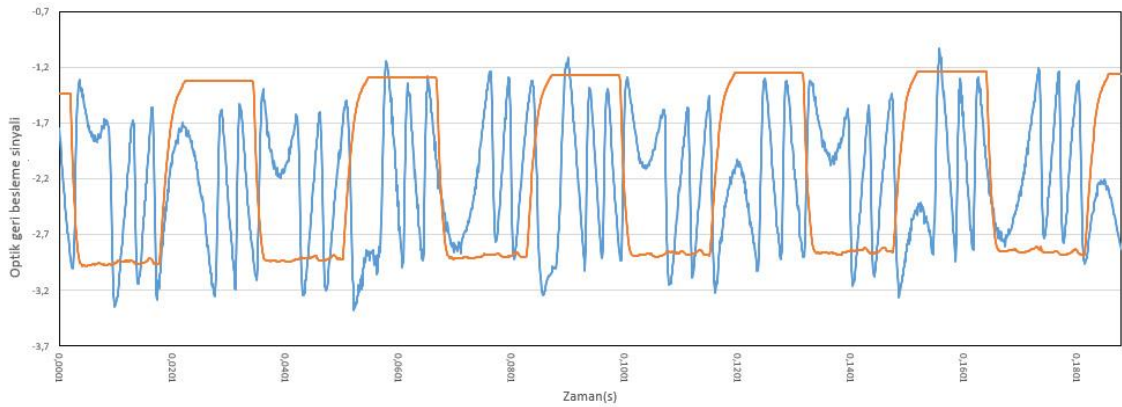
4.2.1 26-60 Dengesizlik kütlesine sahip jiroskop disk ölçümü

Bir sonraki deneyde, jiroskop diskinin bir tarafına 26 mg ve 226 derece açığa, diğer tarafına 60 mg ve 62 derece açığa olmak üzere 2 adet dengesizlik kütlesi eklenmiştir. 26 mg kütle 1. düzleme ve 60 mg kütle 2. düzleme gelecek şekilde sisteme monte edilmiştir. Disk döndürülerek 18000 rpm de veriler kaydedilmiştir. Kaydedilen veriler incelendiğinde yarım periyotta 1. düzlem için 2 adet tepe ve 2. düzlem için 5 adet tepe gözlenmiştir (Şekil 4.8-10).

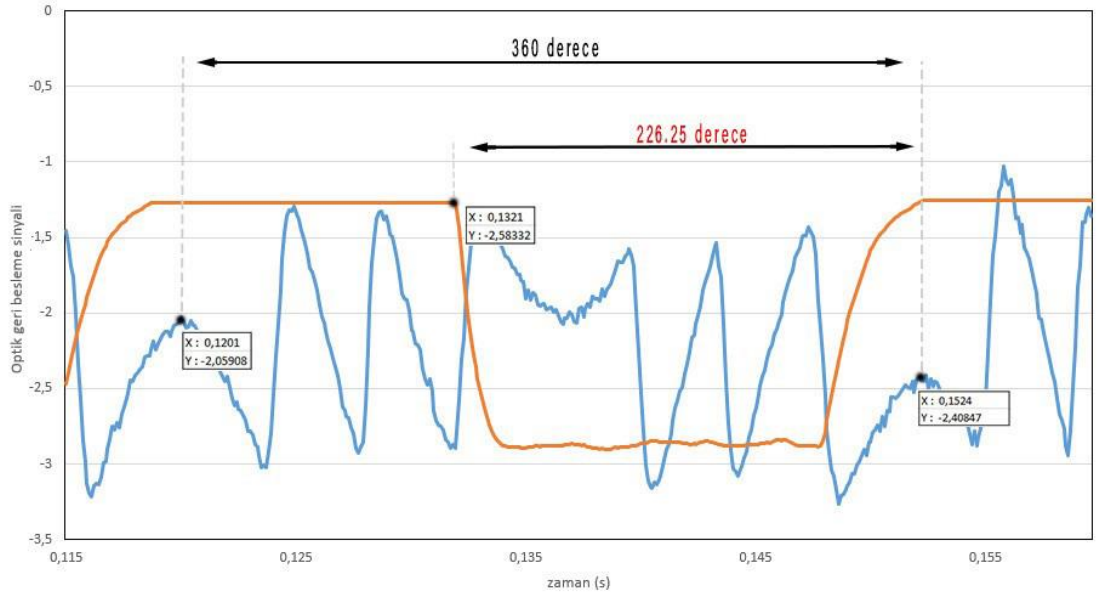
Dengesizlik kütlelerini hesaplamak için denklem 3.5’i kullanarak e 'yi (dış merkezlik) bulabiliriz. Bunu bulmak için tepe sayısını $\lambda/2$ ile çarpıyoruz; burada λ , 0.970 μm 'dir. Denklem 3.5’i kullanarak, 1. düzlem için dengesizlik kütlesi 25 mg $((2*0.970/2)*580)/22.62$ olarak ve 2. düzlem için dengesizlik kütlesi 62.18 mg $((5*0.970/2)*580)/22.62$ olarak bulunmuştur. Şekil 4.12’de gösterildiği gibi balans makinesi tarafından bulunan 1. düzlem için 26.4 mg ve 2. düzlem için 60.7 derece değerlerine çok yakındır. İki değer

arasındaki farklılığın denge ölçümündeki artık ofset değerinden ve kullanılan lazer dalga boyuna göre değişen optik geri besleme interferometri hassasiyetinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Turuncu eğri siyah ve beyaz bölgeleri verir (**Şekil 4.9**). Dengesiz kütlenin açı konumunu ölçmek için optik geri besleme interferometri sinyalleriyle kare birleşen optik sensör verilerinden yararlanılmaktadır. Her iki veri de veri toplama ünitesi tarafından eş zamanlı olarak alınır. 1. düzlem için optik geri besleme interferometri sinyalinin bir tam dalga oluşumu için (yani bir tepeden diğer tepeye ya da bir çukurdan diğer çukura) geçen süre 360 dereceye karşılık gelir. **Şekil 4.9**'da iki tepe arası zaman farkı 0.0323 saniyeye karşılık gelir. Kare sinyalin düşen kenarı sıfır dereceye karşılık gelir. Düşen kenar ile faz değişimi arasındaki zaman aralığı yaklaşık 0.0203 saniyedir. Bu durumda 0.0323 saniye 360 dereceye karşılık geliyorsa, 0.0203 saniye kaç derece karşılık geleceği ($360 \cdot 0.0203 / 0.0323$) işlemi çözülerek, dengesizlik kütlelerinin açısal konumu 226.25 derece olarak elde edilir. Bu değer, **şekil 4.9**'da gösterilmektedir ve **şekil 4.12**'nin sol tarafında gösterilen balans makinesi sonuçlarıyla tutarlıdır.

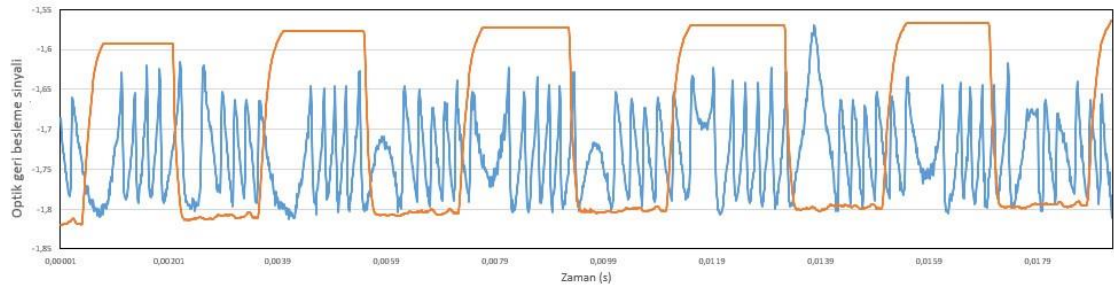


Şekil 4.8 1. düzlem için 26 mg dengesizlik kütlelerinde optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)

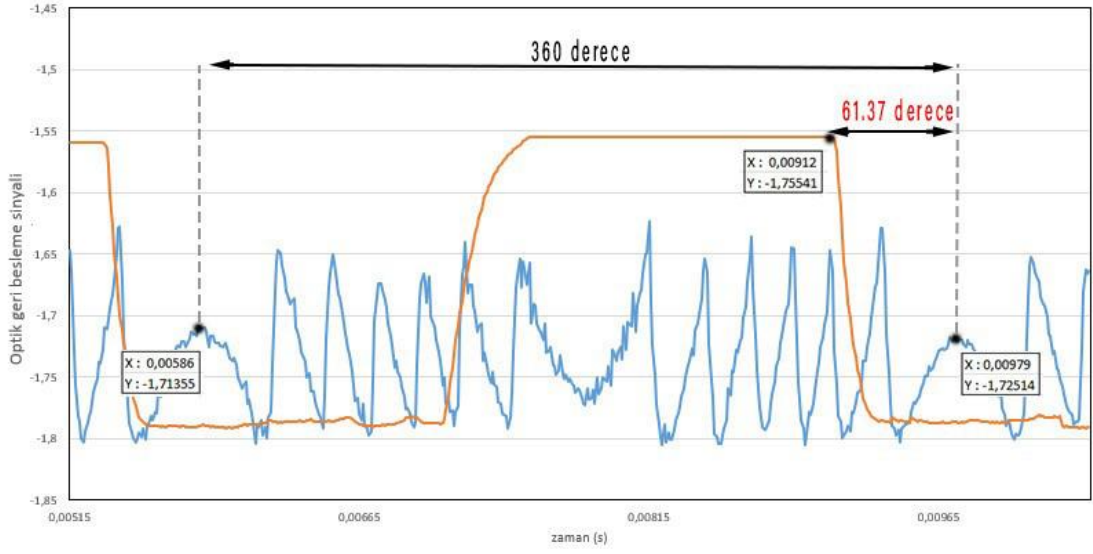


Şekil 4.9 1. Düzlem ve 26 mg dengesizlik kütlesi için açısal konumunun hesaplanması (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)

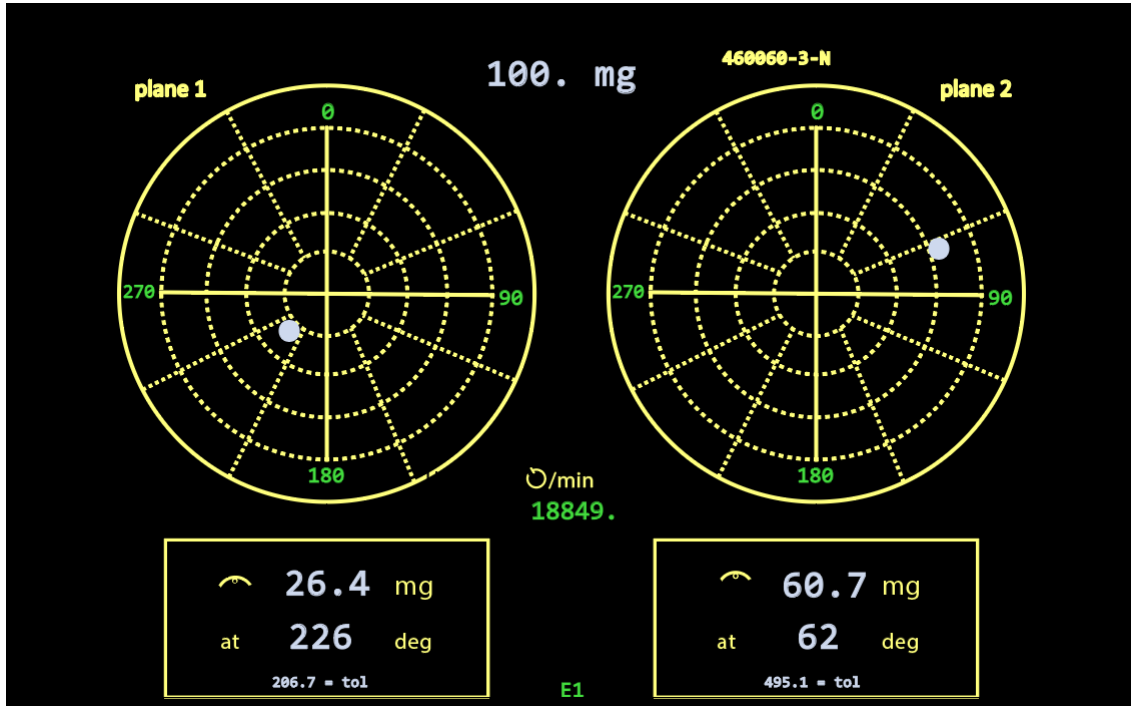
2. düzlem için optik geri besleme interferometri sinyalinin bir tam dalga oluşumu için geçen süre 0.0393 saniyeye karşılık gelir. Düşen kenar ile faz değişimi arasındaki zaman aralığı yaklaşık 0.00067 saniyedir. Bu değerde 61.37 dereceye karşılık gelir ve **şekil 4.11**'de gösterilmektedir. **Şekil 4.12**'nin sağ tarafında gösterilen balans makinesi sonuçlarıyla tutarlıdır.



Şekil 4.10 2. düzlem için 60 mg dengesizlik kütlesinde optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)



Şekil 4.11 2. düzlem ve 60 mg dengesizlik kütlesi için açısal konumunun hesaplanması (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)



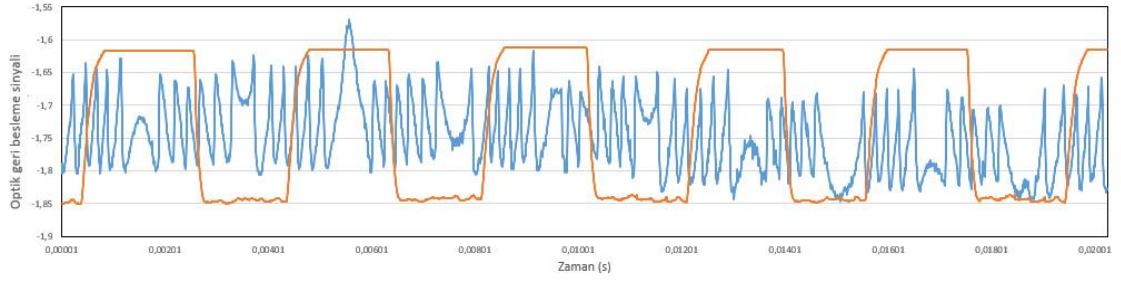
Şekil 4.12 26 - 60 mg dengesizlik kütlesine sahip jiroskop diskinin 18000 rpm'de dengeleme makinesi ölçüm sonuçları

4.2.2 60-26 Dengesizlik kütlesine sahip jiroskop disk ölçümü

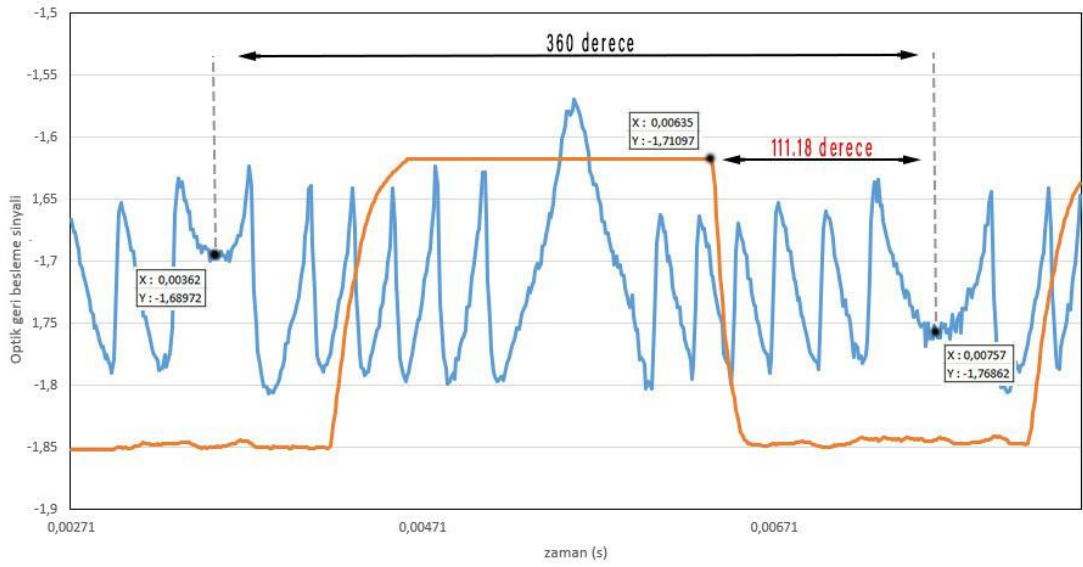
Deney düzeneğinin tutarlılığını kontrol etmek için 1. düzlem için 112 dereceye 60 mg ve 2. düzlem için 310 dereceye 26.2 mg olmak üzere 2 adet dengesizlik kütlesi eklenmiştir. Disk döndürülerek 18000 rpm de veriler kaydedilmiştir. Kaydedilen veriler incelendiğinde yarım periyotta 1. düzlem için 5 adet tepe ve 2. düzlem için 2 adet tepe gözlenmiştir.

Dengesizlik kütlelerini hesaplamak için denklem 3.5'i kullanarak e 'yi (dışmerkezlik) bulabiliriz. Bu değeri bulmak için tepe sayısını $\lambda/2$ ile çarpıyoruz ve burada λ , 0,970 μm 'dir. Denklem 3.5'i kullanarak, 1. düzlem için dengesizlik kütlesi 62.18 mg $((5*0,970/2)*580)/22,62$ olarak ve 2. düzlem için dengesizlik kütlesi 25 mg $((2*0.970/2)*580)/22,62$ olarak bulunmuştur. **Şekil 4.17**'de gösterildiği gibi balans makinesi tarafından bulunan 1. düzlem için 60.3 mg ve 2. düzlem için 26.2 mg değerlerine çok yakındır. İki değer arasındaki farklılığın dengeli ölçümdeki artık ofset değerinden ve kullanılan lazer dalga boyuna göre değişen optik geri besleme interferometri hassasiyetinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

1. düzlem için optik geri besleme interferometri sinyalinin bir tam dalga oluşumu için geçen süre 360 dereceye yani 0.0395 saniyeye karşılık gelir. Düşen kenar ile faz değişimi arasındaki zaman aralığı yaklaşık 0.00122 saniyedir. Bu değerde 111.19 dereceye karşılık gelir. Bu değer, **şekil 4.14**'de gösterilmektedir ve **şekil 4.17**'nin sol tarafında gösterilen balans makinesi sonuçlarıyla tutarlıdır.

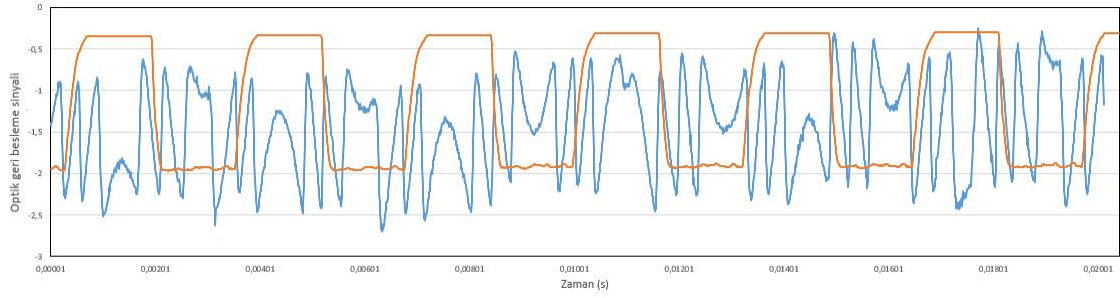


Şekil 4.13 1. düzlem için 60 mg dengesizlik kütleinde optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)

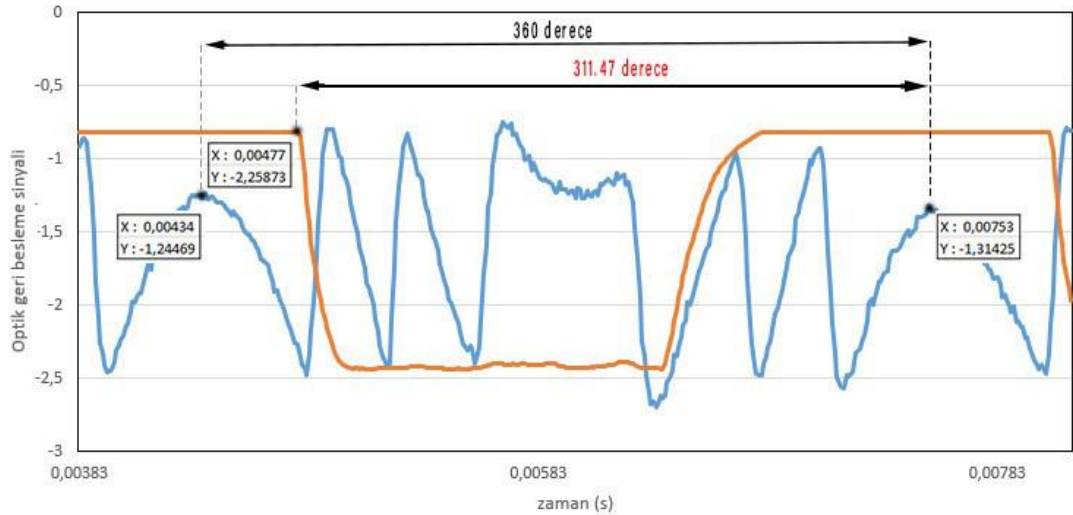


Şekil 4.14 1. düzlem ve 60 mg dengesizlik kütlesi için açısal konumunun hesaplanması (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)

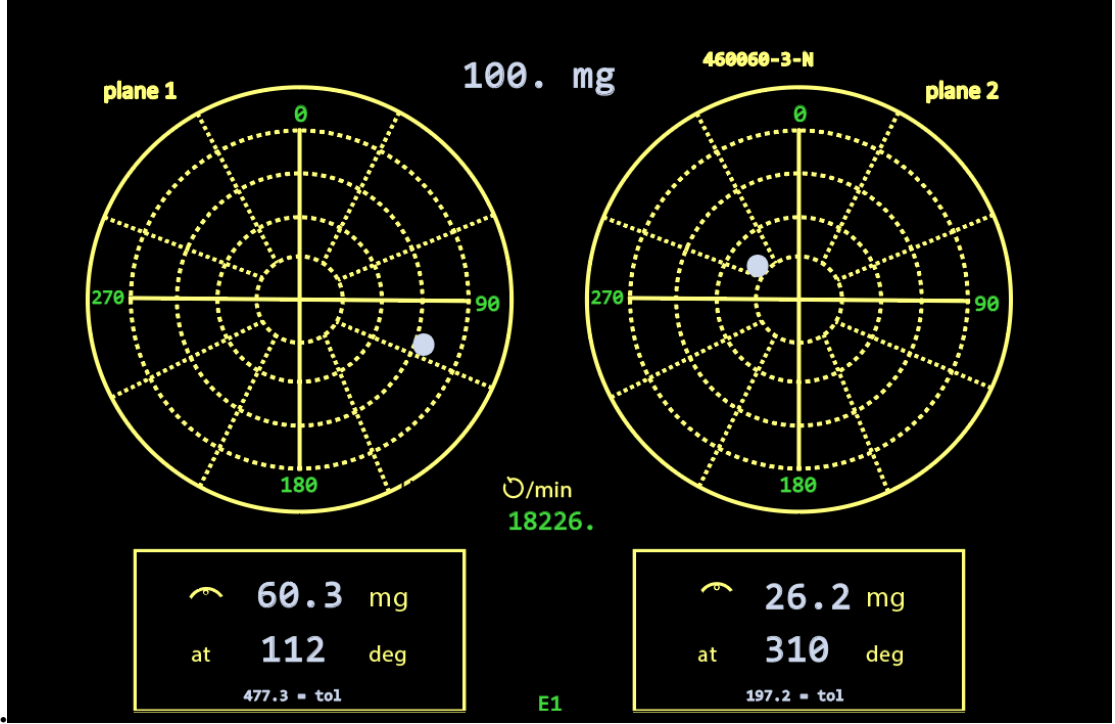
2. düzlem için optik geri besleme interferometri sinyalinin bir tam dalga oluşumu için geçen süre 0.0319 saniyeye karşılık gelir. Düşen kenar ile faz değişimi arasındaki zaman aralığı yaklaşık 0.00276 saniyedir. Bu değerde 311.47 dereceye karşılık gelir. Bu değerler, **şekil 4.16**'da gösterilmektedir ve **şekil 4.17**'nin sağ tarafında gösterilen balans makinesi sonuçlarıyla tutarlıdır.



Şekil 4.15 2. düzlem için 26 mg dengesizlik kütesinde optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)



Şekil 4.16 2. düzlem ve 26 mg dengesizlik kütesi için açısal konumunun hesaplanması (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)



Şekil 4.17 60 - 26 mg dengesizlik kütlesine sahip jiroskop diskinin 18000 rpm’de dengeleme makinesi ölçüm sonuçları

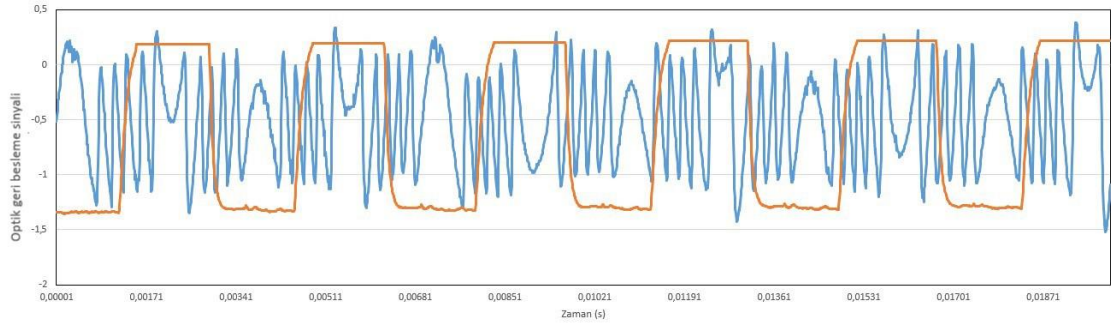
4.3 50-100 ve 100-50 Dengesizlik Kütlesine Sahip Jiroskop Disk Ölçümü

4.3.1 50-100 Dengesizlik kütlesine sahip jiroskop disk ölçümü

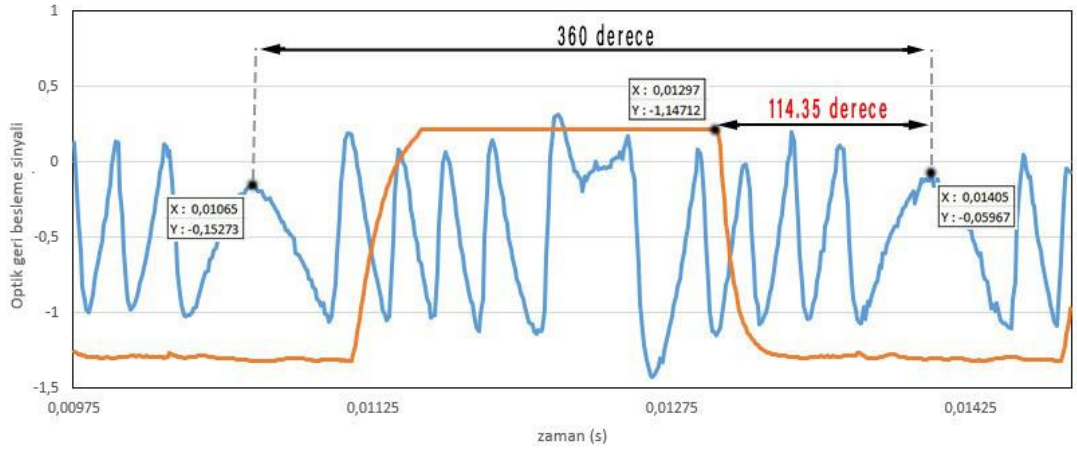
Bir sonraki deneyde, jiroskop diskinin bir tarafına 48.1 mg ve 115 derece açığa, diğer tarafına 96.3 mg ve 312 derece açığa olmak üzere 2 adet dengesizlik kütlesi eklenmiştir. 48.1 mg kütle 1.düzleme ve 96.3 mg kütle 2. düzleme gelecek şekilde sisteme monte edilmiştir. Disk döndürülerek 18000 rpm’de veriler kaydedilmiştir. Kaydedilen veriler incelendiğinde yarım periyotta 1. düzlem için 4 adet tepe ve 2. düzlem için 8 adet tepe gözlenmiştir.

Denklem 3.5'i kullanarak, 1. düzlem için dengesizlik kütlesi 49.74 mg ($((4 \cdot 0.970/2) \cdot 580)/22.62$) olarak ve 2. düzlem için dengesizlik kütlesi 99.49 mg ($((8 \cdot 0.970/2) \cdot 580)/22.62$) olarak bulunmuştur. **Şekil 4.22**'de gösterildiği gibi balans makinesi tarafından bulunan 1. düzlem için 50.1 mg ve 2. düzlem için 100 mg değerlerine çok yakındır. İki değer arasındaki farklılığın dengeli ölçümdeki artık ofset değerinden ve kullanılan lazer dalga boyuna göre değişen optik geri besleme interferometri hassasiyetinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

1. düzlem için optik geri besleme interferometri sinyalinin bir tam dalga oluşumu için geçen süre 0.0034 saniyeye karşılık gelir. Kare sinyalin düşen kenarı sıfır dereceye karşılık gelir. Düşen kenar ile faz değişimi arasındaki zaman aralığı yaklaşık 0.00108 saniyedir. Bu değer 114.35 dereceye karşılık gelir. Bu değer, **şekil 4.19**'da gösterilmektedir ve **şekil 4.22**'nin sol tarafında gösterilen balans makinesi sonuçlarıyla tutarlıdır.

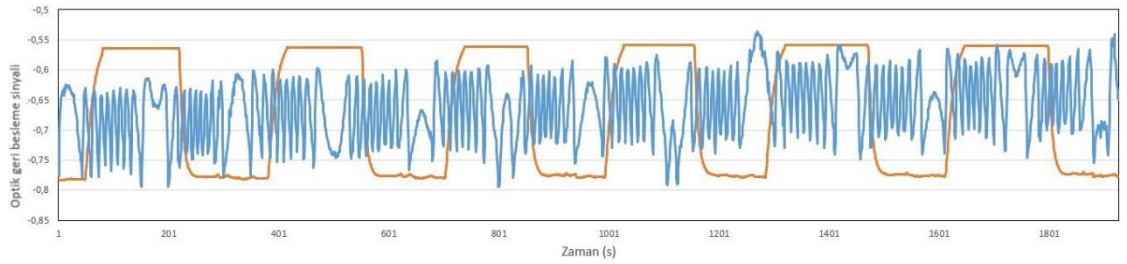


Şekil 4.18 1. düzlem için 50 mg dengesizlik kütlesinde optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)

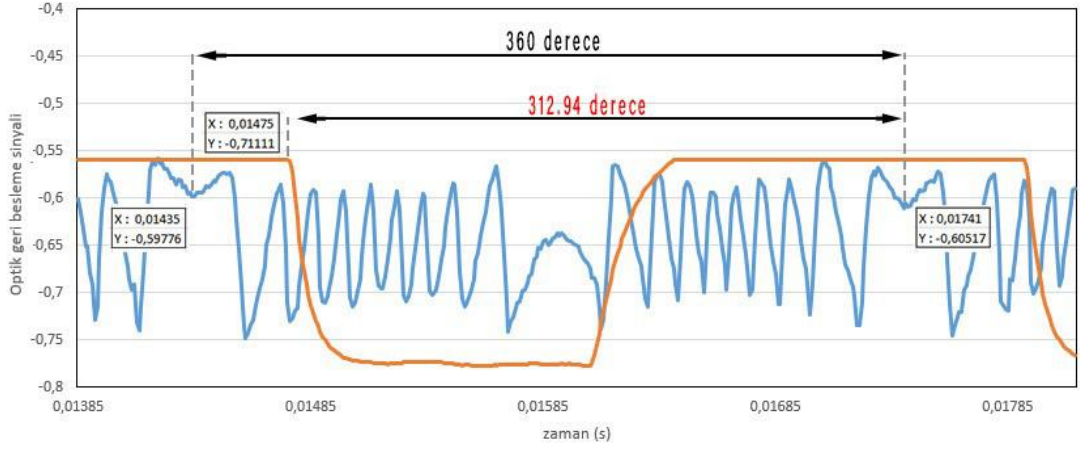


Şekil 4.19 1. düzlem ve 50 mg dengesizlik kütlesi için açısal konumunun hesaplanması (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)

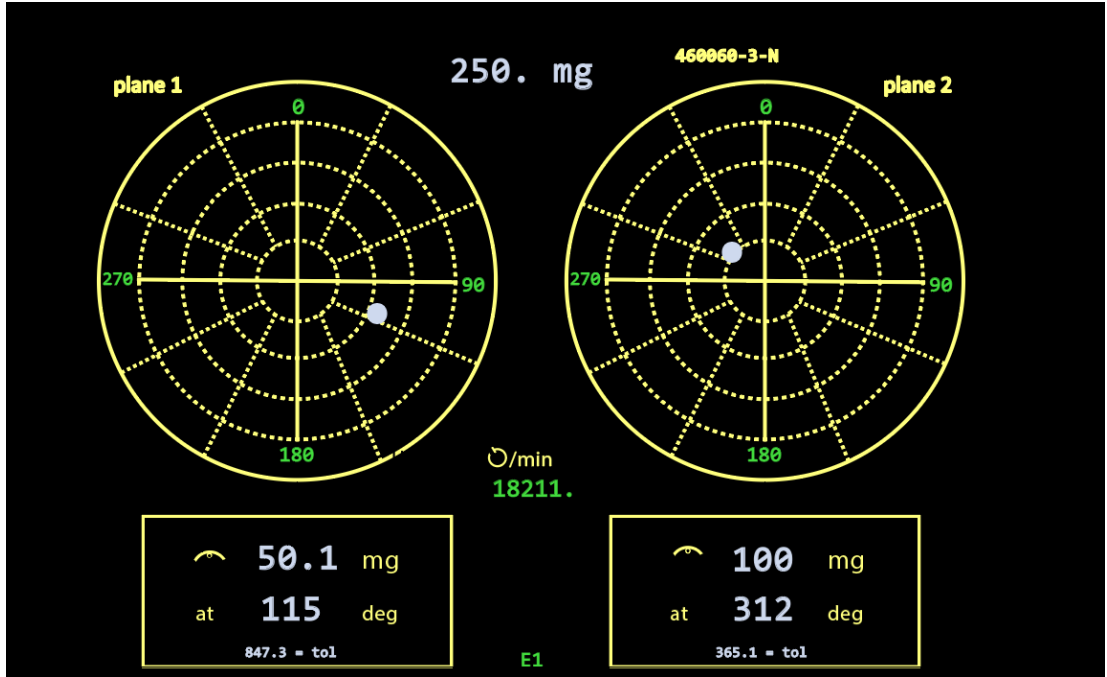
2. düzlem için optik geri besleme interferometri sinyalinin bir tam dalga oluşumu için geçen süre 0.00306 saniyeye karşılık gelir. Düşen kenar ile faz değişimi arasındaki zaman aralığı yaklaşık 0.00266 saniyedir. Bu değerde 312.94 dereceye karşılık gelir. Bu değer, **şekil 4.21**'de gösterilmektedir ve **şekil 4.22**'nin sağ tarafında gösterilen balans makinesi sonuçlarıyla tutarlıdır.



Şekil 4.20 2. düzlem için 100 mg dengesizlik kütlesinde optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)



Şekil 4.21 2. düzlem ve 100 mg dengesizlik kütlesi için açısal konumunun hesaplanması (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)



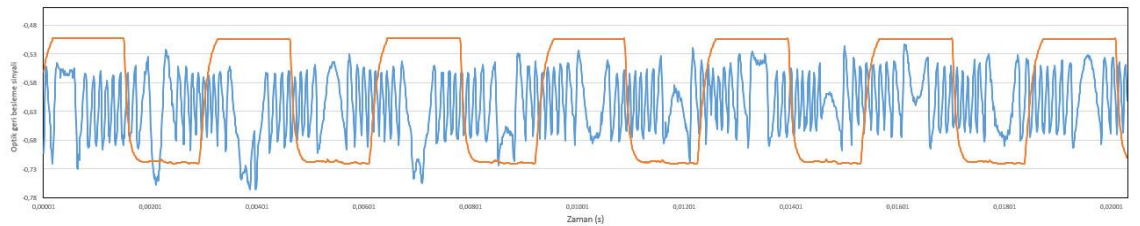
Şekil 4.22 50 - 100 mg dengesizlik kütlesine sahip jiroskop diskinin 18000 rpm'de dengeleme makinesi ölçüm sonuçları

4.3.2 100-50 Dengesizlik kütlesine sahip jiroskop disk ölçümü

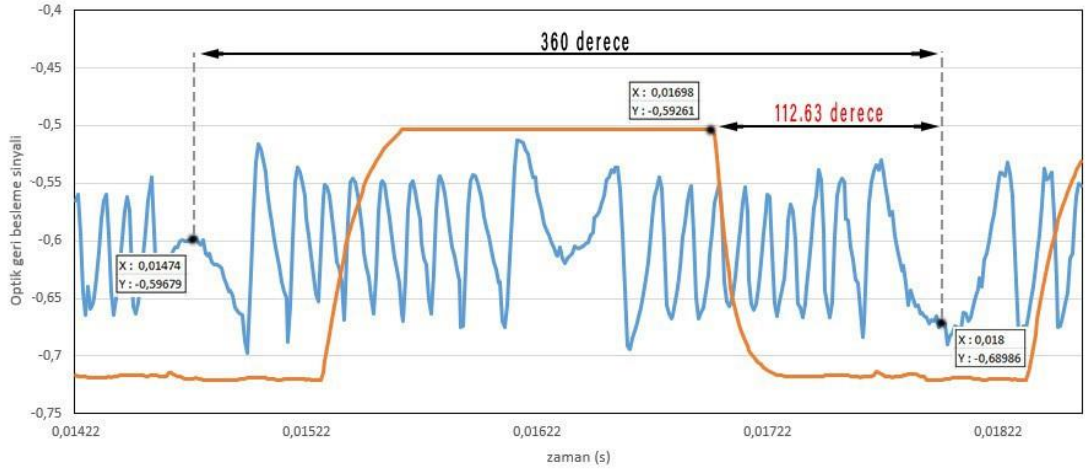
Deney düzeneğinin tutarlılığını kontrol etmek için 1. düzlem için 115 dereceye 100 mg ve 2. düzlem için 312 dereceye 50.6 mg olmak üzere 2 adet dengesizlik kütlesi eklenmiştir. Disk döndürülerek 18000 rpm'de veriler kaydedilmiştir. Kaydedilen veriler incelendiğinde yarım periyotta 1. düzlem için 8 adet tepe ve 2. düzlem için 4 adet tepe gözlenmiştir.

Dengesizlik kütlelerini hesaplamak için denklem 3.5'i kullanarak e 'yi (dış merkezlik) bulabiliriz. Bunu bulmak için tepe sayısını $\lambda/2$ ile çarpıyoruz; burada λ , $0.970 \mu\text{m}$ 'dir. Denklem 3.5'i kullanarak, 1. düzlem için dengesizlik kütlesi 99.49 mg ($((8*0.970/2)*580)/22.62$) olarak ve 2. düzlem için dengesizlik kütlesi 49.74 mg ($((4*0.970/2)*580)/22.62$) olarak bulunmuştur. **Şekil 4.27**'de gösterildiği gibi balans makinesi tarafından bulunan 1. düzlem için 100 mg ve 2. düzlem için 50.6 mg değerlerine çok yakındır.

1. düzlem için optik geri besleme interferometri sinyalinin bir tam dalga oluşumu için geçen süre 0.00326 saniyeye karşılık gelir. Kare sinyalin düşen kenarı sıfır dereceye karşılık gelir. Düşen kenar ile faz değişimi arasındaki zaman aralığı yaklaşık 0.00102 saniyedir. Bu değer 112.63 dereceye karşılık gelir. Bu değer, **şekil 4.24**'te gösterilmektedir ve **şekil 4.27**'nin sol tarafında gösterilen balans makinesi sonuçlarıyla tutarlıdır.

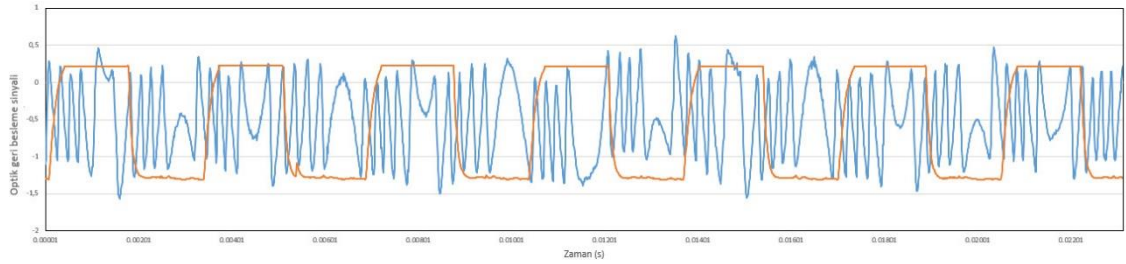


Şekil 4.23 1. düzlem için 100 mg dengesizlik kütlesinde optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)

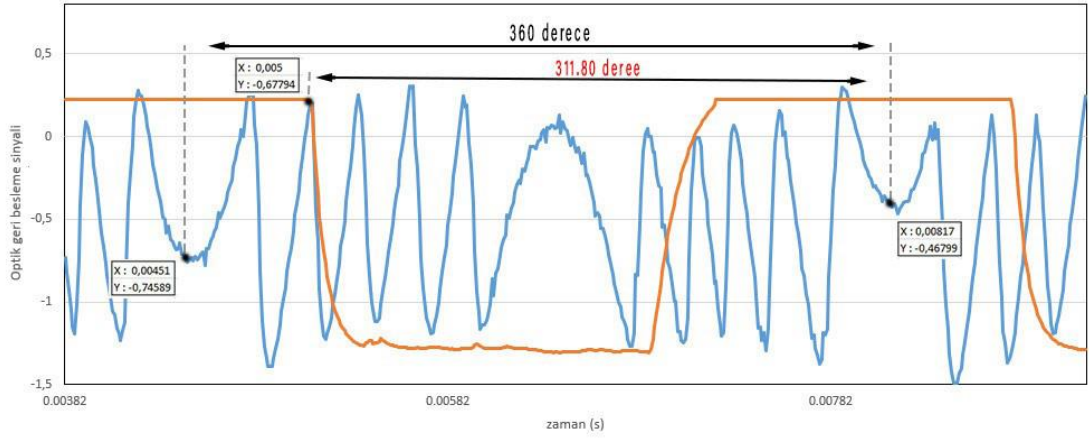


Şekil 4.24 1. düzlem ve 100 mg dengesizlik kütlesi için açısal konumunun hesaplanması (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)

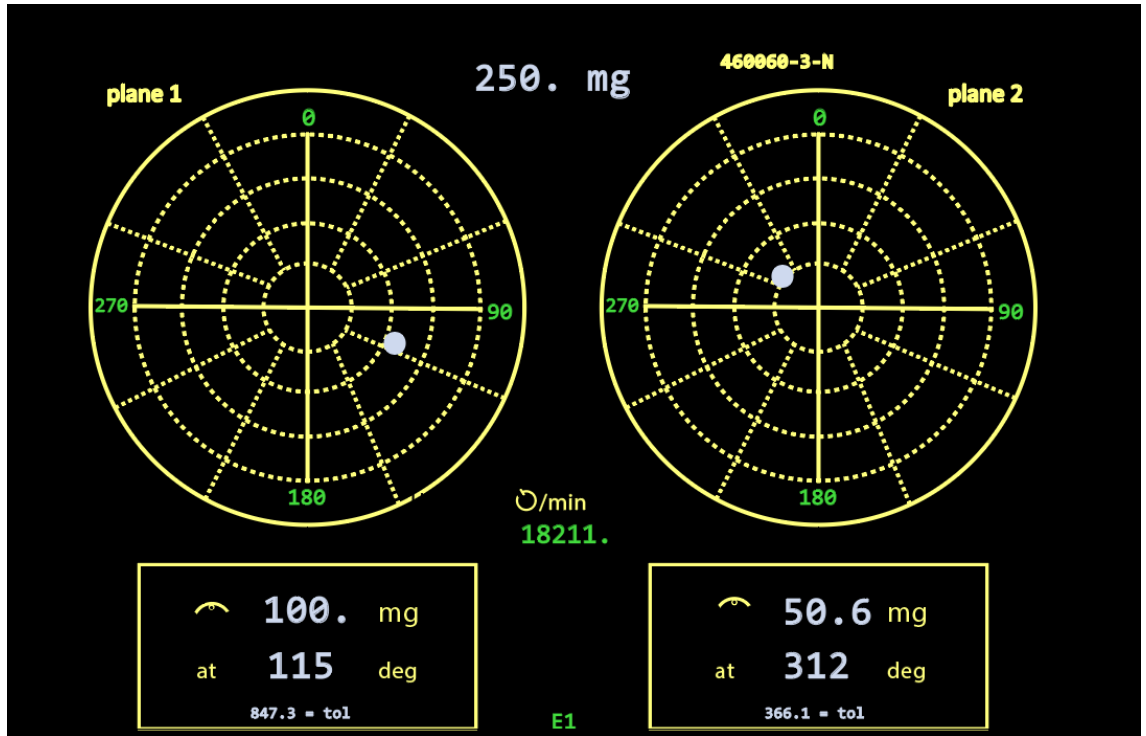
2. düzlem için optik geri besleme interferometri sinyalinin bir tam dalga oluşumu için geçen süre 0.00366 saniyeye karşılık gelir. Düşen kenar ile faz değişimi arasındaki zaman aralığı yaklaşık 0.00307 saniyedir. Bu değerde 311.80 dereceye karşılık gelir. Bu, **şekil 4.26**'da gösterilmektedir ve **şekil 4.27**'nin sağ tarafında gösterilen balans makinesi sonuçlarıyla tutarlıdır.



Şekil 4.25 2. düzlem için 50 mg dengesizlik kütlesinde optik geri besleme sinyali (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)



Şekil 4.26 2. düzlem ve 50 mg dengesizlik kütlesi için açısal konumunun hesaplanması (Turuncu çizgiler siyah, beyaz bölgeleri göstermekte ve mavi çizgiler optik geri besleme interferometriyi göstermektedir.)



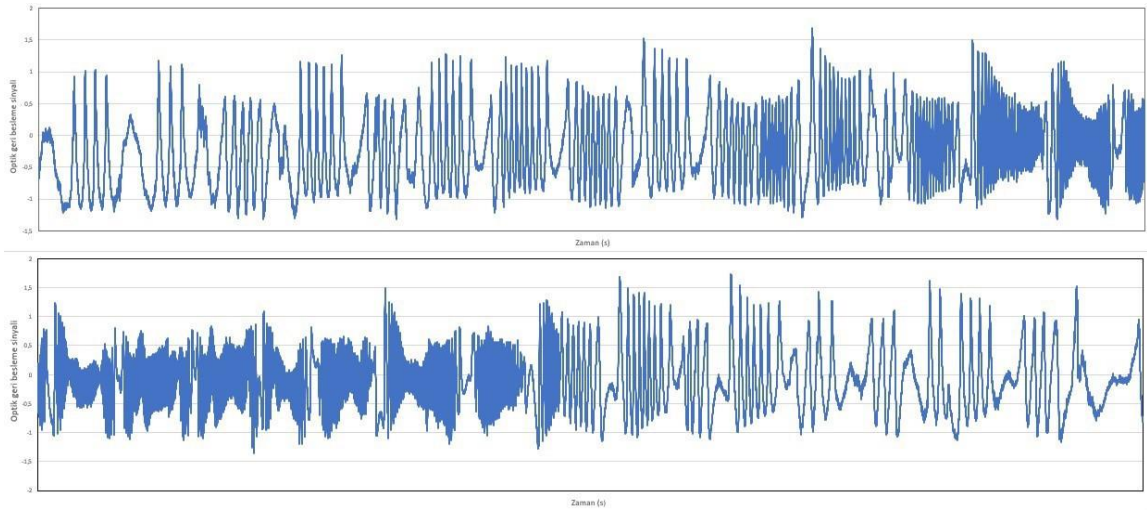
Şekil 4.27 100 - 50 mg dengesizlik kütlesine sahip jiroskop diskinin 18000 rpm'de dengeleme makinesi ölçüm sonuçları

Çizelge 4.1 CAB 690-R Balans makinesi ve optik geri besleme interferometri sonuçları

		CAB 690-R Sonuçları		Optik Geri Besleme İnterferometre Sonuçları		Hata Hesabı (%)	
Dengesizlik Kütleleri (mg)	Düzlemler	Açı (derece)	Dengesizlik Kütlesi (mg)	Açı (derece)	Dengesizlik kütlesi (mg)	Açı	Dengesizlik kütlesi
26-60	1.Düzlem	226	26.4	226.25	25.00	0.11	5.6
	2.Düzlem	62	60.7	61.37	62.18	1.02	2.38
60-26	1.Düzlem	112	60.3	111.19	62.18	0.72	3.02
	2.Düzlem	310	26.2	311.47	25.00	0.32	4.8
50-100	1.Düzlem	115	50.1	114.35	49.74	0.57	0.72
	2.Düzlem	312	100	312.94	99.49	0.30	0.51
100-50	1.Düzlem	115	50.6	112.64	49.74	2.09	1.73
	2.Düzlem	312	100	311.80	99.49	0.06	0,51
Balans edilmiş rotor	1.Düzlem	0	1.53	00.00	00.00	0	0
	2.Düzlem	20	1.67	00.00	00.00	0	0

Bu sistemde her bir darbeye karşılık lazer demeti ekseni boyunca $D = N \cdot \lambda/2$ 'lik yer değişimine karşılık gelir. Bu deneyde kullanılan lazerin dalga boyu 970 nm olması sebebiyle en az 485 nm yer değiştirme ölçümü yapılabilir. Diskin rezonans durumunda 75 tepe gözlenmiştir ve bu durumda en fazla 36 μm yer değiştirme ölçümü yapılabilir. Bu neden ile sistemin ölçüm aralığı 485 nm ile 36 μm aralığındadır ve bu da 12 mg ile 0.932692 g aralığına karşılık gelmektedir.

Şekil 4.28'de düşük devirlerde (2500-4000) elde edilen ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Devir sayısı azaldıkça belirli devirlerde tepe sayılarının anormal şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Burada, interferometrik sinyallerin yer değiştirme ile orantılı olarak artışı ve azalışı görülmektedir. Bu artışın sebebi, titreşen diskin rezonansa girdiği noktalardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.28 2500-4000 rpm de optik geri besleme sinyali

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Optik geri besleme interferometreler basit yapıları ve algılama hassasiyetleri dolayısıyla geleneksel interferometrilere göre oldukça kullanışlıdır. Bu çalışmada, doğruluğu açısından oldukça umut verici sonuçlar sunan OGBİ tekniklerinin başka bir endüstriyel uygulaması gösterilmiştir. Yatay olarak dönen jiroskop diski, CAB 690-R cihazının platformunu titreştirmektedir. Jiroskop diskinin sabitlendiği noktalara hizalanan ışınlar ile diskin titreşimi ölçülmüştür. Ölçülen bu titreşim ile diskin dengesizlik kütesinin miktarı ve sisteme eklenen IR sensör ile açısız konumunun tespiti yapılmaktadır. Burada her iki teknik arasında karşılaştırma analizi yaptığımız için kesin bir doğruluk değeri veremiyoruz ve balans makinesinin doğruluğunu değerlendiremiyoruz. Ancak sadece balans makinesinin mikrometrik çözünürlüğe sahip olduğunu bildiğimiz için sonuçlarımızı karşılaştırmak için çok doğru alınabileceğini kabul edebiliriz.

Deneyin ilk kısmında balans edilmiş jiroskop diskinin ölçümü balans makinesi ve optik geri besleme interferometrisi teknikleri ile yapılmıştır. Optik geri besleme interferometrisi ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde OGBİ sinyali gözlenmemiştir. Elde edilen sonuçlar balans makinesiyle karşılaştırıldığında tutarlı olduğu gözlenmiştir.

Deneyin ikinci ve üçüncü kısımlarında 1. ve 2. düzlemlere farklı dengesizlik kütleleri eklenerek interferometrenin doğruluğu sınanmıştır. Sonrasında kütleler ters çevrilerek işlem tekrarlanmıştır. Bu deneylerin sonunda, jiroskop gibi yüksek hassasiyetli parçaların denge derecesi için OGBİ tekniklerinin uygulanabilirliğinin görülmesi adına birçok deney yapılmış ve hepsi için çok tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların tamamen aynı olmamasının sebepleri kullanılan lazerin dalga boyundan dolayı sistemin hassasiyetinden ve çevresel gürültülerin etkisi olduğu düşünülmektedir. Sistemde kullanılan lazer dalga boyu azaltılarak daha tutarlı sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Ölçüm sırasında bazı düşük devir değerlerinde kendi kendine karışan sinyaldeki tepe sayısının önemli ölçüde arttığı gözlenmiş ve bu durum disk ve yatak sisteminin rezonansına ulaşılması durumuna bağlanmıştır.

Bu alışmada OGBİ tekniğinin mekanik jiroskop gibi yüksek hassasiyetli iş parçalarının denge ölümü alanındaki yeteneği gösterilmiştir. Sadece dengesizlik kütlesini değil aynı zamanda açısal konumunu da kabul edilebilir sınırlar dahilinde başarıyla hesaplanabildiği grlmştir. Ancak lazer dalga boyu azaltılarak ve sistem yalıtılarak testere dişi benzeri OGBİ sinyaller ve gürültüsüz temiz kare darbe elde edilirse, OGBİ tekniklerinden ok daha iyi sonuçlar elde edilebilecektir.

KAYNAKLAR

- Bernal, O.D., Zabit, U., Bosch, T. 2013. "Study of laser feedback phase under self-mixing leading to improved phase unwrapping for vibration sensing," *IEEE Sens. J.* 4962–4971.
- Bes, C., Plantier, G., Bosch, T., (2006). "Displacement Measurements Using a Self-Mixing Laser Diode Under Moderate Feedback," *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, 55, 4 1101-1105.
- Bosch T., 2004. An Overview Of Self-Mixing Sensing Applications. *IEEE Conference Proceedings Vol.8:* 385-392.
- Bosch, T., Servagent, N., Gouaux, F. ve Mourat, G. 1998. *The Self-Mixing Interference Inside A Laser Diode: Application To Displacement, Velocity and Distance Measurement.* SPIE, Vol. 3478.
- Broom R.F., Mohn E., Risch C. and Salathe R., 1970. 'Microwave self-modulation of diode lasers coupled to an external cavity', *IEEE J. Quant. Electron.*, QE-6, 328–334.
- Chinone N., Aiki K. and Ito R., 1978. 'Stabilization of semiconductor laser outputs by a mirror close to a laser facet', *Appl. Phys. Lett.*, 33, 990–992.
- Donati, G. Giuliani, S. Merlo, 1995. *IEEE J Quant Electr.*, vol. 31, pp. 1 13-1 19.
- Donati, S., Giuliani, G., 2005 *Unlocking Dynamical Diversity. Laser Interferometry.* 217-255. Ed: by D.M.Kane and K.Alan Shore. John Wiley & Sons, Ltd.
- Giuliani G., Norgia M., Donati S. and Bosch T. 2002. "Laser diode self-mixing technique for sensing applications" *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 4 S283.
- Hirota O. and Suematsu Y., 1979. 'Noise properties of injection lasers due to reflected waves', *IEEE J. Quant. Electron.*, QE-15, 142–149.
- Kibble, T.W.B., Berkshire, F.H., (2004). [Classical Mechanics], Imperial College Press, 213-214.
- Lang R. and Kobayashi K., 1980. 'External optical feedback effects on semiconductor laser properties', *IEEE J. Quant. Electron.*, QE-16, 347–355.
- Morikawa T., Mitsuhashi Y., Shimoda J. and Kojima Y., 1976. 'Return beam induced oscillations in self-coupled semiconductor lasers', *Electron. Lett.*, 12, 435–436.
- Meschede, D. 2007. *Optics, Light and Lasers.* 333-370. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Federal Republic of Germany.

- Passaro V.M.N., Cuccovillo, A., Vaiani, L., De Carlo, M., and Campanella, C.E., 2017. "Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective," *Sensors*, 17, 2284.
- Shimizu E. T., 1987. "Directional discrimination in the self-mixing type laser doppler velocimeter," *Appl. Opt.*, vol. 26, no. 21, pp. 4541–4544, Nov.
- Schenck Trebel Corporation, Technical Manual and Documentation for RG-T CAB690-R.
- Yu Y., Fanb Y., Liua B. 2016. "Self-mixing interferometry and its applications".
- Zabit, U., Bosch, T., Bony, F., 2009. "Adaptive transition detection algorithm for a self-mixing displacement sensor," *IEEE Sens. J.* 9, 1879 – 1886.
- Zhang Z., Li C., Huang Z., 2019. "Vibration measurement based on multiple Hilbert transform for self-mixing interferometry" *Optics Communications* 436, 192-196.

EKLER

EK 1 Veri kaydı için kullanılan Laview kodları

