

T.C.  
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**OPTİK İNTERFEROMETRENİN UYARLAMALI KAYAN KIPLI  
KONTROLÇÜ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Adnan BİRGÜL  
DANIŞMAN: Dr. Öğr. Ü. Özkan ATAN

VAN-2019

T.C.  
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**OPTİK İNTERFEROMETRENİN UYARLAMALI KAYAN KIPLI  
KONTROLCÜ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Adnan BİRGÜL

VAN-2019



## KABUL VE ONAY SAYFASI

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Dr. Öğr. Üyesi Özkan ATAN danışmanlığında, Adnan BİRGÜL tarafından sunulan "**Optik İnterferometrenin Uyarlamalı Kayan Kipli Kontrolcü Tasarımı**" isimli bu çalışma Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince 26/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile başarılı bulunmuş ve yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Sabir RÜSTEMLİ

İmza:

Üye : Doç. Dr. M. Nuri ALMALI

İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Özkan ATAN

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 08/08/2019 tarih ve 2019/43-I Sayılı kararı ile onaylanmıştır.

  
Enstitü Müdürü  
Prof. Dr. Suat ŞENSOY  
Enstitü Müdürü



## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atf yapıldığını bildiririm.

Adnan BİRGÜL

## ÖZET

### OPTİK İNTERFEROMETRENİN UYARLAMALI KAYAN KIPLİ KONTROLCÜ TASARIMI

BİRGÜL, Adnan

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi. Özkan ATAN

Ağustos 2019, 43 sayfa

Bu çalışma, uyarlamalı kayan kipli denetleyici ile interferometri için yeni bir doğrusal olmayan kontrol sistemi sunmaktadır. Bu yöntemeye dayanan yaklaşım, sıfırlama devresine ihtiyaç duymadan, lineer kontrol sistemine kıyasla interferometrenin doğrusal olmayan davranışını tam olarak telafi edebilir. Ayrıca gürültülü ortamlarda bile yüksek doğruluk, düşük maliyet ve uygulama kolaylığı gibi avantajlara sahiptir. Sistemin küresel asimptotik kararlılığı, derin bir stabilite analizi ile gösterilmiştir. Yüksek gürültülü ortamlarda bile, rastgele sinyaller, sinüzoidal sinyaller veya sıfır giriş sinyalleri için doğrusal olmayan kontrolörün interferometreyi dörtlü noktada tutabildiğini gösterir. Piezoelektrik aktüatörü karakterize etmek için, yarım dalga boyundan daha küçük yer değiştirmelerin sistem için uygun olduğunu gözlemledik. Fabrika gibi ağır çalışma ortamlarında sistemde yer alarak interferometrelerin yüksek dayanıklılıkta kullanılmasını sağlar.

Önermiş olduğumuz bu yöntem daha yüksek bir dinamik aralığa, çözünürlüğe sahip olup zaman gecikmesini ölçebilir ve isteğe bağlı zaman sinyalleriyle çalışabilir. Ayrıca, küçük genlikli sinyallerin doğruluğunu artıran zamansal demodülasyon yöntemlerini iyileştirir, karesel koşulun korunması (maksimum hassasiyet noktası) ve bu nedenle, sıcaklık değişimi ve hava akımı gibi güçlü dış bozucular altında bile sinyal solmasının etkisini ortadan kaldırır.

**Anahtar kelimeler:** İnterferometre, Kontrol tasarımı, Optik, Uyarlamalı kayma modu





## ABSTRACT

### ADAPTIVE SLIDING MODE CONTROLLER DESIGN OF OPTICAL INTERFEROMETER

BİRĞÜL, Adnan

M.Sc. Thesis, Electrical-Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Özkan ATAN

August 2019, 43 pages

This study presents a new nonlinear control system for interferometry with adaptive sliding mode controller. The approach based on this method can fully compensate for the non-linear behavior of the interferometer compared to the linear control system without the need for a reset circuit. It also has the advantages of high accuracy, low cost and ease of application even in noisy environments. The spherical asymptotic stability of the system has been demonstrated by a deep stability analysis. Indicates that the non-linear controller can hold the interferometer at quadruple point for random signals, sinusoidal signals or zero input signals, even in high-noise environments. To characterize the piezoelectric actuator, we have observed that displacements smaller than half a wavelength are suitable for the system. It enables the use of interferometers with high durability by taking part in the system in heavy working environments such as factory.

This method has a higher dynamic range, resolution and can measure time delay and work with optional time signals. It also improves the methods of temporal demodulation, which improves the accuracy of small amplitude signals, preserves the quadratic condition (maximum sensitivity point) and therefore eliminates the effect of signal fading even under strong external disturbances such as temperature changes and airflow.

**Keywords:** Interferometry, Control design, Optic, Adaptive sliding mode



## ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasında, her türlü ilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Özkan ATAN'a teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarım sırasında bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen başta Prof. Dr. Naci GENÇ olmak üzere tüm Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü hocalarıma ve yüksek lisans arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

2019

Adnan BİRGÜL



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
ÖN SÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xi
1.GİRİŞ.....	1
1.1. İnterferometre Çeşitleri ve Temel Kullanım Alanları .....	2
1.2. Doğrusal Olmayan Kontrol Yaklaşımı .....	5
2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ .....	7
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	11
3.1 Materyal.....	11
3.1.1. Optik İnterferometri.....	11
3.1.1.1. Toplu Michelson İnterferometresi .....	11
3.1.1.2. Sinyal Solması .....	16
3.2 Yöntem .....	19
3.2.1. Uyarlamalı Kayma Modu .....	19
3.2.2. Sistem Modeli.....	20
3.2.3. Durum-Uzay Temsili.....	22
3.2.4. Kararlılık Çalışması.....	24
3.2.4.1. Doğrusallaştırılmış Sistemin Lyapunov Analizi.....	24
3.2.4.2. Doğrusal Olmayan Sistemin Lyapunov Analizi .....	28
4. BULGULAR .....	33
4.1 Kapalı Döngü Çevrim Sistemi.....	33
4.1.1. Sıfır Giriş Sinyali.....	35
4.1.2. Rastgele Giriş Sinyali .....	36
4.1.3. Sinüsoidal Bir Giriş Sinyali.....	37
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	39
KAYNAKLAR.....	41
ÖZ GEÇMİŞ.....	43



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Michelson İnterferometresi Temel Yapısı.....	12
Şekil 3.2. İnterferometrelerde Sinyal Solma Problemi.....	18
Şekil 3.3. Önerilen Kapalı Döngü Sisteminin Blok Diyagramı .....	22
Şekil 3.4. Sistem Analizinde Kullanılan Blok Diyagramı.....	23
Şekil 4.1. Kapalı Döngü Sistemi Michelson İnterferometresi Blok Diyagramı.....	33
Şekil 4.2. Açık Döngü Sistemi Simülasyon Sonucu .....	34
Şekil 4.3. Kapalı Döngü Sistemi Simülasyon Sonucu.....	35
Şekil 4.4. İnterferometrenin Çıkış Sinyali ve Kontrol Sinyali .....	36
Şekil 4.5. İnterferometre Tarafından Rastgele Tespit Edilen Yer Değiştirme .....	37
Şekil 4.6. İnterferometre Tarafından Belirlenen Sinüsoidal Giriş Sinyal Değişimi ...	38





## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

Simgeler	Açıklama
$\omega_0$	Optik Açısal Frekans
$\gamma$	Toplam Geri Besleme Kazancı
$n_s$	Kırılma İndisi
A	Laser Gücü
V	Saçak Görünürlüğü
$\Delta\phi(t)$	İlgili Sinyal
$\xi$	Sönümlenme Oranını
$\lambda$	Laser Dalga Boyu
$\phi(t)$	Optik Faz Kayması
$\phi_0$	Statik Faz Kayması
$\omega$	Modülasyon İndeksi
$\chi$	Hassasiyet Faktörü
I	Optik Yoğunluk

### Kısaltmalar

### Açıklama

PZT	Piezoelektrik Çalıştırıcı
LPF	Alçak Geçiren Filtre
PZTfb	Geri Bildirim Piezoelektrik Çalıştırıcı
DC	Doğru Akım
SMC	Kayma Modu Kontrolü
PID	İntegral-Oransal-Türev



## 1. GİRİŞ

Temel anlamda bir interferometre, ışığın girişim özelliğinden yararlanarak küçük mesafelerin, malzemelerin kırma indislerinin ve yüzey düzgünlüklerinin ölçülebildiği ayardır. Bilimde ve endüstride geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptir. Tüm interferometrelerde ölçüm, ışığın girişim özelliğinden yararlanarak yapılır. Optik interferometri sensörlerinin gelişimi, 20. yüzyıl boyunca, lazer gelişiminden ve yüksek uzaysal ve zamansal tutarlılıkları nedeniyle artmıştır. Girişim deseni, fiziksel büyüklükleri yüksek hassasiyetle tespit etmeyi sağlar. Girişim deseni, iki veya daha fazla ışık dalgasının üst üste binmesi ile oluşur ve örtüşen dalga katkılarının yoğunluğunun toplamıdır. Örneğin, aynı frekansa, genliğe, polarizasyona ve yöne sahip iki harmonik dalga faz-ıçısı ise, her bir noktadaki sonuç, toplam yapıcı girişim olarak adlandırılan yoğunlukların toplamıdır. Öte yandan, iki dalga arasındaki faz farkı  $180^\circ$  olursa bu sefer yoğunluklar çıkarılacak ve dalgalar birbirini sönmüleyerek toplam yıkıcı girişim olarak adlandırılan durum ortaya çıkacaktır. Bu yoğunluk dağılımı saçak girişim deseni olarak adlandırılır.

Bir lazer interferometresi, optik faz varyasyonundaki fiziksel miktar değişimini, ardından elektronik olarak ölçülebilen optik yoğunluğa dönüştürülen yüksek hassasiyetli bir araçtır. Bu nedenle, interferometreden birindeki bir optik faz varyasyonunun indüklenmesiyle çeşitli fiziksel büyüklükler ölçülebilir (Örneğin, yer değiştirme, sıcaklık, basınç, gerilme açısal hız vb.).

Bu fiziksel niceliklerin son derece küçük değerleri, literatürde açıklandığı gibi interferometreler tarafından tespit edilebilir. Mekanik yer değiştirme ölçümü ile ilgili olarak, interferometri, geleneksel bir sistem için, yani kolları uzunluğu 0,5 m'den küçük olan  $10^{-14}$  m'lik bir titreşim genliğini tespit edebilir. İnterferometri nanoteknolojide numunelerin konumlandırılması, mikroelettronik, hücre manipülasyonu, elektronik mikroskopi aletleri, lazer interferometreleri için mercek konumlandırma ve birçok ince mekanik sektörleri için parçaların mikroskobik ve kesin olarak konumlandırılması gerekir.

Bununla birlikte, yüksek hassasiyeti ve çok küçük yer değiştirmeleri saptama kabiliyetinden dolayı, interferometreler; sahte sıcaklık değişimleri (mikro kelvin ölçeğinde), nano-mekanik titreşimler, hava türbülansı gibi sahte çevresel bozuklukları

tespit edebilir. İnterferometre karakteristik eğrisinin doğrusal olmayan doğası göz önüne alındığında, bu etkiler, sinyal solmasına neden olmakla birlikte sonuçların ve yönün belirsizliğine yol açar. Bu davranış genellikle, üst üste bindirilmiş bir solma sinyali ile faz-modüle edildiğinden, sinyal demodülasyon işleminin karmaşıklığından dolayı ilgi sinyalini çıkarmak için önemsiz bir sürece yol açar.

### **1.1 İnterferometre Çeşitleri ve Temel Kullanım Alanları**

Girişim ölçer yada interferometre ışığın girişim özelliğinden faydalanarak çok küçük mesafelerin ve maddelerin kırılma indislerinin ölçümünde kullanılmaktadır. Ayrıca saydam cisimlerin yüzeylerinin kontrolünde, çok küçük hareketlerin ölçülmesinde ve yıldızların yarıçapların belirlenmesinde de kullanılan bir ölçü aletidir.

İlk interferometre 1878 yılında Albert Abraham Michelson tarafından icat edilmiştir. Asıl amaçları dünyanın hareketinin, ışık hızının ölçümündeki etkisini belirlemek ve ışık hızını bulmaktır. Michelson, Profesör Morley ile birlikte interferometreyi kullanarak bütün dahili sistemlerde aynı hızda ilerlediğini ve eter denen ortamın olmadığını göstermiştir. Ayrıca interferometre istenilen mesafeyi dalga boyu cinsinden büyük bir duyarlılıkla ölçmek için kullanılırdı. Bu icadı ile Michelson 1907 yılında Nobel Fizik ödülünü aldı.

Eter Olayını açıklayacak olursak eğer 19. yüzyılda bilim adamları ışık dalgalarının eter denilen bir ortamda taşındığını düşünüyorlardı. Yani eterin evreni doldurduğu düşünülen bir maddeydi. Bu kısa açıklama eteri hava ile kardeş yapan bir biçime sahip. Zaten o dönemin zihinleri de eter kavramını ortaya atarken bu kardeşlikten yola çıkmışlar ve ışık dalgalarına göre daha tanıdık olan başka bir dalganın yapısından benzerlik kurmuşlardı: ses dalgaları.

Biliyoruz ki ses dalgaları ortamda yayılabilmek için hava, su gibi taşıyıcı bir maddenin varlığına ihtiyaç duyar. Yapılan bilimsel gözlemlerde havası alınmış bir ortamda ses dalgaları yayılamaz. Peki, ışık için de aynı şey söz konusu olabilir mi? Işık da yayılmak için havanın veya daha başka bir taşıyıcı maddenin varlığına ihtiyaç duyar mı?

Saydam kutunun içindeki saat çalmakta iken saatin topuzunun titrediğini görürüz. Bu da bize ışığın kutuya özgürce girip çıktığını göstermektedir. Vakum ortamında ışığın yayılabildiğini birçok deneyde gösterilmiştir. Öyleyse ışık yayılmak için neye ihtiyaç duyarsa duysun biliyoruz ki o şey ‘hava’ değil. Dönemin bilim insanları havanın yerine eter kavramını ortaya attılar. Eter, atomlar arası boşluğu yani evreni dolduran, ağırlığı olmayan, ışığı iletir diye bir kavram olduğunu açıkladılar.

Ses dalgalarından yola çıkarak yapmış oldukları karşılaştırma neticesinde böyle bir kavram türemiştir. Netice de bir dalga biçimi yayılırken havaya ihtiyaç duyuyorken bir başka dalga türünün yayılması için etere ihtiyaç duyması oldukça normal ve mantıklı görünmektedir. Fakat ne kadar mantıklı olursa olsun bütün bilimsel görüşler gibi bu görüş de kendisine deneysel kanıtlar bulmaya muhtaçtır.

Dönemin bilim insanları eteri, bir kabin içini tümüyle dolduran su olarak düşündüler. Dünyamız da bu su dolu kap içerisindeki bir bilyeydi. Bilye hareket ettiği zaman su yüzeyinde dalgalanmalar meydana getirir. Aynı şekilde dünya ve diğer gezegenler, hareketleri esnasında evreni bütünüyle dolduran eter alanında bir dalgalanma meydana getirmeliydi. Bu durum ise bizleri, ışığın hızının bu dalgalanmaların doğrultusu ve büyüklüğünde değişmesi gerektiği sonucuna götürür. Yani eğer eter gerçekten var ise ve evrenin tümünü kaplıyorsa, eter alanında hareket eden ışığın hızı, hareketin doğrultusuna göre farklılık göstermeliydi.

Öyleyse eter teorisini doğrulamak için yapılacak iş basitçe şuydu: eter alanında dalgalanma oluşturan herhangi bir hareketin doğrultusunda ve hareketin olmadığı doğrultuda olmak üzere iki ayrı durum için ışığın hızı ölçülecek ve karşılaştırılacaktı. Eğer bulunan bu iki hız değeri birbirinden farklıysa daha önce sezgisel olarak çıkarsaması yapılmış olan eterin ilk deneysel kanıtı elde edilmiş olacaktı. Diğer yandan iki hız değeri birbirinin aynısı çıkıyorsa eter teorisi çok ciddi bir yara alacaktı.

Burada hareket doğrultusunda yol alan ışığın hızının (eğer eter var ise) daha büyük olması gerektiğini düşünmüş olabilirsiniz. Hatta bu çıkarımı yaparken hep söylenilen “hareketli bir trende ileriye doğru atılan cismin net hızına trenin hızı da eklenir” örneği hatırlanıza gelmiş olabilir. Fakat eter söz konusu olduğunda bu örnek durumu izah etmeye yetmez. Eteri, evreni tümüyle dolduran ve kapsadığı cisimlerin hareketine karşı onlara direnç uygulayan bir alan olarak düşünmek gerekir. Burada su

üstünde hareket eden tekne örneği daha uygun bir yaklaşım sergiler. Teknede seyir halindeyken elinizi suya daldırdığınızda teknenin hızı ölçüsünde büyüyen bir dirençle karşılaşsınız. Yani eter içerisinde hareket eden herhangi bir cisimden hareket doğrultusunda gönderilen ışık, cismin hızının büyüklüğü ölçüsünde bir dirençle karşılaşacak ve bunun sonucu olarak daha yavaş hareket edecektir.

Bu düşüncelerin ışığıyla eter teorisinin gerçek olduğuna inanan ve bunu kanıtlamaya soyunan iki bilim insanı Albert Abraham Michelson ve Edward Williams Morley, daha önceden Michelson tarafından geliştirilen interferometre (girişimölçer) aygıtını kullanarak 1887 yılında yaptıkları bir dizi ölçümle birlikte eter teorisinin 20. yüzyılın ilk yarısında gerçekleşecek olan kuantum devriminde kendine yer bulup bulamayacağını belirleyeceklerdi. Günümüzde kullanılan bir çok interferometre çeşidi bulunmaktadır.

**Michelson İnterferometresi:** Michelson interferometresi en iyi 1881 yılında ünlü Michelson-Morley deneyinde oynadığı rol üzerine bilinir. Michelson ve meslektaşı Edward Morley tarafından yapılan bir deney genel olarak eter teorisine karşı en büyük kanıt olarak düşünülmektedir.

**Fabry-Perot İnterferometresi:** Etolon olarak da bilinen bu interferometre Michelson interferometresinin gelişmiş halidir. Fabry-Perot interferometresi, net ve keskin saçaklarla gözlem ve ölçüm açısından geliştirilmiştir.

**Fizeau İnterferometresi:** Fabry-Perot interferometresinden daha kolay kullanıma sahip olup optik ve mühendislik ölçümleri yapmak için kullanılmaktadır. İnterferometrelerin temel kullanım alanları aşağıdaki gibidir.

a.)Fizik ve Astronomi: Michelson-Morley deneyiyle beraber görelilik teorisi için önemli bir yere sahip olan interferometreler; fizik ve astronomi alanında, görüntüleme teknolojilerinde, radyo teleskoplarında, optik teleskoplarda ve birçok alanda daha az hata için kullanılmaktadır. En önemli örnek olarak kütle çekim dalgalarında Fabry-Perot interferometresi kullanılarak kütle çekim dalgaları görülmesi sağlanmıştır. İki karadeliğin birleşerek bir karadelik oluşturması esnasında oluşan kütle çekim dalgası bütün bir uzay-zamanı esneterek, bu dalgaların Fabry-Perot interferometresinde ışın kaynağıyla girdiği temas sonucu dedektörler, kütle çekim dalgalarını algılayarak Einstein'ın bir kere daha haklı olduğunu bizlere gösterdi.

b.)Mühendislik ve Uygulamalı Bilimler: Telekomünikasyonda yüksek hızlı haberleşme için az hata payına sahip sistemlerin yapılmasında kullanılmaktadır ve genellikle ince ayrıntılar verebilen, yarı iletkenleri görüntüleme sistemlerinde kullanılmaktadır.

c.)Biyoloji ve Tıp Bilimleri: Optik Koherans Tomografi (OCT) cihazlarında, yeni nesil X-ray cihazlarında, renkli görüntü verebilen sistemlerde kullanılmaktadır. İnterferometreler, fotonik sistemlerde kullanılarak elektron yerine fotonlar kullanılması ilkesiyle, insan vücuduna daha az zarar veren ve görüntü verimi yüksek sistemler üzerinde çalışılmaktadır.

İnterferometrelerde muhtemel hatanın en büyük kaynağı, lazer kaynağının dalga boyunun değişmesi ve içinden geçtiği cismin kırılma indisinin büyük ya da küçük olduğu düşünülmesinden dolayı olabilir. Ölçüm hatalarında lazerin geçtiği ortamdaki gazın sıcaklığı, yoğunluğu ve nemi ortamın kırılma indisine etki ederek ortamdan geçen lazerin dalga boyunda değişmeler oluşmasını sağlayarak potansiyel ölçme hataları oluşabilir. Neyse ki iyi interferometreler ile bu hatalar aza indirgenir. Yukarıdaki hataların düzeltilmesi ile interferometrelerin hata yapma oranı yaklaşık olarak milyonda 1 veya 2 olacaktır.

## **1.2. Doğrusal Olmayan Kontrol Yaklaşımı**

İnterferometreleri stabilize etmek ve fazı doğru bir şekilde tahmin etmek için düzenli kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Doğrusal sistem tekniklerinin çok geniş olmasına rağmen, interferometreler gibi doğrusal olmayan sistemlere uygulanan kullanımlara sınırlamalar getirebilir bu da sistem performansında gerekli sağlamlığı sağlayamaz. Bundan dolayı, değerini korumak için, doğrusal kontrol yöntemleri, bozukluğun sistemi denge noktasında tutacak kadar küçük bir değere sahip olduğu varsayımına dayanır.

Bozucu giriş sistemi denge noktasından çıkarmaya yetecek kadar büyük olduğu durumlarda, doğrusal bir kontrol cihazının sistemdeki doğrusal olmayanlarla başa çıkamama nedeniyle çok düşük bir performans göstermesi hatta dengesiz olması muhtemeldir. Bu nedenle, bozucular uygun şekilde telafi edilemeyebilir. Aslında büyük bozucularla başa çıkabilen doğrusal kontrol sistemleri vardır, ancak

bileşimlerinde genellikle sistemi sıfırlayan devreleri vardır ki sistem karmaşıklığını artırır. Aynı zamanda, sıfırlama gerilimi eylemi, sensörün faz algılama yeteneğini ciddi şekilde tehlikeye atarak ölçüm işlemini durdurabilir.

Yeni bir perspektifin ardından, bu çalışmanın temel amacı, uyumlu kayma modlarına dayanan optik interferometri için tasarlanmış doğrusal olmayan bir kontrol sistemi geliştirmektir. Bu yaklaşım, interferometre içindeki doğrusal olmayan davranışı tamamen telafi edebilir, uygulama kolaylığı ve yüksek sağlamlık sağlayarak çok büyük çevresel gürültüler için yüksek doğruluk kontrolüne yol açabilir. Sıfırlama devresi gerekli olmayıp böylelikle sıfırlama işlemi tarafından üretilen sahte sinyallerin olmadığı, donanım sistemlerinin ve devrenin maliyetinde ve karmaşıklığında önemli ölçüde azalma sağladığı anlamına gelir.

Bu yaklaşımın sağladığı yüksek sağlamlık, sistemin mekanik veya çevresel gürültüleri olan yerlerde gömülmesine ve çalıştırılmasına, endüstriler ve fabrikalar gibi zorlu ortamlarda çalışmaya uygun olması ve interferometreyi laboratuvar dışına çıkarmasına izin verebilir.



## 2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

1878 yılından beri bilim dünyasında kullanılan ve gün geçtikçe önemi daha çok artan interferometrelerden yararlanılarak bilimsel anlamda literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları ise aşağıdaki gibidir.

Fritsch, optik fiber interferometrelerde bulunan fiber hidrofona ve diğer fiber sensör tiplerini, sıcaklık dalgalanmaları ve diğer bozuculardan kaynaklanan diferansiyel faz kayması varlığında maksimum hassasiyet ve doğrusallık sağlamak için geri beslemeyle kontrol etti (Fritsch,1981).

White, bir Michelson interferometresinin yüksek frekanslı, küçük genlikli yüzey yer değiştirmelerini sistem dengelenmesi yönünden inceleyerek açıkladı. Sistem parametrelerinin teorik ve deneysel bir çalışmasını yaparak cihazın optimizasyonunu sağladı. Cihaz, akustik emisyon iletimi ile ilgili küçük genlikli yüksek frekanslı ultrason yer değiştirmelerini yakalamak için kullanılmıştır (White, 1985).

Barnes, iki ışınli interferometrenin çıkış yoğunluğunu, interferometre fazını kontrol etmek için kullandı. Bu bize interferometrenin doğrusallaştırma, kararlılık ve optik eşikleme dahil birkaç ilginç özelliğini verir. Yüksek hassasiyete sahip ölçümlerin istendiği mikro makinelerin uygulamaları için spesifik olarak faz ölçümüne geri besleme interferometresi uygulanmıştır (Barnes, 2002).

Cheung çalışmasında , geri bildirim interferometrelerinin sapma düzeltmesinin yanı sıra birçok optik ölçüm için de kullanılabilirdiğini gözlemledi. İnterferometrede faz modülatörünün seçimi, geri besleme sisteminin çalışması üzerinde büyük etkiye sahiptir. Faz modülatörü olarak bir membran ayna kullanan bir geri besleme interferometresinin çalışmasını göstermektedir (Cheung, 2003).

Yimnirun yaptığı çalışmada, elektrik alanı küçük olan yükleri ölçmek için basit bir araç tasarlanmıştır. Düşük geçirgenliğe sahip dielektriklerin doğrudan elektrolitik katsayısını ölçmek için 3-20 kHz frekans aralığında yer değiştirmede  $10^{-4}$  A veya daha iyi çözme yeteneğine sahip tek ışınli interferometre geliştirilmiştir. Ayrıca bu ölçümler süresinde meydana gelen mekanik ve akustik titreşimler, elektrik kablolarının titreşiminden kaynaklanan önemli bozukluklar gibi problemlerin giderilmesi amaçlanmaktaydı (Yimnirun, 2003).

Lin ve arkadaşlarının yaptıkları bu çalışmada, ayarlanabilir bir lazer ve fiber Bragg ızgarası kullanarak kendinden referanslı çok katlı bir fiber interferometre önerilmektedir. Optik ölçüm sistemi, iki Michelson fiber interferometreyi, optik sistemin ana bölümünde paylaşılan optik yol ile çoğaltır. Bir fiber optik interferometre, çevresel bozulmalara karşı ölçüm sisteminin yüksek doğruluğunu izlemek ve kontrol etmek için referans interferometresi olarak kullanılır. Diğeri, hedeften bilgi elde etmek için ölçüm interferometresi olarak kullanılır. Yüksek çözünürlük elde etmek için sinyal işleme için aktif faz izleme homodyne tekniği uygulanır (Lin ve ark., 2004).

Pang, sıfır optik yol farkına sahip bir interferometre için , büyük bir dinamik aralıkta, dijital faz tarafından oluşturulan taşıyıcı şemadan daha hızlı bir işlem hızına sahip olduğunu gözlemlemiştir. Bu interferometrik optik fiber sensör için yeni bir dijital demodülasyon şeması geliştirilmiştir (Pang, 2007).

Xie ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, ortak interferometrik-optik yolu paylaşan iki fiber Michelson interferometresini bir araya getiren referans bir interferometre ölçüm sistemi sunmaktadır. Fiber interferometrelerinden biri, sistemi çevresel bozulmalardan kaynaklanan etkileri telafi etmek için elektronik bir geri besleme halkası kullanarak dengelemek için kullanılırken, diğeri ölçüm görevini yerine getirmek için kullanılır. Bunun sistemler için avantajı ise çevresel rahatsızlıklardan kaynaklanan etkiler elektronik geri besleme döngüsünün dengeleme etkisiyle giderilmesi olup sistemi çevrimiçi hassas ölçüm için uygun hale getmektir (Xie ve ark., 2009).

Xie ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, iki fiber Michelson interferometresinden elde edilen sinyallerdeki faz değişimi, iki ayrı elektronik geri besleme döngüsü ile izlendi. Fiber interferometrelerden birinde, çevresel bozuklukları yok etmek için elektronik bir geri besleme döngüsü kullanıldı. İkinci fiber interferometre ise, ölçüm görevini gerçekleştirmek için kullanıldı. Dengelenmiş bir fiber optik Michelson interferometresi, çevresel gürültülerin etkilerini etkin bir şekilde telafi ederek ve üretim sistemlerinde gereken çevrimiçi hassas ölçüm için yüksek kararlılık sunabilir (Xie ve ark., 2010).

Barbosa'nın çalışmasında kullandığı lazer interferometrisi, piezoelektrik aktüatörlerin karakterizasyonu için iyi bilinen bir tekniktir. Düşük maliyetli bir michelson interferometresinin, kalibrasyon faktörünün ölçümü, topoloji optimizasyon yöntemi kullanılarak tasarlanan yeni bir piezoelektrik esnek boyutlu aktüatörün (PFA) yer değiştirme amplifikasyonu ile gerçekleştirilir. PFA'nın çeşitli sürücü voltajları için serbest yer değiştirmesi ölçülerek yer değiştirme kuvvetlendirmesi belirlenir (Barbosa, 2010).

Hao ve arkadaşlarının yaptıkları bu çalışmada, faz modülasyonuna dayalı karışan girişim ölçümü, bir fiber lazer sistemi kullanılarak gösterilmiştir. Erbium katkılı bir fiber lazer ve buna entegre optik faz modülatörü tarafından yapılmıştır. Optik geri besleme ve faz modülasyonlu girişim teorik olarak analiz edilir. Girişim sinyalinin optik geri besleme varlığında bozulması ve ışığın kutuplanması ile elektro-optik olarak aktif eksen arasındaki kusurlu hizalamanın neden olduğu hata kaynakları ayrıntılı olarak değerlendirilir. Sistem, yüksek hassasiyetli bir PZT'nin hareketini yeniden oluşturmak için deneysel olarak uygulanarak yüksek hassasiyetli tüm optik fiber algılama uygulamalarına dayanan yer değiştirme ölçümü için pratik bir çözüm sunar (Hao ve ark., 2013).

Zhang ve arkadaşlarının yaptıkları bu çalışmada, Mach-Zehnder ve Sagnac gibi interferometrelerin bir hibrid konfigürasyonuna spesifik olan düşük uyumlu interferometreye dayanan tamamen fiber algılama sistemiyle uzun mesafeli dağınık algılama uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasıdır. Bununla birlikte, sonunda ortadan kaldırılması ve sistemin performansını düşürmesi zor olan birçok istenmeyen gürültü, yerel devreler ve uzaktan algılama lifi arasına girecektir. İletim lifi boyunca yayılan gürültüyü azaltmak için yeni bir yöntem bu makalede önerilmiştir. Çalışmada seslerin iki sinyalin çıkarılmasıyla ortadan kaldırılabileceğini belirtilir (Zhang ve ark., 2013).

Galeti'nin yapmış olduğu çalışma, sentetik-heterodin demodülasyonu, interferometrik sapmaya bağımlı olan bir çıkış sinyali sağlayabildiğinden, interferometrik sensörler kullanılarak dinamik yer değiştirme ve hız ölçümü için yararlı bir tekniktir. Uygun maliyetli, yüksek hızlı, gerçek zamanlı sinyal işleme sistemleri ve

yazılımı, interferometre de karşılaşılan karışık sinyallerin işlenmesini daha uygun hale getirdi (Galeti, 2015).

Martin ve arkadaşları, değişken yapı kontrolü ve kayma modlarına dayalı bir Michelson interferometresi için tasarlanmış doğrusal olmayan bir kontrol sistemi önermiştir. Bu yaklaşım, interferometrenin doğrusal olmayan davranışını tam olarak telafi edebilir. Uygulama kolaylığı ve yüksek sağlamlık özelliğine sahip, güçlü bozucular için yüksek doğrulukta kontrol sağlamıştır (Martin ve ark., 2017).

İnterferometreler ile ilgili olarak yapılan çalışmaların amacı, sistemde kullanılan cihazların optimizasyonu, çevresel bozucuların azaltılması ve güçlü dış bozucular altında bile sistemin çalışabilmesini sağlamaktır. Ayrıca uygulama kolaylığı ve yüksek sağlamlık özelliğine sahip, güçlü bozucular için yüksek doğrulukta kontrol sağlayabilir. Sistemin sıfırlama devresine ihtiyaç duymaması ise başka bir avantaj sağlamaktadır. Çalışmamızın literatürdekilerden farkı ise uyarlamalı kayan kipli kontrol tekniğinin kullanılmasıdır.

### **3. MATERYAL VE YÖNTEM**

Bu çalışmada MATLAB programı kullanılarak bilgisayar ortamında gerçekleştirilen uyarlamalı kayma modlarına dayalı optik interferometre için simülasyon sonuçları elde edilmiştir.

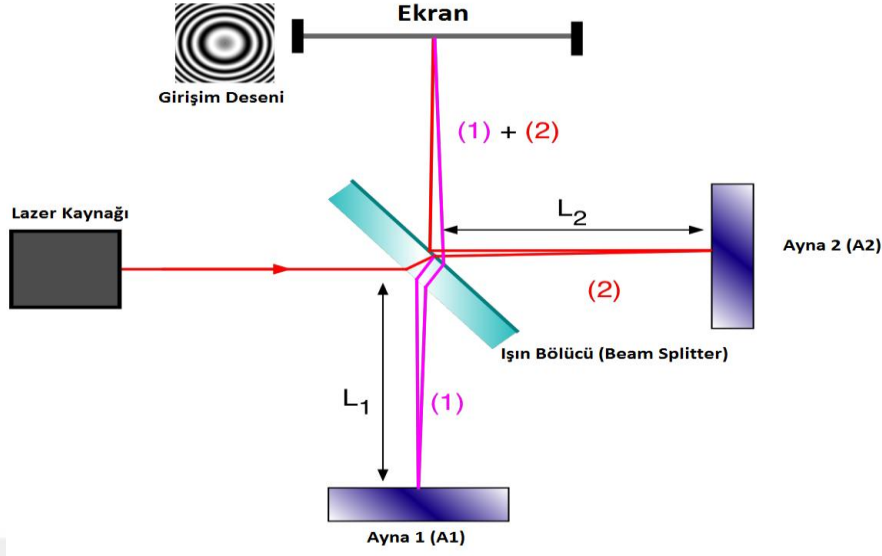
#### **3.1. Materyal**

##### **3.1.1. Optik İnterferometri**

Bu bölümde, optik interferometri teorisinin temelleri, çalışma prensipleri ve toplu Michelson'un şemaları sunulmaktadır.

##### **3.1.1.1. Toplu Michelson İnterferometresi**

Toplu Michelson interferometre konfigürasyonu Şekil 1'de gösterilmektedir. Lazer ışını ışın bölücü tarafından ikiye bölünmüştür; referans kiriş (veya referans kolu) adı verilen bu kirişlerden biri referans aynaya doğru ilerler ve geri yansıtılır, diğeri ise sensör ışını (veya sensör kolu) olarak adlandırılır ve değerlendirme sırasında numuneye doğru ilerler ve ayrıca geri yansıtılır. İki kiriş daha sonra kiriş ayırıcıda yeniden birleştirilir ve girişim sinyalini algılayan fotodetektöre (ekrana) yönlendirilir. Şekil 3.1'de Michelson interferometresinin temel yapısı verilmiştir.



Şekil 3.1. Michelson İnterferometresi Temel Yapısı.

Foto algılayıcıdan elde edilen optik sinyal, bir transimpedans devresi tarafından elektrik voltajına dönüştürülür. Nötrden geçtikten sonra, referans ve aynı optik kaynak tarafından oluşturulan sensör ışını ile bir homodyne interferometre göz önüne alındığında giriş ayırıcı, iki giriş aynı kutuplaşmaya sahiptir. Böylece, bu alanların vektörel yapısını göz ardı edebilir ve fazör gösterimini kullanarak bir skalar analizi yapabiliriz.

Şekil 3.1'de gösterilen interferometre konfigürasyonunu göz önüne alırsak, referans koldaki  $E_{01}$  ve sensör kolundaki  $E_{02}$  genliklerinde ki elektrik alanını birleştirebiliriz. Dolayısıyla, interferometrenin referans ( $E_R(t)$ ) ve sensör ( $E_S(t)$ ) kollarından dönen fazör gösterimindeki elektrik alanı şöyledir:

$$E_R(t) = E_{01}e^{j\omega_0 t} \quad (3.1)$$

$$E_S(t) = E_{02}e^{j(\omega_0 t + \theta(t))} \quad (3.2)$$

$\omega_0$  optik açısal frekans olup,  $\theta(t)$  optik faz gecikmesidir. (Martin ve ark., 2017a)

Verilen toplam alan aşağıdaki gibi olur:

$$E_T = E_{01}e^{j\omega_0 t} + E_{02}e^{j(\omega_0 t + \varnothing(t))} \quad (3.3)$$

İnterferometrenin çıkış yoğunluğu, eşitlik (3.4) te gösterildiği gibi nokta ürün tarafından verilen Poynting vektörünün ortalama değeri ile orantılıdır. (Martin ve ark., 2017a)

$$I(t) = \frac{E_T \cdot E_T^*}{2} \quad (3.4)$$

Burada  $E_T \cdot E_T^*$  toplam elektrik alan ve onun karmaşık eşleniği arasındaki üründür. (3.3) ve (3.4) nolu eşitliklere bakarak çıkış yoğunluğunu elde edebiliriz.

$$I(t) = (|E_{01}|^2 + |E_{02}|^2 + E_{01}E_{02}e^{j\varnothing(t)} + E_{01}E_{02}e^{-j\varnothing(t)})/2 \quad (3.5)$$

Pratik fotodetektör alçak geçiren karakteristiğe sahip olduğundan ve bu frekans sırasına cevap veremediği için, optik frekans  $\omega_0$  ( $10^{14}$  rad / s'de) eşitlik (3.5) 'te belirtilmiştir. Bununla birlikte,  $\varnothing(t)$  'nin düşük zamansal varyasyonlarını elde edebilir.

Euler özdeşliğini kullanıp eşitlik (3.5)'i tekrar yazarsak (Milne-Thomson ve ark., 1972);

$$I(t) = \frac{1}{2} [E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\varnothing(t))] \quad (3.6)$$

Eşitlik (3.6) iki bileşene ayrılabilir: bireysel kaynaklardan gelen optik yoğunluklar (DC yanlılığı) ve alanlar ürünü tarafından verilen girişim terimi. Girişim terimi, fazın  $\varnothing(t)$  değişmesinden dolayı saçak hareketi ile ilişkilidir.

(3.6) eşitliği tekrar yazarsak elde edeceğimiz eşitlik aşağıdaki gibi olacaktır.

$$I(t) = \frac{E_{01}^2 + E_{02}^2}{2} \left[ 1 + \frac{2E_{01}E_{02}}{E_{01}^2 + E_{02}^2} \cos(\varnothing(t)) \right] \quad (3.7)$$

Bununla birlikte, (3.4) nolu eşitlik göz önüne alındığında, referans ve sensör kollarındaki optik yoğunluk eşitlik (3.8) ve (3.9) 'da gösterildiği gibi yeniden yazılabilir:

$$I_R = E_{01}^2/2 \quad (3.8)$$

$$I_S = E_{02}^2/2 \quad (3.9)$$

Bunun yanında, interferometrenin çıkış saçak görünürlüğü (V), maksimum ve minimum I (t) arasındaki kontrastı gösterir. Bu nedenle, V şu şekilde ifade edilebilir:

$$V = \frac{2E_{01}E_{02}}{E_{01}^2+E_{02}^2} = \frac{2\sqrt{I_R I_S}}{(I_R+I_S)} \quad (3.10)$$

(3.8-9) ve (3.10) nolu eşitlikleri tekrar yazarsak :

$$I(t) = (I_R + I_S)[1 + V \cos(\varnothing(t))] \quad (3.11)$$

Eğer giriş ayırıcı 50:50'lik bir bölünme oranına sahipse,  $I_R$  ve  $I_S$  optik yoğunlukları eşit olduğu için bire birlik görünürlüğüne (V) sahip olacağız. Bu nedenle, her interferometre kolundaki optik yoğunluk,  $E_{01} = E_{02} = E_0/\sqrt{2}$  olacak şekilde aynı olacaktır. Ayrıca,  $I_0 = \frac{E_0^2}{2}$  burada  $I_0$  lazerin optik yoğunluğudur, daha sonra interferometre çıkış yoğunluğu şu şekilde belirlenebilir:

$$I(t) = I_0[1 + V \cos \varnothing(t)] \quad (3.12)$$

Kesinlikle doğru olarak, V görünürlüğü ( $0 \leq V \leq 1$ ) (3.12) nolu eşitliğe göre optik kaynağın tutarlılığı, çıkış ışınları arasında hizalama ve polarizasyon gibi çeşitli parametrelere dayanır. Bu nedenle, pratik bir durumda, V=1 durumunun olmasını başarmak oldukça zordur. Bununla birlikte, interferometre hizasını ayarlayarak buna yaklaşabiliriz.



İnterferometrede yayılan bir sinyal teriminin,  $\Delta \emptyset(t)$  ve bir statik faz kayması,  $\emptyset_0$  olduğunu ve bunun optik faz kayması  $\emptyset(t)$  tarafından verildiğini varsayalım. Bu yüzden;

$$\emptyset(t) = \Delta \emptyset(t) + \emptyset_0 \quad (3.13)$$

burada  $\Delta \emptyset(t)$  ilgili sinyaldir ve  $\emptyset_0$ , interferometre kollarının optik yol uzunlukları arasındaki farktan kaynaklanır.  $\emptyset_0$  terimi ise (3.14) nolu eşitlikte verilmiştir. (Udd, Spillman, 2011)

$$\emptyset_0 = \frac{2\pi}{\lambda} n_s l_s \quad (3.14)$$

Buradaki,  $\lambda$  vakumdaki lazer dalga boyu,  $n_s$  kırılma indisi,  $l_s$  ise interferometrenin kolları arasındaki toplam farktır.

İlgilenilen sinyalin  $\Delta \emptyset(t)$  kırılma indisindeki ( $\Delta n_s$ ) ve/veya kol uzunluğundaki ( $\Delta l_s$ ) bir değişiklikten kaynaklanabileceğini göz önünde bulundurarak, ölçülecek bazı bozulmalar interferometrenin sensör kolunda harekete geçtiğinde, eşitlik (3.15) 'de gösterildiği gibi bir optik faz kayması oluşumu meydana gelir.

$$\Delta \emptyset(t) = \frac{2\pi}{\lambda} [l_s \Delta n_s(t) + n_s \Delta l_s(t)] \chi \quad (3.15)$$

$\chi$  burada hassasiyet faktörü olup, Michelson interferometresinde  $\chi = 2$  olduğunda, lazer ışını kolları boyunca iki kez geçtiğinden, duyarlılığı iki katına çıkarır (Mach- Zehnder interferometresi için,  $\chi = 1$  kullanılır). Ayrıca, yayılma ortamının hava ( $\Delta n_s = 1$ ) olduğu ve kırılma indisi değişiminin olmadığı göz önüne alındığında, elde ettiğimiz sonuçlar eşitlik (3.16) deki gibi olur:

$$\Delta \emptyset(t) = \frac{2\pi}{\lambda} [\Delta l_s(t)] 2 = \frac{4\pi}{\lambda} [\Delta l_s(t)] \quad (3.16)$$

Doğrusal sistemlerin karakterizasyonun amacı, doğrusal bölgesinde çalışan piezoelektrik çalıştırıcılarda olduğu gibi, ilgili sinyali ( $\Delta \emptyset(t)$ ) sinüsoidal bir sinyal

olarak kullanırız. Sonrasında ise  $\Delta l_s(t)$  ve  $\Delta \emptyset(t)$  arasındaki oransal ilişkiyi aşağıdaki gibi açıklayabiliriz.

$$\Delta \emptyset(t) = x \sin(\omega t) \quad (3.17)$$

burada  $x$ , radyan cinsinden faz modülasyon indeksidir ve  $\omega$  ise modülasyon frekansdır.

Yoğunluk çıkışı daha sonra (3.12) nolu eşitlikte bir orantı sabiti olan  $A$  kullanılarak bir fotodedektör tarafından elektrik voltajına dönüştürülür. Bu nedenle, interferometre çıkışı aşağıdaki gibi olacak:

$$v(t) = A[1 + V \cos(\Delta \emptyset(t) + \emptyset_0)] \quad (3.18)$$

$A$  sabiti, lazer gücünü ve  $V$  ise saçak görünürlüğü ifade eder.

İdeal olarak,  $\emptyset_0$  sabit olmalıdır. Ancak, interferometre kolu üzerinde etkili olan sahte bozucular nedeniyle, aslında yarı statik bir miktardır (varyasyon genellikle 20 Hz'nin altında meydana gelir) ve birkaç saniye içinde bu sapmanın genliği kolaylıkla  $2\pi$  radyan veya daha yüksek mertebede olabilir. (Udd, Spillman, 2011)  $\emptyset_0$ 'daki bu değişim interferometre çalışma noktasının zamanla değişerek sinyal solmasına neden olur.

### 3.1.1.2. Sinyal solması

Yüksek hassasiyet nedeniyle, interferometre ayrıca sıcaklık değişimleri (mikro kelvin ölçeğinde), nano-mekanik titreşimler, hava türbülansı, vb. gibi çevresel bozucuları da ( $\emptyset_0$  değiştirerek) tespit eder.

Eşitlik (3.12) ve (3.13) göz önüne alındığında, yavaş değişken faz  $\emptyset_0$ , toplam fazda  $\emptyset$ , bir değişkene neden olur, bu da çalışma noktasını zamanla değiştirebilir ve sinyalin solmasına neden olur. İnterferometrenin bir kolunun kırılma indisinde veya uzunluğunda herhangi bir rastgele değişiklik, tespit edilen sinyalin genliğinde bir değişiklik meydana getirir. Bu davranış birkaç kaynağa sahiptir ve genellikle ilgi sinyalini çıkarmak için önemsiz bir sürece yol açarak interferometre çalışmasını daha da zorlaştırır.

Sorunu daha derinden anlamak için, eşitlik (3.12) 'daki faz kayması  $\emptyset$  , eşitlik (3.13) de zamanla yavaş yavaş sürüklenen çevresel düşük frekanslı faz önyargısını temsil eden  $\emptyset_0$ ' da yazıldığı gibi iki terim ile değiştirilecektir ve ilgili sinyali  $\Delta \emptyset_0$  diferansiyel faz kayması ile indüklenen sinyali temsil eder, örneğin.  $\emptyset = \Delta \emptyset + \emptyset_0$

Yoğunluk terimi I, bir  $\emptyset$  fonksiyonu olarak eşitlik (3.12) dan alınarak Şekil 3.2 de gösterilmiştir. Bu yoğunluk, farklı önyargı fazlarında ( $\emptyset_0$ ) küçük sinyal tepkisini gösterir. Sapma fazı  $\pm\pi/2$  rad tek katları olduğunda,interferometre karesel olup doğrusal bir tepki gösterir(küçük sinyal şartları için:  $\pi/2$  radyan dan daha küçük) (3.12) nolu eşitliki tekrar yazarsak:

$$I(t) = \frac{I_0}{2} \left[ 1 + \cos(\Delta \emptyset + \frac{\pi}{2}) \right] = \frac{I_0}{2} [1 - \sin(\Delta \emptyset)] \quad (3.19)$$

$\Delta \emptyset(t) = x \sin(\omega t)$  ,  $x \ll \pi/2$  rad ve  $\sin(a) \cong a$  varsayarak eşitliği yeniden yazarsak:

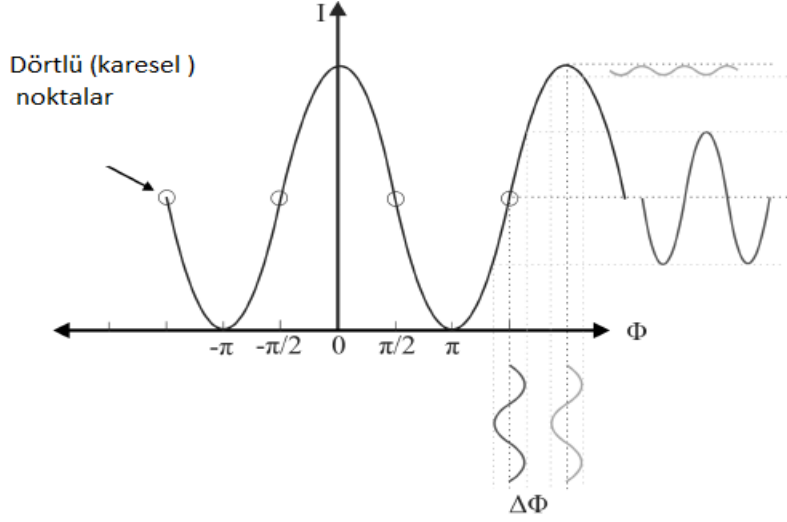
$$I(t) \cong \frac{I_0}{2} [1 - x \sin(\omega t)] = \frac{I_0}{2} (1 - \Delta \emptyset) \quad (3.20)$$

Eşitlik (3.20) 'daki ikinci terim, ilgilenilen sinyale  $\Delta \emptyset$  orantılıdır. Doğrusal tepki,  $\pi/2$  rad'den daha düşük tepe değerlere sahip sinyaller için meydana gelir. Bu durumda, sinyal dalga biçimi keyfi olabilir.

Önyargı fazı  $\pm\pi$  rad'nin katı olduğunda, kosinüs fonksiyonu tepe ve çukurlar arasında değişir. Bu durumda, küçük sinyal tepkisi zayıflatılır ve ağır şekilde çarpıtılır. Bu fenomen, çoğu sensör uygulamasında interferometrik çıkışın doğrudan kullanımını önleyen yanlılık kaynaklı sinyal solması olarak bilinir.

Rastgele faz kaymaları ölçüm doğruluğunu azaltır ve en kötü durumda ölçüm sisteminin düzgün çalışmasını engelleyebilir. Bu nedenle, interferometrenin çevresel bozulmalara karşı stabilizasyonunda bir problem vardır. Aslında bu, bütün iki ışın

demetli interferometre türü için olağan bir sorundur. Şekil 3.2’de interferometrelerde sinyal solması gösterilmiştir.



Şekil 3.2. İnterferometrelerde sinyal solma problemi.

(3.12) nolu eşitlikten de görülebileceği gibi, çıkış yoğunluğu ( $I$ ), bilgi sinyalini içeren faz kaymasının ( $\Phi$ ) kosinüsüne karşılık gelen bir oranda değişir. Bu doğrusal olmayan fonksiyonun çevresel sürüklenmelerle birlikte varlığı, Şekil 3.2’de gösterildiği gibi interferometrik bir sinyal solması ile sonuçlanır.

## 3.2. Yöntem

Bu bölümde, interferometrik sistemi ve sistemin kararlılık analizini dengelemek için önerilen doğrusal olmayan kontrolün matematiksel modelini sunuyoruz. Hesaplamalı simülasyonlar, interferometrenin matematiksel modeline dayanarak gerçekleştirilir.

### 3.2.1. Uyarlamalı kayma modu

Değişken yapılı kontrol sistemlerinin davranışları, uygun bir geri besleme kontrol kuralı ve bir karar kuralı tarafından karakterize edilir. Anahtarlama fonksiyonu olarak adlandırılan karar kuralı, sistemin davranışını oluşturan fonksiyon seçer. Kayan kipli kontrolde, değişken yapılı kontrol sisteminin durumları, faz uzayında, faz değişkenlerinden oluşan kayma yüzeyi olarak adlandırılan bir yüzey üzerinde tutacak şekilde tasarlanır. Tasarlanan sistemin davranışı, sistemin durumlarının bu yüzey üzerine gelmesi ve bu yüzey üzerinde kalmasına yöneliktir.

Kayan kipli kontrol doğası gereği süresizdir. Kontrolde, sistem durumları kayma yüzeyine ulaştıktan sonra, sistem durumlarının kayma yüzeyinin dışına çıkma durumu gerçekleşirse, ani bir kontrol işareti üretilerek durumlar tekrar yüzey üzerine getirilmeye çalışılır.

Oransal-integral-türev (PID) kontrolü, geniş bir yelpazedeki kontrol mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Günümüzde PID kontrol yöntemi kullanımı, basit mimarisi ve etkinliği nedeniyle tercih edilir. Bir PID kontrol cihazı tasarlamamanın kilit yönü  $K_p$ , integral kazanç,  $K_i$  ve türev kazanç,  $K_d$ 'dir. Tipik PID kontrolünde, bu kazançlar genellikle sabit olduğu için, uyarlamalı kayma mod kontrol yöntemi geliştirilmiştir.

PID kontrolü endüstriyel uygulamada geniş çapta kullanılmasına rağmen, bazı uygulamalar için yetersizdir. Daha önce de belirtildiği gibi, kayan mod kontrolü (SMC), bu belirsizliklere karşı sağlamlığı ile bilinmektedir. SMC, uyarlamalı PID kontrolü ile birlikte bir denetleyici olarak kullanılabilir. SMC'yi kontrol şemasına eklemek, genel kontrol ünitesinin adaptasyon değişikliklerini mümkün kılacaktır.

### 3.2.2. Sistem modeli

İnterferometrik sistemi stabilize etmek için kullanılan kontrol tekniği, sistemi bir anahtarlama yüzeyinden beslemek için bir işaret fonksiyonunun kullanılmasıyla karakterize edilen değişken yapı ve kayma modları kontrolü (Decarlo, Zak, Matthews, 1988, Utkın, 1978) olarak adlandırılır, sistemin eşleşen belirsizliklerin varlığından etkilenmediği, belirsizliklerin kontrol girişi ile aynı kanalda olduğu anlamına gelir. Bu kontrol tekniği süresiz ve sonuç olarak doğrusal olmayan bir yapı kullanarak ve uygulaması interferometre gibi doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde kuvvetli bir şekilde gerçekleşir. Bu tekniği kullanmanın avantajları, uygulama kolaylığı, sistemdeki kurulum belirsizliklerini ve bozucularını (sağlamlık) elimine etme konusundaki güçlü yeteneğidir.

Önerilen kapalı döngü sistemin blok şeması Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Bu, alçak geçiren bir filtre (LPF) ve bir entegratör içerdiğinden, ikinci dereceden bir sistemdir. Alçak geçiren filtre, sahte sinyal  $\emptyset_0$  nedeniyle  $v$ 'nin düşük frekanslarda (20 Hz altında) bileşenlerinin dengelenmesine izin verir, çünkü 2. bölümde belirtildiği gibi düşük frekanslarda meydana gelir. Diğer taraftan, ilgilenilen sinyal bu uygulamanın çoğunda daha yüksek frekanslarda değişmeden kalır (20 Hz üstünde).

İnterferometrelerden elde edilen optik yoğunluk çıkışları, bir orantı sabiti  $A$  olan bir fotodetektör ile elektrik voltajında dönüştürülür ve (3.18) nolu eşitliğin DC bileşenini ortadan kaldırarak çıkışı elde ederiz.

$$v(t) = AV \cos \emptyset \quad (3.21)$$

Sinyallerin  $\Delta\emptyset$  ve  $\emptyset_0$  'ın tamamen dengelendiğini ve interferometrenin karesel durumda olduğunu varsayarak, şöyledir:

$$\phi = \Delta\phi + \phi_0 - \phi_c = \pi/2 \quad (3.22)$$

Bu yüzden (3.21) nolu eşitliği tekrar yazarsak;

$$v(t) = AV \cos(\Delta\phi + \phi_0 - \phi_c) \quad (3.23)$$

$\Delta\phi + \phi_0 - \pi/2 = \phi_c$  , olup geri besleme sinylidir.

Bu nedenle, çıkış voltaj sinyali  $v(t)$ , kareleme noktasında sıfırdır ve ilgilenilen sinyali içeren geri besleme fazı sinyali aşağıdaki şekilde verilir:

$$\phi_c = G_{AMP} G_{PZT_{fb}} v_{fb} \quad (3.24)$$

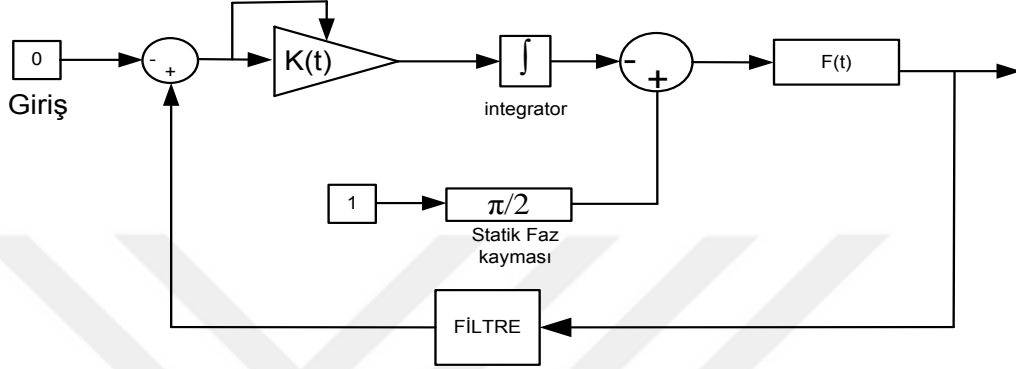
burada,  $G_{AMP}$  [V/V] 'deki lineer amplifikatör kazancı ise,  $G_{PZT_{fb}}$ , geri besleme piezoelektrik aktüatör kazancı [rad/V]' dir ve  $v_{fb}$ , Bölüm 3'te detaylandırıldığı gibi, geri besleme voltajı sinylidir. Doğrusal bölgesinde çalışan geri besleme piezoelektrik aktüatörleri göz önüne alındığında, ilgilenilen sinyalin ( $\Delta\phi$ ) var olduğu ve geri besleme voltajı ile doğrusal olarak değiştiği sonucuna varabilir.

Bununla birlikte, bu tekniği uygulamak için frekans aralığını göz önünde bulundurmaktır önemlidir, çünkü kontrol sisteminin ilgi sinyalini tam olarak dengelemek için yeterli bir kazanıma sahip olması gerekir ve ilgi sinyalinin frekansı ne kadar yüksekse, kazanç o kadar büyük olur (özellikle düşük kazançlı yaklaşımla karşılaştırıldığında (Udd,Spillman, 2011) ki hangi frekans için dinamik aralığı yoğun olarak kısıtlar. Dahası,  $\phi_c$  yi elde etmek için  $G_{PZT_{fb}}$  'nin kesin değerini bilmek önemlidir.

Şekil 3.3'te gösterildiği gibi,  $\gamma$  toplam geri besleme kazancı, LPF ise 1.dereceden alçak geçiren Butterworth filtresi olup kesim frekansı  $f_c = 20$  Hz olarak ve transfer fonksiyonu  $H(s) = \frac{W(s)}{V(s)} = \frac{1}{(1+\tau s)}$  dir. Burada  $s$  Laplace transfer değişkeni olup ve  $\tau = \frac{1}{2\pi f_c} = \frac{1}{40\pi}$  saniyedir. Sgn fonksiyonu şu şekilde çalışmaktadır.

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0, \\ 0 & x = 0, \\ -1 & x < 0. \end{cases} \quad (3.25)$$

Önerilen kapalı çevrim sistemi blok diyagramını aşağıdaki gibidir. Şekil 3.3'de sistemimizde önerdiğimiz kapalı döngü sisteminin blok diyagramını verilmiştir.



Şekil 3.3. Önerilen kapalı döngü sisteminin blok diyagramı.

### 3.2.3. Durum-uzay temsili

Durum –uzay temsilinde kapalı döngü sistemi tanımlamak için Şekil 3.3'de gösterilen blok diyagramını ve Şekil 3.4'de düzenlenmiş olan blok diyagramını üzerinden yola çıkarak alçak geçiren filtrenin transfer fonksiyonunda  $w(t) = x_2(t)$  ile giriş =0 olursa elde edeceğimiz sonuç:

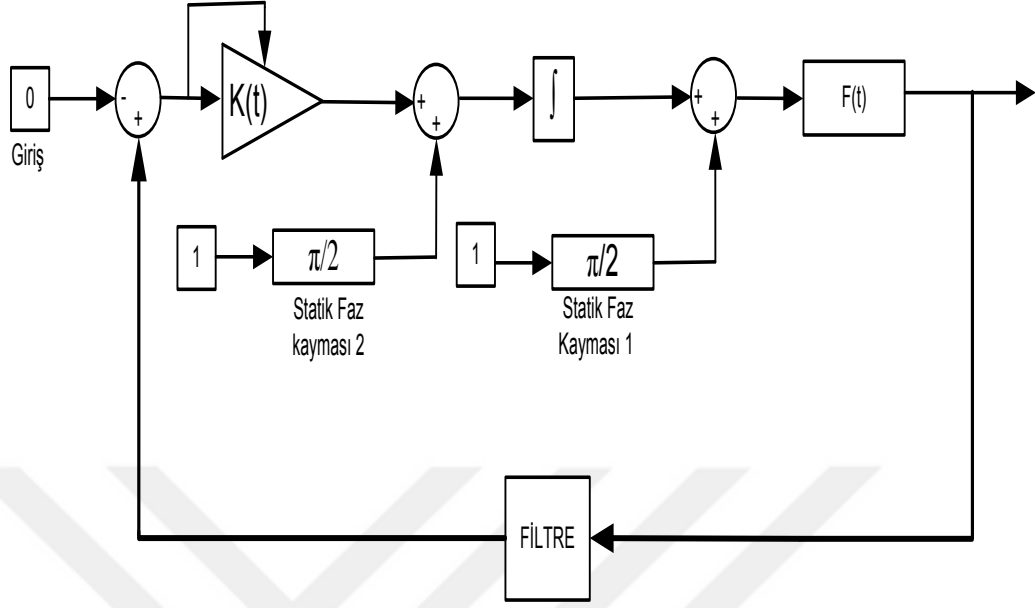
$$x_2(s)(1 + \tau s) = V(s) \quad (3.26)$$

(3.26) nolu eşitliğe Ters Laplace dönüşümü uygularsak:

$$x_2(t) + \tau \dot{x}_2(t) = v(t) \quad (3.27)$$



Şekil 3.4'de sistem analizinde kullanılan blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.4. Sistem analizinde kullanılan blok diyagramı.

Şekil 3.4 ve (3.27) nolu eşitlikten yola çıkarak sunmuş olduğumuz interferometrik sistemin durum denklemlerini yazacak olursak:

$$\dot{x}_1(t) = \gamma \operatorname{sgn}(x_2) + \dot{\phi}_0, \quad \gamma > 0 \quad (3.28)$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{AV}{\tau} \cos(x_1) - \frac{x_2}{\tau}, \quad AV, \tau > 0 \quad (3.29)$$

burada  $x_1$  ve  $x_2$  sistemin durum değişkenleridir. (3.28) nolu eşitlikten de çıkarıldığı gibi kontrol koşulları aşağıdaki şekilde verilir (Martin ve ark., 2017a)

$$\gamma > |\dot{\phi}_0| \quad (3.30)$$

Kontrol koşulu  $\operatorname{sgn}(\dot{x}_1) = \operatorname{sgn}[\gamma \operatorname{sgn}(x_2 + \dot{\phi}_0)] = \operatorname{sgn}(\dot{x}_2)$  şeklindedir. Bu yüzden  $\dot{x}_1$  sadece  $x_2$  ye bağlıdır ve  $x_1$  in artış oranı bozulmayı etkilemez. Not alınması gereken bir durumda şudur ki, sistemin  $\gamma$  kazancı ne kadar yüksekse,  $x_1$  in denge

noktasına yakınsaması daha hızlı olacak ve daha sağlam sistem olacaktır. Sonuç olarak, aşma daha büyük olacakken , yerleşme süresi daha kısa olacaktır.

Durum denklemleri ve kontrol koşulları göz önüne alındığında , sistemin denge noktaları şu şekilde verilir.

$$\dot{x}_1 = 0 \rightarrow \text{sgn}(x_2) = 0 \rightarrow x_2 = 0 \quad (3.31)$$

Ve

$$\dot{x}_2 = 0, x_2 = 0 \rightarrow AV \cos(x_1) = 0 \rightarrow x_1 = k \frac{\pi}{2} \quad (3.32)$$

$$k \in [\dots, -3, -1, 1, 3, \dots]$$

Sonraki bölümlerde, sistemin denge noktasına yaklaşması ( $x_1 = k\pi/2$  ,  $x_2 = 0$ ) olarak değerlendirilecektir.

### 3.2.4. Kararlılık Çalışması

#### 3.2.4.1. Doğrusallaştırılmış Sistemin Lyapunov Analizi

Lyapunov'un doğrusallaştırma yöntemi doğrusal olmayan bir sistemin yerel kararlılığının değerlendirilmesine izin verir. Bu nedenle, eğer doğrusallaştırılmış sistemin bir denge noktası kesinlikle kararlı ise, o zaman bu nokta (ve etrafındaki) o belirli doğrusal olmayan sistem için yerel olarak asimptotik olarak kararlıdır. (Slotine ve L1 1991)

Köken etrafındaki kararlılık (sabit durum noktası) durum uzayının yeni orijini olarak tanımlanacak olan özgül bir denge noktası ( $x_1^* = \pi/2$  ,  $x_2^* = 0$ ) seçilerek incelenecektir. Bu şekilde aşağıdaki gibi değişken değişikliklerini yapabiliriz.

$$y_1 = x_1 - x_1^* = x_1 - \frac{\pi}{2} \quad (3.33)$$

$$y_2 = x_2 - x_2^* = x_2 \quad (3.34)$$

Burada  $x_i^*$   $i=1,2,\dots$  için denge noktasında ki  $x_i$  durumudur. (3.28) ve (3.29) nolu eşitliklere dayanarak durum denklemleri tarafından sistem şu şekilde tanımlanır.

$$\dot{y}_1 = \gamma \operatorname{sgn}(y_2) = f_1(y_1, y_2) \quad (3.35)$$

ve

$$\dot{y}_2 = \frac{AV}{\tau} \cos\left(y_1 + \frac{\pi}{2}\right) - \frac{y_2}{\tau} = -\frac{AV}{\tau} \sin(y_1) - \frac{y_2}{\tau} = f_2(y_1, y_2) \quad (3.36)$$

(3.35) ve (3.36) nolu eşitlikler, kontrol şartları ve sistemin denge noktaları ile aşağıdaki gibi düzenlersek eğer;

$$\dot{y}_1 = 0 \rightarrow \gamma \operatorname{sgn}(y_2) = 0 \rightarrow y_2 = 0 \quad (3.37)$$

ve

$$\dot{y}_2 = 0 \rightarrow \sin(y_1) = 0 \rightarrow y_1 = k\pi \quad (3.38)$$

$k \in [\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots]$

Sistem doğrusallaştırılması için, işaret fonksiyonu sigmoid bir fonksiyon tarafından verilen denklem tarafından yaklaşımı yapılarak  $\dot{y}_1 = \gamma \operatorname{sgm}(y_2) = \gamma y_2 / (|y_2| + \epsilon)$   $\epsilon > 0$  olarak yeterince küçüktür. Bu yüzden, (3.37) ve (3.38) nolu eşitliklerde verilen durum değişkenleri çevresinde oluşan doğrusallaştırma (Slotine ve Li, 1991),  $k$  çift olarak:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{y}_1 \\ \Delta \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \frac{\partial f_1}{\partial y_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial y_1} & \frac{\partial f_2}{\partial y_2} \end{bmatrix}_{\substack{y_1=k\pi \\ y_2=0}} \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \end{bmatrix} = D_{2 \times 2} \quad \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\gamma}{\epsilon} \\ -\frac{AV}{\tau} & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$D$  matrisinin öz değerleri  $s$  olarak verilen  $\{\det(sI_d - D) = 0, s \in \mathbb{C}\}$ , burada  $I_d$  özdeşlik matrisi ve doğrusallaştırılmış sistemin kapalı döngü kutuplarına karşılık gelir. Bu durumda, determinant sonuçları:

$$\det(sI_d - D) = s^2 + \frac{1}{\tau}s + \frac{AV\gamma}{\tau\epsilon} = 0 \quad (3.40)$$

Burada ki denklemde yer alan  $\tau, \gamma, \epsilon$  ve  $AV$  değerleri pozitiftir. Bu nedenle ortaya çıkan sistem kutupları aşağıdaki gibidir.

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2\tau} \pm \frac{1}{2}j\sqrt{\left(\frac{4AV\gamma}{\tau\epsilon}\right) - \left(\frac{1}{\tau^2}\right)} \quad (3.41)$$

(3.41) nolu eşitliği gerekli şekilde düzenlersek:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2\tau} \pm j\left[\frac{1}{2}\left(\sqrt{\frac{4AV\gamma}{\tau\epsilon}}\right)\left(\sqrt{1 - \frac{\epsilon}{4\tau AV\gamma}}\right)\right] \quad (3.42)$$

İkinci mertebeden bir sistem için dinamik denklemi aşağıdaki gibi verilmiştir. (Ogata, Severo, 1998):

$$p = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \xi^2} \quad (3.43)$$

burada,  $\omega_n$  sönümsüz doğal frekans ve  $\xi$  ise sönümleme oranı olup aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{AV\gamma}{\tau\epsilon}} \quad (3.44)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{\epsilon}{4\tau AV\gamma}} \quad (3.45)$$

(3.42) nolu eşitlikteki gözlemlerimizden birisi de, zaman sabitini ( $\tau$ ) düşürürsek eğer, kutupun asıl bileşenini hayali eksenden kutuplara hareket ettirmek daha da olumsuz olacaktır. Bu nedenle, sistem dinamiği sırasıyla (3.44) ve (3.45) nolu eşitliklerde yer alan  $\omega_n$  ve  $\xi$  nin açıklamalarından ötürü yerleşme ve yükselme zamanlarının azalımı daha hızlı olacaktır. Ayrıca, kontrol sinyali daha hızlı olacak ve bu değişkenlerinin takibi sağlanacaktır.

Bunun yanısıra, eğer  $AV$  faktörü  $\tau$  sabiti ile birlikte artırılırsa, sonrasında yükselme zamanı düşecektir. Bununla birlikte, aşma yüzdesi, sistem yanıtındaki salınımı artırarak daha yüksek olacaktır. Eğer küçük bir  $AV$  faktörüne sahip isek, yükselme zamanı daha büyük olacaktır ki, dolayısıyla yükselme zamanından daha hızlı bir  $\phi_0$  bozunumu varsa, sonrasında kontrol bu bozulmayı bastırmayı başaramayacaktır. Bu durumun üstesinden gelmenin yolu ise  $\gamma$  kazancını arttırmaktır. (3.42) nolu eşitlikte gözlemlediğimiz kadarıyla, eğer  $AV$  faktörü azalırsa, (3.43) nolu eşitlik tarafından tanımlanan sistemin dinamik karakteristiğini korumak amacıyla  $\gamma$  kazancı arttırılmalıdır.

$\tau = \frac{1}{40\pi}$  saniye,  $\epsilon = 0.01$ ,  $\gamma = 54 \text{ rad}$  ve  $AV = 1 \text{ V}$   $k$  çift için kutuplar  $s_{1,2} = (-63 \pm j821)$  olarak (Slotine ve Li, 1991) göre, sabit bir odağa karşılık gelir ki buda denge noktası kesinlikle kararlıdır demektir. Daha sonrasında doğrusal olmayan bir sistem lokal olarak asimptotik kararlılığı mevcuttur. Benzer şekilde,  $k$  tek ise kutupları  $s_1 = -889$  ve  $s_2 = 763$  olarak elde edebiliriz. Buda herhangi bir eyer noktasına karşılık gelir. (Slotine ve Li, 1991) Bu yüzden, bu denge noktaları kararlı değildir. (Martın ve ark, 2017a) Bunun yanı sıra  $D$  nin bir sabit olması, gerçek elemanlar ve nonsingular matris ile, denge noktasının  $y_1 = k\pi$  ve  $y_2 = 0$  olması gerek ve yeter şarttır. Ayrıca  $k$  çift için, kesinlikle kararlı olmalı ki, herhangi bir simetrik pozitif belirli matris ( $Q$ ) için, burada benzersiz bir simetrik matris ( $P$ ) pozitif sınırdadır, Lyapunov denklemi için çözüm vardır. (Slotine ve Li, 1991)

$$D^T P + P D = -Q \quad (3.46)$$

Burada  $Q$  bir simetrik pozitif belirli matristir.

$D$  değerini ve  $Q = I_d$  yaparsak eğer buradaki  $I_d$  özdeşlik matrisidir. Elde edeceğimiz denklemler aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix} 0 & -\frac{AV}{\tau} \\ \frac{\gamma}{\epsilon} & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \frac{\gamma}{\epsilon} \\ -\frac{AV}{\tau} & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Böylelikle elde edilen  $P$  matrisi :

$$P = \begin{bmatrix} \frac{\epsilon AV}{2\gamma} + \frac{\epsilon}{2AV\gamma} + \frac{\tau}{2} & \frac{\tau}{2AV} \\ \frac{\tau}{2AV} & \frac{\tau}{2} + \frac{\tau^2\gamma}{2\epsilon AV} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Sylvester' in teoremine başvuru yaparsak, elde edeceğimiz değer  $p_{11} = (\frac{\epsilon AV}{2\gamma} + \frac{\epsilon}{2AV\gamma} + \frac{\tau}{2}) > 0$   $\det(P) > 0$  dır. Bu yüzden  $P$  bir pozitif sınırlı matrisi ve lineer sistem kesinlikle kararlıdır. Bu nedenle lineer yaklaşım sadece lokal kararlı iken doğrusal olmayan sistemin küresel asimptotik kararlılığı mevcuttur.

### 3.2.4.2. Doğrusal Olmayan Sistemin Lyapunov Analizi

Doğrusal olmayan sistemin analizine göre kararlılık çalışması için, spesifik bir denge noktasının seçimi ( $x_1 = \frac{\pi}{2}, x_2 = 0$ ) durum-uzayın orjininde olması gerekliydi. Bu yolla birlikte, hem orjin etrafındaki kararlılık hemde sabit durum noktasında analizi yapılacaktır.

Gerçek bir sisteme daha iyi bir yaklaşım için, işaret fonksiyonuna bir sigmoid fonksiyonu tarafından verilen şu denklemle  $sgm(y_2) = \frac{y_2}{|y_2| + \epsilon}$ ,  $\epsilon > 0$  (yeterince küçük) yaklaşılabılır. Bu yüzden (3.35) ve (3.36) nolu eşitliklerden yola çıkarsak durum denklemleri aşağıdaki şekilde olacaktır.

$$\dot{y}_1 = \gamma \frac{y_2}{|y_2| + \epsilon} \quad (3.49)$$

$$\dot{y}_2 = -\frac{AV}{\tau} \sin(y_1) - \frac{y_2}{\tau} \quad (3.50)$$

Analizi ile devam edebilmek için aşağıdaki teorem de anlatılan Küresel Değişmeyen Küme Teoremini kullanacağız. (Slotine ve L1, 1991)

**Teorem 3.1-Küresel Değişmeyen Küme Teoremi:** Değişmeyen bir zaman sistemi düşünürsek (otonom gibi.)  $\dot{x} = f(x)$  sürekli  $f$  ile ,  $V_1(x)$  ise sürekli birinci kısmi

türevlere sahip skaler bir fonksiyon olsun. Farz edelim ki  $V_1(x) \rightarrow \infty, \|x\| \rightarrow \infty$  ve  $\dot{V}_1(x) \leq 0$  olarak tüm durum uzayı boyunca,  $\mathcal{R}$  tüm noktalar kümesi olsun burada  $V_1(x) = 0$  ve  $N$  ise  $\mathcal{R}_l$  içindeki en büyük değişmeyen küme olur. Sonrasında ise,  $t \rightarrow \infty$  olduğu için  $N$  de tüm çözümler küresel olarak asimptotik olarak birleşiyor.

İkinci derece bir sistemin genel formu ile düşünersek:

$$\ddot{x} + b(\dot{x}) + c(x) = 0 \quad (3.51)$$

Buradaki  $b$  ve  $c$ , aşağıdaki denklemlerde açıklanan işaret koşullarıyla sürekli fonksiyonlardır:

$$\dot{x} + b(\dot{x}) > 0 \quad \dot{x} \neq 0 \quad (3.52)$$

ve

$$xc(x) > 0, \quad x \neq 0 \quad (3.53)$$

Süreklilik varsayımları ile birlikte  $b$  ve  $c$  fonksiyonlarında ki işaret koşulları  $b(0)=0$  ve  $c(0)=0$  anlamına gelir. Aşağıdaki denklemde tanımlandığı gibi sistem için pozitif belirli bir fonksiyon (Slotine ve Li, 1991):

$$V_l = \frac{1}{2}\dot{x}^2 + \int_0^x c(y)dy \quad (3.54)$$

(3.54) nolu eşitliği türeterek elde edeceğimiz eşitlik:

$$\dot{V}_1 = \dot{x}\ddot{x} + c(x)\dot{x} = -\dot{x}b(\dot{x}) - \dot{x}c(x) + c(x)\dot{x} = -\dot{x}b(\dot{x}) \leq 0 \quad (3.55)$$

Ayrıca  $\dot{x}b(\dot{x}) = 0$ , ise sadece  $\dot{x} = 0$  olur. Bu da şu anlama gelmektedir ki (3.51) nolu eşitlikten yola çıkarsak  $x \neq 0$  olduğu sürece  $\ddot{x} = -c(x)$  ifadesi sıfır olmaz. Bu yüzden,  $\ddot{x}$  ifadesi sadece  $x=0$  olursa sıfıra hiç eşit değildir ve sistem  $x=0, \dot{x} = 0$  da denge noktalarındadır. Ek olarak,  $\dot{x} = 0$  tarafından tanımlı  $\mathcal{R}_l$  ye eşit küme ile en büyük değişmeyen küme  $N$   $\mathcal{R}_l$  içerisinde  $x = 0, \dot{x} = 0$  olarak adlandırılan sadece bir nokta

içerir. Yerel değişmeyen küme teoreminin kullanımı, orijinin bir yerel olarak asimptotik olan kararlı noktayı belirtir.

Son olarak, doğrusal olmayan interferometrik bir sistemi (3.54) ve (3.55) deki eşitlikler tarafından tanımlayabiliriz. (3.50) nolu eşitlikten yola çıkarak:

$$\ddot{y}_2 = -\frac{AV}{\tau} \cos(y_1) \dot{y}_1 - \frac{\dot{y}_2}{\tau} \quad (3.56)$$

(3.56) nolu eşitlikte (3.50) nolu eşitliğin gerekli değişikliği yapılırsa:

$$\ddot{y}_2 = -\frac{AV}{\tau} \cos(y_1) \gamma \frac{y_2}{|y_2| + \epsilon} - \frac{\dot{y}_2}{\tau} \quad (3.57)$$

(3.57) nolu eşitlik tekrar yazılırsa: aşağıdaki gibi ikinci mertebeden bir sistem elde ederiz ki, buradaki sıradan fonksiyonlar  $b$  ve  $c$  (3.51) nolu eşitlikteki ifade ile karşılaştırıldığında  $b(\dot{y})_2 = \frac{\dot{y}_2}{\tau}$  ve  $c(y_2) = -\frac{AV}{\tau} \cos(y_1) \gamma (y_2 / (|y_2| + \epsilon))$  şu şekilde temsil ederiz.

$$\ddot{y}_2 + \frac{\dot{y}_2}{\tau} + \frac{AV}{\tau} \cos(y_1) \gamma \frac{y_2}{|y_2| + \epsilon} = 0 \quad (3.58)$$

Sistemin durum değişkeni  $y_1$   $-\pi/2 < y_1 < \pi/2$  arasında olup ve  $\cos(y_1) > 0$  olacaktır ki, sistem için pozitif bir sınır fonksiyonu vardır.

$$V_l = \frac{1}{2} (\dot{y}_2^2) + \int_0^{y_2} \frac{AV}{\tau} \cos(y_1) \gamma \frac{y_2}{|y_2| + \epsilon} dy_2 \quad (3.59)$$

(3.60) nolu eşitliği ayrıştırırsak elde edeceğimiz eşitlik aşağıdaki gibi olur:

$$\dot{V}_l = \dot{y}_2 \ddot{y}_2 + \left( \int_0^{y_2} \frac{AV}{\tau} \cos(y_1) \gamma \frac{y_2}{|y_2| + \epsilon} dy_2 \right) \dot{y}_2 \quad (3.60)$$

(3.57) nolu eşitliği düşünersek;

$$\dot{V}_l = -\dot{y}_2 \frac{\dot{y}_2}{\tau} \quad (3.61)$$



Çıktıyı bir durum değişkeni olarak kullanarak, kontrol sistemi bu değişkeni sonsuz denge noktalarından birinde çalışma noktasından bağımsız olarak sıfıra zorlar, bu yüzden, önerilen amaca sistemin hangi denge noktalarının çalıştığını analiz etmeye gerek kalmadan ulaştığını yazmamız önemlidir.



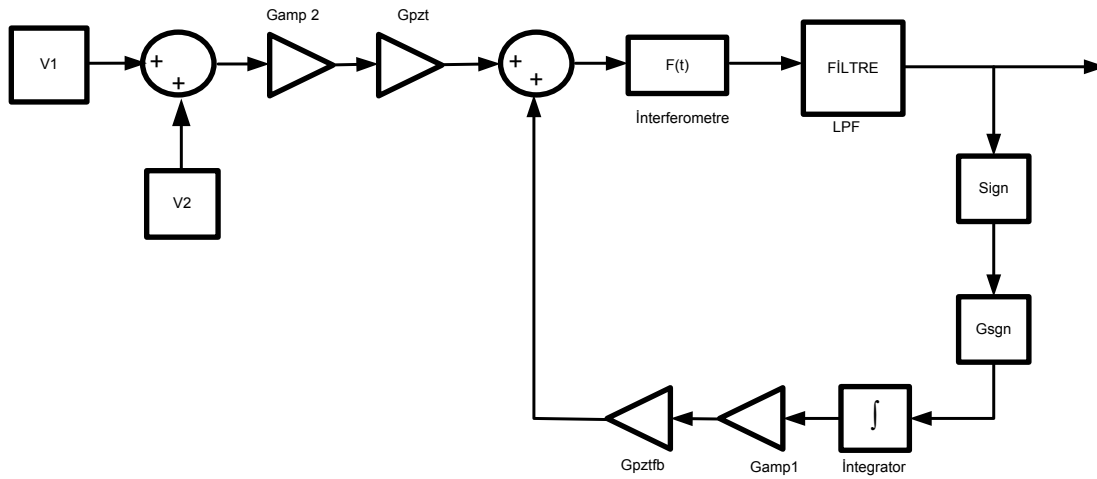


## 4. BULGULAR

### 4.1. Kapalı Döngü Çevrim Sistemi

Michelson interferometresinin temel yapısı daha önce Şekil 3.1’te gösterilmişti, Şekil 4.1’de ise kapalı döngü blok sistemi sunulmuştur.

Faz değişimi ( $\Delta\phi$ ), deney düzeneğinde değerlendirme altındaki piezoelektrik çalıştırıcı (PZT) tarafından sağlandı. Bu piezoelektrik çalıştırıcının doğrusal bölgede çalışması koşuluyla, interferometre içindeki faz kayması(radyan cinsinden) direk olarak başvuru gerilimi(volt) ile doğru orantılıdır. Bu yüzden, ilgili sinyal  $\Delta\phi(t)$  ve statik faz kayması  $\phi_0$  gerilim sinyali jeneratörleri tarafından sentezlenebilir ve toplam blokları tarafından üst üste getirilebilir. İlgili sinyal tepe gerilimi 1 V ve 1 kHz frekansa sahip sinüsoidal bir sinyal iken, statik faz kayması tepe gerilimi 2 V ve 5 Hz frekansa sahip sinüsoidal bir sinyaldir. Elde edilen sinyal yükseltici ( $AMP2-G_{AMP2} = 12 V/V$ ) ve başvuru PZT ( $G_{PZT} = 0.034 rad/V$ ) aracılığıyla yükseltildi ve buda radyan olarak voltajdan açığa dönüşüm sağladı. Bu voltaj, sahte değişiminin statik faz kayması ( $\phi_0$ ) ile üst üste getirilen ilgili sinyalini  $\Delta\phi(t)$  simüle eder. Şekil 4.1’de kapalı döngü Michelson interferometresinin blok diyagramı verilmiştir.



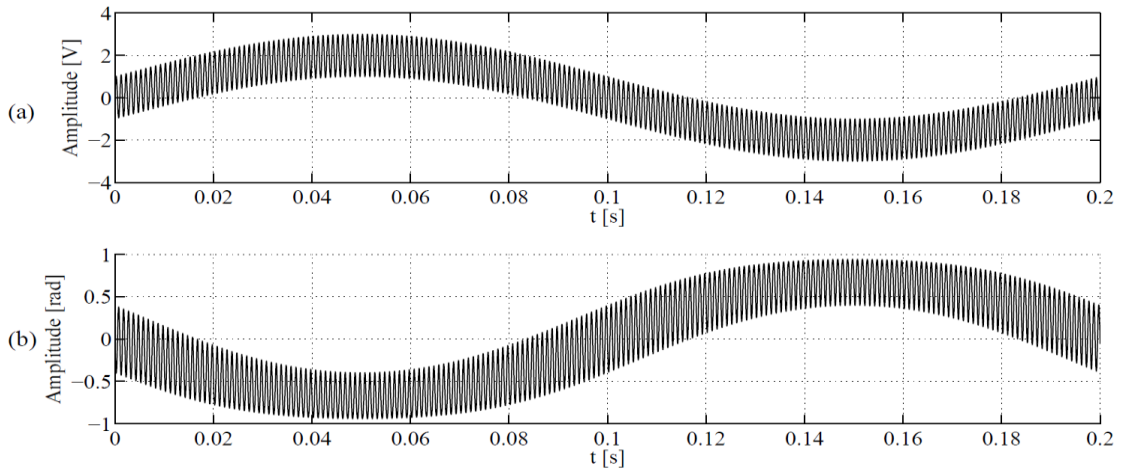
Şekil 4.1. Kapalı döngü michelson interferometresi blok diyagramı (Martin, R. I. ve ark., 2017).

Geri besleme döngüsü alçak geçiren filtre (LPF)  $h(t)$  (bant geçiş kazancı  $G_{LPF} = 1 V/V$ ), işaret fonksiyonu ( $G_{Sgn} = \pm 15 V$ ), integrator ( $1/s$ ) ve bunları takip eden bir yükseltici ( $AMP -G_{AMP} = 20 V/V$ ) ve geri besleme piezoelektrik çalıştırıcısından ( $G_{PZTfb} = 0.18 rad/V$ ) dan oluşur ki toplam geri besleme kazancı  $\gamma = 56.7$  ve işaret fonksiyonun işlevini sağlar. Simülasyonda yer alan interferometre bloğu  $v(t) = AV \cos[\Delta\phi(t) + \phi_0 + \phi_c]$  şeklinde olarak, buradaki düzeltme sinyali  $\phi_c = -\phi_0 + \frac{\pi}{2}$  ve  $AV$  çarpımı simülasyonda 1 V olarak ayarlanmıştır. Bu nedenle, çıkış sinyali faz dörtlüsünün çalışma noktasında olacaktır.

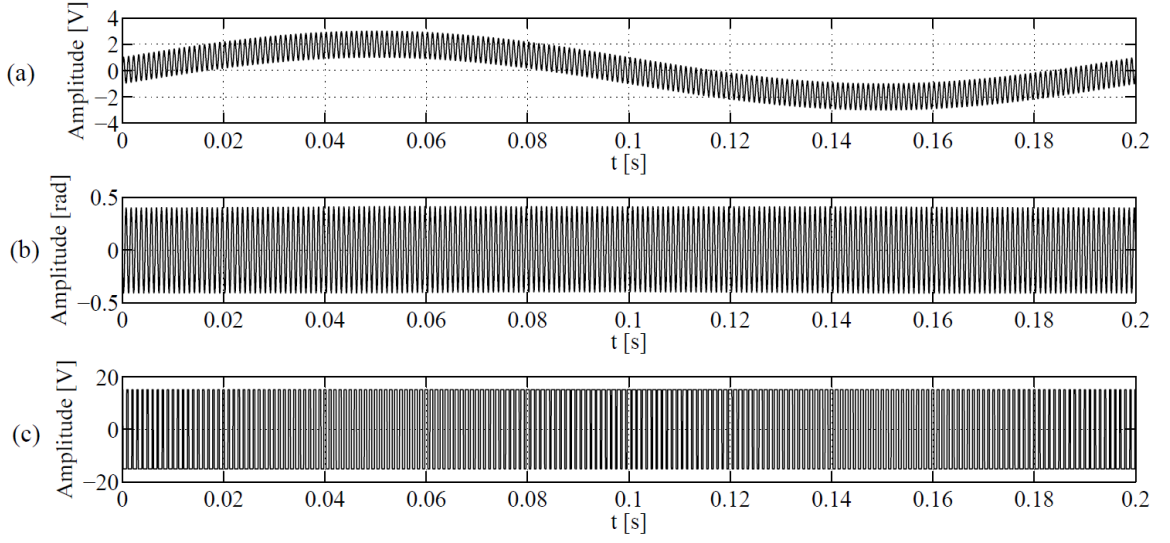
Açık döngü işlemi için giriş sinyalinin simülasyon sonucu, Şekil 4.2(a) 'da sunulmuştur. Şekil 4.2(b) ile temsil edilen çıkış sinyalinin, sahte değişkenliğin statik faz kayması ( $\phi_0$ ) ile rahatsız edildiğini ve ilgilenilen sinyalin  $\Delta\phi(t)$ , sahte bir düşük frekans değişkenliğini sağlayarak uygun şekilde geri kazanılmadığını görebiliriz.

Bu işlemlerden sonra aynı parametreler kullanılarak kapalı döngü işlemi için simülasyon yapılarak Şekil 4.3'deki gibi sonuçlar elde edildi.

Çıkış sinyalinin, Şekil 4.3(b)'de görüldüğü gibi uygun şekilde geri kazanıldığı, burada statik faz kayması sahte değişiminin kaldırıldığı, yani sinyal solmasının bastırıldığı ve çıkış sinyalinin dörtlü çalışma noktasının gerisinde kaldığı gözlemlenebilir. İşaret fonksiyonunun davranışı, Şekil 4.3 (c) 'de gösterilmiştir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de michelson interferometresinin açık ve kapalı döngü işlemi simülasyon sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.2. Açık döngü sistemi simülasyon sonucu a.giriş sinyali b.çıkış sinyali.



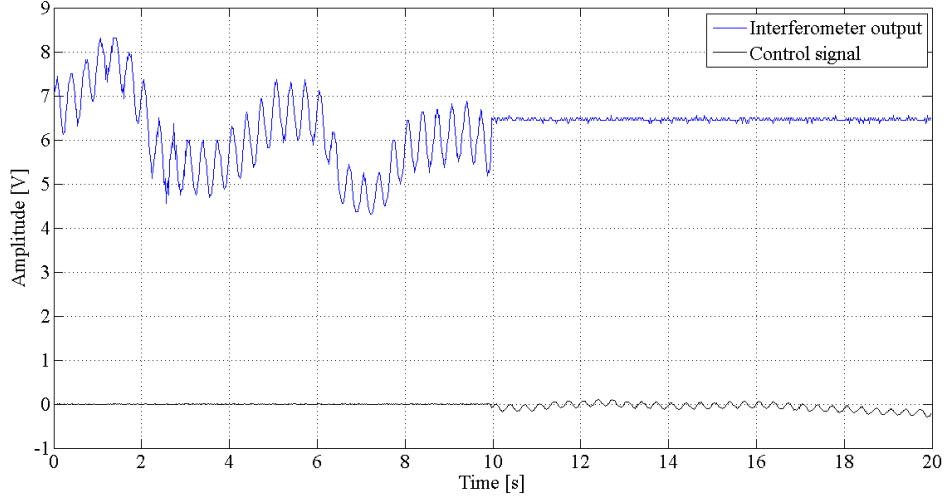
Şekil 4.3. Kapalı döngü sistemi simülasyon sonucu a.giriş sinyali b. çıkış sinyali c.işaret fonksiyonu.

Martin ve ark., 2017 yılında yapmış oldukları , değişken yapı kontrolü ve kayma modlarına dayalı bir Michelson interferometresi için tasarlanmış doğrusal olmayan bir kontrol sistemi önermiştir. Bu yöntemde sırasıyla uygulanmış olan sıfır giriş sinyali, rastgele bir giriş sinyal ve sinüsoidal bir giriş sinyali durumlarına göre oluşan sonuçlar incelenmiştir. Bu yaklaşım, ile yapmış olduğumuz çalışmayı karşılaştırma konusunda şunları söyleyebiliriz.

#### 4.1.1. Sıfır girişi sinyali

Bir toplu Michelson interferometresi, doğrusal olmayan kontrol sistemi kapalıyken (açık döngü işlemi) ve ilgilenilen sinyal ( $\Delta\phi(t) = 0$ ) durumunda iken, interferometre ilk 10 saniyede çıkış 120 Hz parazitinin üst üste bindirdiği sahte çevresel bozulmaların yarattığı rastgele salınımları dahası, kontrol sinyali sabit kalarak, hareket gerçekleşmez. Bununla birlikte, doğrusal olmayan kontrol sisteminde kapalı döngü çevriminde 10 saniye sonra ve giriş sinyalini ( $\Delta\phi = 0$ ) tuttuktan sonra, Şekil 4.4'deki çıkış sinyali sabit bir değerde dengelenmiş halde kalır; eşitlik (3.18) deki A

parametresinin harekete geçmeye başlama zamanı Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. İnterferometrenin çıkış sinyali ve kontrol sinyali( Nonlinear sistemin açılma ve kapanma tepkileri).

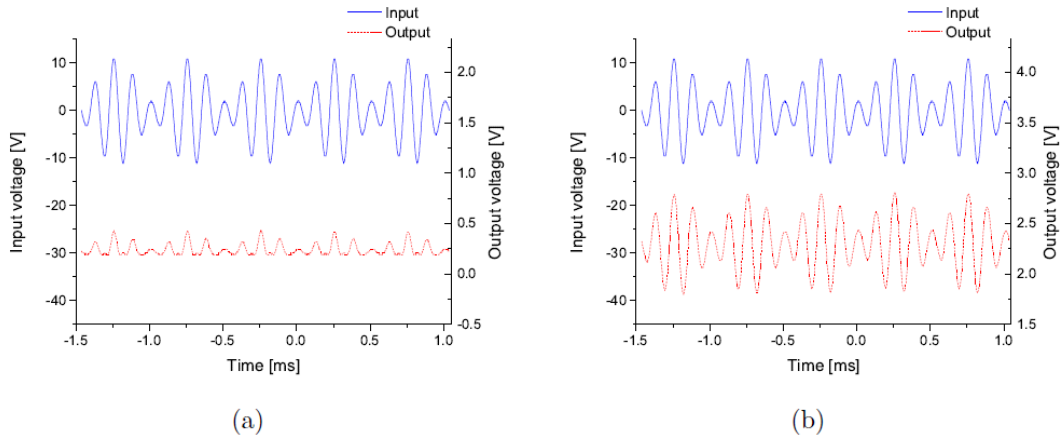
Bu sonuçla birlikte, doğrusal olmayan kontrol sisteminin, sahte girişleri sıfır sinyal için bile etkili bir şekilde çıkararak düzgün çalıştığını göstermektedir.

#### 4.1.2. Rastgele giriş sinyali

Bu bölümde, analog doğrusal olmayan kontrol sistemli bir toplu Michelson interferometresi için girişteki rastgele bir sinyal için bile düzgün çalışıp çalışmadığını kontrol ediyoruz. Şekil 4.5'de gösterildiği gibi, piezoelektrik aktüatöre (sensör kolu) uygulanan giriş sinyali üstte(düz mavi çizgi) ve interferometre çıkış sinyalidir.(altta kırmızı çizgi)

Açık döngü işleminde interferometre ile ilgili olarak, çıkış sinyali solma gösterir ama Şekil 4.6(a) 'da gösterildiği gibi giriş yer değiştirmesini göstermez. Öte yandan, kapalı döngü sistemi aktif olduğunda, interferometre çıkış sinyali, Şekil 4.6(b)'de gösterildiği gibi piezoelektrik aktüatör tarafından uygulanan yer değiştirmeye uygundur.

Bu durumda giriş sinyali, osiloskop üzerinde giriş ve çıkış sinyalleri arasında daha iyi bir karşılaştırma görüntüsü sağlamak için  $180^\circ$  faz farkı ile kaydırılmıştır.

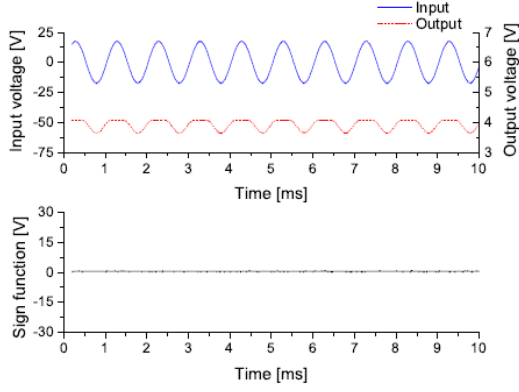


Şekil 4.5. İnterferometre tarafından rastgele tespit edilen yer değiştirme giriş (düz mavi çizgi) ve altta çıkış (kesik çizgili kırmızı çizgi) a.açık çevrim b.kapalı çevrim.

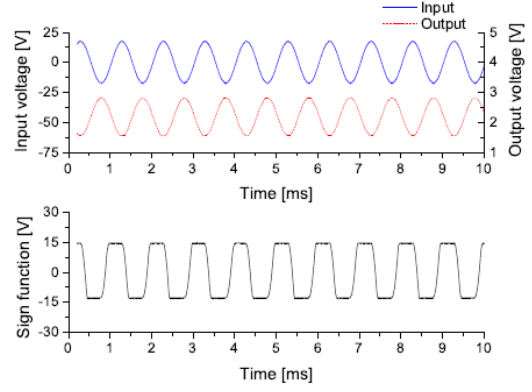
#### 4.1.3. Sinüsodial bir giriş sinyali

Kontrol sisteminin düzgün bir şekilde çalışabilmesi için, bir sonraki adım analog kontrolcü ile toplu bir Michelson interferometresi kullanarak sensör kolundaki piezo elektrik çalıştırıcıya sinüsodial bir sinyal uygulayıp ve doğrusal olmayan kontrol sistemli interferometrenin ilgili yer değiştirmeyi ölçüp ölçemediğini ve sahte sinyalleri bastırabildiğini doğrulamaktı. Bu şekilde  $\Delta\phi(t)$  'yi üretebilmek için değerlendirme altındaki PZT ye 17.2 V tepe voltajı ve 1 kHz frekansı olan sinüzoidal bir giriş sinyali uygulanmıştır. Şekil 4.6'da, giriş sinyali üst düz mavi çizgi olarak gösterilirken, interferometre çıkış sinyali alt kesikli kırmızı çizgi olarak gösterilmektedir. İşaret fonksiyonu, aşağıdaki grafikte düz siyah bir çizgi olarak gösterilmiştir. Açık döngü işlemi Şekil 4.6(a) 'da, kapalı döngü işlemi Şekil 4.6 (b)' de gösterilmiştir.

Gözlenebildiği gibi, açık döngü çalışmasında Şekil 4.6 (a), interferometre çıkış sinyali solma gösterir, yani çalışma noktası eksen dışındadır ve sinüzoidal yer değiştirme uygun şekilde geri kazanılmamıştır. Öte yandan, kapalı döngü çalışmasında Şekil 4.6 (b), interferometre çıkış sinyali solma göstermez ve sinüzoidal sinyal uygun şekilde geri kazanılır. Kapalı döngü çıkış sinyalinin giriş sinyaline göre 180° kayması dikkat çekicidir.



(a)



(b)

Şekil 4.6. İnterferometre tarafından belirlenen sinüsoidal giriş sinyal değişimi a. açık çevrim işlemi b. kapalı çevrim işlemi.



## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada geliştirilen optik interferometre için doğrusal olmayan kontrol sistemi sağlamlık ve yüksek doğruluk sunmuştur. Ayrıca, interferometrik sensörlerin farklı uygulamaları için ölçüm kabiliyetini arttırmak basit ve düşük maliyetlidir.

Günümüz dünyasında geldiğimiz son dönemde optik interferometride uygulanan son teknoloji kontrol teknikleri ile kıyaslandığında, önerdiğimiz sistem önemli özellikler sunarak interferometrenin doğrusal olmayan karakteristiğini dikkate alarak ölçüm kabiliyetini artırır. Sonuç olarak, bu sistemde bir sıfırlama devresi gerekli değildir. İnterferometre zorlu ortamlarda çalışabilir, parametrelerin montajı ve ayarlanması, kurulumun basitliği ve düşük maliyetle, daha yüksek sağlamlık ve doğruluk sağlaması daha kolaydır. Önermiş olduğumuz bu sistem daha yüksek bir dinamik aralığa, çözünürlüğe sahiptir, zaman gecikmesini ölçebilir ve isteğe bağlı zaman sinyalleriyle çalışabilir. Ayrıca, küçük genlikli sinyallerin doğruluğunu artıran zamansal demodülasyon yöntemlerini iyileştirir, karesel koşulun korunması (maksimum hassasiyet noktası) ve bu nedenle, sıcaklık değişimi ve hava akımı gibi güçlü dış bozucular altında bile sinyal solmasının etkisini ortadan kaldırır.

Tüm fiber interferometreler için piezoelektrik silindirik faz modülatörlerinin montaj detaylarına gelince, önemli olan kontrol tekniklerini uygulamadan önce faz modülatörünün kazancını dikkate almaktır. Kontrol için kullanılan faz modülatörü minimum bir kazanç gereklidir ki, büyük miktarda fiber ihtiyacını ima eden ve sahte bozulmaya karşı daha fazla hassasiyet sağlayan asgari bir kazanç gerektirir. İlave katmanlardaki kazanç kaybını önlemeyi hedefledikten sonra, kontrol kolunda lineer bir amplifikatör veya paralel olarak ilişkili faz modülatörlerinin kullanılmasını önerdik (aynı kazanç için daha az fiber). Ayrıca, önerilen sistemin başka bir avantajı da şudur: tüm fiber interferometre de polarize solma problemi, lineer olmayan kontrol ile normal fiberler kullanılarak, toplam maliyetleri daha da azaltarak önleyebiliriz. Bu, (Stowe, Moore ve Priest'in,1982) çalışmasıyla karşılaştırıldığında, burada Hi-Bi (polarizasyonu sürdüren) fiberlerinde polarizasyondaki (solma) ilişkisiz rastgele sapmalar için çıkış sinyalinin bozulması nedeniyle interferometrelerdeki polarizasyonu kontrol etmek için kullanılmıştır.

Kontrolörün teorik analizi ile ilgili olarak, işaret fonksiyonunun süreksizliği ile çalışmanın matematiksel zorluğuna rağmen, teorik kararlılık çalışmasını birkaç yöntemle geliştirmek mümkün olmuştur. İlk önce, Lyapunov'un doğrusallaştırma yöntemini kullanarak sistem içerisinde sigmoid yaklaşım ile doğrusallaştırıldı. Bu durumda, kararlı odakların oluşumu (kesinlikle kararlı denge noktaları), yanı sıra eyer noktalarının (dengesiz denge noktaları) oluşumu gözlemlendi, doğrusal yaklaşım yerel olarak asimptotik olarak kararlıdır. Sonuçta, lineer olmayan sistem için Lyapunov denklemini, sistemin kararlılığını kanıtlayan faz düzlemi analizini dikkate alarak elde ettik. Bu nedenle, bu yaklaşım interferometrenin doğrusal olmayan davranışını tam olarak telafi edebilir, dörtlü çalışma noktasında tutarak sinyal solmasını bastırabilir.



## KAYNAKLAR

- Barbosa, F. D. A. A., Nader, G., Higuti, R. T., Kitano, C., Silva, E. C. N., 2010. A simple interferometric method to measure the calibration factor and displacement amplification in piezoelectric flextensional actuators. *Revista Controle e Automação, Campinas*, **21**(6) : 577-587.
- Barnes, T., Eiju, T., Cheung, D., Wu, C., 2002. Phase measurement accuracy of feedback interferometers. *Optics and Lasers in Engineering*, **38**(6): 387–404.
- Cheeke, J., David, N., 2017. *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. CRC, **109**:361-379
- Chen, X., Zeng, X., Fan, D., Liu, Q., Bie, B., Zhou, X., Luo, S., 2014. Phase retrieval method for analyzing single-phase displacement interferometry data. *Review of Scientific Instruments*, Maryland, **85**(026106).
- Cheung, D., Barnes, T., Haskell, T., 2003. Feedback interferometry with membrane mirror for adaptive optics. *Optics Communications*, Amsterdam, **218**(1): 33–41.
- Connelly, M., Galeti, J., Kitano, C., 2015. Michelson interferometer vibrometer using self-correcting synthetic-heterodyne demodulation. *Applied Optics*, Washington, **54**(18): 5734–5738.
- Decarlo, R. A., Zak, S. H., Matthews, G. P., 1988. Variable structure control of nonlinear multivariable systems: a tutorial. *Proceedings of the IEEE*, Piscataway, **76**(3): 212–232.
- Ertuğrul, M., Kaynak, O., Sabanovic, A., Ohnishi, K., 1996. A generalized approach for Lyapunov design of sliding mode controllers for motion control applications. *In: International Workshop on Advanced Motion Control, IEEE* 1:407–412.
- Fritsch, K., Adamovsky, G., 1981. Simple circuit for feedback stabilization of a single-mode optical fiber interferometer. *Review of Scientific Instruments*, Rochester, **52**(7): 996–1000.
- Galeti, J. Kitano, C. Connelly, M., 2015. Improved synthetic-heterodyne Michelson interferometer vibrometer using phase and gain control feedback. *Applied Optics*, Washington, **54**(35): 10418–10424.
- Hao, H., Wang M., Xia W., Guo D., Lu H., 2013. Phase modulated self-mixing interferometer of a fiber laser system. *Optics & Laser Technology*, **51**: 55-61.
- Lin D., Jiang X., Xie F., Zhang W., Zhang L., Bennion I., 2014. High stability multiplexed fibre interferometer and its application on absolute displacement measurement and on-line surface metrology. *Optics Express*. **12**(23): 5729-5734.
- Martin, R. I., Sakamoto, J. M. S., Teixeira, M. C. M., Martinez, G. A., Pereira, F. D. C., Kitano, C., 2017a. Nonlinear control system for optical interferometry based on variable structure control and sliding modes. *Optics Express*, Washington, **25**(6): 6335–6348.
- Martin, R. I., Sakamoto, J. M. S., Teixeira, M. C. M., Kitano, C., 2017b. Variable structure and sliding modes nonlinear control system applied to a fiber optic interferometer. *In: International Conference on Applications of Optics and Photonics*, **3**.
- Milne-Thomson, L. M., Abramowitz, M., Stegun, I. A., 1972. *Handbook of mathematical functions*. Dover Publications, **19**.
- Ogata, K., Severo, B., 1998. *Modern Control Engineering*. Prentice Hall, **35**.

- Pang, M., Zhang, M., Wang, L., Zou, Q., Kuang, W., Wang, D., Liao, Y., 2007. Phase mode-matching demodulation scheme for interferometric fiber-optic sensors. *IEEE Photonics Technology Letters*, Piscataway, **19**(1): 39–41.
- Scruby, C., Drain, L., 1990. *Laser Ultrasonics Techniques and Applications*. CRC, **109**
- Slotine, J., Li, W., 1991. *Applied Nonlinear Control*. New Jersey: Prentice Hall Englewood Cliffs, **199**.
- Stowe, D., Moore, D., Priest, R., 1982. Polarization fading in fiber interferometric sensors. *IEEE Transactions on Microwave and Techniques*, Piscataway, **30**(10):1632–1635.
- Sudarshanam, V., Srinivasan, K., 1982. Linear readout of dynamic phase change in a fiber-optic homodyne interferometer. *Optics letters, Washington*, **14**(2):140–142,
- Svelto, O., Hanna, D., 1998. *Principles of Lasers*. Springer, **4**(70).
- Udd, E., Spillman, W. B. J., 2011. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. New York: Wiley.
- Utkin, V., 1978. *Sliding Modes and Their Applications in Variable Structure Systems*. Moscow, **29**.
- Vali, V., Shorthill, R., 1976. *Fiber Ring Interferometer*. *Applied Optics*, New York, **15**(5):1099–1100.
- White, R., Emmony, D., 1985. Active feedback stabilisation of a Michelson interferometer using a flexure element. *Journal of Physics E: Scientific Instruments, London*, **18**(8): 658.
- Xie, F., Chen, X., Zhang, L., 2009. High stability interleaved fiber Michelson interferometer for on-line precision displacement measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, Amsterdam, **47**(11): 1301–1306.
- Xie, F., Chen, Z., Ren, J., 2009. Stabilisation of an optical fiber Michelson interferometer measurement system using a simple feedback circuit. *Measurement*, Amsterdam, **42**(9): 1335–1340.
- Xie, F., Ren, J., Chen, Z., Feng, Q., 2010. Vibration-displacement measurements with a highly stabilised optical fiber Michelson interferometer system. *Optics & Laser Technology, Elsevier*, Amsterdam, **42**(1): 208–213.
- Yimnirun, R., Moses, P., JR, R. M., Newnham, R., 2003. A single-beam interferometer with sub-ångström displacement resolution for electrostriction measurements. *Measurement Science and Technology*, Bristol, **14**(6): 766.
- Young, K. D., Utkin, V. I., Ozgüner, U., 1996. A control engineer's guide to sliding mode control. *In: IEEE International Workshop on Variable Structure Systems*, 1–14.
- Zhang Q., Yu B., Zhao S., Tao R., Peng J., Wu X., 2013. A novel method to reduce noise induced along transmission fiber for low-coherence interferometer. *Optic*, **124**(9): 845-847.

## ÖZ GEÇMİŞ

Adnan BİRGÜL, 1989 yılında Van-Muradiye’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Muradiye’de, lise öğrenimini ise Gaziantep’te tamamladı. 2011 yılında öğrenime başladığı Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden 2016 yılında mezun oldu. 2017 yılında, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başlamıştır.



T.C  
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
LİSANSÜSTÜ TEZ ORJİNALLIK RAPORU

Tarih: 09/08/2019

Tez Başlığı / Konusu: **Optik İnterferometrenin Uyarlamalı Kayan Kipli Kontrolcü Tasarımı**

Yukarıda başlığı/konusu belirlenen tez çalışmamın Kapak sayfası, Giriş, Ana bölümler ve Sonuç bölümlerinden oluşan toplam 43 sayfalık kısmına ilişkin, 09/08/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % 3 (üç) tür.

Uygulanan filtreler aşağıda verilmiştir:

- Kabul ve onay sayfası hariç,
- Teşekkür hariç,
- İçindekiler hariç,
- Simge ve kısaltmalar hariç,
- Gereç ve yöntemler hariç,
- Kaynakça hariç,
- Alıntılar hariç,
- Tezden çıkan yayınlar hariç,
- 7 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç (Limit inatch size to 7 words)

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Yönergeyi inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.

  
09/08/2019

Adı Soyadı: Adnan BİRGÜL

Öğrenci No: 17910001082

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı: : Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü


Statüsü: Y. Lisans

Doktora

DANIŞMAN ONAYI  
UYGUNDUR



Dr. Öğr. Üyesi Özkan ATAN

  
Prof.Dr. Suat SENSOY  
Enstitü Müdürü