

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FAZ KAYDIRMA İNTERFEROMETRESİNE DAYALI LAZER MİKROFON

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE TURAN

OCAK 2020

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FAZ KAYDIRMA İNTERFEROMETRESİNE DAYALI LAZER MİKROFON

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANADİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre TURAN

DANIŞMAN

: Prof. Dr. Zehra SARAÇ

ZONGULDAK

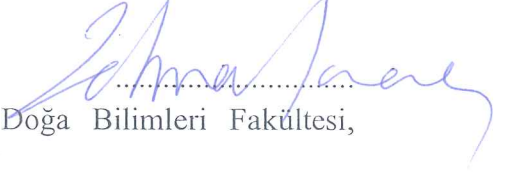
Ocak 2020

KABUL:

Emre TURAN tarafından hazırlanan “Faz Kaydırma İnterferometresine Dayalı Lazer Mikrofon” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans/~~Doktora~~ Tezi olarak oybirliğiyle/~~oyçokluğuyla~~ kabul edilmiştir. 28/01/2020

Danışman: Prof.Dr.Zehra SARAÇ

İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü



Üye: Dr. Öğr. Üyesi Aytaç ALTAN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik
Mühendisliği Bölümü



Üye: Dr. Öğr. Üyesi Batıkan Erdem DEMİR

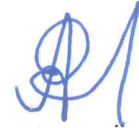
Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü



ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

.../.../2020



Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

ETP.

Emre TURAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FAZ KAYDIRMA İNTERFEROMETRESİNE DAYALI LAZER MİKROFON

Emre TURAN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zehra SARAÇ

Ocak 2020, 57 sayfa

Sesin uzak mesafelerden dinlenmesinde günümüzde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri olan lazer mikrofonlar, son yıllarda sıkça anılmaktadır. Lazer mikrofonlarda ışık dalgası, ses dalgası tarafından modülasyona uğrar ve bu prensibine dayalı olarak sistem çalışır. Bu çalışmada He-Ne lazer kullanılarak oluşturulan Michelson ve Mach-Zehnder interferometrelerine dayalı faz kaydırma esaslı lazer mikrofon sistemleri oluşturulur. Bu sistemlerde, herhangi özel bir filtre içeren sinyal işleme algoritması kullanmaksızın, farklı donanımsal değişiklikler yapılarak dinlenen sesin minimum gürültü ile elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada ses dalgasındaki gürültüyü minimize etmek için faz kaydırma tekniği kullanılır. Bu teknikte interferometrede faz kaydırma işlemi iki farklı yolla yapılabilir: 1- Dalga Plakaları kullanımı (yarım ve çeyrek dalga plakaları) 2- Piezo esaslı bir hareket ettirici kullanımı. Bu çalışmada ilk yol kullanılarak faz kaydırma esaslı lazer mikrofon sistemleri elde edilir ve dinlenen ses dalgaları için sistemlerin SNR değerleri bulunarak karşılaştırma işlemleri gerçekleştirilir. Amaç gürültüyü hangi sistemin daha iyi bastırdığını tespit etmektir.

ÖZET (devam ediyor)

Anahtar Kelimeler: Lazer mikrofon, faz kaydırma interferometrisi, dalga plakaları

Bilim Kodu: 608.04.08.Optik Bilgi İşleme (Bilim Dalı)



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

LASER MICROPHONE BASED ON PHASE SHIFTING INTERFEROMETER

Emre TURAN

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Thesis Advisor: Prof. Dr. Zehra SARAÇ

January 2020, 57 pages

Today, different methods are used to listen to sound from long distances. One of these methods, laser microphones, has been frequently mentioned in recent years. In laser microphones, the light wave is modulated by the sound wave and based on this principle the system operates. In this study, phase shift based laser microphone systems based on Michelson and Mach – Zehnder interferometers created using He-Ne laser are created. In these systems, it is aimed to obtain the listened sound with minimum noise by making different hardware changes without using a signal processing algorithm including any special filter. In this study, phase shifting technique is used to minimize noise in the sound wave. In this technique, the phase shifting of the interferometer can be done in three different ways: 1- Use of Wave Plates (half and quarter wave plates) 2- Use of a piezo-based actuator. In this study, phase shift based laser microphone systems are obtained by using the first method and SNR values of the systems are listened to and the comparison operations are performed. The aim is to determine which system suppresses noise better.

ABSTRACT (continued)

Keywords: Laser microphone, phase shifting interferometer, wave plates

Science Code: 608.04.08.Optik Bilgi İşleme (Bilim Dalı).



TEŞEKKÜR

Bu tezi gerçekleŐtirmem için bana gerekli alt yapı hizmetini sağlayan Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'ne, çalıŐmalarım sırasında bana destek sağlayan tez danıŐmanım Prof. Dr. Zehra Saraç'a, laboratuvarında bana yardımcı olan ArŐ. Gör. Gülhan Kaya'ya ve bu esnada maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen aileme teŐekkürlerimi sunarım.





İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL:	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	1
1.1 LAZER MİKROFON	1
BÖLÜM 2 GENEL BİLGİLER	5
2.1 IŞIK	6
2.1.1 Işığın Parçacık (Tanecik) Modeli	7
2.1.2 Işığın Dalga Modeli	8
2.2 IŞIĞIN GİRİŞİMİ.....	8
2.2.1 Girişim Oluşturma Koşulları	10
2.2.2 Girişim Oluşturma Yöntemleri	10

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.3 İNTERFEROMETRE.....	11
2.3.1 Michelson İnterferometresi.....	11
2.3.2 Mach–Zehnder İnterferometrisi.....	12
2.3.3 Fabry-Perot İnterferometresi.....	12
2.3.4 Fizeau İnterferometresi.....	13
2.3.5 Sagnac İnterferometresi.....	14
BÖLÜM 3 YÖNTEM.....	15
3.1 AKUSTO OPTİK ETKİ.....	15
3.2 BİR BOYUTLU HIZLI FOURIER DÖNÜŞÜMÜNE DAYALI SİNYAL İŞLEME ALGORİTMASI (ONE DIMENSIONAL FAST FOURIER TRANSFORM).....	16
3.3 FAZ KAYDIRMA İNTERFEROMETRESİ.....	17
3.4 FAZ KAYDIRMA TEKNİKLERİ.....	19
3.4.1 Dalga Plakaları ile Faz Kaydırma.....	19
3.4.1.1 Üç Adımda Faz Kaydırma.....	20
3.4.1.2 Dört Adımda Faz Kaydırma.....	20
3.4.2 Hareketli Ayna ile Faz Kaydırma.....	21
3.5 SİNYAL/GÜRÜLTÜ ORANI.....	21
BÖLÜM 4 LAZER MİKROFON SİSTEMLERİNDE KULLANILAN DONANIMSAL ELEMENLAR.....	23

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
4.1 LAZER	23
4.1.1 Lazerin Temelleri.....	23
4.1.2 Lazer Işığının Özellikleri	24
4.1.3 Lazer Mikrofon Sisteminde Kullanılan Lazer	24
4.2 ÜÇ BOYUTLU UZAYSAL FİLTRE	25
4.3 İNCE KENARLI MERCEK.....	26
4.4 IŞIN BÖLÜCÜ	26
4.5 DÜZLEM YANSITICI AYNA	27
4.6 FAZ KAYDIRMA ELEMANI.....	27
4.6.1 Dalga Plakaları.....	27
4.7 SES KAYNAĞI (HOPARLÖR)	28
4.8 HIZLI KAMERA	28
BÖLÜM 5 LAZER MİKROFON SİSTEMLERİ	31
5.1 MİCHELSON İNTERFEROMETRESİNİ TEMEL ALAN LAZER MİKROFON (DALGA PLAKALARI İLE FAZ KAYDIRMA)	32
5.2 MACH-ZEHNDER İNTERFEROMETRESİNİ TEMEL ALAN LAZER MİKROFON	38

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
5.2.1 Mach–Zehnder İnterferometresini Temel Alan Faz Kaydırma İnterferometresi İle Lazer Mikrofon Sisteminde Dalga Plakalarının Referans Kolda Olma Durumu	40
5.2.2 Mach–Zehnder İnterferometresini Temel Alan Faz Kaydırma İnterferometresi İle Lazer Mikrofon Sisteminde Dalga Plakalarının Kamera Önünde Olma Durumu	43
5.3 FAZ KAYDIRMA İNTERFEROMETRESİNE DAYALI LAZER MİKROFONDA FOURİER DÖNÜŞÜMÜNE DAYALI SİNYAL İŞLEME ALGORİTMASI UYGULAMASI	46
5.4 LAZER MİKROFON SİSTEMLERİNİN SONUÇLARI	50
BÖLÜM 6 SONUÇLAR	53
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Işık dalgası.	6
Şekil 2.2 Young deneyi	8
Şekil 2.3 Girişim çeşitleri	10
Şekil 2.4 Michealson interferometresi.	11
Şekil 2.5 Mach–Zehnder interferometresi.	12
Şekil 2.6 Fabry-Perot interferometresi	13
Şekil 2.7 Fizeau interferometresi	13
Şekil 2.8 Sagnac interferometresi	14
Şekil 3.1 Faz Kaydırma İnterferometresi	18
Şekil 4.1 Uyarılmış yayımın.....	23
Şekil 4.2 Lazer ışığının paralellik özelliği.	24
Şekil 4.3 He-Ne kırmızı lazer ışık kaynağı.	25
Şekil 4.4 Üç boyutlu uzaysal filtre.	25
Şekil 4.5 İnce kenarlı mercek.	26
Şekil 4.6 Işın bölücü a) Yandan görünüş b)Üstten görünüş.....	26
Şekil 4.7 Düzlem yansıtıcı ayna.	27
Şekil 4.8 Dalga plakaları a) Çeyrek dalga plakası b) Yarım dalga plakası.	27
Şekil 4.9 Hoparlör.	28
Şekil 4.10 Hızlı Kamera.	29
Şekil 5.1 Akış şeması.	32
Şekil 5.2 Michelson interferometresini temel alan faz kaydırma interferometreli lazer mikrofon.....	33
Şekil 5.3 Sistemin laboratuvar kurulumu.	33
Şekil 5.4 Örnek girişim desenleri (Michelson İnterferometre):	35
Şekil 5.5 Faz kaydırma tekniği kullanılarak lazer mikrofon sisteminden elde edilen toplam girişim deseni((100x104) adet piksel den oluşur) için elde edilen faz dağılımı	36
Şekil 5.6 Referans ses.....	37
Şekil 5.7 Michelson interferometresini temel alan lazer mikrofon kullanılarak dinlenen ses dalgası.	37
Şekil 5.8 Mach–Zehnder İnterferometresini Temel Alan Faz Kaydırma İnterferometresi İle Lazer Mikrofon:	38
Şekil 5.9 Sistemin laboratuvar kurulumu.	39
Şekil 5.10 Mach–Zehnder interferometresini temel alan faz kaydırma interferometresi ile lazer mikrofon (referans kol)	40

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.11 Elde edilen örnek girişim deseni (referans kol	41
Şekil 5.12 Faz kaydırma tekniği kullanılarak lazer mikrofondan elde edilen toplam girişim deseni((124x124) adet piksel den oluşur) için elde edilen faz dağılımı	42
Şekil 5.13 Mach–Zehnder İnterferometresini temel alan lazer mikrofonda Dalga Plakalarının Referans Kolda Olma Durumunda dinlenen ses dalgası.....	42
Şekil 5.14 Mach–Zehnder interferometresini temel alan faz kaydırma interferometresi ile lazer mikrofondan (kamera önü)	43
Şekil 5.15 Elde edilen örnek girişim deseni (referans kol)	44
Şekil 5.16 Faz kaydırma tekniği kullanılarak lazer mikrofondan elde edilen toplam girişim deseni((116x116) adet piksel den oluşur) için elde edilen faz dağılımı	45
Şekil 5.17 Mach–Zehnder İnterferometresini temel alan lazer mikrofonda Dalga Plakalarının kamera Önünde Olma Durumunda dinlenen ses dalgası	45
Şekil 5.18 Michelson interferometresini temel alan lazer mikrofondan	46
Şekil 5.19 Elde edilen örnek girişim deseni.....	47
Şekil 5.20 Fourier dönüşümüne dayalı sinyal işleme algoritması.....	48
Şekil 5.21 Hızlı Fourier Dönüşümüne dayalı SİA kullanılarak lazer mikrofondan elde edilen 1. girişim deseni ((100x100) adet piksel den oluşur) için elde edilen genlik spektrumu.....	49
Şekil 5.22 Fourier dönüşümüne dayalı SİA kullanılarak yeniden elde edilen ses dalgası (Faz-Zaman Grafiği= Zamansal Faz Dağılımı).	49
Şekil 5.23 Referans Ses	51
Şekil 5.24 Lazer mikrofondan sistemlerinden alınan ses dalgaları.....	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

No

Sayfa

Tablo 1 Yapılan lazer mikrofon sistemleri ve SNR değerleri..... 50





SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

E	: Elektrik alan
H	: Manyetik alan
E_0	: Dalganın genliği
ω	: Açısal frekansı ($\omega = 2\pi f$),
k	: Dalga katsayısını ($k = 2\pi / \lambda$)
λ	: Dalga boyu
φ	: Faz sabitini
v	: Elektromanyetik dalgaların boş uzayda görülen hızı
ϵ	: Dielektrik sabiti
I	: Işıma şiddeti;
\Re	: Karmaşık sayının gerçel kısmı
\Im	: Karmaşık sayının sanal kısmı
P	: Ses basıncı
n	: havanın kırılma indisi
Y	: özgül ısı oranı
P_0	: statik koşullar altında basınç
φ_p	: sesin neden olduğu faz modülasyonu
$r=(x,y,z)$: 3 boyutlu öklid uzayının konumu
t	: zaman
L	: optik yol
E_h	: Statik alanda yayılan ışık
I_n	: n. adımdaki ışıma şiddeti
a	: arka plan ışığı
b	: modülasyon ışığı
Ψ_{0n}	: n. adımdaki faz kaymanın ifadesi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

KISALTMALAR

BEÜ	: Bülent Ecevit Üniversitesi
FBE	: Fen Bilimleri Enstitüsü
PBS	: Lazer Ayırıcı
PHC	:Yüksek hızlı polarizasyon kamerası
SIA	: Sinyal İşleme Algoritması
SNR	: Signal to Noise Ratio Sinyal-gürültü oranı



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte uzaktan algılama sistemlerinde optik yöntemler sıkça kullanılmaktadır. Sesin uzaktan algılanması ve dinlenmesi için kullanılan sistemlerden biri de lazer mikrofonlardır. Bu sistemler günümüz mikrofonlarına göre fiziksel gürültü oluşturmayıp çevresel gürültüyü indirgeyebilmektedir. Bu tezde çevresel gürültüyü en aza indirgeyebilen ve faz kaydırma tekniğine dayalı olarak farklı donanımlar içeren lazer mikrofon sistemleri oluşturulmaktadır. Öncelikle aşağıda lazer mikrofon sistemi kısaca anlatılmaktadır.

1.1 LAZER MİKROFON

Ses sinyallerini diğer bir deyişle akustik enerjiyi elektriksel işaretlere çeviren elemanlara mikrofon denir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan mikrofonlarda fiziksel bir diyafram kullanılmaktadır ve bu diyaframdan elde edilen titreşimler kuvvetlendiriciler ile yükseltilerek elektriksel işaretlere dönüştürülmektedir. Bu titreşimler; kapasitans ve endüktansa bağlı bir diyafram yardımı ile elektriksel işaretlere çevrilmektedir. Bundan dolayı ses elektrik sinyallerine dönüştürüldüğünde, fiziksel diyaframın endüktif ve kapasitif etkisi ile mekanik rezonanslar gibi gürültü faktörleri ortaya çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında sunulan, lazer mikrofon sistemleri ise ses basıncının bir lazer dalgasını modüle etmesi ilkesine dayanmaktadır. Bu sayede fiziksel bir diyaframın ürettiği mekanik rezonans sorunları ortadan kaldırılmaktadır. Ayrıca elde edilen elektrik sinyali (dinlenen ses dalgası) ile sisteme verilen ses dalgası arasındaki korelasyon yüksek olmaktadır. Lazer mikrofonun çalışma prensibi ise şu şekildedir:

Tek bir yönde yayılan lazer ışını, bir ses ile etkileşime girdiğinde ses basıncından dolayı modülasyona uğrar. İşte bu olay akusto-optik etki olarak bilinir. Bir interferometrik sistemde bu olay sesin verildiği yoldaki ışığın açısız modülasyona uğramasına sebep olmaktadır. Bu

interferometrinin referans yolu ile bir faz farkı oluşmaktadır. Şimdiye kadar oluşturulan lazer mikrofon sistemlerinde faz kaydırma tekniği hiç kullanılmamıştır. Bu çalışmada ilk defa farklı donanımsal elemanlar kullanarak faz kaydırma tekniğine dayalı birkaç lazer mikrofon sistemi oluşturulmaktadır. Amaç sistemin yazılım kısmında herhangi bir özel filtre içeren işaret işleme algoritması kullanmaksızın sesin gürültüsüz bir şekilde dinlenmesidir.

Bu kapsamda oluşturulan lazer mikrofon sistemlerinde Michelson ve Mach Zehnder interferometrileri kullanılmaktadır. Bu interferometrilere faz kaydırma işlemi dalga plakaları kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Lazer mikrofon temel olarak uzaktan ses dinlenen ya da bir cismin titreşimlerini algılayan bir sistemdir. Lazer mikrofonların çıkış noktası visual (görsel) mikrofonlar ilk defa gözlem yapmak için kullanılır. Lazer mikrofonlar ise minimum kayıpla uzaktan sesin gizlice dinlenmesi amacı ile ortaya çıkar.

Uzaktan ses kaydı yapmak için bir ışık ışını kullanma tekniği olarak bilinen bu yöntem, ilk olarak Sovyetler Birliği'ndeki Léon Theremin tarafından "Buran" adı verilen bir gizli dinleme sistemini geliştirip kullanılmasıyla 1947'de ortaya çıkmıştır. Bu gizli dinleme sisteminde , uzak mesafeden camlardaki ses titreşimlerini algılamak için düşük güçlü kızılötesi ışık kullanılmaktadır. Ayrıca KGB (Komitet Gosudarstvennoy Bezopasnosti - Sovyet Gizli İstihbarat Servisi) başkanı Lavrentiy Beria, bu Buran cihazını ABD, İngiliz ve Fransız elçiliklerini gözetlemek için Moskova'da kullanmıştır [1].

Daha sonra lazer mikrofonlar askeri ihtiyaçtan ziyade farklı alanlarda ve uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle uzaktan algılama uygulama alanları olan sensörlerde ses basıncı ölçümünde, gaz basıncı ölçümünde, mesafe ölçümünde, derinlik ölçümünde ve malzeme özelliklerinin ölçümünde kullanılmaktadır [2-6].

Faz kaydırma interferometre çalışmalarında ortamdaki sesin görüntülenmesi için literatürde ses basıncını ölçen çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalara örnek olarak Y. Nakazono ve Kenji Ishikawa' nın çalışmaları örnek olarak verilebilir. Y. Nakazono ve meslektaşları 2008' de sesi ölçülebilen bir optik dalga mikrofon kullanarak incelemiştir [7]. Aynı zamanda Kenji Ishikawa ve meslektaşları ise 2016' da yayılan ses dalgalarının yüksek hızlı görüntülemesi

için bir yüksek hızlı polarizasyon kamerasıyla paralel faz değiştiren interferometri (PPSI) kullanımını araştırmıştır [8]. Daha sonra Kenji Ishikawa ve meslektaşları 2017' de sesin optik olarak ölçümü için 4 adımlı faz kaydırma tekniğini kullanmıştır [9]. Ses akışını ölçmek için son olarak Kenji Ishikawa ve meslektaşları 2018' de paralel faz kaydırma tekniği ve yüksek hızlı bir polarizasyon kamerası kullanarak ses akışını görüntülemeyi başarmıştır [10].

Bu çalışmada Michelson ve Mach–Zehnder interferometrelerine dayalı faz kaydırma esaslı lazer mikrofon sistemleri oluşturulmuştur. Literatürde uzaktan algılama sistemlerinde sıkça kullanılan lazer mikrofon ile mühendislik ölçümü için literatürde sıkça kullanılan faz kaydırma interferometresi birleştirilerek literatüre yeni bir lazer mikrofon kazandırılması bu çalışmanın önemimini vurgulamaktadır. Aynı zamanda bu çalışmada lazer mikrofonlar ile faz kaydırmalı interferometri yöntemi birleştirilerek sesin uzaktan, gürültüsüz bir şekilde dinlenmesine olanak sağlayacak bir düzenek geliştirilmesi amaçlanmıştır. Faz kaydırmalı interferometri yaygın olarak kullanılan, kabul görmüş bir yöntemdir. Lazer mikrofonlar da özellikle uzaktan dinleme uygulamalarında sıklıkla karşımıza çıkmaktadırlar. Bu iki yöntemi birleştiren tezin konusu ve kapsamı bu yönüyle günceldir.



BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

Bir lazer mikrofona temelinde optik interferometriye dayalı ışık dalgası ile çalışan bir sistemdir. Bu nedenle burada ışığın dalga doğası, girişimi ve girişime dayalı interferometre (Girişimölçer) sistemleri ile ilgili genel bilgiler sunmakta fayda vardır. İnterferometreler uzaktan algılamaya dayalı olarak fiziksel parametrelerin (uzaklık, derinlik yükseklik vb.) ölçümünde kullanılmaktadır.

Bu interferometrelerde elde edilen işaretler optik girişim desenleridir (interference pattern). Yazılımsal olarak lazer mikrofona sistemlerinden elde edilen bu işaretler çok farklı işaret işleme algoritmaları kullanılarak işlenmekte ve istenilen parametreler elde edilebilmektedir. Bu işaret işleme algoritmalarına örnek verecek olursak; Fourier Dönüşümüne Dayalı (Geleneksel Yöntem), 1-Boyutlu(B)-Dalgacık Dönüşümüne Dayalı, Faz Kaydırma Tekniğine Dayalı vb. Bu tezde oluşturulan Lazer Mikrofona sistemlerinde Faz Kaydırma Tekniğine Dayalı işaret işleme algoritması kullanılmaktadır. Bu tekniğe dayalı oluşturulan interferometrelerde verim yüksek olup işlem hızı oldukça yüksektir.

Bu teknik ile özel bir gürültü bastırma filtresine ihtiyaç duyulmadan işaret işleme gerçekleştirilmektedir. Bu teknik (lazer mikrofonda ilk defa bu tezde kullanılmaktadır) donanımsal değişiklikler ile elde edilen zamansal faz dağılımının (ses dalgası) kullanılması ve dinlenilmesine olanak sağlanmaktadır. Ayrıca bu çalışmada farklı interferometrelerle (Michelson ve Mach Zehnder interferometrik yapıları) oluşturulan farklı faz kaydırma donanımsal elemanları içeren lazer mikrofona performans karşılaştırılması da amaçlanmaktadır. Bu karşılaştırma farklı lazer mikrofona sistemleri ile elde edilen ses işaretleri kullanılarak hesaplanan sinyal/gürültü oranları (Signal to Noise Ratio) ile gerçekleştirilmektedir.

Yukarıda da ifade edildiği gibi bir lazer mikrofona temelinde optik interferometriye dayalı ışık dalgası ile çalışan bir sistemdir. Bu nedenle burada ışığın dalga doğası, girişimi ve girişime dayalı interferometre sistemleri ile ilgili genel bilgiler sunmakta fayda vardır.

Aşağıda verilen 2.1, 2.2, 2.3 bölümleri Eugene Hecht, Optic (2017) [11] , Fundamentals of Optics (2001) [12], Engineering Optics (2008) [13] , Optics (2014) [14] kitaplarından elde edilen bilgiler ışığında yazılmıştır.

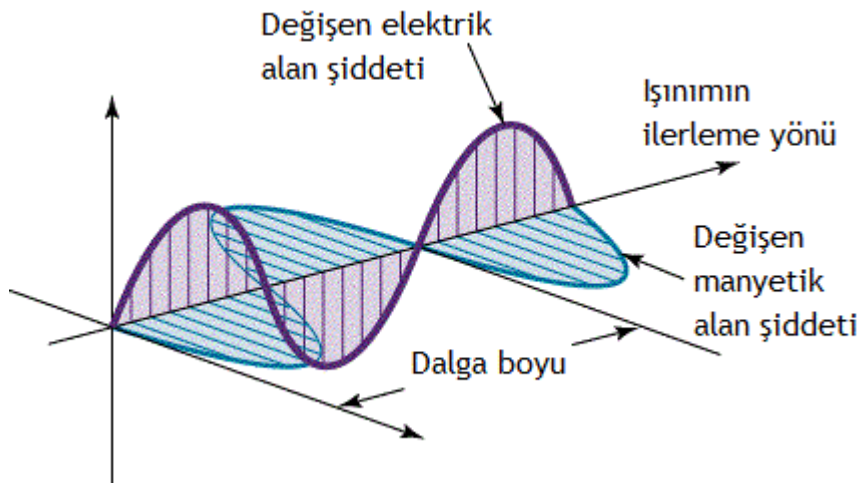
2.1 IŞIK

Bir enerji türü olan ışık 17. yüzyılda iki farklı model olarak geliştirilmiştir. Hooke ve Huygens'in 'dalga' teorisi ve diğeri Newton'un 'tanecik' teorisidir. Bu durum ışığın iki farklı doğaya sahip olduğunu göstermektedir. Işığın parçacık doğası fotoelektrik etki ile açıklanabilirken, ışığın dalga doğası ise elektromanyetik dalga teorisi ile açıklanabilmektedir.

Maxwell ışığın bir elektromanyetik dalga olduğunu savunur. Yani ışık zamanla değişen bir elektrik alan ve manyetik alanın birleşiminden oluşur. Işığın oluşturan bu alan bileşenlerini içeren dalga denklemi (2.1) ile verilebilir:

$$\nabla^2(\vec{E}, \vec{H}) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t^2} (\vec{E}, \vec{H}) \quad (2.1)$$

Işık dalgasının elektrik ve manyetik alan bileşenleri dalganın ilerleme yönüne diktir (Şekil 2.1). Burada E elektriksel alan bileşenini, H manyetik alan bileşenini ve c ışığın yayılma hızını göstermektedir. Optikte genel olarak manyetik alan vektörü kavramların açıklanmasını kolaylaştırmak ihmal edilir. Bu durum matematiksel ifadelerin daha anlaşılır olmasını sağlar.



Şekil 2.1 Işık dalgası.

Bir düzlem ışık dalgasının elektriksel alan bileşeninin matematiksel olarak ifadesi şu şekildedir:

$$E(x, t) = E_0 \cos(\omega t - kx + \varphi) \quad (2.2)$$

Burada E elektrik alanının t anında x noktasındaki değerini, E_0 dalganın genliğini, ω açısal frekansı ($\omega = 2\pi f$), k dalganın ilerleme sabiti ($k = 2\pi/\lambda$) ve φ faz sabitini göstermektedir. $(\omega t - kx + \varphi)$ dalganın fazıdır. Eşitlik 2.2 Eşitlik 2.1 'in düzlem dalga çözümüdür.

2.1.1 Işığın Parçacık (Tanecik) Modeli

Bu modele göre ışık foton adı verilen çok küçük kütsüz taneciklerden oluşur. Işığın tanecik modeline göre ışığın yayılması, ışığın birbiri içinden geçmesi, ışığın yansması, aydınlanma, ışık basıncı, ışığın soğurulması, ışığın kırılması gibi ışık davranışlarını açıklamak mümkündür.

Işığın tanecik modeline göre ışığı oluşturan fotonlar çok küçük yapıllı olup yüksek hıza sahip olduğundan yörüngeleri doğrusaldır. Boşlukta ışık hızı yaklaşık olarak $\cong 3 \times 10^8 \text{ km/s}$ dir. Bu sayede tanecik modeline göre tanecikler çok küçük ve hızlı olduklarından birbiri içinden birbirlerini etkilemeden geçerler.

Bir ortamda ilerleyen ışık ikinci bir ortamın sınırına gelince, eğer ikinci ortama geçemez ise geldiği açıyla yansır. Bu olaya yansıma denir.

Birim yüzeye düşen ışık miktarı o yüzeydeki aydınlanmayı verir. Aynı şekilde fotometre de göre birim yüzeye düşen foton sayısı o yüzeydeki aydınlanma şiddetini verir. Işık kaynağından uzaklaştıkça aydınlanma azalır. Tanecik modeline göre aydınlanmanın azalması ters kare kanunu (aydınlanma uzaklığın karesi ile ters orantılıdır.) gereği izah edilir, örneğin kaynaktan 2 kat uzağa gidilince aydınlanma dörtte birine düşer.

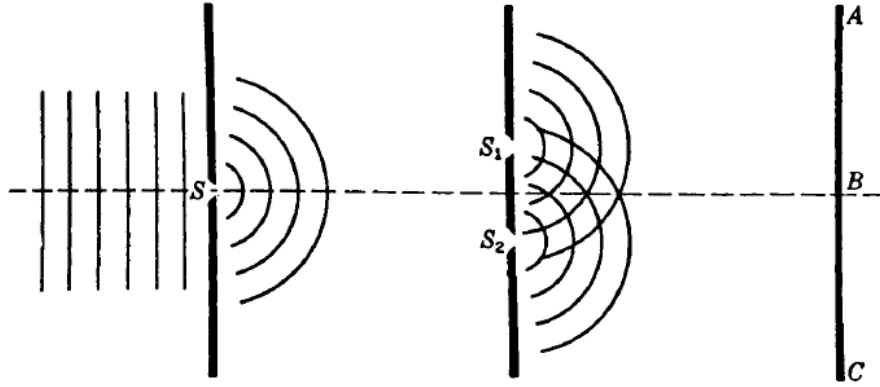
Tanecik modeline göre taneciklerden oluşan ışıkta düştüğü yüzeye basınç uygular. Işık basıncı aydınlanma ile doğru orantılı olup Radyometre denilen aygıtla ölçülür.

Işığın vurduğu yüzeyden yansımayıp tutulması olayına soğurulma denir. Yüzeye çarpan fotonların yansımayıp soğurulması tanecik modeline göre açıklanabilir.

Işık farklı ortam geçişlerinde kırılmaya uğrar. Işığın tanecik modeline göre fotonların iki farklı ortam arasında geçişlerinde farklı yol izler.

2.1.2 Işığın Dalga Modeli

Huygens 17. yy ' da ışığın dalgalardan oluştuğunu öne sürdü. Thomas Young ışığın elektromanyetik dalga olduğunu 19. yy ' da yapmış olduğu “Çift Yarık Deneyi” deney ile ispat etti. Işığın dalga modeline sahip olduğu iletim, yansıma, kırınım, saçılma, girişim, kırılma gibi ışık davranışları ile açıklanabilmektedir.



Şekil 2.2 Young deneyi (Fundamentals of Optic 2001)[13].

Young tarafından gerçekleştirilen çift yarık deneyi şekil 2.2 'de gösterilmektedir. Burada S, S₁ ve S₂ açıklığı göstermektedir. AC ekranı göstermektedir. Düzlem dalga S açıklığından geçer ve küresel dalga oluşur. Daha sonra bu küresel dalga S₁ ve S₂ açıklıklarından geçerek iki küresel dalga kaynağı oluşturur. AC ekranında birbirleriyle etkileşime geçen iki dalga simetrik bir görüntü oluşturur.

2.2 IŞIĞIN GİRİŞİMİ

Işığın dalga doğasını en iyi açıklayan olaylardan biridir. Girişim olayının temeli üst üste binme (süper pozisyon) ilkesine dayanır. Bu ilkeye göre genliğe ve faza bağlı olarak dalgalar ya bir birbirinin üzerine eklenir, ya da birbirini yok ederler. Girişim iki veya daha fazla dalganın belirli bir zaman ve noktadaki elektriksel alanlarının toplamıdır.

$$E_0 = E_1 + E_2 + E_3 + \dots N \quad (2.3)$$

Burada E_1, E_2, E_3 belirli zaman ve noktadaki her bir dalgaya ait elektrik alanlardır.

$$E_1 = E_{01} \sin(\omega t - kx + \varphi_1) \quad (2.4)$$

$$E_2 = E_{02} \sin(\omega t - kx + \varphi_2) \quad (2.5)$$

E_1 ve E_2 aynı yönde ilerleyen, aynı frekanslı iki dalga olsun. Bu iki dalga toplamı şu şekilde ifade edilir:

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (2.6)$$

Genel olarak, N sayıda dalga toplamı şu şekilde ifade edilir:

$$E_0^2 = \sum_{i=1}^N E_{0i}^2 + 2 \sum_{j>1}^N \sum_{i=1}^N E_{0i}E_{0j} \cos(\varphi_i - \varphi_j) \quad (2.7)$$

Işıma şiddetinin ifadesi:

$$I = \varepsilon v E_0^2 \quad (2.8)$$

şeklinde verilir. Burada v elektromanyetik dalgaların uzayda görülen hızını, ε ise dielektrik sabitini ifade eder.

Denklem 2.8 ' de sabitler ihmal edilip elektrik alan bileşenine bağlı ışımaya şiddetini yeniden düzenlersek:

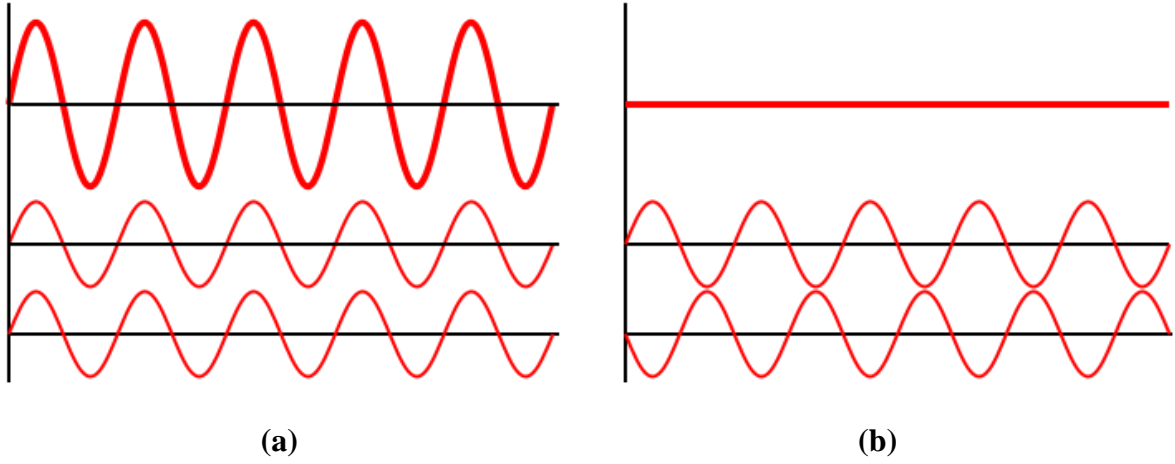
$$I = E_0^2 \quad (2.9)$$

elde edilir. Denklem (2.4) ve (2.5) ' teki dalgaların herhangi bir noktadaki bileşenlerinin ışımaya şiddetlerinin toplamı şu şekilde ifade edilir:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \quad (2.10)$$

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$$

Denklem 2.10 girişimin genel ifadesidir. $2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi$ ifadesi girişim terimi olarak ifade edilmektedir. $\varphi = 2\pi m$ olduğunda ışımaya şiddeti maksimum (yapıcı girişim), $\varphi = (2m + 1)\pi$ olduğunda ışımaya şiddeti minimumdur (yıkıcı girişim).



Şekil 2.3 Girişim çeşitleri a) Yapıcı girişim b) Yıkıcı girişim.

2.2.1 Girişim Oluşturma Koşulları

İki ışık dalgasından girişim oluşturulabilmesi için ışık kaynaklarının aynı faza sahip olması gerekli değildir. Belirli bir faz farkına sahip olması girişimin gözlenebilmesi için yeterlidir. Bu durum ışık kaynaklarının faz uyumlu olması ile ilgilidir. Yani kaynaklardan gelen ışık dalgalarının sabit bir faz ilişkisi oluşturması gerekir.

İyi bir ışık girişimi yakalanabilmesi için ışık kaynağı monokromatik olmalıdır. Yani ışığın dalga boyu her iki dalga için aynı olmalıdır.

Örneğin bir ampulden yayılan ışık faz uyumlu değildir. Çünkü farklı dalga boylarının toplamından oluşmaktadır. Bu yüzden faz ilişkisi kurulamaz ve girişim oluşturmak çok zordur.

Girişimin olduğu ve deneysel olarak gözlemlendiği en temel deney Thomas Young'ın 19. yy 'da yapmış olduğu “Çift Yarık Deneyi” deneyidir.

2.2.2 Girişim Oluşturma Yöntemleri

Girişim oluşturmak için iki dalganın sabit bir faza ve aynı dalga boyuna sahip olması gerekliliği bölüm 2.2.1' de anlatılmıştır. Bu yüzden bir girişimi oluşturmak için bu gereklilikleri sağlayacak yöntemler literatür de kullanılmaktadır. Bu yöntemleri başlıca 'dalga cephesinin bölümü' ve 'genliğin bölümü' olarak ikiye ayırabiliriz.

Dalga cephesinin bölümü yöntemine Thomas Young'ın 19. yy' da yapmış olduğu “Çift Yarık Deneyi” deneyi örnek verilebilir.

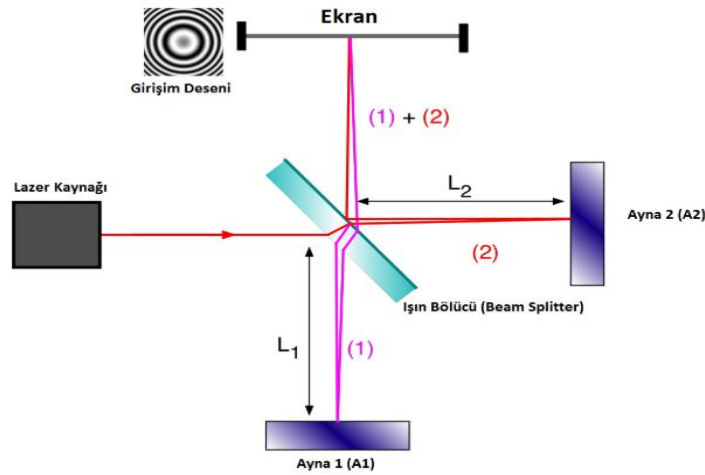
Genlik bölerek girişim oluşturma yöntemine ise Michealson interferometresi örnek verilebilir.

2.3 İNTERFEROMETRE

Girişimölçer olarak da adlandırılan interferometreler fiziksel parametrelerin yüksek hassaslıkla ölçümünü sağlayan yapılardır. Çeşitli interferometrik yapılar bulunmaktadır. Bunlardan bir kaçını burada verecektir.

2.3.1 Michelson İnterferometresi

Albert Abraham Michelson tarafından geliştirilmiştir. Bu interferometrik yapıda lazer kaynağından çıkan ışın bir ışın bölücü ile iki kola ayrılır. İkiye ayrılan ışın demetleri aynı frekansta ama farklı genlik ve fazdadırlar. Şekil 2.4'te 1 numaralı lazer ışın kolu referans kolu gösterirken diğer 2 numaralı kol ise obje kolu olarak adlandırılır. Obje kolunda ölçmek istediğimiz parametrenin etkisi söz konusudur. Bu iki kolun sonunda yer alan sonlandırıcı aynalardan lazer ışını geri yansıtılarak aynı ışın bölücü ile tekrar birleştirilirler ve girişim deseni oluştururlar.

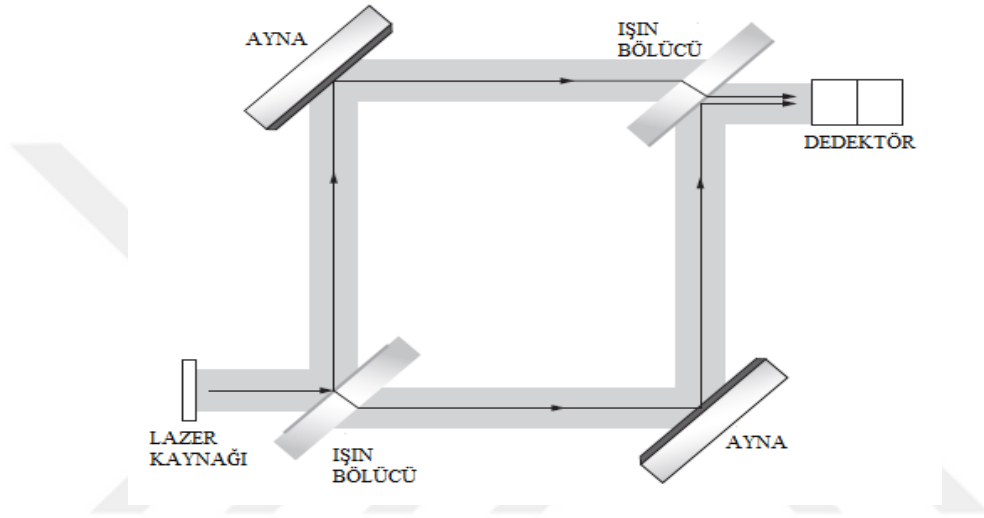


Şekil 2.4 Michealson interferometresi.

Şekil 2.4' te gösterilen interferometrik yapıda gelen ışın bölücü tarafından 2'ye ayrılır. Daha sonra A1 (Ayna 1) ve A2 (Ayna 2) den yansıtıp geri dönen ışınlar bu ışın bölücüde yeniden toplanarak ekranda girişim desenini oluşturur.

2.3.2 Mach-Zehnder İnterferometrisi

Mach-Zehnder İnterferometresi tıpkı Michelson İnterferometresi gibi genlik bölücü cihazdır. Bu interferometrik sistemde 2 ayrı ışın bölücü ve 2 ayna kullanılmaktadır.

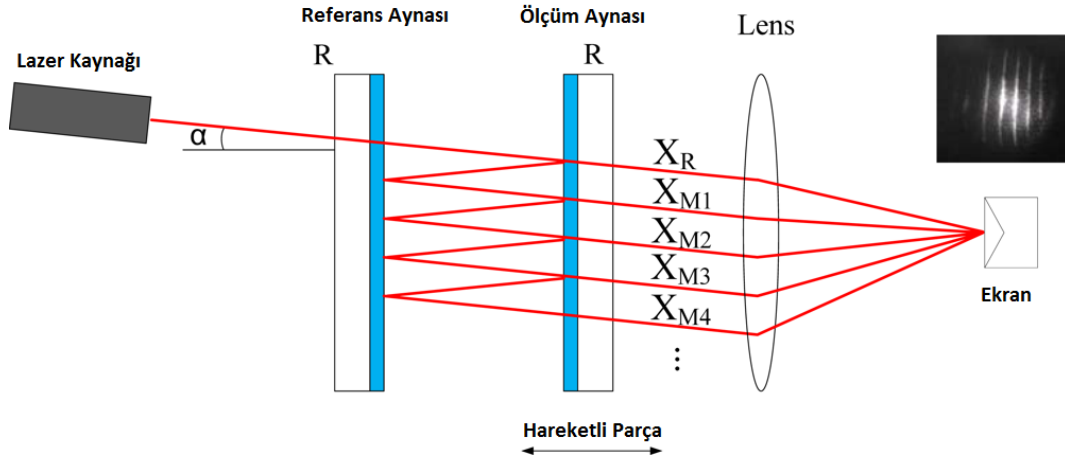


Şekil 2.5 Mach-Zehnder interferometresi.

Şekil 2.5 'te gösterilen yapıda lazer kaynağından çıkan lazer ışığı ışın bölücü ile ikiye ayrılır. Bir kol referans kolu olurken diğer kol obje kolu olmaktadır. Bu iki koldan gelen lazer ışığı 2. ışın bölücü ile birleştirilerek girişim deseni oluştururlar. Oluşan girişim deseni dedektör veya hızlı kamera kullanılarak kayıt edilir.

2.3.3 Fabry-Perot İnterferometresi

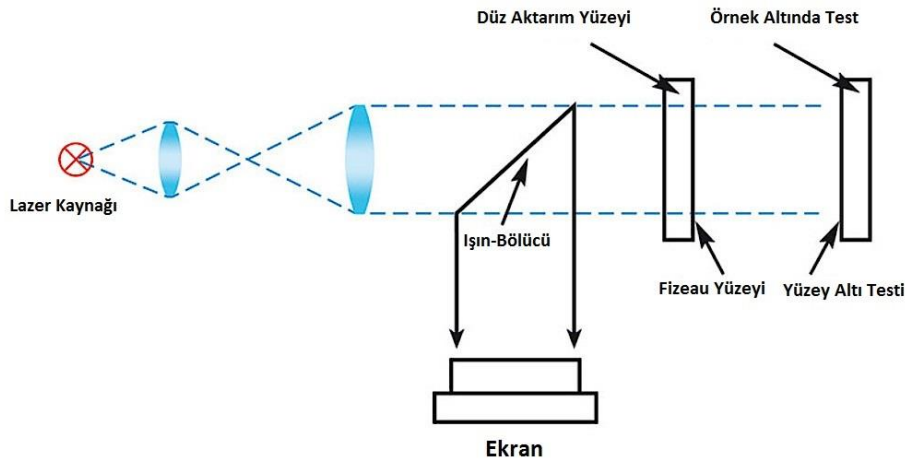
Ayrıca Etalon olarak da bilinen bu interferometre Michelson interferometresinin gelişmiş halidir. Fabry-Perot interferometresi, net ve keskin saçaklarla gözlem ve ölçüm açısından geliştirilmiştir.



Şekil 2. 6 Fabry-Perot interferometresi.

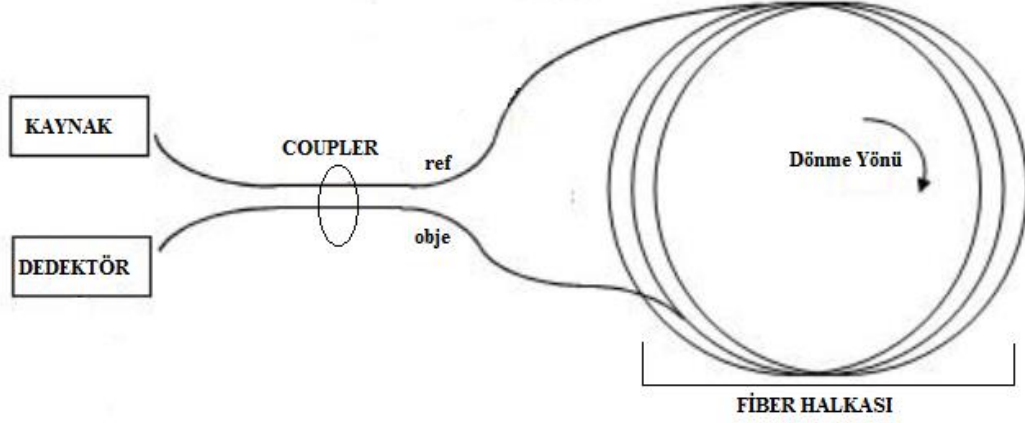
2.3.4 Fizeau İnterferometresi

Fabry-Perot interferometresinden daha kolay kullanıma sahip olup optik ve mühendislik ölçümleri yapmak için kullanılmaktadır.



Şekil 2.7 Fizeau interferometresi.

2.3.5 Sagnac İnterfrometresi



Şekil 2.8 Sagnac interferometresi.

Bu tip interferometrik yapılar daha çok fiber optik ile birlikte kullanılan sistemlerdir. Burada kullanılan fiberler genellikle aynı diğer interferometrede bulunan tek renkli kaynaklar gibi tek renklidir. Kaynaktan çıkan ışık genellikle saat yönünde döndürülür. Işığın yansıyıp gelme süresine göre faz farkı meydana gelir. Duyarlı fiberler bu faz farkını algılayıp fiziksel parametrelerin ölçümünü sağlarlar.

Yapılan tez çalışmasında Michelson interferometresi ve Mach-Zehnder interferometrisini temel alan sistemler oluşturulmuştur. Bu interferometreler literatürde ses basıncı ölçümünde sıkça kullanılmaktadır ve özellikle Michelson interferometresi faz kaydırma interferometresinin temelini oluşturmaktadır. Girişimi bu interferometreler ile ölçülmüştür.

BÖLÜM 3

YÖNTEM

Bu tez çalışmasında lazer mikrofon için temelde Michelson ile Mach–Zehnder interferometresi kullanılarak faz kaydırma interferometresi oluşturulmuştur. Fazı kaydırmak için dalga plakaları kullanılmıştır. Sesin ışık üzerinde etkisini anlamak için akusto optik etkiyi, fazı kaydırmak için kullanılan yöntemleri ve sisteme verilen sesin enerjisinin alınan sesin enerjisine göre nasıl olduğunu anlamak için SNR kavramı kullanılmaktadır. Bu bölümde çalışmanın temelini oluşturan bu yöntemler açıklanacak olup faz kaydırma interferometresinin genel hatlarıyla nasıl çalıştığı anlatılacaktır. Ayrıca bir yazılımsal sinyal işleme algoritması olan bir boyutlu hızlı fourier dönüşümüne dayalı sinyal işleme algoritması anlatılacak olup bu sinyal işleme algoritması oluşturulan sistemler ile Bölüm 5' te kıyaslanacaktır.

3.1 AKUSTO OPTİK ETKİ

Akusto optik etki sesin ışık üzerinde faz modülasyonu veya sesin neden olduğu ışığın kırınımı olarak tanımlanır. Bu etki sayesinde sesin veya ses basıncının ölçümü için ışık üzerindeki sesin oluşturduğu modülasyon ile ölçümü gerçekleştirilebilir [15,16].

Daha önceki araştırmalara göre, zayıf ses alanında yayılan ışık şu şekilde olarak ifade edilebilir:

$$E_0(r, t) = E_h(r, t) \exp[i\varphi] \quad (3.1)$$

Burada;

$$E_h(r, t) = |E_h| \exp[i(kr - \omega t)] \quad (3.2)$$

homojen bir terimdir ve

$$\varphi = k \frac{n_0 - 1}{\gamma P_0} \int_L P(l, t) dl \quad (3.3)$$

φ sesin neden olduğu faz modülasyonudur; $r = (x, y, z)$ üç boyutlu öklid uzayının konumudur; t zaman; ω ışığın açısal frekansı; k ışığın dalga boyu; n_0 statik koşullar altındaki kırılma indisi; l optik yoldur. Yukarıdaki denklemler kırılma indisindeki zamansal değişimin elektromanyetik alanın açısal frekansından oldukça daha yavaş olduğunu varsayan geometrik optik yaklaşımdan türetilir. E_h terimi, ortamın zamansal ve uzamsal şiddet değişiminin olmadığı (örneğin sesin) statik bir alanda yayılan ışığı temsil eder. Denklemler, zayıf sesin neden olduğu ışığın faz modülasyonunun, ses basıncının optik yol boyunca çizgisel integrali ile orantılı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, havadaki zayıf ses alanı ışığın fazı gözlemlenerek elde edilebilir.

Işığın fazı gözlemlenerek ses alanının ölçülmesi akusto optik etki ile mümkün olduğu denklem 3.1' de görülmektedir. Yapılan tez çalışmasında ışık fazının ölçülebilmesi için faz kaydırma tekniğinden faydalanılmıştır. Faz kaydırma tekniği, Michelson ve Mach-Zehnder interferometre temelli oluşturulan lazer mikrofon sistemlerinde kullanılmıştır. Ayrıca girişim desenlerinden yani lazer ışığından faz bilgisi elde edilmesi için hızlı fourier dönüşümüne dayalı sinyal işleme algoritması kullanılması diğer bir yöntemdir. Faz bilgisinin lazer ışığından elde edilmesi yöntemleri sayesinde sesin elde edilebilmesi sağlanmış ve SNR oranları karşılaştırılmıştır.

3.2 BİR BOYUTLU HIZLI FOURİER DÖNÜŞÜMÜNE DAYALI SİNYAL İŞLEME ALGORİTMASI (ONE DIMENSIONAL FAST FOURIER TRANSFORM)

Girişim desenlerinden faz bilgisi elde etmek için Hızlı Fourier Dönüşümüne (FFT-Fast Fourier Transform) dayalı sinyal işleme algoritması kullanılması ilk defa 1982 yılında Takeda tarafından ortaya atılmıştır [17].

$$g(x, y) = I_0(x, y)[1 + \cos(my + \varphi(x, y))] \quad (3.4)$$

Burada $I_0(x, y)$ arka plan şiddeti, m yatay y yönünde uzaysal taşıyıcı frekansı gösterirken, $\varphi(x, y)$ optiksel fazdır. Bu girişim deseninin faz bilgisini bulmak için, $g(x, y)$ 'nin Fourier dönüşümü denklem (3.5) kullanılarak elde edilir.

$$G(f, y) = FFT\{g(x, y)\} \quad (3.5)$$

Aynı zamanda Girişim deseninin tüm satırlarının sırası ile FFT'si elde edilir. Bu adımdan sonra ilk girişim deseninin FFT sinin genlik spektrumundan parlak bir piksel (x, y) seçilir.

Zamansal faz dağılımı $\varphi(x, y)$, (Lazer mikrofon sistemi ile yakalanan ses dalgası), filtrelenen $G(f, y)$ 'nin ters Fourier dönüşümü $p(x, y)$ elde edildikten sonra belirtilen piksel için faz bulunarak elde edilir. Son olarak her bir girişim deseni için sadece bu piksel için fazlar denklem (3.6) ile bulunur [23].

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\Im\{p(x, y)\}}{\Re\{p(x, y)\}} \quad (3.6)$$

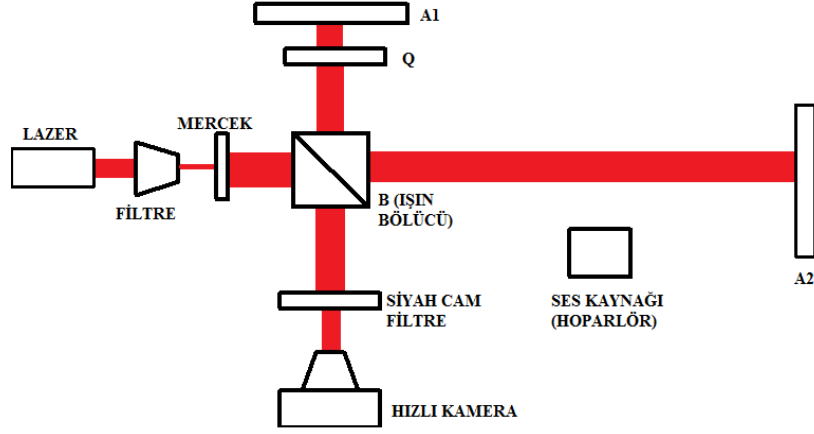
3.3 FAZ KAYDIRMA İNTERFEROMETRESİ

Faz kaydırma interferometresi, yer değiştirme, titreşim ve fiziksel olayların ölçümü için yaygın olarak kullanılır. Optik alandaki teknolojik ilerlemeler faz kaydırma interferometresinin uygulama alanını genişletmektedir. Özellikle fiziksel olayların ölçülmesi için kullanılan paralel faz kaydırma interferometresi literatürde sıkça kullanılmıştır. Bu interferometre ile titreşim, gaz akışı, ses, elektrik deşarjı ve mikroskobik olaylar gibi fiziksel olayların sayısal olarak incelenmesini sağlar. Sesi ölçmek için literatürde optik yöntemler uygulanmıştır ve bunlar bir ses alanının doğrudan görüntülenmesi potansiyeline sahiptir.

Faz kaydırma interferometrik yapılarında birden fazla faz kaydırmalı görüntüden test altındaki faz yeniden yapılandırır. Çevresel titreşimi azaltmak ve statik olmayan olayların ölçümünü sağlamak için, çoklu faz kaydırmalı görüntülerin tek çekimde elde edilmesi faz kaydırma interferometresinin temelini oluşturmaktadır.

Faz kaydırma interferometresini oluşturulabilmesi için literatürde kullanılan yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerin ilki tek çekimle görüntülerin elde edilebilmesi için faz değiştiren eleman kullanma yöntemidir [18,19]. Ayrıca doğrudan dört tür faz gecikmesine neden olan pikseli bir faz kaydırma dizisi cihazının kullanılması da bir diğer yöntemdir [20].

Yaptığımız tez çalışmasında kullanılan Michelson ve Mach–Zehnder interferometreleri kullanılarak oluşturulan faz kaydırma interferometrileri girişim desenlerini ölçerek ses eldesi gerçekleştirilmiştir. Michelson interferometresinin temel alan faz kaydırma interferometresinin genel görüntüsü Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Faz Kaydırma İnterferometresi .

Şekil 3.1 Michelson interferometresinin temel alan faz kaydırma interferometresinin genel bir görüntüsüdür. Buradaki sistemde A_1 ve A_2 yansıtıcı aynaları, Q dalga plakalarını, B ışın bölücüsünü göstermektedir. Yapılan çalışmada 2 adet yansıtıcı ayna, 1 adet ışın bölücü, dalga plakaları, hızlı kamera, siyah cam filtre, kırmızı lazer, üç boyutlu uzaysal filtre ve mercek kullanılmıştır. Bu sistemde lazerden çıkan dağınık halde bulunan lazer üç boyutlu uzaysal filtre sayesinde nokta kaynak haline getirilir. Bu nokta kaynak lazer ışını daha sonra ince kenarlı mercek yardımıyla düzlem dalgaya dönüştürülür. Düzlem dalgalar lazer ışın ayırıcı (B) ile 2 kola ayrılmaktadır. Bir kol (referans dalganın ilerlediği) olmakla birlikte diğer kol obje lazer dalgasının ilerlediği koludur. Referans koldaki ışın referans aynadan (A_1) yansıtılarak ve faz kaydırma plakaları ile kaydırılarak lazer ayırıcıya (B) gelir. Objeye kolunda ise test edilecek fiziksel parametre sisteme verilerek ışın modülasyona uğrar ve aynadan geri yansıtılarak lazer ışın ayırıcıya (B) ulaşır. Işın bölücü hem obje kolundan gelen ışını hem de referans kolundan gelen ışını birleştirerek siyah cam filtreye gönderir. Siyah cam filtre kamera merceğinin zarar görmemesi için kullanılmıştır. Lazer ışını siyah cam filtreden geçerek kameraya ulaşır. Kamera ile sistemde elde edilen girişim desenleri kaydedilir. Böylece ölçülmek istenen fiziksel parametre faz kaydırma interferometre ile ölçülmüş olur.

Yaptığımız tez çalışmasında faz kaydırma plakaları ayrı ayrı konularak 4 kez hızlı kamerada görüntü elde edilmiştir. Michelson interferometresini temel alan benzer bir çalışma Referans 9'da açıklanmıştır. Referansta yer alan çalışmaya göre geliştirilen doğrusal kutuplaştırmıcılardan oluşan bir polarizasyon kamerası ile paralel faz kaydırma interferometresi gerçekleştirilmiştir.

Faz kaydırma interferometresinin temelini faz kaydırma tekniği oluşturur. Lazer ışığını faz bilgisini faz kaydırma tekniği ile elde edilir. Yaptığımız faz kaydırma interferometresine dayalı lazer mikrofön sistemlerinde faz açısını kaydırmak için faz kaydırma plakaları kullanılmıştır.

3.4 FAZ KAYDIRMA TEKNİKLERİ

Faz kaydırma interferometresi, farklı faz kayma değerlerinden dolayı birbirinden farklı olan belirli sayıda girişim desenlerinin örneklenerek fazın yeniden yapılandırılması ilkesine dayanır. Faz açısını kaydırmak için çeşitli deneysel yöntemler vardır [21].

3.4.1 Dalga Plakaları ile Faz Kaydırma

Bu yöntem fazı kaydırmak için en çok kullanılan yöntemdir. Fazı kaydırmak için birbirinden farklı faz kaydırma miktarı yaratan dalga plakaları (yarım dalga boyu ya da çeyrek dalga boyu faz farkı yaratan dalga plakaları) kullanılır. Bu plakalar faz kaydırma interferometresinde referans kola koyularak referans dalganın fazı kaydırılır.

Dalga plakaları ile faz kaydırma tekniğini matematiksel olarak açıklayacak olursak;

$$I_n = a + b \cos(\varphi + \Psi_{0n}) \quad (3.7)$$

ile ifade edilebilir. Burada I_n n. adımdaki ışık şiddetinin, a arka plan ışığının, b modüle edilen ışığın genliği, φ fazın ifadesidir. Ψ_{0n} n. adımdaki faz kaymasının ifadesidir ve şu şekilde yazılabilir:

$$\Psi_{0n} = \frac{2\pi}{N} \quad (3.8)$$

Denklem (3.7) 'i yeniden düzenlersek şu sonuca ulaşırız:

$$I_n = A + B \cos \Psi_{0n} + C \sin \Psi_{0n} \quad (3.9)$$

Burada $A=a$; $B=b \cos \varphi$; $C=-b \sin \varphi$ 'dir.

B ve C ifadelerinin analitik formları şu şekilde yazılabilir:

$$B = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N I_n \cos \Psi_{0n} ; C = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N I_n \sin \Psi_{0n} \quad (3.10)$$

Burada N ile ifade edilen adım sayısıdır (n=1,2,...N). Denklem (3.9) ve (3.10) kullanılarak Faz Kaydırma İnterferometresinin temel eşitliği bulunur:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{-C}{B} = \tan^{-1} \frac{\sum I_n \sin \Psi_{0n}}{\sum I_n \cos \Psi_{0n}} \quad (3.11)$$

Genel olarak φ fazını bulmak için en az 3 parametreye ihtiyaç duyulur. Eşitlik (3.9) ' da bulunan Ψ_{0n} , a , b bilirse φ fazı bulunabilir.

3.4.1.1 Üç Adımda Faz Kaydırma

Dalganın fazını yeniden yapılandırılabilmesi için en az 3 girişim desenine yani üç faz kaymasına ihtiyacımız vardır. Her adımda $\pi/2$ 'lik faz kayması yaratılabilir. 3 adımda meydana gelen şiddetler ve girişim desenlerinin matematiksel ifadeleri şu şekilde ifade edilir:

$$I_1 = a + b \cos \left(\varphi + \frac{1}{4} \pi \right), \quad (3.12a)$$

$$I_2 = a + b \cos \left(\varphi + \frac{3}{4} \pi \right), \quad (3.12b)$$

$$I_3 = a + b \cos \left(\varphi + \frac{5}{4} \pi \right). \quad (3.12c)$$

Toplam faz şu şekilde ifade edilir:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} \right). \quad (3.13)$$

3.4.1.2 Dört Adımda Faz Kaydırma

Daha hassas şiddet hesaplamak için kullanılan yaygın teknik ise dört adımlı faz kaydırma tekniğidir. Bu durumda dört adımda elde edilen fringe(girişim) desenleri şu şekilde ifade edilebilir:

$$I_1 = a + b \cos \varphi, \quad (3.14a)$$

$$I_2 = a + b \cos \left(\varphi + \frac{1}{2} \pi \right) = a - b \sin \varphi, \quad (3.14b)$$

$$I_3 = a + b \cos(\varphi + \pi) = a - b \cos \varphi, \quad (3.14c)$$

$$I_4 = a + b \cos \left(\varphi + \frac{3}{2} \pi \right) = a + b \sin \varphi. \quad (3.14d)$$

Elde edilen toplam faz ise şu şekilde olur:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right). \quad (3.15)$$

3.4.2 Hareketli Ayna ile Faz Kaydırma

Bu yöntem, ışık doğrultusunda bulunan bir aynayı hareket ettirerek bir ışının optik yolundaki değişime dayanır. Bu hareket, piezoelektrik bir dönüştürücü kullanılarak yapılabilir. Faz kayması şu şekilde ifade edilir:

$$\Psi = \frac{2\pi}{\lambda} (\text{OPD}) \quad (3.16)$$

OPD optik yol farkının ifadesidir. Dolayısıyla bu faz kaydırma tekniğinde optik yol farkı faz kaymasına eşit olmaktadır.

3.5 SİNYAL/GÜRÜLTÜ ORANI

Herhangi bir sinyalde az da olsa gürültü vardır. Burada önerilen sistemden elde edilen ses işaretinin üzerinde de gürültü olacaktır. Bu gürültünün ne kadar olduğunu anlamak için sistemimizin verdiği sinyal /gürültü oranı (SNR-Signal to Noise Ratio) şu matematiksel ifade ile bulunur (ses den alınan 6000 örnek için):

$$SNR = \frac{\sum_{n=1}^{6000} (P_E[n])^2}{\sum_{n=1}^{6000} (P_0[n] - P_E[n])^2} \quad (3.17)$$

Burada SNR sinyal-gürültü oranını , P_E girişim desenlerinin işaret işleme yöntemi olan dört faz kaydırma ile işlenmesi sonucunda tekrar oluşturulan sesin enerjisi (yakalanan ses, lazer mikrofondan elde edilen), P_0 referans sesi (sisteme başlangıçta verilen ses işaretinin enerjisi, lazer mikrofonla hoparlör ile verilen ses) göstermektedir.



BÖLÜM 4

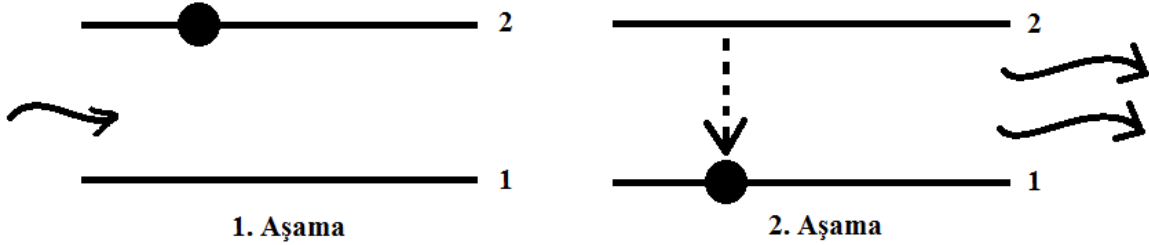
LAZER MİKROFON SİSTEMLERİNDE KULLANILAN DONANIMSAL ELEMANLAR

Bu bölümde oluşturulan lazer mikrofon sistemlerinde kullanılan elemanlar ve özellikleri anlatılacaktır.

4.1 LAZER

4.1.1 Lazerin Temelleri

Lazerler uyarılmış yayılım ile çalışan ışın kaynaklarıdır. Tanımdan anlaşılacağı üzere lazerin temeli uyarılmış yayıma dayanmaktadır. Uyarılmış yayımın Şekil 4.1' de gösterilmektedir.

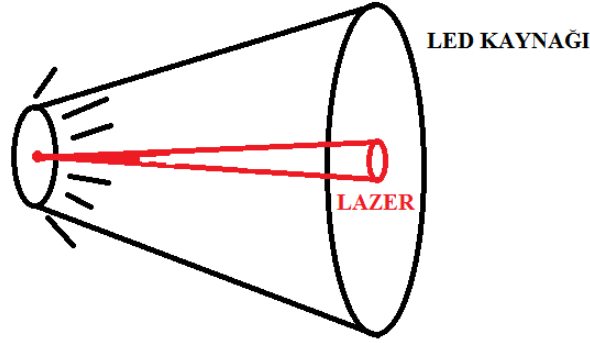


Şekil 4.1 Uyarılmış yayımın.

Einstein'ın ışık madde etkileşimine göre malzeme ışık ile pompalandığı sürece 1. ve 2. enerji düzeyleri arasında elektron geçişleri olur ve ışık yayılır. Buna uyarılmış yayım denilmektedir. Lazerin temelini de bu oluşturmaktadır.

4.1.2 Lazer Işığının Özellikleri

Lazer ışığı çok fazla özelliğe sahiptir. Lazerin paralellik özelliğine göre lazer ışığı tek yönde kutuplanmaya müsaittir. Mesafeye göre ışığın açısı çok az değişir. Bu sayede ışık çok uzun mesafelere çok dağılmaya uğramadan ulaşabilir. Bir LED ışık kaynağı ile lazer ışığı karşılaştırılırsa aradaki açı dağılım farkı anlaşılabilir. Bu durum Şekil 4.2' de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Lazer ışığının paralellik özelliği.

Lazerler tek renkli ışık kaynaklarıdır. Dolayısıyla lazerler tek frekansa sahiptirler. Lazerler aynı zamanda koherent bir ışık yayarlar. Lazer ışığını oluşturan her foton diğer fotonla senkronizedir ve ışık çok az miktarda kayıp olur.

Lazer ışınlar düşük çaplı olmasına rağmen yüksek enerjiye sahiptirler. Bu nedenle tek bir noktada oldukça yoğun olan bir ışık şiddeti oluşturabilir.

4.1.3 Lazer Mikrofon Sisteminde Kullanılan Lazer

Lazer mikrofon sisteminde 12(mW) gücünde 633(nm) dalga boyuna sahip bir He-Ne kırmızı lazer ışık kaynağı kullanılmıştır. Sistemde kullanılan lazer Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 He-Ne kırmızı lazer ışık kaynağı.

4.2 ÜÇ BOYUTLU UZAYSAL FİLTRE

Üç boyutlu uzaysal filtre dağınık halde bulunan lazeri nokta kaynak haline getiren bir cihazdır. İyi bir Gaussian dağılım elde etmek için kullanılır.



Şekil 4.4 Üç boyutlu uzaysal filtre.

4.3 İNCE KENARLI MERCEK

Sistemimizde lazer ışığını paralelleştirmek ve düzlem dalga oluşturmak için ince kenarlı mercek kullanılmıştır.



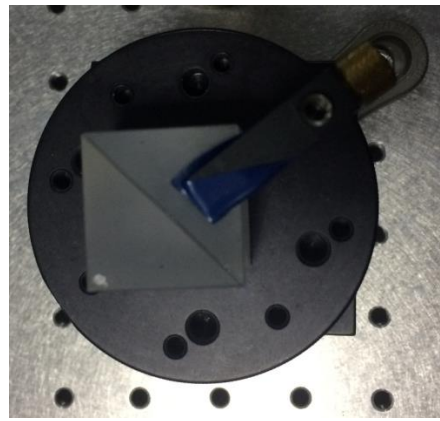
Şekil 4.5 İnce kenarlı mercek.

4.4 IŞIN BÖLÜCÜ

Işın bölücüler hem ışını eşit iki kola ayırır hem de iki koldan gelen ışınları toplama özelliğine sahiptir. Sistemin türüne göre bir ya da iki ışın bölücü kullanılır.



(a)



(b)

Şekil 4.6 Işın bölücü a) Yandan görünüş b) Üstten görünüş.

4.5 DÜZLEM YANSITICI AYNA

Yansıtıcı aynalar iki kola ayrılan ışını gelme doğrultusuna paralel geri yansıtarak sisteme yardımcı olurlar. İki tane yansıtıcı ayna kullanılır.



Şekil 4.7 Düzlem yansıtıcı ayna.

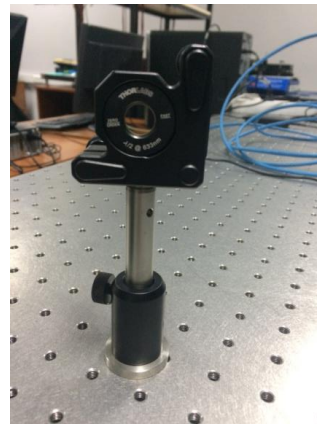
4.6 FAZ KAYDIRMA ELEMANI

4.6.1 Dalga Plakaları

Fazı kaydırmak için kullanılan plakalardır. En az 2 tane faz kaydırma plakası kullanarak 4 farklı girişim oluşturulmuştur.



(a)

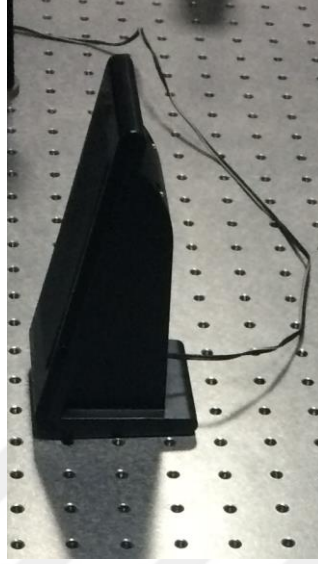


(b)

Şekil 4.8 Dalga plakaları a) Çeyrek dalga plakası b) Yarım dalga plakası.

4.7 SES KAYNAĞI (HOPARLÖR)

Lazer mikrofon sisteminde ses dalgası olarak hoparlörden verilen ses kullanılmıştır. Sisteme verilen ses dalgası 'Deneme 1' sesidir. Lazer mikrofon sisteminde kullanılan hoparlör şekil 4.11 'de gösterilmiştir.



şekil 4.9 Hoparlör.

4.8 HIZLI KAMERA

Lazer mikrofondan alınan işaretlerin kayıt edilmesi ve bilgisayara aktarılabilmesi için hızlı kamera kullanılmıştır. Lazer mikrofon sisteminde kullanılan hızlı kameranın görüntüsü şekil 4.12 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Hızlı Kamera.



BÖLÜM 5

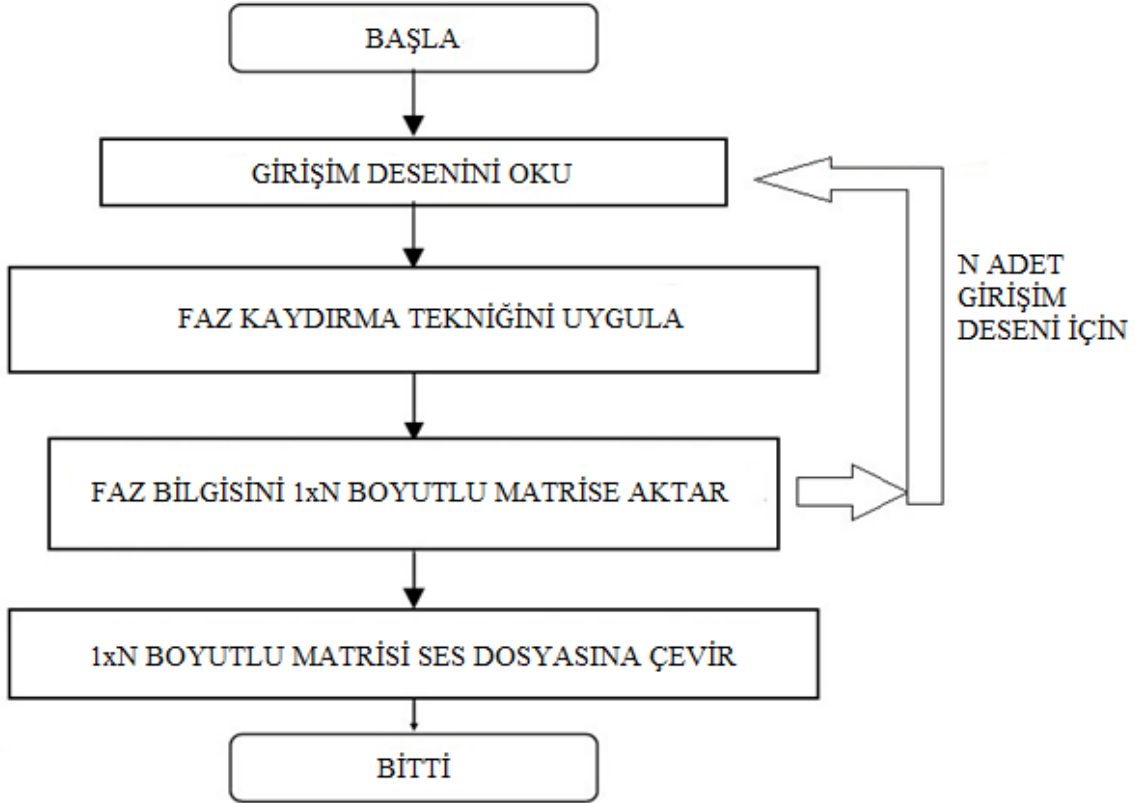
LAZER MİKROFON SİSTEMLERİ

Yapılan tez çalışması üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamamız kurulan Michelson ve Mach-Zehnder interferometre lazer mikrofon sistemleri ile girişim desenlerinin hızlı kamera ile kaydedilmesidir. İkinci aşamamız ise hızlı kamera ile kaydedilen girişim desenlerinin bilgisayar ortamına aktarılarak sesin elde edilmesidir. Üçüncü ve son aşamamız ise yapmış olduğumuz lazer mikrofon sistemine verdiğimiz sesin enerjisi ile sistemden elde edilen sesin enerjisinin sinyal/gürültü oranını bulmaktır. Michelson ve Mach-Zehnder interferometrelerini temel alan faz kaydırma interferometresine dayalı lazer mikrofon sistemleri oluşturulmuştur. Bu interferometrelerden Mach-Zehnder interferometresini temel alan lazer mikrofonda ise iki farklı durum üzerinde durulmuştur. İlk olarak referans kolu olarak adlandırdığımız referans lazer ışınının bulunduğu kola dalga plakaları ile gerekli işlemler yapılarak oluşturulan girişim desenlerinin hızlı kamera ile kaydedilmesi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra hem referans ve obje kolunun birleşmesiyle oluşan lazer ışını ile hızlı kamera arasına dalga plakaları konularak oluşan girişim desenleri kaydedilmiştir. Ayrıca Michelson interferometresini temel alan lazer mikrofondan alınan girişim desenleri Fourier dönüşümüne dayalı sinyal işleme algoritması ile işlenmiş ve oluşturulan sistemler ile kıyaslanması yapılmıştır.

Yapılan lazer mikrofon sistemlerinde 12 (mW) gücünde 633 (nm) dalga boyuna sahip kırmızı lazer ışık kaynağı kullanılmıştır. Michelson ve Mach-Zehnder interferometre lazer mikrofon sistemleri kurulmuştur ve girişim desenleri hızlı kamera kullanılarak kayıt edilmiştir. Lazer kaynağımızdan iyi bir Gaussian ışık dağılımı elde etmek için üç boyutlu uzaysal filtre kullanılmıştır ve ince kenarlı mercek ile düzlemsel dalga oluşturulmuştur. Lazer ışığı ışın bölücü ile ikiye ayrılmıştır. Sistemin türüne göre 1 veya 2 ışın bölücü kullanılmıştır. Ses hoparlör ile ortama verilmiştir. Lazer mikrofon ile kayıt edilen ses dalgası 'Deneme 1' sesidir. Girişim desenleri hızlı kamera ile kayıt edilmiştir. Nyquist kriterine göre, sisteme verilen sesin frekansı maksimum frekansın en az 2 katı ve daha fazla olacak şekilde ses dalgası örneklenmiştir. Bu nedenle 3 sn'lik ses ile aynı anda 6000 girişim deseni kamera

tarafından bilgisayara aktarılmıştır. Elde edilen girişim desenleri bilgisayar üzerinde belirlenen işaret işleme algoritmaları ile işlenerek yakalanan ses dalgası dinlenebilmiştir.

Lazer mikrofön sisteminde elde edilen işaretler bilgisayar ortamında işlenmiştir. Bilgisayar ortamında işlenen görüntülerin akış şeması Şekil 5.1'de verilmiştir.



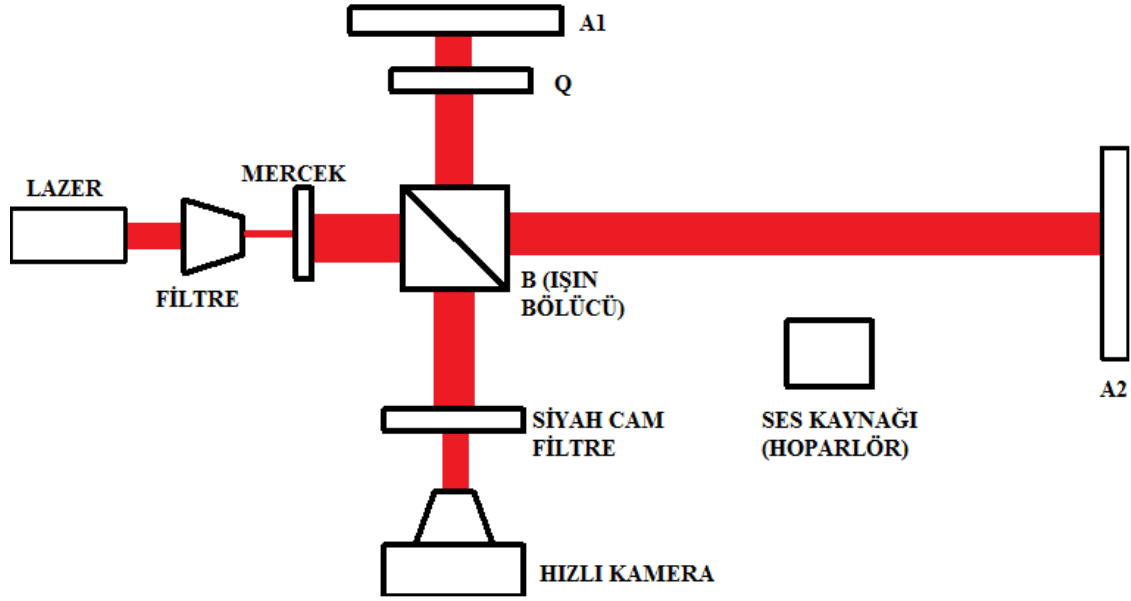
Şekil 5.1 Akış şeması.

Şekil 5.1 'de gösterilen akış şeması lazer mikrofön sistemlerinde alınan girişim desenlerinin tümünde aynı şekilde kullanılmıştır.

5.1 MİCHELSON İNTERFEROMETRESİNİ TEMEL ALAN LAZER MİKROFON (DALGA PLAKALARI İLE FAZ KAYDIRMA)

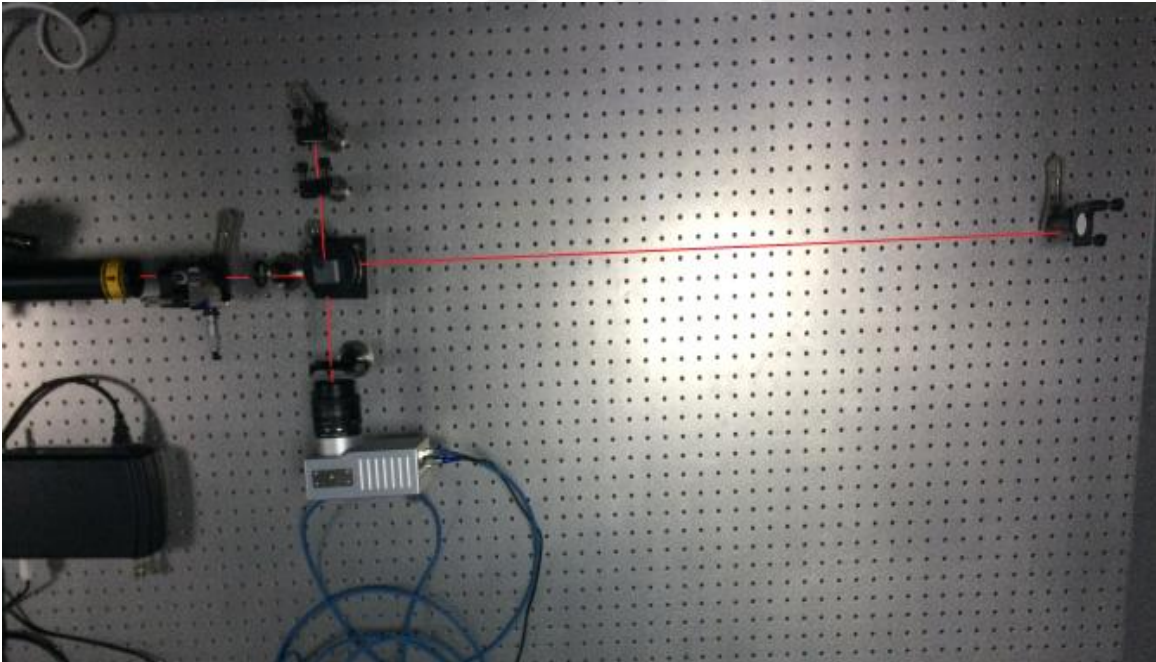
Bu çalışma için 12 (mW) gücünde 633 (nm) dalga boyuna sahip bir kırmızı lazer ışık kaynağı, üç boyutlu uzaysal filtre, ince kenarlı mercek, 1 adet ışın bölücü, 2 adet ayna, dalga plakaları (yarım ve çeyrek dalga plakaları) , hızlı kamera ve bilgisayar kullanılmıştır.

Sistemin şematik görüntüsü Şekil 5.2 'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Michelson interferometresini temel alan faz kaydırma interferometreli lazer mikrofon: A1 ve A2 aynaları, Q dalga plakalarını göstermektedir.

Sistemin laboratuvar kurulumu şekil 5.3' de gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Sistemin laboratuvar kurulumu.

Lazer kaynağından çıkan ışın dağınık lazerdir. Dağınık halde bulunan lazeri 3 boyutlu uzaysal filtre ile nokta kaynak haline getirilmiştir. Daha sonra bu nokta kaynak ince kenarlı mercek

ile düzlemsel dalgaya dönüştürülüp, ışın bölücüye gönderilmiştir. Işın bölücü lazer ışığının genliğini ikiye bölmüştür. Bu iki yoldan birisi referans yol olup diğeri ise obje kolu olarak adlandırılmaktadır. Objeye koluna dinlemek istediğimiz ses dalgası hoparlör ile verilmektedir. Bu verilen ses dalgası obje kolundaki lazer ışığını akusto optik etki ile modüle eder. Modüle olmuş ışık dalgası obje kolundaki aynadan geri yansıtılarak ışın bölücüye tekrar gelir. Referans kolundaki ışın da aynı obje kolundaki ışın gibi referans kolunda bulunan aynadan geri yansıtılarak ışın bölücüye gelir. Daha sonra burada birleştirilerek girişim deseni oluştururlar. Bu girişim deseni kamera vasıtası ile bilgisayara aktarılır.

Nyquist kriterine göre bir sesi yeniden dinleyebilmek için sesin içinde bulunan en yüksek frekansın minimum 2 katı kadar ya da daha büyük bir örnekleme frekansı seçmek gerekir. Burada sisteme verilen sesin maksimum frekansı 1 (kHz) olarak kabul edilmiş olup en az 2 (kHz)'lik bir örnekleme frekansı seçilmiştir. Bu frekansa erişmek için saniyede kameradan en az 2000 adet örnek alınması gerekir. Sisteme 3 sn süre ile ses verildiğinden burada 6000 örnek alınarak işlem yapılmıştır.

Aynı işlemler dalga plakalarını şekildeki gibi yerleştirerek her adımda tekrarlanır. Burada dört adımlı faz kaydırma tekniği kullanıldığından ve her adımda 6000 girişim deseni kayıt edildiğinden dolayı 24000 girişim deseni toplamda bilgisayara kayıt edilir. Dört adımlı faz kaydırma tekniğinde ilk olarak referans koluna herhangi bir dalga plakası koyulmadan 6000 girişim deseni kayıt edilmiştir. İkinci adımda referans koluna çeyrek dalga plakası ($\lambda/4$) yerleştirilmiş ve 6000 girişim deseni kayıt edilmiştir. Üçüncü adımda yarım dalga plakası ($\lambda/2$) referans koluna yerleştirilip 6000 girişim deseni kayıt edilmiştir. Dördüncü adımda ise yarım ve çeyrek dalga plakaları birlikte kullanılarak ($\lambda/2$ ve $\lambda/4$) referans kola yerleştirilmiş ve 6000 girişim deseni daha hızlı kamera ile kayıt edilmiştir.

Dalga plakalarının oluşturduğu faz kaydırma açıları ise şu şekilde verilebilir:

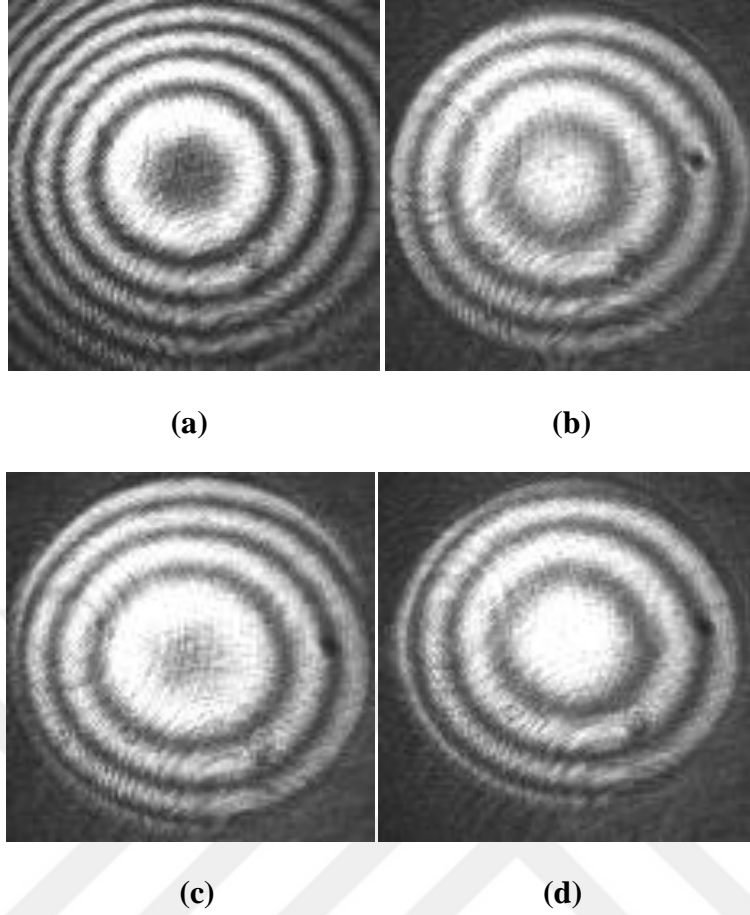
$$(\lambda/4).(2\pi/\lambda)=\pi/2$$

$$(\lambda/2).(2\pi/\lambda)=\pi$$

$$(\lambda/2+\lambda/4)=(3\lambda/4)$$

$$(3\lambda/4).(2\pi/\lambda)=3\pi/2$$

Alınan girişim desenlerinde örnekler Şekil 5.4' de verilmiştir.



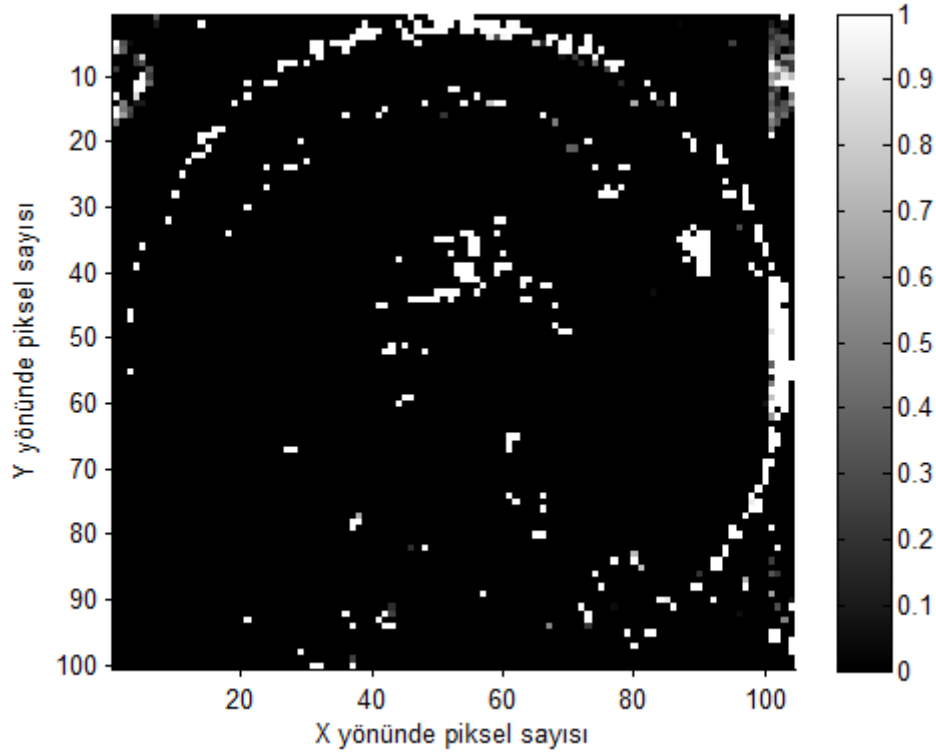
Şekil 5.4 Örnek girişim desenleri (Michelson İnterferometre): a) Dalga plakası olmadan alınan 6000 tane desenden 1. girişim desenidir. b) Çeyrek dalga plakası kullanılarak alınan 6000 tane desenden 1. girişim desenidir. c) Yarım dalga plakası kullanılarak alınan 6000 tane desenden 1. girişim desenidir. d) Hem yarım dalga hem de çeyrek dalga plakaları kullanılarak alınan 6000 tane desenden 1. girişim desenidir.

Aldığımız girişim desenleri bilgisayar yardımı ile MATLAB R2012B uygulamasında yapılan dört fazlı faz kaydırma tekniği algoritması kullanılarak işlenmiştir. MATLAB R2012B uygulamasında oluşturulan faz kaydırma algoritması kısaca şöyledir:

Sistemde elde edilen her bir kaydırma için elde edilen 6000 girişim deseni MATLAB R2012B uygulamasında işlenmiştir. Yani toplam 24000 girişim deseni işlenmiştir. I_a , faz kaydırma elemanı olmadan sistemden alınan 6000 deseninin MATLAB R2012B uygulamasında işlenmiş fazı, I_b çeyrek dalga plakası kullanılarak alınan 6000 tane desenden işlenmiş fazı, I_c yarım dalga plakası kullanılarak alınan 6000 tane desenden işlenmiş fazı, I_d hem çeyrek hem de yarım dalga plakaları kullanılarak alınan 6000 tane desenden işlenmiş faz olmak üzere Denklem (3.15)'i sistemimiz için MATLAB R2012B uygulamasında yeniden düzenlersek:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{I_d - I_b}{I_a - I_c} \right). \quad (5.1)$$

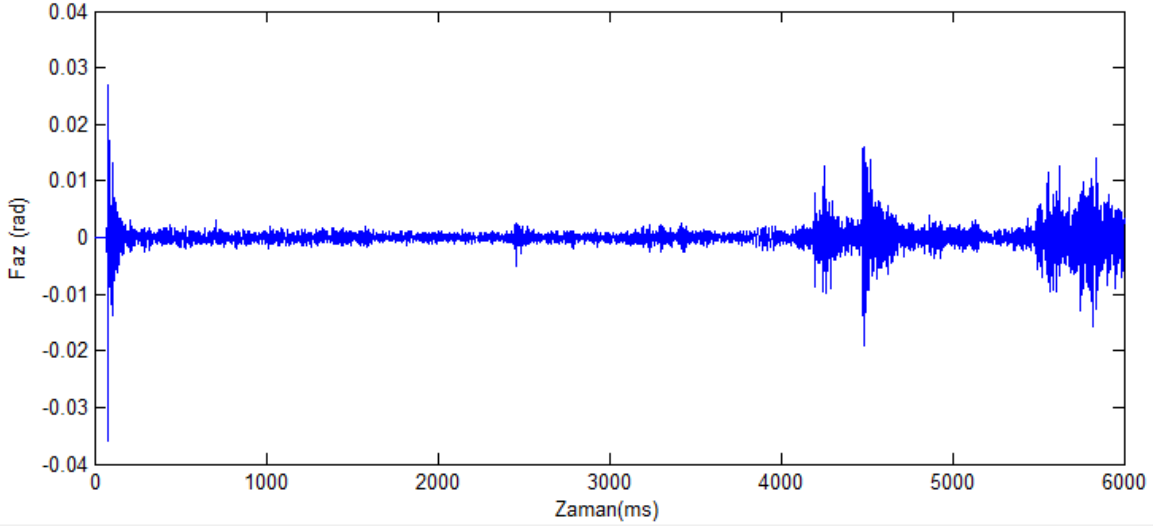
olur. Faz açısını bulmak için işlenen desenlerde bir nokta belirlenir ve o noktaya Denklem (3.15) uygulanarak faz açısı bulunur. Bu fazlar (I_a , I_b , I_c , I_d) kullanılarak başlangıçta sisteme verilen ses dalgasının yeniden dinlenmesi gerçekleştirilir. Faz açısını bulmak için işlenen desenlerin grafiği şekil 5.5' de verilmiştir.



Şekil 5.5 Faz kaydırma tekniği kullanılarak lazer mikrofon sisteminden elde edilen toplam girişim deseni (100x104) adet piksel den oluşur) için elde edilen faz dağılımı. Yatay (X) ekseni ve Dikey (Y) ekseni girişim deseninin piksel konumunu (p(x,y)), ölçek ise genlik seviyesini ifade etmektedir.

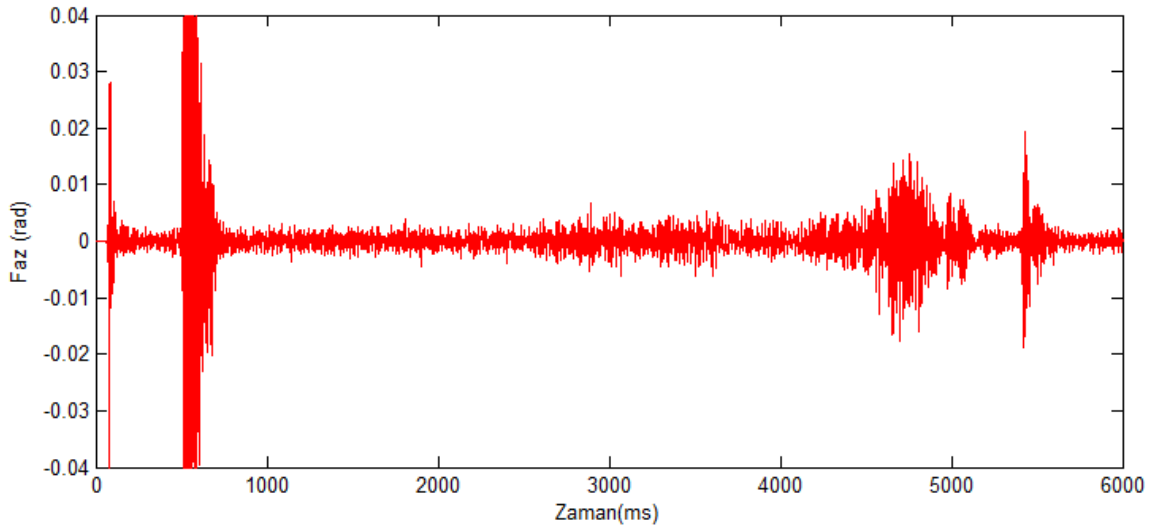
Şekil 5.5' de yer alan piksellerden deneme yanılma yolu ile seçim yapılmıştır. Bu seçim için gelecek çalışmalarda bir algoritma oluşturularak piksel seçimi için daha verimli bir çalışma yapılması planlanmaktadır.

Sisteme verilen referans sesin faz zaman grafiği şekil 5.6' da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 Referans ses.

Lazer mikrofön sisteminden alınan ses dalgasının (faz zaman) grafiği Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



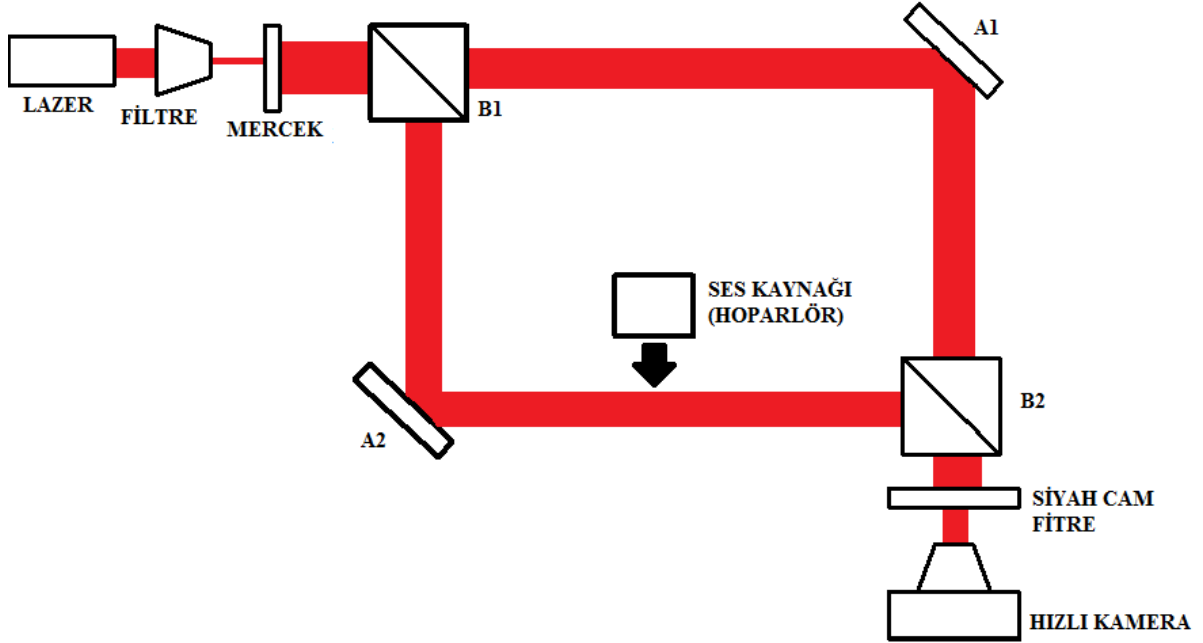
Şekil 5.7 Michelson interferometrisini temel alan lazer mikrofön kullanılarak dinlenen ses dalgası.

Sistemden elde edilen ses ile başlangıçta sisteme verilen referans ses Denklem (3.18) ' e göre karşılaştırılmıştır. Sistemden elde edilen ses ile başlangıçta sisteme verilen ses arasındaki karşılaştırmalardan hesaplanan SNR değeri %96,50'dir. Bu oldukça yüksek bir değerdir. Faz kaydırma tekniği sistemdeki ve çevredeki gürültüyü iyi bastırmaktadır denilebilir.

5.2 MACH-ZEHNDER İNTERFEROMETRESİNİ TEMEL ALAN LAZER MİKROFON

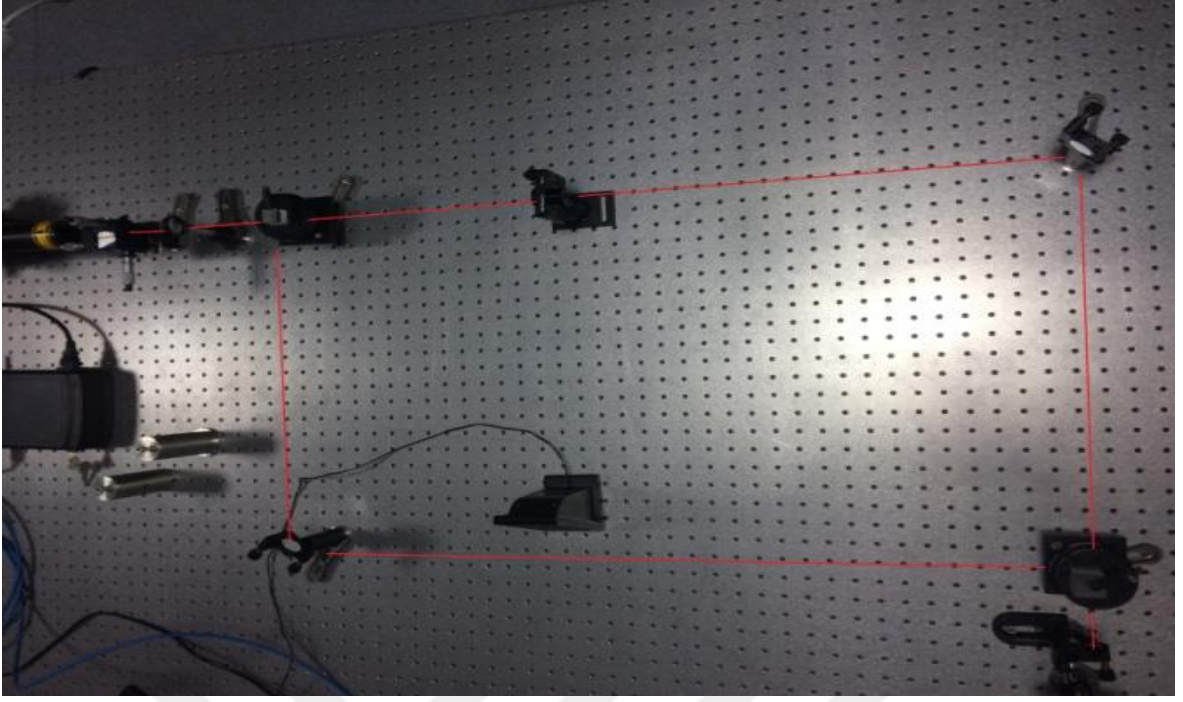
Bu çalışma için 12(mW) gücünde 633(nm) dalga boyuna sahip bir kırmızı lazer ışık kaynağı, 3 boyutlu uzaysal filtre, ince kenarlı mercek, 2 adet ışın bölücü, 2 adet ayna, dalga plakaları (yarım ve çeyrek dalga plakaları), hızlı kamera ve bilgisayar kullanılmıştır.

Yaptığımız sistemde Mach-Zehnder interferometresini temel alan lazer mikrofon oluşturulmuştur. Bu lazer mikrofon sistemimizde iki farklı çalışma yapılmıştır. Faz kaydırma plakaları referans koluna yerleştirilip hızlı kamera ile girişim desenleri kaydedilmiştir. Daha sonra MATLAB R2012B uygulamasında bilgisayar ortamında girişim desenleri işlenerek ses elde edilmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu lazer mikrofon sistemimizde diğer bir çalışma olarak faz kaydırma plakaları kamera önüne yerleştirilerek hızlı kamera ile girişim desenleri kaydedilmiştir. Böylece aynı lazer mikrofon sisteminde faz kaydırma plakalarının yerinin önemi ve ne kadar katkı sağlayacağı araştırılmıştır. Oluşturulan temel lazer mikrofon sisteminin şematik çizimi Şekil 5.8' de verilmiştir.



Şekil 5.8 Mach-Zehnder İnterferometresini Temel Alan Faz Kaydırma İnterferometresi İle Lazer Mikrofon: A1 ve A2 yansıtıcı aynaları, B1 ve B2 ışını bölücüleri göstermektedir.

Sistemin lab kurulumu ve gerçekleştirilmesi Şekil 5.9' da fotoğraflanmıştır.



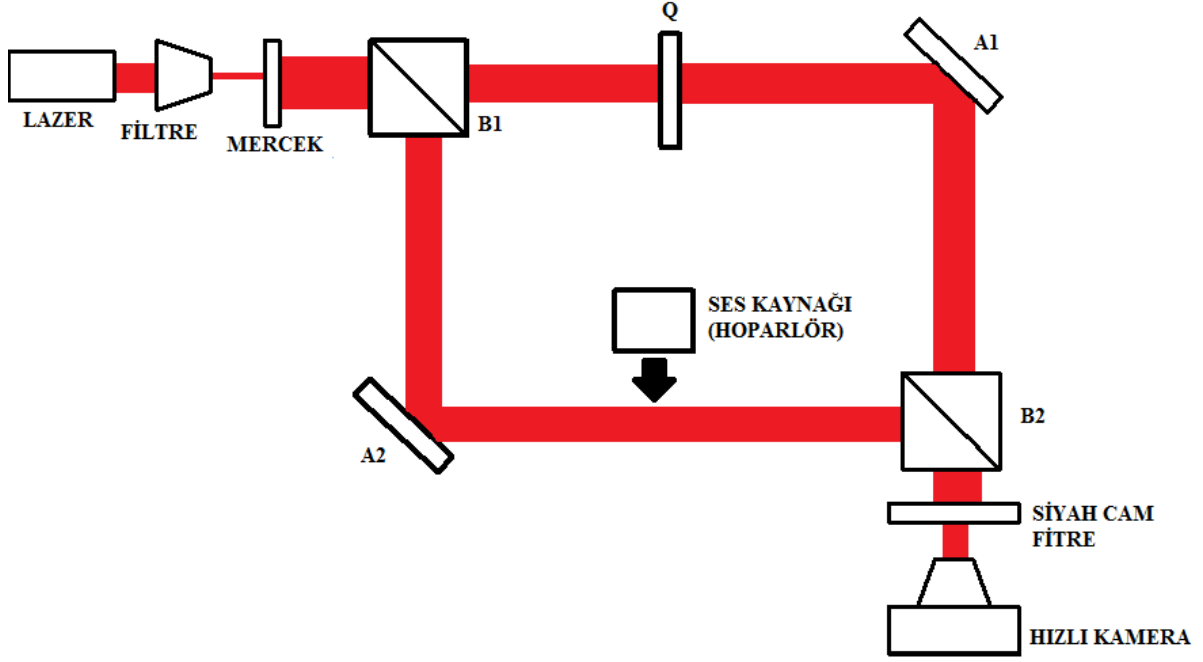
Şekil 5.9 Sistemin laboratuvar kurulumu.

Bu sistemde Michelson İnterferometresin'den farklı olarak 2 ışın bölücü kullanılmaktadır. Lazer Kaynağından çıkan lazer sırasıyla 3 boyutlu uzaysal filtre ve ince kenarlı merceği geçerek 1.ışın bölücüye ulaşır. Bu ışın bölücünün görevi lazer ışığının genliğini ikiye ayırmaktır. İki koldan birisi olan obje koluna hoparlörden ses verilerek akusto optik etki ile ışık modülasyona uğrar ve 2. ışın bölücünden sonra modülasyona uğramış ışık ile referans ışık birleşir ve oluşan girişim deseni kamera ile kayıt edilir.

Mach-Zehnder interferometresini temel alan lazer mikrofon sistemlerimizde tıpkı Michelson interferometresini temel alan lazer mikrofon sistemimizde olduğu gibi 4 adımda gerçekleştirilmiştir. İlk olarak dalga plakası olmadan 6000 adet girişim deseni hızlı kamera ile kaydedilmiştir. Daha sonra sırasıyla çeyrek dalga plakası ($\lambda/4$) yani faz kaydırma açısı ($\pi/2$) olan plaka, yarım dalga plakası ($\lambda/2$) yani faz kaydırma açısı (π) olan plaka ve son olarak ($\lambda/4$ ve $\lambda/2$) olan yani faz kaydırma açısı ($3\pi/2$) olan plakalar aynı anda kullanılarak her birinden 6000 girişim deseni hızlı kamera ile kaydedilmiştir. Toplamda 24000 adet girişim deseni hızlı kamera ile kaydedilmiş olur. Daha sonra kaydedilen girişim desenleri bilgisayar ortamında MATLAB R2012B uygulamasında işlenerek ses elde edilmiştir. Elde edilen ses ile lazer mikrofon sistemine verilen sesin enerjileri sinyal/gürültü oranları bulunmuştur.

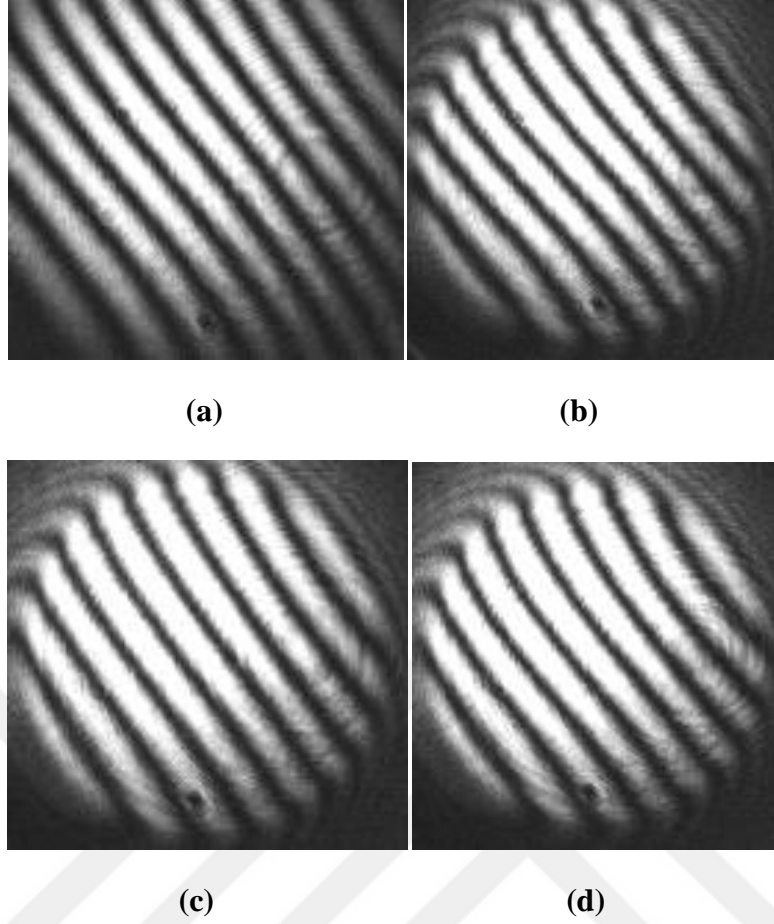
5.2.1 Mach–Zehnder İnterferometresini Temel Alan Faz Kaydırma İnterferometresi İle Lazer Mikrofon Sisteminde Dalga Plakalarının Referans Kolda Olma Durumu

Burada oluşturduğumuz lazer mikrofon sistemimizde dalga plakaları referans kola yerleştirilmiş olup girişim desenleri hızlı kamera ile kaydedilmiştir. sistemimizin şematik çizimi Şekil 5.10'da verilmiştir.



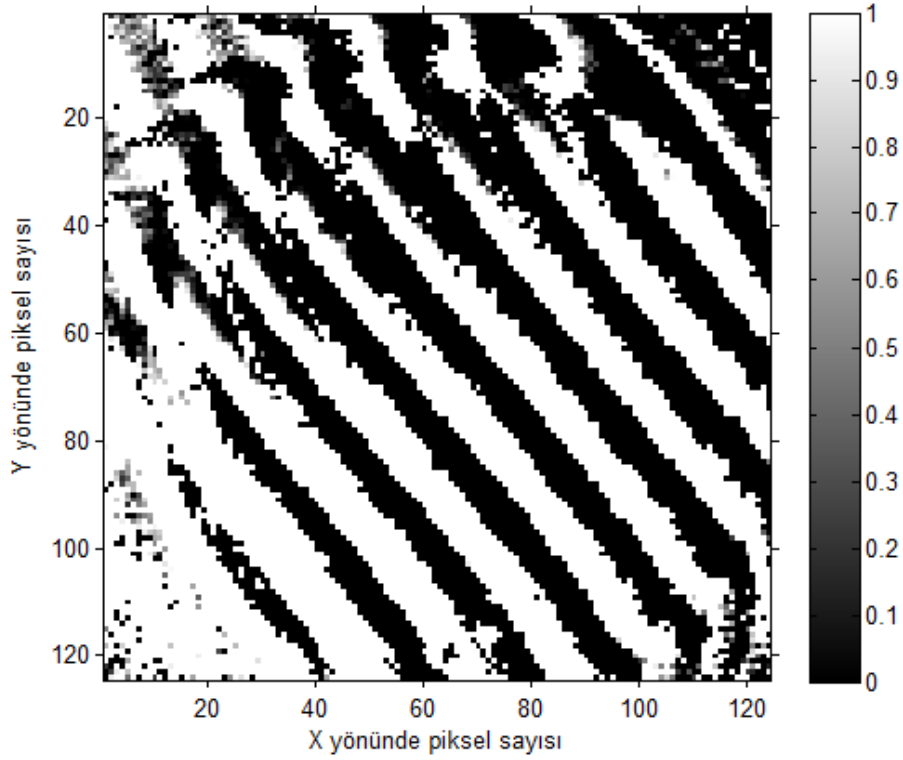
Şekil 5.10 Mach–Zehnder interferometresini temel alan faz kaydırma interferometresi ile lazer mikrofon (referans kol): A1 ve A2 yansıtıcı aynaları, B1 ve B2 ışını bölücülere ve Q dalga plakalarının yerleştirildiği yeri göstermektedir.

Oluşturduğumuz lazer mikrofon sistemimizde ilk olarak dalga plakası olmadan girişim desenleri hızlı kamera ile kaydedilmiştir. Daha sonra dalga plakaları sırasıyla $\pi/2$, π , $3\pi/2$ faz farkı yaratacak şekilde referans kola koyularak elde edilen girişim desenleri kayıt edilmiştir. Bu sistemimizde 4 adımlı faz kaydırma tekniği kullanıldığı için her bir adımda kaydedilen girişim desenleri 6000 adet olduğundan toplam girişim desenleri 24000 olmuştur. Bu girişim desenlerine ait desenlerinin görüntüsü Şekil 5.10' da verilmiştir. Bu girişim desenleri her bir adımda alınan 6000 adet girişim desenlerinin ilk girişim desenini göstermektedir.



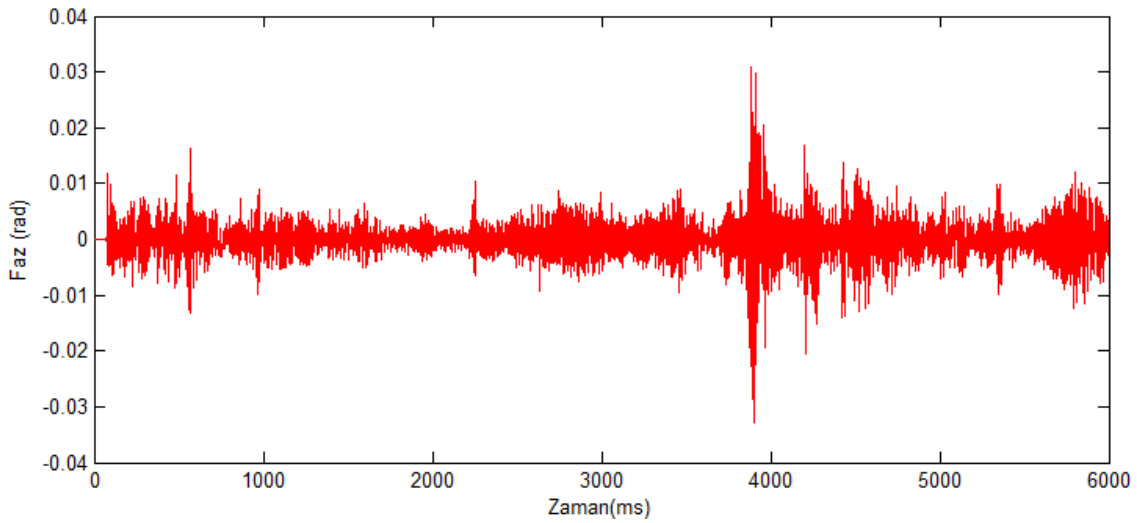
Şekil 5.11 Elde dilen örnek girişim deseni (referans kol): a) Dalga plakası olmadan alınan 6000 tane desenden 1. girişim desenidir. b) Çeyrek dalga plakası kullanılarak alınan 6000 tane desenden 1. girişim desenidir. c) Yarım dalga plakası kullanılarak alınan 6000 tane desenden 1. girişim desenidir. d) Hem yarım dalga hem de çeyrek dalga plakaları kullanılarak alınan 6000 tane desenden 1. girişim desenidir.

Aldığımız girişim desenleri bilgisayar yardımı ile MATLAB R2012B uygulamasında yapılan dört adımlı fazlı faz kaydırma tekniği algoritması kullanılarak işlenmiştir. Faz açısını bulmak için işlenen desenlerde bir nokta belirlenir. Faz açısının belirlenmesi için işlenen desenlere ait faz dağılımının ifadesi şekil 5.10'da gösterilmiştir. Bu şekilde bir piksel seçilerek o seçilen noktaya ait faz açısı bulunur ve başlangıçta sisteme verilen ses dalgasının yeniden dinlenmesi gerçekleştirilir.



Şekil 5.12 Faz kaydırma tekniği kullanılarak lazer mikrofön sisteminden elde edilen toplam girişim deseni((124x124) adet piksel den oluşur) için elde edilen genlik dağılımı. Yatay (X) eksen ve Dikey (Y) eksen girişim deseninin piksel konumunu (p(x,y)), ölçek ise genlik seviyesini ifade etmektedir.

Piksel seçildikten sonra o piksele ait faz açısı bulunur ve sisteme verilen sesin yeniden elde edilmesi sağlanır. Sistemden elde edilen ses dalgası (faz-zaman) grafiği Şekil 5.13'de gösterilmiştir.

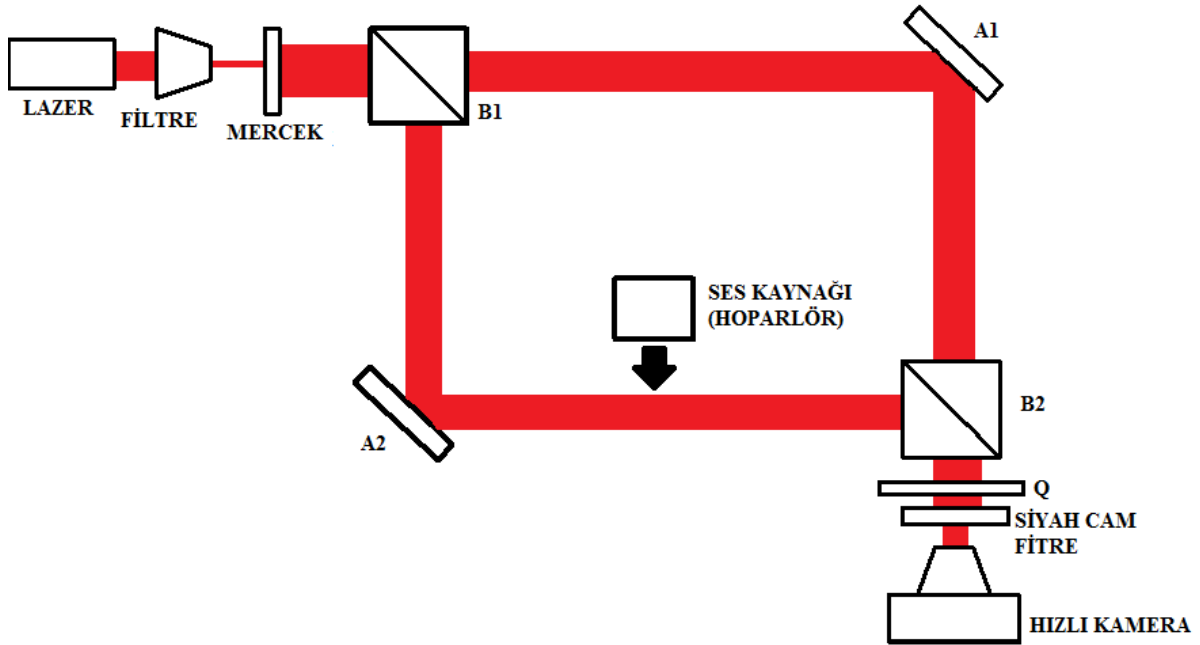


Şekil 5.13 Mach-Zehnder İnterferometresini temel alan lazer mikrofonda Dalga Plakalarının Referans Kolda Olma Durumunda dinlenen ses dalgası.

Sistemden elde edilen ses ile başlangıçta sisteme verilen ses arasındaki karşılaştırmalardan hesaplanan SNR değeri %59,95'dir. Bu durum Mach-Zehnder İnterferometresi ile oluşturulmuş sistemin çevredeki gürültüyü tam olarak bastıramadığını göstermektedir.

5.2.2 Mach-Zehnder İnterferometresini Temel Alan Faz Kaydırma İnterferometresi İle Lazer Mikrofon Sisteminde Dalga Plakalarının Kamera Önünde Olma Durumu

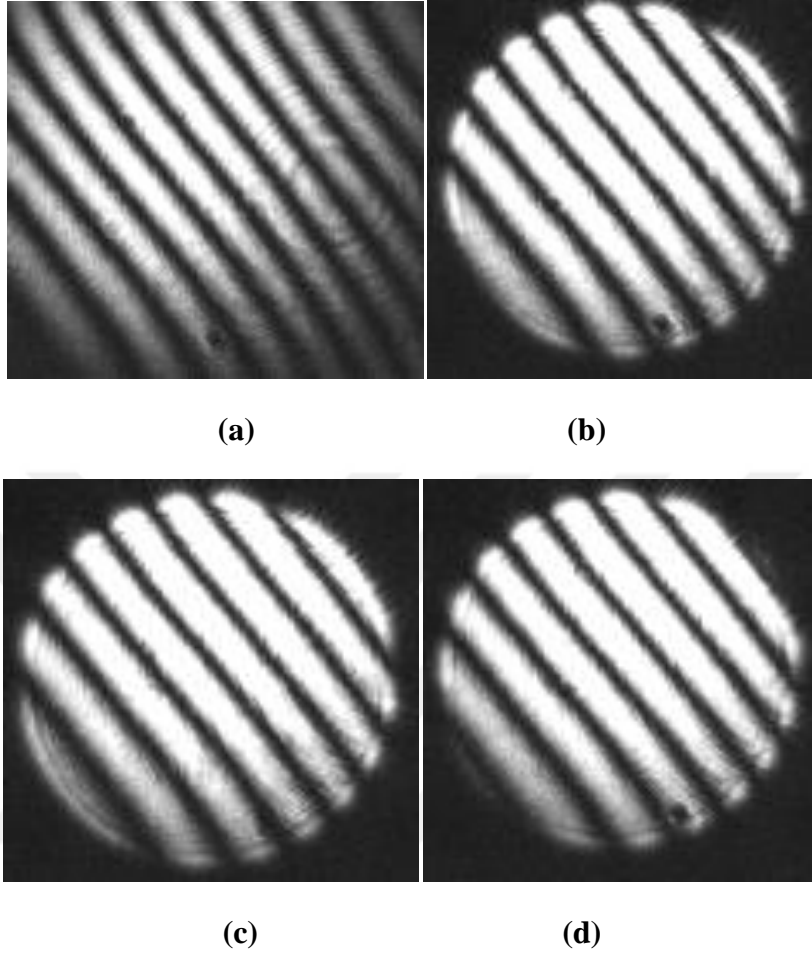
Burada oluşturduğumuz lazer mikrofon sistemimizde dalga plakaları kamera önüne yerleştirilip girişim desenleri hızlı kamera ile kaydedilmiştir. Sistemimizin şematik çizimi Şekil 5.14'de verilmiştir.



Şekil 5.14 Mach-Zehnder interferometresini temel alan faz kaydırma interferometresi ile lazer mikrofon (kamera önü): A1 ve A2 yansıtıcı aynaları, B1 ve B2 ışını bölücülerini ve Q dalga plakalarının yerleştirildiği yeri göstermektedir.

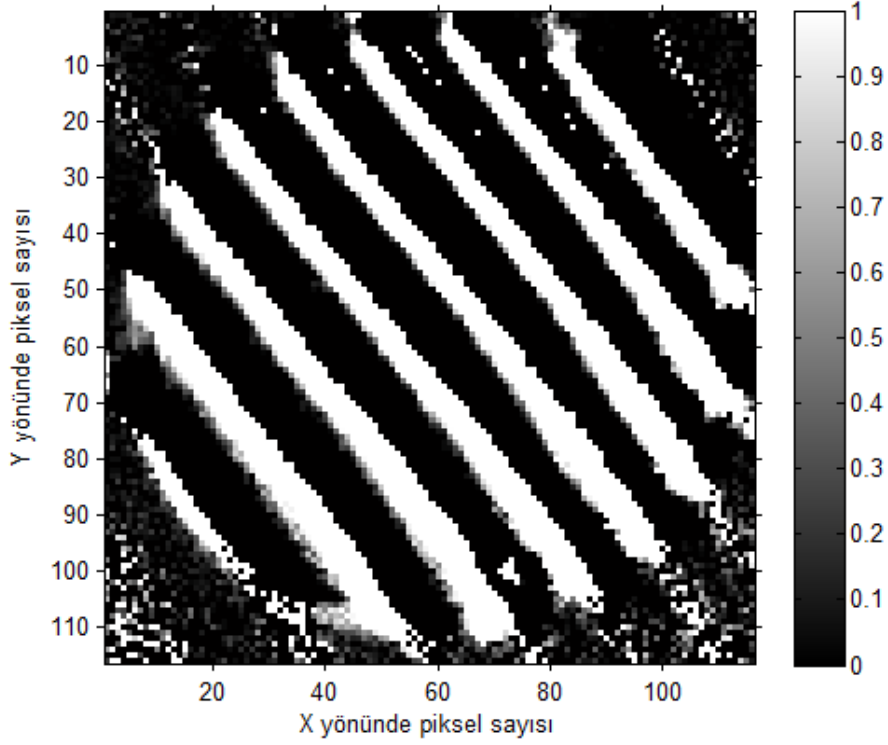
Oluşturduğumuz lazer mikrofon sistemimizde ilk olarak dalga plakası olmadan girişim desenleri hızlı kamera ile kaydedilmiştir. Daha sonra dalga plakaları sırasıyla $\pi/2$, π , $3\pi/2$ faz farkı yaratacak şekilde referans kola koyularak elde edilen girişim desenleri kayıt edilmiştir. Bu sistemimizde 4 adımlı faz kaydırma tekniği kullanıldığı için her bir adımda kaydedilen girişim desenleri 6000 adet olduğundan toplam girişim desenleri 24000 olmuştur. Bu girişim

desenlerine ait desenlerinin görüntüsü Şekil 5.15' de verilmiştir. Bu girişim desenleri her bir adımda alınan 6000 adet girişim desenlerinin ilk girişim desenini göstermektedir.



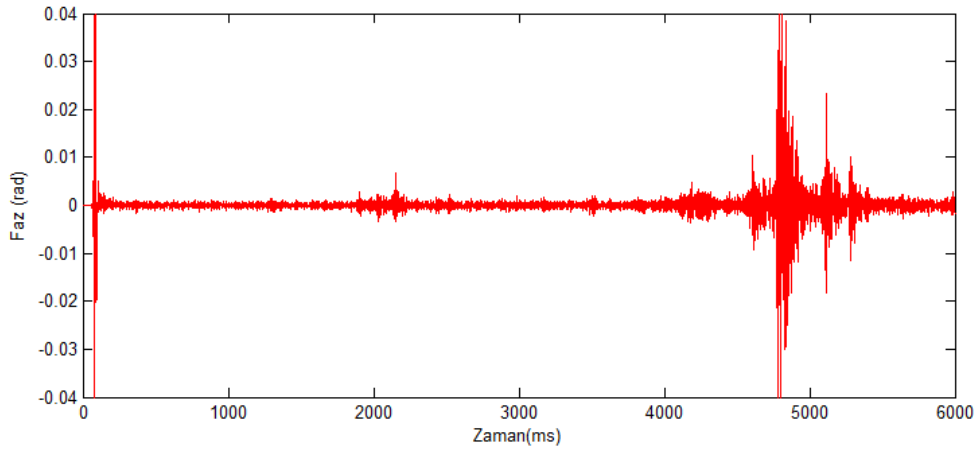
Şekil 5.15 Elde edilen örnek girişim deseni (referans kol): a) Dalga plakası olmadan alınan 6000 tane desenden 1. girişim desendir. b) Çeyrek dalga plakası kullanılarak alınan 6000 tane desenden 1. girişim desendir. c) Yarım dalga plakası kullanılarak alınan 6000 tane desenden 1. girişim desendir. d) Hem yarım dalga hem de çeyrek dalga plakaları kullanılarak alınan 6000 tane desenden 1. girişim desendir.

Aldığımız girişim desenleri bilgisayar yardımı ile MATLAB R2012B uygulamasında yapılan dört adımlı faz kaydırma tekniği algoritması kullanılarak işlenmiştir. Faz açısını bulmak için işlenen desenlerde bir nokta belirlenir. Faz açısının belirlenmesi için işlenen desenlere ait faz dağılımının ifadesi şekil 5.16'da gösterilmiştir. Bu şekilde bir piksel seçilerek o seçilen noktaya ait faz açısı bulunur ve başlangıçta sisteme verilen ses dalgasının yeniden dinlenmesi gerçekleştirilir.



Şekil 5.16 Faz kaydırma tekniği kullanılarak lazer mikrofon sisteminden elde edilen toplam girişim deseni(116x116) adet piksel den oluşur) için elde edilen genlik dağılımı. Yatay (X) eksen ve Dikey (Y) eksen girişim deseninin piksel konumunu (p(x,y)), ölçek ise genlik seviyesini ifade etmektedir.

Piksel seçildikten sonra o piksele ait faz açısı bulunur ve sisteme verilen sesin yeniden elde edilmesi sağlanır. Sistemden elde edilen ses dalgası (faz-zaman) grafiği Şekil 5.17'de gösterilmiştir.

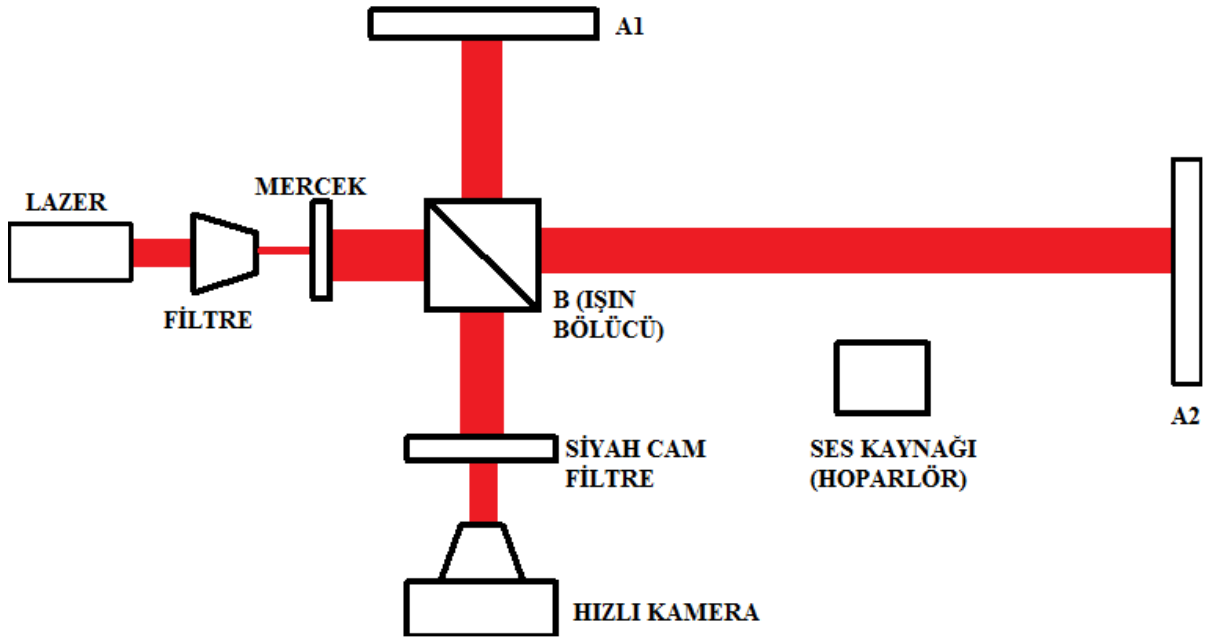


Şekil 5.17 Mach–Zehnder İnterferometresini temel alan lazer mikrofonda Dalga Plakalarının kamera Önünde Olma Durumunda dinlenen ses dalgası .

Sistemin SNR değeri Denklem (3.17) kullanılarak %65,17 olarak elde edilmiştir. Bu durum Mach–Zehnder İnterferometresi ile oluşturulmuş sistemin çevredeki gürültüyü tam olarak bastıramadığı görülmektedir. Kullanılan dalga plakalarının referans kola veya kamera önüne yerleştirilmesinin gürültüyü bastırmada etkili olmadığı görülmektedir.

5.3 FAZ KAYDIRMA İNTERFEROMETRESİNE DAYALI LAZER MİKROFONDA FOURIER DÖNÜŞÜMÜNE DAYALI SİNYAL İŞLEME ALGORİTMASI UYGULAMASI

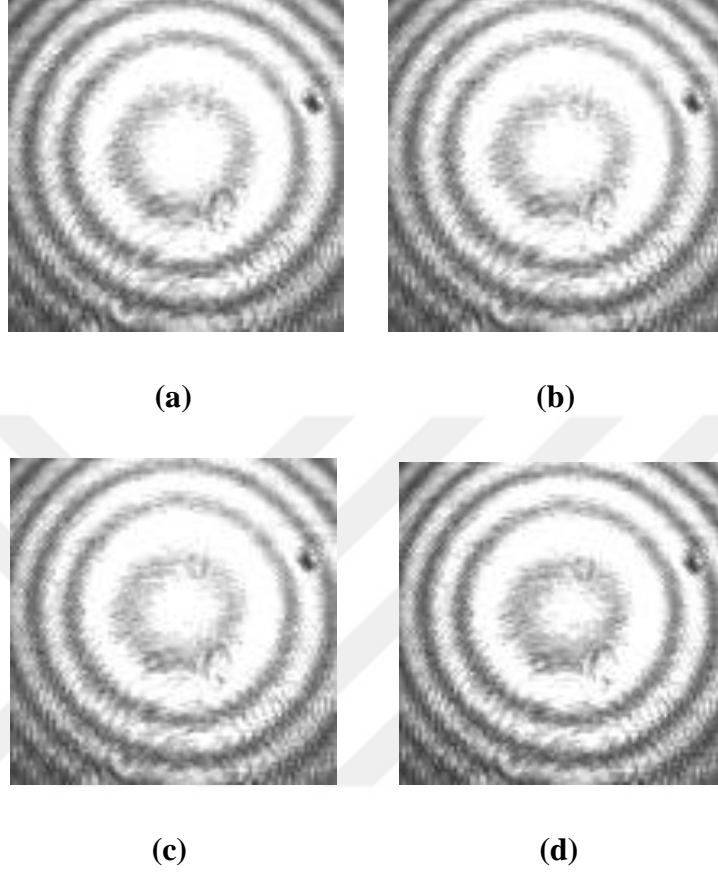
Yapılan tez çalışmasında oluşturulan lazer mikrofon sistemlerimiz ile bir yazılımsal algoritma olan Fourier dönüşümüne dayalı sinyal işleme algoritması karşılaştırma yapılabilmesi için uygulanmıştır. Burada yapılan çalışmada Michelson interferometresini temel alan lazer mikrofon oluşturulmuştur. Bu interferometreye ait şematik çizim Şekil 5.18' de verilmiştir.



Şekil 5.18 Michelson interferometresini temel alan lazer mikrofon

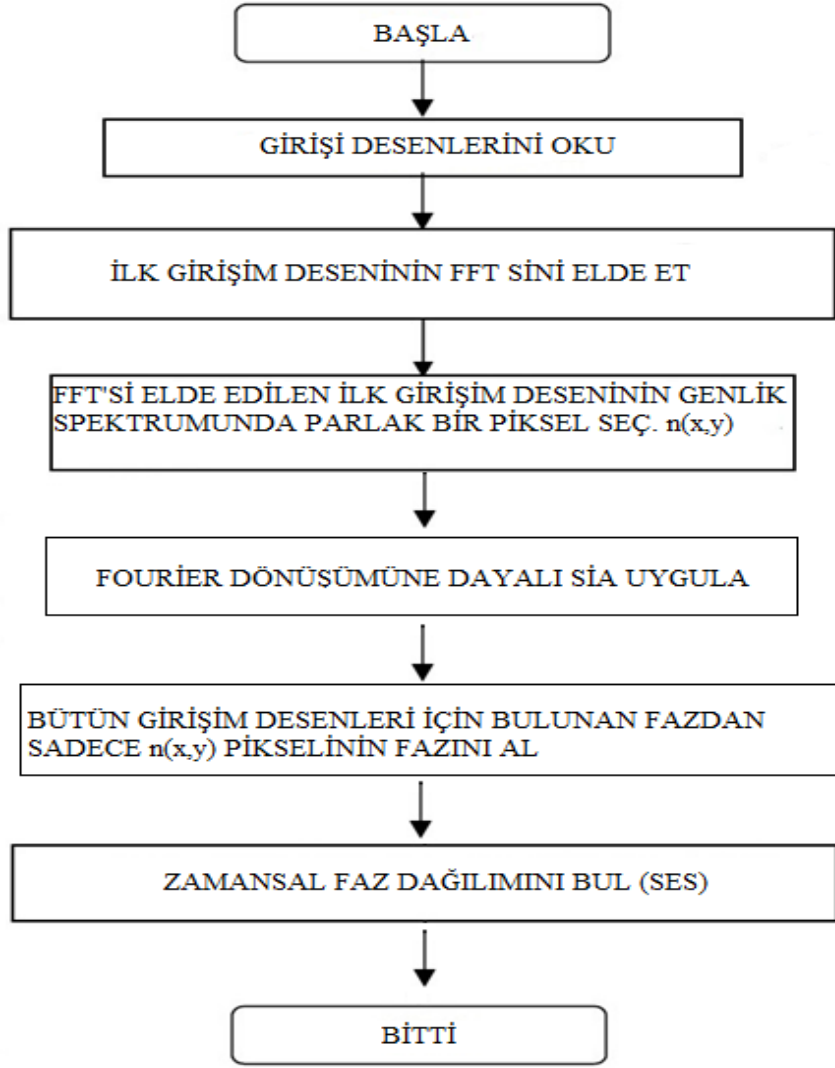
Oluşturulan lazer mikrofondan hızlı kamera ile tek seferde 6000 girişim deseni kaydedilmiştir. Bunu nedeni Nyquist kriterine göre bir sesi yeniden dinleyebilmek için sesin içinde bulunan en yüksek frekansın minimum 2 katı kadar ya da daha büyük bir örnekleme frekansı seçmek gerekir. Burada sisteme verilen sesin maksimum frekansı 1 (kHz) olarak kabul edilmiş olup en az 2 (kHz)'lik bir örnekleme frekansı seçilmiştir. Bu frekansa erişmek

için saniyede kameradan en az 2000 adet örnek alınması gerekir. Sisteme 3 sn süre ile ses verildiğinden burada 6000 örnek alınarak işlem yapılmıştır. Sistemden alınan girişim deseni örneği Şekil 5.19'da gösterilmiştir.



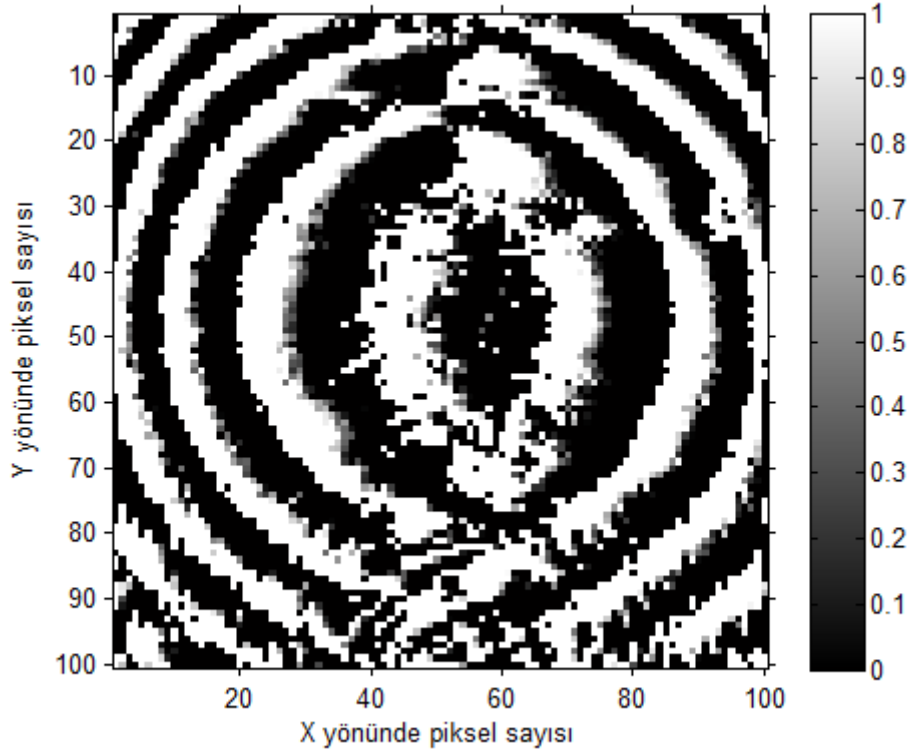
Şekil 5.19 Elde edilen örnek girişim deseni : a) 6000 tane deseninin 1. girişim desendir. b) alınan 6000 tane deseninin 2000. girişim desendir. c) 6000 tane deseninin 4000. girişim desendir. d) 6000 tane deseninin 6000. girişim desendir.

Bu girişim desenleri bilgisayar ortamına aktarılarak MATLAB R2012B uygulamasında işlenerek lazer mikrofön sistemimize verilen sesin yeniden elde edilmesi sağlanmıştır. Bu girişim desenlerinin fazı, Fourier dönüşümüne dayalı SİA ile bulunmuş ve sadece seçilen pikselin fazı alınarak zamansal faz dağılımı yani sisteme başlangıçta dinlemek için verilen ses dalgası yeniden oluşturulmuştur. Sesin elde edilebilmesi için Fourier dönüşümüne dayalı SİA (Sinyal İşleme Algoritması) kullanılmıştır. Algoritmanın işleyiş şeması Şekil 5.20' de verilmiştir. İlk olarak girişim desenleri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. MATLAB R2012B uygulamasında okutulan 6000 girişim desenlerinin ilk girişim deseninin FFT (Fast Fourier Transform) 'si alınmıştır. FFT'si alınan girişim deseninin genlik spektrumundan bir piksel seçilmiştir.



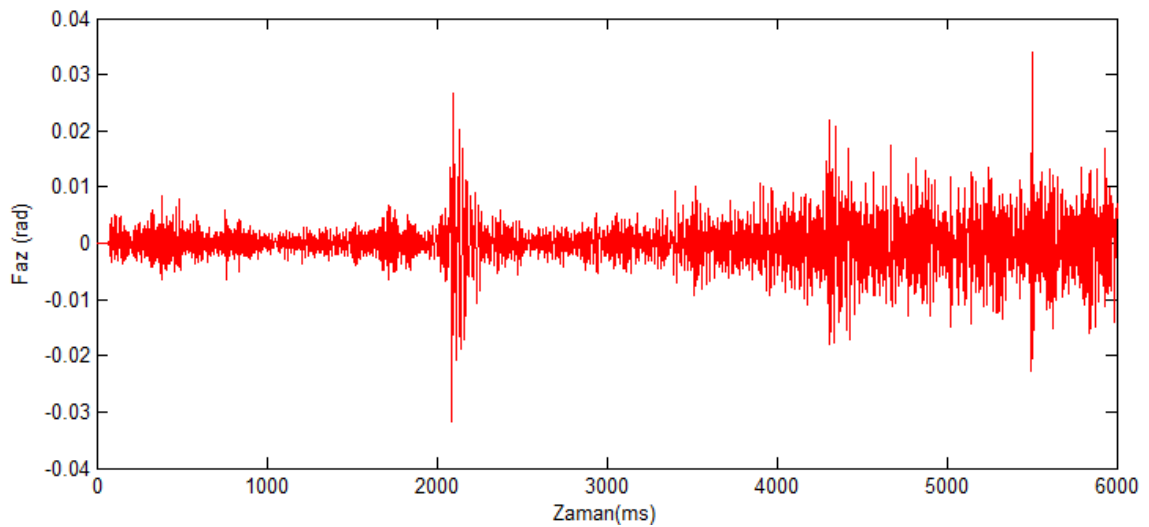
Şekil 5.20 Fourier dönüşümüne dayalı sinyal işleme algoritması

FFT'si alınan ilk girişim deseninin genlik spektrumu şekil 5.21'de gösterilmiştir. Bu girişim deseninden bir piksel seçilmiştir. Hızlı Fourier Dönüşümüne dayalı SİA dayalı SİA kullanılarak lazer mikrofön sisteminden elde edilen girişim deseni ((100x100) adet piksel den oluşur) için elde edilen faz dağılımdan sadece bir piksel (x,y) seçilerek tek bir noktanın fazı alınır. 6000 adet girişim deseninden elde edilen 6000 adet faz bilgisi kullanılarak bir zamansal faz dağılımı (sistem tarafından yakalanan ses dalgası) elde edilir.



Şekil 5.21 Hızlı Fourier Dönüşümüne dayalı SİA kullanılarak lazer mikrofön sisteminden elde edilen 1. girişim deseni ((100x100) adet piksel den oluşur) için elde edilen genlik dağılımı. Yatay (X) eksenini ve Dikey (Y) eksenini girişim deseninin piksel konumunu ($p(x,y)$), ölçek ise genlik seviyesini ifade etmektedir.

Elde edilen ses dalgasının faz-zaman grafiği Şekil 5.22’de gösterilmektedir.



Şekil 5.22 Fourier dönüşümüne dayalı SİA kullanılarak yeniden elde edilen ses dalgası (Faz-Zaman Grafiği= Zamansal Faz Dağılımı).

Şekil 5.5'deki referans ses ile ve Şekil 5.22'de elde edilen ses dalgası kullanılarak sistemin SNR değeri % 80,93 bulunmuştur.

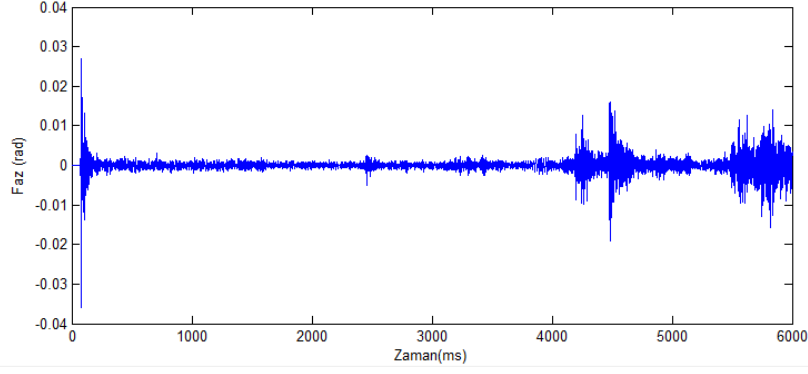
5.4 LAZER MİKROFON SİSTEMLERİNİN SONUÇLARI

Oluşturulan lazer mikrofon sistemleri ve elde edilen ait Sinyal/gürültü oranları Tablo 1'de ifade edilmiştir.

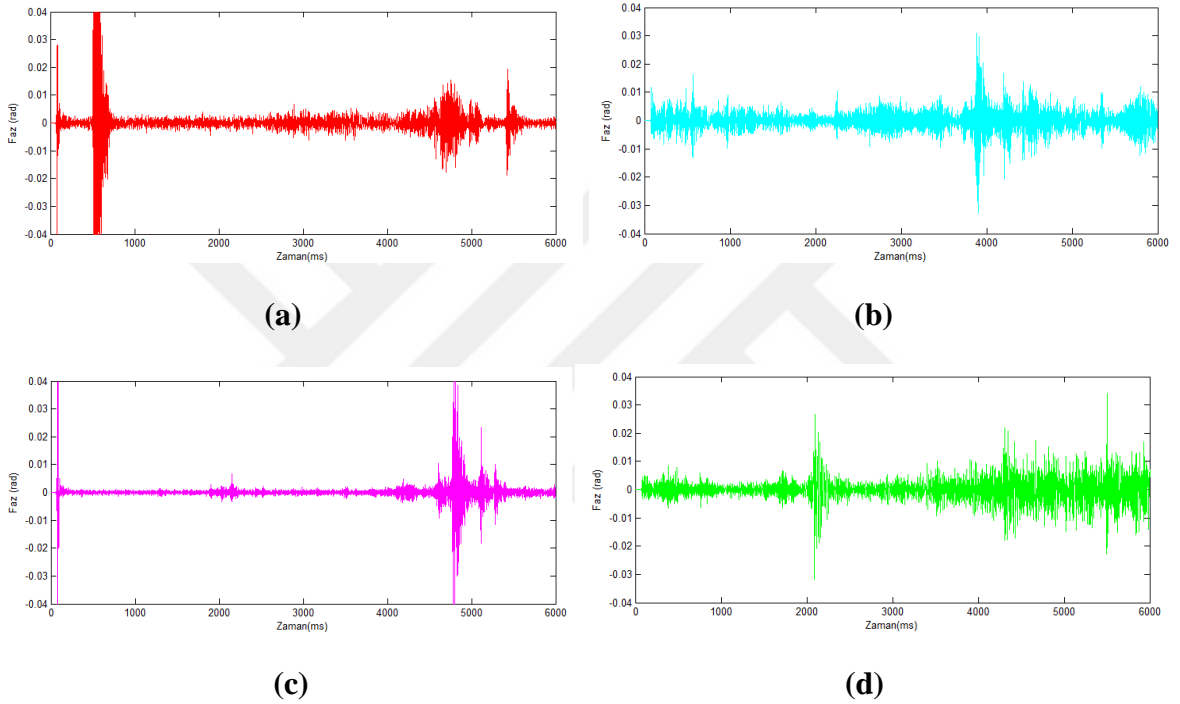
Tablo 1 Yapılan lazer mikrofon sistemleri ve SNR değerleri.

LAZER MİKROFON SİSTEMİ	SNR DEĞERİ (%)
Michelson İnterferometresini Temel Alan Lazer Mikrofon (Dalga Plakaları ile faz Kaydırma)	96,50
Mach-Zehnder İnterferometresini Temel Alan Lazer Mikrofon (Dalga Plakaları ile faz Kaydırma) Dalga Plakalarının Referans Kolda Olma Durumu	59,95
Mach-Zehnder İnterferometresini Temel Alan Lazer Mikrofon (Dalga Plakaları ile faz Kaydırma) Dalga Plakalarının kamera Önünde Olma Durumu	65,17
Michelson İnterferometresini Temel Alan Lazer Mikrofonda Fourier Dönüşümüne Dayalı SİA Uygulaması	80,93

SNR oranları göz önüne alındığında lazer mikrofon için en uygun interferometre Michelson interferometresi olmuştur. Çünkü Michelson interferometresi ile oluşturulan sistemin SNR değeri %96,50 olurken Mach-Zehnder interferometresi ile oluşturulan sistemin SNR değeri %65,17'ı geçememiştir. Ayrıca lazer mikrofonda uygulan Fourier Dönüşümüne dayalı SİA ile sistemler karşılaştırıldığında Michelson interferometresi ile oluşturulan sistemimiz bir yazılımsal sinyal işleme algoritmasına gerek kalmadan gürültüsüz esin elde edilebileceğini göstermektedir. Aynı zamanda Tablo 1'e göre 6000 adet girişim deseni alınan yazılımsal uygulama ile 24000 adet girişim deseni alınan lazer mikrofon sistemlerimiz karşılaştırıldığında Michelson interferometresi daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Mach-Zehnder interferometresinde uygulanan iki farklı yola göre ise kamera önüne yerleştirilen faz kaydırma plakalarından alınan sonuçlar daha iyi çıkmıştır. Sisteme verilen ses ile sistemden alınan ses grafikleri Şekil 5.23, Şekil ve 5.24'de gösterilmiştir.



Şekil 5.23 Referans Ses



Şekil 5.24 Lazer mikrofön sistemlerinden alınan ses dalgaları: a) Michelson İnterferometresini Temel Alan Lazer Mikrofön (Dalga Plakaları ile faz Kaydırma), b) Mach-Zehnder İnterferometresini Temel Alan Lazer Mikrofön (Dalga Plakaları ile faz Kaydırma) Dalga Plakalarının Referans Kolda Olma Durumu, c) Mach-Zehnder İnterferometresini Temel Alan Lazer Mikrofön (Dalga Plakaları ile faz Kaydırma Dalga Plakalarının kamera Önünde Olma Durumu, d) Lazer mikrofonda Fourier dönüşümüne dayalı SİA kullanılarak yeniden elde edilen ses dalgası (Faz-Zaman Grafiği= Zamansal Faz Dağılımı).



BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada lazer mikrofon oluşturmak için Michelson ve Mach–Zehnder interferometresi yapıları kullanılmıştır. SNR oranları göz önüne alındığında lazer mikrofon için en uygun interferometre Michelson interferometresi olmuştur. Çünkü Michelson interferometresi ile oluşturulan sistemin SNR değeri %96,50 olurken Mach–Zehnder interferometresi ile oluşturulan sistemin SNR değeri %65,17'ı geçememiştir. Fourier Dönüşümüne dayalı SIA ile sistemler karşılaştırıldığında Michelson interferometresi ile oluşturulan sistemimiz bir yazılımsal sinyal işleme algoritmasına gerek kalmadan gürültüsüz esin elde edilebileceğini göstermektedir. Böylece bu çalışma ile faz kaydına interferometresine dayalı yeni bir lazer mikrofon literatüre kazandırılmıştır. Sonuçta sistemin yazılım kısmında herhangi bir özel filtre içeren işaret işleme algoritması kullanmaksızın sesin gürültüsüz bir şekilde dinlenmesi, bu tezde amaçlanan faz kaydına interferometresine dayalı lazer mikrofon sistemi ile sağlanmıştır.

Yaptığımız lazer mikrofon sistemi mühendislik ölçüm sistemlerinin yanında askeri, sağlık ve sanayi alanlarında kullanılabilecek şekilde dizayn edilebilir. Askeri alanda casus mikrofon olarak kullanılabilmesinin yanında askeri haberleşme için de kullanılabilir. Sağlık ve tıp alanlarında kalp ve beyin sinir hücrelerinin titreşimlerini algılayarak bir takım hastalıkların teşhisi için kullanılabilecek şekilde dizayn edilebilir. Aynı zamanda sanayide bir elektrik makinasının titreşimi algılanarak hasar tespiti yapabilir.

Lazer mikrofon sistemimizin geliştirilmesi amacıyla ileride planlanan çalışmalar da mümkündür. Lazer mikrofon sistemlerimizde kırmızı lazer kullanılmıştır. Yaptığımız sistemi geliştirmek adına farklı dalga boylarına sahip lazerler kullanımı ve hangi dalgaboyunun daha iyi sonuç verdiği diğer bir araştırma konusu olabilir. Aynı zamanda 4 adımda alınan görüntüleri tek seferde alınması adımlar arası kaynaklanan zamanın kısalması için olumlu sonuç doğuracaktır.

Lazer mikrofon sistemimizin geliştirmek adına sisteme verşlen ses üzerinde de değişikliler yapmak mümkündür. Farklı ses türlerinde çalışmak veya sinyal jeneratörü kullanılarak belirli frekans aralıklarında çalışma yapmak mümkündür. Ayrıca farklı mekanlarda ses kaydı oluşturma lazer mikrofon sistemimizin güvenirliğini arttıracaktır.

Lazer mikrofon sistemimizin yazılımsal olarak geliştirmek için otonom bir sistem oluşturularak seçilen piksel üzerinde çalışmalar yapmak diğer bir araştırma konusu olabilir.

Tüm bu sonuçlar gösteriyor ki oluşturduğumuz lazer mikrofon sistemimiz geleceğe yönelik çalışmalar için bir kaynak oluşturmanın yanında literatüre kazandırılmış yeni bir çalışmadır.



KAYNAKLAR

- [1] **Glinsky A** (2005) *Theremin: Ether Music And Espionage (Music in American Life)*. 1st edition, ISBN : 978-0252072758, University of Illinois Press Publisher, New York, 480 pp.
- [2] **Kakue T, Yonesaka R, Tahara T, Awatsuji Y, Nishio K, Ura S, Kubota T and Matoba O** (2011) High-speed phase imaging by parallel phase-shifting digital holography. *Optic Letters*, 36 (21): 4131- 4133.
- [3] **Bertling K, Perchoux J, Taimre T, Malkin R, Robert D, Rakic A D and Bosch T** (2014) Imaging of acoustic fields using optical feedback interferometry. *Optic Express*, 22 (24): 30346 - 30356.
- [4] **Matoba O, Inokuchi H, Nitta K and Awatsuji Y** (2014) Optical voice recorder by off-axis digital holography. *Optic Letters*, 39 (22): 6549-6552.
- [5] **Koukoulas T and Piper B** (2015) Towards direct realisation of the SI unit of sound pressure in the audible hearing range based on optical free-field acoustic particle measurements. *Applied Physics Letters*, 106 (16): 164101-164101.
- [6] **Awatsuji Y, Fujii A, Kubota T and Matoba O** (2006) Parallel three-step phase-shifting digital holography. *Applied Optics*, 45 (13): 2995-3002.
- [7] **Nakazono Y, Sonoda Y, Ouchi Y and Nasu Y** (2008) Near-field acoustic characteristics of screech jet exhausted from a nozzle with a hard reflecting plate. *Journal of Visualization*, 11 (2): 153–162.
- [8] **Ishikawa K, Yatabe K, Chitanont N, Ikeda Y, Oikawa Y, Onuma T, Niwa H and Yoshii M** (2016) High-speed imaging of sound using parallel phase-shifting interferometry. *Optics Express* 24 (12): 12922-12932.
- [9] **Ishikawa K, Yatabe K, Ikeda Y, Oikawa Y, Onuma T, Niwa H and Yoshii M** (2017) Interferometric imaging of acoustical phenomena using high-speed polarization camera and 4-step parallel phase-shifting technique. *31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics*, 20 February 2017, Osaka, Japan, 7 pp.
- [10] **Ishikawa K, Tanigawa R, Yatabe K, Oikawa Y, Onuma T and Niwa H** (2018) Simultaneous imaging of flow and sound using high-speed parallel phase-shifting interferometry. *Optics Letters*, 43(5):991-994.
- [11] **Hecht E** (2017) *Optics*. Fifth edition, ISBN:9780133977226, Pearson Education Publisher, London, 720 pp.
- [12] **Jenkins F A and White H E** (2011) *Fundamentals of Optics*. Fourth edition, ISBN: 9781259002298, McGraw-Hill Higher Education Publisher , New York, 768 pp.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [13] **Iizuka K** (2008) *Engineering Optics*. Third edition, ISBN: 978-0-387-75723-0, Springer Publisher, New York, 540 pp.
- [14] **Optics**. (t.y.) *Physics*. Adres: <http://www.physics.ucc.ie/mvaughan/lecturing/PY3101/Optics.pdf>.
- [15] **Yatabe K, Ishikawa K, Tanigawa R and Oikawa** (2019) Optical Sound Measurement. *Fundamentals Review* 12 (4): 259-268.
- [16] **Saleh B E A and Teich M C** (2019) Acousto-optics. *Fundamentals of Photonics 2*. volume set, Wiley Inc Publisher, ISBN : 9781119506874, 1520 pp.
- [17] **Saraç Z, Birkök H G, Taşkn H, Öztürk E** (2011) Evaluation of thermal lens fringes using Hilbert and Fourier transform methods. *IET Science Measurement & Technology*, 5(3): 81 - 87.
- [18] **Yasuda K, Takagi R, Ishii K, Fujita K, Shirai H and Tsuboi A** (2019) High-Speed Imaging of a Laser Ablation Process Using Parallel Phase-Shifting Interferometry. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 14 (3): 1955-1, 431-1202.
- [19] **Albertazzi Jr A , Viotti M R, Silva F, Veiga C L, Barrera E S, Benedet M , Fantin A V, Willemann D P** (2018) Speckle Interferometry in harsh environments: design considerations and successful examples. *Optical Micro- and Nanometrology VII*, 24 May 2018, Strasbourg, France, 14 pp.
- [20] **Awatsuji Y, Sasada M and Kubota T** (2004) Parallel quasi-phase-shifting digital holography. *Applied Physics Letters*, 85(6):1069-1071
- [21] **Fabian C M and Ortega U R** (2012) Phase-Shifting Interferometry by wave Amplitude Modulation. *Optics Letters*, 36 (13) :2417-2419

ÖZGEÇMİŞ

13 Şubat 1994 tarihinde Zonguldak ilinde doğdum. İlköğretim ve lise eğitimimi Rize' de tamamladım. 2012 yılında lisans eğitimine Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde başladım ve 2016 yılında mezun oldum. Lisans eğitimim boyunca kendimi sürekli geliştirme çabası içerisinde oldum. Uluslararası bir sertifika programına katılarak yenilenebilir enerji kaynakları konusunda kendimi geliştirdim. Kendimi akademik anlamda geliştirebilmek ve lisans eğitiminde aldığım bilgi ile tecrübeleri bir adım öteye taşıyabilmek için Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik- Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'na 2018 yılında başladım. Yüksek lisans eğitimimi 2020 yılında 4.00/4.00 ortalama ile bitirdim. Lisans eğitiminde ve yüksek lisans eğitiminde aldığım bilgi ve tecrübeleri daha da geliştirmek için doktora programlarına başvurmak hedeflediğim kariyer planlarından birisi olmaktadır.

İLETİŞİM BİLGİLERİ:

E posta: emre.turannn61@gmail.com