

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**UÇUŞ ZAMANI METODUNA DAYALI DARBE LAZERLİ
2-BOYUTLU LAZER ALAN TARAYICISI**

**Hazırlayan
Hüseyin TOPÇUOĞLU**

**Danışman
Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN**

Yüksek Lisans Tezi

**Haziran 2019
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

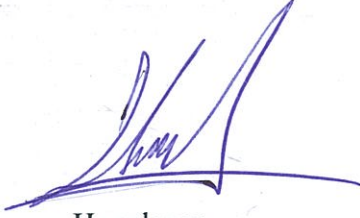
Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı : Hüseyin TOPÇUOĞLU

İmza :



Uçuş Zamanı Metoduna Dayalı Darbe Lazerli 2-Boyutlu Lazer Alan Tarayıcısı adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.



Hazırlayan

Hüseyin TOPÇUOĞLU



Danışman

Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN



Prof. Dr. Necmi TAŞPINAR

Elektrik – Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN danışmanlığında **Hüseyin TOPçUOğLU** tarafından hazırlanan “**Uçuş zamanı metoduna dayalı darbe lazerli 2 boyutlu lazer alan tarayıcısı**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

17/6/2019

JÜRİ:

Danışman : Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

ye : Doç. Dr. Enis GÜNAY

ye : Dr. Öęr. Üyesi Mehmet BİLİM

(Handwritten signatures of the jury members)

ONAY:

Bu tezin kabul Enstitü Yönetim Kurulunun 23/07/2019 tarih ve 2019/42-28 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

(Handwritten signature of Prof. Dr. Mehmet AKKURT)

 23/07/2019

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**UÇUŞ ZAMANI METODUNA DAYALI DARBE LAZERLİ
2-BOYUTLU LAZER ALAN TARAYICISI
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Hüseyin TOPÇUOĞLU**

**Danışman
Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN**

**Haziran 2019
KAYSERİ**

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Başta tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, bilgi, tecrübe ve mesaisini benim için cömertçe harcayan, dünyaya daha geniş bir pencereden bakma becerisi kazandıran ve isabetli öngörülerini ile her zaman yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mustafa Türkmen'e teşekkür ederim.

Özellikle de, aralıksız devam eden yoğun araştırma süreçlerinde beni destekleyen, benden güler yüzünü hiçbir zaman eksik etmeyen, beni birçok konuda yüreklendirip hedeflerimi büyüten ve her zaman yanımda olan, aileme çok teşekkür ederim.

Hüseyin TOPÇUOĞLU
Kayseri, Haziran 2019

UÇUŞ ZAMANI METODUNA DAYALI DARBE LAZERLİ 2-BOYUTLU LAZER ALAN TARAYICI

Hüseyin TOPÇUOĞLU

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2019
Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN

KISA ÖZET

Lazer alan tarama cihazları oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Bu cihazlar lazer darbeleri kullanılarak bir nesne veya yüzeyin cihaza olan uzaklığını ölçmeye yarayan teknolojik aygıtlardır. Radar teknolojisiyle benzer bir teknolojiye sahiptir ancak radarlarda kullanılan radyo dalgaları yerine ışık, yani lazer darbeleri kullanırlar. Uzaklığı ölçülecek nesne ya da yüzeye gönderilen lazer darbesinin gönderiliş zamanı ile nesneye çarpıp gelen yansımanın tekrar kaynağa ulaşma vakti arasındaki farkı kullanarak uzaklık ölçen cihazlardır.

Tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, yeni nesil mesafe ölçüm sistemleri ve bu sistemlerde kullanılabilen yöntemlerin belirlenmesi amacıyla yapılan literatür çalışmasına yer verilmiştir. İkinci bölümde, mesafe tayini uygulamalarında kullanılan yöntemlerden biri olan uçuş zamanı (TOF) yönteminin özelliklerinden ve uygulama tekniklerinden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, darbeli bir TOF lazer mesafe ölçerin yapısı ve hata kaynakları hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde tez konusu çalışma ile ilgili teknik ayrıntı detaylı inceleme ve bu çalışmaya ait çıktılar hakkında bilgiler verilecektir. Beşinci bölümde ise tartışma, sonuç ve öneriler yer almaktadır.

Anahtar Kelimeler: Lazer alan tarama cihazı, Işık algılama ve mesafe tayini, LIDAR (Lazerli görüntü algılama ve mesafe tayini), Lazer güvenlik sensörleri

2-DIMENSIONAL LASER FIELD SCANNER WITH PULSE LASER BASED ON FLIGHT TIME METHOD

Hüseyin TOPÇUOĞLU

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M. Sc. Thesis, July 2019

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa TÜRKMEN

ABSTRACT

Laser field scanning devices have a wide range of applications. These devices are technological devices for measuring the distance of an object or surface to the device by using laser pulses. It has a similar technology to radar technology, but instead of radio waves used in radar, they use light, that is, laser pulses. They are devices that measure distance using the difference between the time of delivery of the laser pulse sent to the object or surface to be measured and the time at which the reflection of the object hits the object and reach the source. The thesis consists of five chapters. In the first chapter, a literature study is carried out to determine the new generation distance measurement systems and the methods that can be used in these systems. In the second part, flight time (TOF) method, which is one of the methods used in distance determination applications, is mentioned. In the third section, the structure of a pulsed TOF laser distance meter and the sources of error are given. In the fourth section, detailed technical details about the thesis subject and the results of this study will be given. In the fifth chapter, there are discussions, conclusions and suggestions.

Keywords: Laser area scanning device, Light detection and distance determination, LIDAR, (Laser imaging detection and ranging: Laser image detection and distance determination), Laser Safety Sensors.

İÇİNDEKİLER

UÇUŞ ZAMANI METODUNA DAYALI DARBE LAZERLİ 2-BOYUTLU LAZER ALAN TARAYICISI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY SAYFASI	iv
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR	v
KISA ÖZET	vi
ABSTRACTS	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
Giriş.....	1
Mesafe Ölçüm Sistemleri.....	1
G.1.Yeni Nesil Mesafe Ölçüm Sistemleri.....	1
G.2.Literatür Taraması.....	2
G.3.Tezin Amacı	2

1.BÖLÜM

MESAFE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ VE UYGULAMALARI

1.1.Giriş	3
1.2.Akustik Ve Rf Mesafe Ölçüm Yöntemleri	3
1.3.Optik Mesafe Ölçüm Yöntemleri.....	4
1.3.1.Yöntemlerin Sınıflandırılması	4

2.BÖLÜM

UÇUŞ ZAMANI (TOF) YÖNTEMİ

2.1 Giriş	7
2.2. Uçuş Zamanı (Tof) Metoduna Dayalı Darbe Lazerli Mesafe Bulucuların Performans Gereksinimleri Ve Uygulamaları.....	9
2.3 Tof Lazer Mesafe Bulucuların 3b Görüntü Uygulamaları	10
2.4 Tof Lazer Mesafe Bulucularda Kısa Darbelerin Avantajları.....	11

3.BÖLÜM

DARBELİ BİR TOF LAZER MESAFE ÖLÇERİN YAPISI VE HATA KAYNAKLARI

3.1 Tof Lazer Mesafe Ölçerin Yapısı.....	12
3.2 Performans Parametrelerinin Tanımları.....	13
3.3 Hata Kaynakları Ve Performansın Sınırlayıcı Faktörleri	15
3.4 Darbeli Lazer Üretici (Verici)	17
3.4.1 Genel Yapı	17
3.4.2 Yüksek Hızlı Lazer Darbe Üretimi İçin Alternatif Yollar	19
3.5 Alıcı.....	21
3.5.1 Gerekli Özellikler Ve Alıcılar İçin Alternatifler	21
3.5.2 Fotodiyotların Özellikleri	23

4.BÖLÜM

ÇALIŞMA KONUSU TOF MESAFE ÖLÇER TASARIMI

4.1 Çalışmaya Özgü Elektronik Kart Tasarımları	27
4.1.1.Alıcı Kanal Tasarımı.....	27
4.1.2.Verici Kanal Tasarımı	28
4.1.3. Zaman Ölçme Elektroniği	30
4.2.Tasarımda Kullanılan Elektronik Malzemeler	32

5.BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1.Tartışma-Sonuç Ve Öneriler	33
Kaynakça	35
Özgeçmiş	42

KISALTMALAR VE SİMGELER

RF	Radyo Frekans
LIDAR	Işık Algılama Ve Mesafe Ölçme
LADAR	Lazerli Algılama Ve Mesafe Ölçümü
CCD	Yüklenme İliştirilmiş Araç
CMOS	Bütünleyici Metal Oksit Yarıiletken
TOF	Uçuş Zamanı
IF	Orta Frekans
S/N	Sinyal – Gürültü Oranı
TDC	Zaman-Dijital Çevirici
TAC	Zaman-Analog Çevirici
CW	Sürekli Dalga
RMS	Kök Ortalama Değer
FWHM	Maksimum Yarıısı Tam Genişlik
PIN	P-I-N Yapıya Sahip Foto-diyot
APD	Avalanş Foto-diyot
MSM	Metal Yarıiletken Metal

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. 2 Optik Mesafe Ölçüm Yöntemleri	6
Tablo 2. 1 TOF Lazer Mesafe Bulucular	8
Tablo 5. 2 Deneysel Ölçüm sonuçları	33



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3. 1 TOF lazer mesafe bulucunun yapısı	13
Şekil 4. 1 Alıcı Kanal Tasarımı.....	27
Şekil 4. 2 Alıcı-Verici Kanalda Kullanılan Optik Lensler	29
Şekil 4. 3 Alıcı Kanal Tasarımı.....	29
Şekil 4. 4 Zaman Ölçer Devre Tasarımı.....	30
Şekil 4. 5 Verici-Alıcı sinyalleri	31
Şekil 4. 6 Elektronik Kartın Son hali	31

GİRİŞ

MESAFE ÖLÇÜM SİSTEMLERİ

G.1. Yeni Nesil Mesafe Ölçüm Sistemleri

Yeni nesil mesafe ölçüm teknikleri, robotikte konum-koordinat belirleme ve haritalamada, otomasyonda ve her türlü alan güvenliğini sağlayan sistemlerde, otomotivde montaj hatlarında, havacılıkta uçakların yer yüzeyine olan uçuş yüksekliğinin belirlenmesinde, otoyollarda trafik yoğunluğunun ölçümünde kullanıldığı gibi endüstriyel ve askeri alanlarda farklı birçok uygulama alanına sahiptirler. Mesafe ölçümü ile yapılan görüntü uygulamaları robotik sistemlerin çevreyi algılamasını sağlamaktadır.

Uçuş zamanı metoduna dayalı darbe lazerli mesafe ölçümü hedefe gönderilen lazer darbelerinin gidiş dönüş süreleri kullanılarak yapılır. Uçuş zamanına dayalı lazer mesafe ölçüm sistemlerinin ortak yapısında bir yarıiletken lazer, bir veya iki alıcı kanalı, darbe lazer sürücü ve zaman ölçme ünitesi bulunur. Optik sistemlere ve birkaç çeşit sinyal kontrol yöntemine de ihtiyaç duyulur.

Elektronik tasarımın performansının iyi olması gerekir. Eğer ölçüm hava ortamında yapılıyorsa zamandaki 6.7ps'lik bir sapma, ölçüm sonucunda 1mm'lik hataya neden olur. Oldukça kısa zaman aralıklarını kesin ve tekrarlayan bir şekilde ölçmek için yüksek bant genişlikli ve düşük gürültülü bir elektronik yapıya sahip olunması gerekir. Çünkü ölçüm doğruluğu, oldukça dar olan darbelerin yükselme süreleri ile bire bir bağlantılıdır. Doğrusallık, kararlılık ve yürüme hatası, lazer mesafe ölçüm cihazlarının performansını tanımlayan diğer parametrelerdir. Yürüme hatası, ölçüm sonucunun darbe genliğine bağlı olarak değişmesidir ve bu durum genelde hedeften dönen darbeyi algılamada kullanılan karşılaştırmacı devrenin sınırlı bant genişliğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Yürüme hatası, yükselme zamanı iyi olan elektronik elemanlar

kullanılarak düşürülebilir. İyi bir ölçüm sisteminde, hedefe gönderilen lazer darbeleri kısa ve güçlü olmalıdır ayrıca alıcı kanalı yeterli bant genişliğine sahip olmalıdır.

G.2 Literatür Taraması

Dünya çapında birçok araştırmacı lazer mesafe ölçüm yöntemleri üzerine birçok araştırma yapmıştır. Lazer mesafe bulucularla ilgili ilk çalışmalar 80’lerde pozitron ömrü ölçümleri ile başlamıştır (25). Lazer mesafe bulucuların ilk örnekleri kağıt kalınlık ölçümleri (26), gemi bloklarının şekil ölçümleri (17), metal ergiticilerin giydirmeye muayeneleri (10), inşaat beton ölçümleri ve 3D lazer mesafe uygulamalarıdır(27). Analog interpolatör kullanılarak dijital zaman ölçümü, zaman ölçme çalışmalarının yapıtaşı olmuştur(28).

G.3. Tezin Amacı

Tezin amacı, endüstriyel ve askeri alanda kullanılabilecek lazer mesafe ölçerli bir alan tarama cihazı geliştirmektir. Bu amaçla ilk olarak elektronik kart tasarımları daha sonra mikro-işlemci yazılımları ve optik tasarım yapılmıştır.

1. BÖLÜM

MESAFE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ VE UYGULAMALARI

1.1. Giriş

Temassız mesafe ölçüm işlemleri akustik olarak ultrasonik ses dalgalarıyla, RF olarak elektromanyetik dalgalarla ve optik olarak ise ışık ile gerçekleştirilmektedir. Tüm yöntemlerde mesafe hesaplamaları hedefe bir sinyal gönderilip hedeften geri yansıyan sinyalin özellikleri kullanılarak yapılmaktadır. RF dalgalar ve optik metotlar kullanan mesafe ölçüm cihazları (1) de karşılaştırılmıştır. Her iki teknikteki ortak durum, ölçüm çözünürlüğünün dalga boyuna bağlı olmasıdır. Dalga boyu düştükçe hedefe gönderilen ışının diverjansı düşmektedir. Yatay ve düşey uzunluklarda çözünürlüğün yüksek olması istenilen durumlarda en iyi yöntem optik yöntemlerdir. Mesafe ölçümünde en yüksek doğruluk optik yöntemlerle sağlandığından, hedeften görüntü alma işlemine en uygun yöntemler optik yöntemlerdir.

1.2. Akustik ve RF Mesafe Ölçüm Yöntemleri

Ses dalgaları kullanılarak yapılan mesafe ölçüm yöntemleri 20kHz ile birkaç MHz aralığındaki ultrasonik frekansları kullanır. Ultrasonik yöntemlerin avantajları düşük frekansta çalışmaları ve bu frekanslarda çalışmalarının sağladığı ucuz ve uygulanabilirliği yüksek elektronik devre yapılarıdır. Ayrıca ultrasonik yöntemler, optik yöntemlerin zorlandığı metal, ayna ve cam gibi yüzeylerden daha kolay ölçüm alabilmektedirler. Ana dezavantajı ise dalga diverjansının çok yüksek olmasıdır. Bunun yanında yavaşlık, birden çok yansıma ve uzun mesafelerde yüksek zayıflama da dezavantajlarındandır. Açık ve mesafe çözünürlüğü birden çok alıcı sensör ve işaretleme yöntemleri ile geliştirilebilir (2). Ayrıca dalga boyunun düşük olması kısa mesafe ölçümlerde bir avantaj haline dönüştürülebilir.

Elektromanyetik RF dalgaları 1930'lerden bu yana geleneksel radarlarda askeri ve uzay uygulamalarında her türlü malzemedan mesafe bilgisi almak için kullanılmıştır. Radarlar 10 MHz ile 100GHz frekans aralığını kullanmaktadırlar. En çok kullanılan frekanslar mikrodalga frekansları olan 1-10 GHz aralığındadır. Açı ve mesafe ölçüm çözünürlüğü genellikle optik yöntemlere göre daha kötüdür. Açısal diverjansı mikrodalgalarda 1 ila 10 derece, milimetrik dalgalarda ise yaklaşık 1 derecedir (1). Yüksek darbe gücü ve uzun ölçüm menzili, dumanlı ve tozlu ortamlarda dahi RF radarlarla başarıyla gerçekleştirilebilir. Örneğin hız tespiti için kullanılan polis radarları bir kilometrelik bir menzile sahiptir fakat diverjansı yüksektir (3).

1.3. Optik Mesafe Ölçüm Yöntemleri

1.3.1. Yöntemlerin Sınıflandırılması

Optik mesafe ölçüm cihazları LADAR veya LIDAR duruma göre lazer mesafe bulucu olarak adlandırılır.

Optik mesafe ölçüm yöntemleri birçok yoldan sınıflandırılabilir. Bunlardan biri aktif ve pasif yöntemlerdir. Pasif yöntemler kendi içinde bir ışık kaynağına ihtiyaç duymazlar ve mesafe bilgisine ulaşmak için hedeften yansıyan ortam ışığını kullanırlar. Aktif yöntemler ise hedefi aydınlatmak için kendi içlerinde bir ışık kaynağına sahiptirler. İnterferometrik, geometrik ve uçuş zamanı en önemli aktif yöntemlerdir (4). Diğer bir sınıflandırma şekli, yöntemleri görüntü tabanlı ve direkt olmak üzere ikiye ayırır. Direkt yöntemler hedefteki bir noktadan kesin mesafeyi verir. Görüntü tabanlı yöntemlerde mesafe, hedefin farklı parçalarının birbirlerine göre konumları veya şekillere dayanan birkaç algoritmaya dayalı olarak hesaplanır. Üçüncü sınıflandırma şekli, yöntemleri tek gözlü ve çoklu görünüm ölçüm yöntemleri olarak ikiye ayırır (5).

Pasif tek gözlü yöntemler, genellikle ton farkı, doku, hareket ve odaklamayı kullanarak, CCD kameradan veya bir CMOS görüntü sensöründen elde edilen şekillere dayanarak hesaplama yaparlar. Bu yöntemlerin ortak sorunu aydınlanmadaki ufak farklılıklar ve hedefin yansıma katsayısıdır. Çoklu görünüm yöntemleri de kendi içinde triangulation ve üç boyutlu görünüm yöntemi olmak üzere ikiye ayrılır. Triangulation yöntemi en

yaygın mesafe ölçüm yöntemidir çünkü yapıları basit ve zorlu endüstriyel ortamlara uyum sağlar (7). Pasif triangulation yönteminde ölçüm işlemi iki alıcı ve hedef arasında ki açının ölçülmesidir. Alıcılar arasındaki mesafe arttıkça hassasiyet artmakta fakat bu durumda hedef üzerindeki bazı noktaların ölçümü, hedefe giden yoldaki bazı cisimlerin engeline takılma ihtimali de artmaktadır. Pasif yöntemlerin avantajları güvenli ve basit yapıda olmalarıdır. Tek boyutlu bir CCD veya CMOS foto-diyot matrisi veya ışığa duyarlı bir sensör matrisi, pasif triangulation yönteminde alıcı kanal yapısı için yeterlidir.

Üç boyutlu görünüme dayanan aktif çoklu görünüm yöntemlerinde hedefin yapay olarak aydınlatılması, mesafe hesaplama işlemini oldukça kolaylaştırmaktadır. Yapay aydınlatma işlemi şerit, ızgara veya daha farklı modellerdeki lazer ışınları ile gerçekleştirilir (5). Lazer kullanımının avantajı lazer ışınının küçük ıraksama ve küçük nokta boyutlu olmasıdır. Fakat yüksek tutarlılık bazı durumlarda istenmeyen girişim modelleri oluşturmaktadır. Aydınlatılmış noktalar fiber ızgaralar ile de gerçekleştirilebilmektedir (6). Bu yöntemde 3 metrelik bir mesafede ölçüm sonucu tek bir nokta için 50 μ m'lik bir doğruluğa ulaşabilmektedir (7).

Tek gözlü aktif direkt yöntemler interferometrik ve uçuş zamanı (TOF) yöntemleridir. Ayrıca gölgeleme, doku, hareket veya odaklama ile elde edilen şekilleri kullanan yöntemler eğer hedefin aydınlatılması için bir lazer ışını kullanıyorsa bu yöntemlerde aktif yöntem olarak değerlendirilebilir.

Tek gözlü 3-boyutlu görüntü sensörleri genellikle tarayıcı uçuş zamanına (TOF) dayalı lazer mesafe bulucuları kullanırlar. Tarama işlemi, galvonometreler, step motorlar (8) veya yansıma katsayısı üzerine gönderilen ses dalgaları sayesinde değişen piezoelektrik kristallerin kullanıldığı akutso-optik kristaller kullanılarak döndürülen aynalar ile gerçekleştirilir. Gavonometrelerdeki aç bir kapasitif sensör yardımı ile ölçülebilir. Uçuş zamanı metodu verici ve alıcının bulunduğu iki farklı optik eksene sahip olabilir. Fakat bu eksenlerin birbirlerine çok yakın olması bu yöntemin tek gözlü olarak sınıflandırılmasını sağlamaktadır.

Tablo 1.2 de optik mesafe ölçüm yöntemleri sınıflandırılmıştır.

Tablo 1. 1 Optik Mesafe Ölçüm Yöntemleri

	Pasif, direkt	Pasif, görüntü tabanlı	Aktif, direkt	Aktif, görüntü tabanlı
Tek Gözlü		Gölge	İnterferometrik	Aydınlatma ile şekil elde etme
		Doku		
		Hareket		
		Odaklama	Uçuş Zamanı	
Çoklu Görünüm	Pasif triangulation		Aktif triangulation	

Optik yöntemler kullanıldığında hedefler de aktif veya pasif olarak sınıflandırılabilir. Pasif yöntemlerde hedef çok çeşitli yansıma katsayılarına sahip olabilir. Yansıma ayna gibi Lambertian (tüm yönlerde eşit parlaklık) yüzeylerde bile ölçüm açısına bağlı olarak değişebilir. Hedef üzerine bir reflektör konulduğunda hedef aktif olacaktır.

Sonraki bölümde uçuş zamanı (TOF) metodu, uygulamaları ile birlikte ayrıntılı bir şekilde incelenecektir.

2.BÖLÜM

UÇUŞ ZAMANI (TOF) YÖNTEMİ

2.1 Giriş

Uçuş zamanı metodunun en önemli iki avantajı alıcı ve verici ışınlarının eş eksenli olması ve ölçüm doğruluğunun mesafeye göre değişmemesidir (9). Uçuş zamanı metoduna dayalı lazer mesafe bulucularda duruma göre darbe, genlik veya frekans modülasyonu kullanılır. Darbe modülasyonu metodunda hedeften yansıyan darbenin uçuş zamanı ölçülür (10). Genlik modülasyonunda yayılan ve yansıyan sinüs modülasyonlu ışınlar arası faz farkı ölçülür (11). Frekans modülasyonunda sinyal frekansı belirli birkaç frekans aralığını süpürür. Karma frekans tekniği kullanılarak hedefin uzaklığına bağlı olan ara bir frekans üretilir. Darbe ve genlik modülasyonu en çok kullanılan yöntemlerdir. Ortalama çıkış güçleri eşit olduğunda darbe modülasyonunun genlik modülasyonuna göre daha hassas olduğu (12)'de hesaplamaları ile birlikte gösterilmiştir. Genlik modülasyonunda ölçülen maksimum uzaklık sadece dalga boyunun yarısı kadardır. Eğer daha uzak mesafeler ölçülecekse, birden çok modülasyon frekansı kullanılması gerekir. Yüksek modülasyon frekanslarında daha yüksek çözünürlük elde edilebilir fakat ölçüm menzili kısadır. Örneğin (13) 'de üç farklı modülasyon frekansı kullanan bir genlik modülasyonlu lazer mesafe bulucu incelenmiştir. +/- 6mm'lik bir hassaslık 1km'lik bir mesafede 9 saniyelik ortalama zaman ile başarılmıştır. Kısa mesafelerde (0-7m) ve düşük lazer çıkış gücünde 2mW 3mm'lik bir doğruluk 10us'lik ortalama zaman ile başarılmıştır.

TOF metodunda alıcı kanalda direkt veya uyumlu algılama yöntemleri kullanılabilir. Direkt algılamada alıcıdaki sinyalin gücü zamanın fonksiyonu olarak ölçülür. Uyumlu algılamanın bir avantajı ise sadece mesafeyi değil aynı zamanda hızı da algılayabilmesidir. Çünkü bu yöntemde faz bilgisi de elde edilmektedir. Doppler frekansı kullanılarak hız bilgisi hesaplanabilir (14). Uyumlu algılamadaki iki alternatif

heterodyne ve homodyne yöntemlerdir. Heterodyne yöntemlerde hedeften dönen sinyal ile yerel osilatördeki sinyaller optik olarak toplanır. Yerel osilatör lazeri en iyi S/N oranını yakalaması için kısa süreli ve lokal olarak verici lazer ile uyumlu olmalıdır. Alıcı fotodiyotu bir alçak geçiren filtre gibi çalışır ve alınan sinyal ile yerel osilatör sinyalinin frekansları farkına eşit olan hedef bilgisi frekansı dışındakileri filtreler. IF' den alınan sinyali orijinal ana banda taşımak için elektriksel bir demodülatöre ihtiyaç vardır. Hedefin uzaklığı, seçilen modülasyon türüne göre, IF sinyalinin faz, genlik ve frekansına bağlı olarak hesaplanır. Yerel osilatör gücünün yüksek seçilebilmesi sayesinde uyumlu algılama ile direkt algılamaya göre daha hassas sonuçlar elde edilebilir. Bu durumda baskın olan gürültü kaynağı sinyalin vurma gürültüsüdür. Homodyne yöntemde lazer ışını ikiye bölünür bunlardan biri hedefe gönderilir diğeri ise yerel osilatör görevi yapar. Bu durumda sinyal orijinal frekansında ana bantta gönderilir.

Uçuş zamanı (TOF) metoduna dayalı lazer mesafe bulucular Tablo 2.1 de gösterilmiştir. Darbe ve genlik modülasyonu kullanılmıştır. Tablo 2.1 de ki tüm mesafe bulucular direkt algılama yöntemleri kullanmışlardır. Sinüs modülasyonu kullanan cihazların yavaş fakat daha doğru sonuçlar verdiği görülmektedir. Darbe lazerli yöntemlerin ise daha uzun menzil ve kısa ölçüm zamanı için kullanıldığı görülmektedir.

Tablo 2. 1. TOF Lazer Mesafe Bulucular

Cihaz	Modülasyon Tipi	Ölçüm Menzili	Ölçüm Doğruluğu	Ölçüm Zamanı
LaserTech Impulse 100LR	Darbe (900 nm)	0 - 575 m	50 m de 3 cm, beyaz hedef	0.3- 0.7 s
Riegl FG21-HA	Darbe (904 nm)	2 - 600 m	+/- 5 cm	0.1- 1 s
Riegl LD90-3100VHS	Darbe	2 - 200m	+/- 2.5 cm	0.5 ms
Laser Optronix LDM500 MIL	Darbe	0 - 999 m	+/- 1 m	-
Leica DISTO pro	Sinüs dalgası	0.3 – 100 m	+/- 3 mm	0.5 – 4 s
LaserOptronix PH30	Sinüs dalgası	0 – 30 m	+/- 5 mm	-

2.2. Uçuş Zamanı (TOF) Metoduna Dayalı Darbe Lazerli Mesafe Bulucuların Performans Gereksinimleri ve Uygulamaları

TOF darbe lazerli mesafe bulucuların çeşitli uygulamaları (15)'de gösterilmektedir. Uygulamalar trafik güvenliği, endüstriyel, kesit çıkarma, yükseklik ölçme ve haritalama olarak sınıflandırılmıştır. Bu uygulamalarda pasif hedeften alınan uzaklık 0 ile kilometreler arasında çok çeşitli değerler almaktadır ve doğruluk santimetreler ile birkaç on santimetre arasında değişmektedir. Haritalama ve yer belirlemede hedefin gerçek pozisyonu istenmektedir ve hassas robot uygulamalarında milimetrenin altında bir doğruluk istenebilmektedir. Diğer yandan güvenlik sistemlerinde ve uzun mesafelerde istenilen doğruluk birkaç santimetre ve askeri askeri uygulamalarda birkaç metre dahi olabilmektedir. Robotların gerçek zamanlı kontrolünde, endüstriyel işlemlerde ve üç boyutlu modellemede yüksek ölçüm hızına ihtiyaç vardır.

1960lardaki ilk uygulama yükseklik ölçümüydü bazen uzun mesafelerde genellikle uyduların ve Ay'ın uzaklıklarının ölçümüydü. Ay yüzeyindeki bir astronotun konumunu birkaç yüz metrelik bir mesafede belirlemede bir lazer mesafe bulucu kullanılmıştır. Diğer koordinatlar dört unsurlu bir hareket algılayıcı sensörle ölçülmüştür.

En popüler lazer mesafe bulucu uygulamalarından biri, hedef bulucu profilini tanımlamak ve onu telemetre altından geçen bir araba gibi tanımlamak olmuştur. Ayrıca yeraltı mağaralarının şekil, hacim ve tünel ya da yerüstü metal yığınları ölçümü profillemeye uygulamasından biridir. Toprak yüksekliğindeki yükseklik farkları, yarı iletken veya Nd: YAG-lazerleri kullanılarak uçaklardan ölçülmüştür. Bir lazer çalışması 526 nm dalga genişliği Kuzey Denizi 'nin dibindeki petrol kuyusu alanlarının profil ölçümü için kullanıldı. Bir lazer mesafe bulucu ölçüm için 5-10 m mesafe aralığında ± 3 cm ve 10 ms zaman ölçüm kesinliğiyle metal yüzey ve ahşap profil ölçümünde kullanıldı. Bir anlamda, bir tür profillemeye uygulaması da 20 μ m ileri geri hareketini ayırt edebilen bir kağıt çarpma ölçerdir.

Endüstriyel uygulamaların bazı örnekleri, gemi ve vinçlerin konumlandırılması, depolanan sıvıların ve katı malzemelerin miktarının ölçülmesi, yakınlık sensörleri,

makine araçların konumlandırılması ve taşıma bantlarının gerginliğinin ölçülmesidir. Özel bir uygulama erimiş çeliğin seviyesi ölçümüdür.

Bazı askeri uygulamalar, uçan bir uçağa olan mesafeyi özel bir lazer mesafe bulucu veya genel amaçlı, dürbün şeklindeki, 10 metreden 10 kilometreye kadar ölçüm yapabilen lazer mesafe bulucu kullanarak ölçmektedir.

Lazer mesafe bulucu cihazlarının emniyet uygulamaları, anti çarpışma uyarı radarlarıdır. Lazer menzil bulucular, trafik kontrolünde ve otomatik olarak hareket eden araçların emniyet kontrolünde de kullanılabilir.

2.3 TOF Lazer Mesafe Bulucuların 3B Görüntü Uygulamaları

3B görüntüde TOF metodu diğer optik metotlarla karşılaştırıldığında birçok avantaj sağlar. Ölçüm sonucu yatay ve dikey yönlerin her ikisinde de kesin ve doğrudur çünkü ölçüm ışını dardır ve faaliyet alanında ki başka bir nesnenin arkasına gizlenme tehlikesi yoktur.

3B görüntünün endüstriyel uygulama örnekleri, bir şeyleri toplamak, bir hareketli hedefi takip etmek, karmaşık montaj, vidaların sıkılması, bir robot konumunun kalibresi ve PCB montajlamada parçaları doğrulama ve yerleştirmektir.

3B görüntü sağlayan sensörler mesafe aralığına göre kısa menzilli sensörler (10m den az) ve uzun menzilli sensörler (onlarca metre mesafe aralığı) olarak ayrılabilirler. İlk kısa menzilli TOF-3D sensörlerinden biri 10 kHz frekansta çalışan ve darbeli bir lazer ve ışık çarpanı tüpü kullanan sensördü; bu, 4 saniyede 2,5mm'lik bir hassasiyet ve maksimum 4 m ölçüm aralığıyla 64 x 64 piksel görüntü üretebildi. Darbeli bir yarı iletken lazer ve çığ foto diyot kullanılan bir 3B sensör kullanılmış ve bir 128 x 128 piksel görüntüyü, 2.5sn de +/- 7 mm doğrulukla 4 m mesafede ölçebilmiştir.

Mars gezegenin yeryüzünde yürüyen bir robotu yönlendirmek için uzun mesafeli lazer uzaklık ölçer kullanılmıştır (16). Maksimum 40 metre mesafede ve 10-15 cm hassasiyetle, 0,5 saniyede 256 x 256 piksel görüntü üretebildi. Gezegen yüzeyine robot yönlendirmeleri için tasarlanan başka bir cihaz, bir pasif hedefe 2 cm hassasiyetle ve 30 m mesafeye kadar saniyede 100 nokta ölçüm yapabildi (8). (17)'de sunulan sensör, bir

geminin parçaları gibi endüstriyel metal bloklara 3 - 30 m mesafelerde ve 1 mm hassasiyetle ve bir noktaya 3 saniyelik bir ölçüm süresinde ölçüm yapmak için kullanıldı. Aynı sensörden bir 3D sensör modifikasyonu üretildi ve hedefe tutturulmuş yansıtıcı bant parçalarını otomatik olarak dikey ve yatay yönlerde maksimum 15 metre mesafelerde $\pm 0,3$ mm hassasiyetle aradı ve ölçtü.

2.4 TOF Lazer Mesafe Bulucularda Kısa Darbelerin Avantajları

TOF lazer uzaklık ölçerlerinde kısa lazer darbeleri ve geniş bant genişliği kullanılarak neredeyse tüm parametrelerin geliştirilmesi sağlanabilir; yürüme hatası azalır, tek atış hassasiyeti artar ve art arda iki ölçüm darbesini ayırt etme olasılığı da artar.

Kısa darbe kullanımı, kısa zamanda net bir şekilde pek çok hedef noktalarının ölçülmesini sağlar. Eğer mesafe ölçümü yeterince doğruysa ortalama alınmasına gerek olmadığı durumlarda bir ölçüm noktası için bir tek darbe bile yeterli olabilir. Bu durumda, 128 x 128'lik bir resmin elde edilmesi, 50 kHz darbe frekansı ile 0.33 sn alır, eğer tarama mekanizması yeterince hızlıysa. Daha kısa darbe kullanmak fiber gerilme ölçümünde de yararlıdır çünkü kısa darbeler ölçüm noktasının fiberlerin gömülü olduğu karmaşık beton, çelik veya cam fiber yapılarında daha doğru konumlandırılmasını sağlar (18).

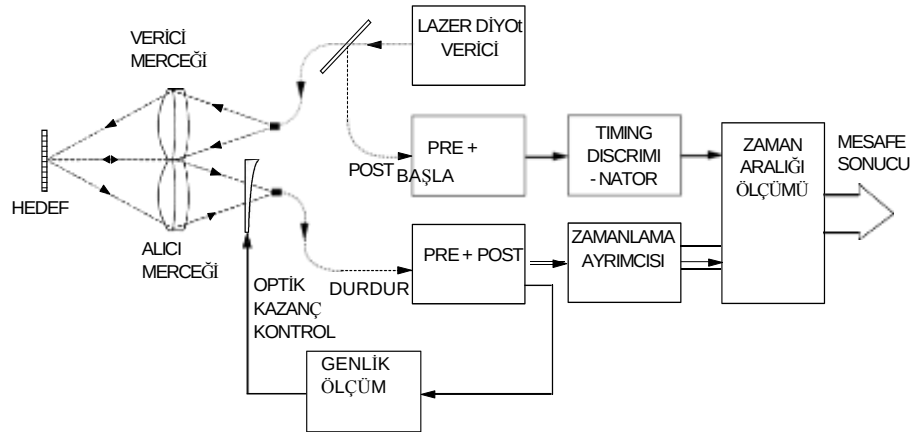
Hızlı lazer darbeleri için bazı yeni uygulamalar örneğin, kağıt hamuru veya kağıt gibi malzemelerin iç yapısının malzemelerden geçen lazer darbesinin genişlemesi ve gecikmesi ölçülerek analiz edilebildiği zamanlama ölçüm analizleridir. Kağıt hamuru ölçümünde, son olarak üretilen kağıdın yapısını tanımlayan uzun fiberlerin ve küçük parçacıkların büyüklüğü ve dağılımı incelenmektedir. Kağıt ölçümlerinde asıl sorun, doğrudan üretilmiş kağıttan, gözeneklilik ve pürüzlülük gibi, baskı kalitesini tanımlayan özellikleri doğrudan ölçmektir. Mevcut cihazlar, örneğin, kağıdın geçirgenliğini ölçmeye ve bunları kullanmaya yönelik laboratuvar koşullarına ihtiyaç duyar ve çok güvenilir değildir. Aynı teknik prensipte (optik tomografi) insan dokusunun ve tıptaki iç organların özelliklerini araştırmak gibi kızılötesi ışığa çok fazla zayıflamayan diğer malzemeler için de kullanılabilir.

3.BÖLÜM

DARBELİ BİR TOF LAZER MESAFE ÖLÇERİN YAPISI VE HATA KAYNAKLARI

3.1 TOF Lazer Mesafe Ölçerin Yapısı

Bu tezde bulunan lazer mesafe ölçer genel olarak bir verici, bir alıcı, ve bir zaman ölçme ünitesinden oluşur (Şekil 3.1). Verici, lazer ve darbeli elektronikten oluşur. Alıcı kanallarının her biri bir foto diyot, transempedans tipinde ön yükselticiyi (preamplifier), gerilim tipi ikincil kuvvetlendirici (post-amplifier) ve bir zamanlama ayırıcısını (discriminator) içerir. İki kanallı bir lazer mesafe ölçerde BAŞLA ve DURDUR darbelerinin her birini kendi kanallarında yayınlar, bu durumda bir PIN foto diyonu maliyeti ve gürültüyü azaltmak için BAŞLA kanalında kullanılabilir. Tek kanallı uzaklık ölçer BAŞLA ve DURDUR darbeleri aynı foto diyotlara optik olarak bağlanır. Zamanlama ayırıcı, analog ölçüm darbelerini, zaman ölçüm ünitesine beslenen lojik seviye darbelerine değiştirir. Zamanlama ayırıcısının en önemli özelliği, zamanlama olayını gelen darbenin genliğinden bağımsız olarak aynı noktada tutmaktır. Zaman ölçme birimi, TDC'de olduğu gibi (saat-dijital çevirici) saat atımlarının sayılmasına veya TAC'de (zaman-genlik dönüştürücüsü) olduğu gibi sabit akımlı bir kondansatörün boşaltılmasına dayanabilir. TDC, clock olarak bir kuvars osilatörünün kullanıldığı süreyi ve TAC'lar analog interparatörleri kullanılarak iki sıralı saat darbesi arasındaki süreyi daha doğru ölçer. Optikler bir veya iki eksene sahiptir ve genellikle optikler ve verici / alıcı arasındaki optik darbeleri yönlendirmek için optik fiberlerin kullanılması durumunda elektronikten ayrılır.



Şekil 3. 1 TOF lazer mesafe bulucunun yapısı

3.2 Performans Parametrelerinin Tanımları

Mesafe ölçerin performansı, çözünürlük, hassasiyet, yürüme hatası, doğruluk, doğrusallık, kararlılık ve tekrarlanabilirlik gibi çeşitli terimlerle tanımlanır. Pratikte kararlılık, doğruluk ve doğrusallık terimlerinin değerleri, kullanılan terimler bitmeden ifade edilse bile, kararsızlık, doğruluğu olmayan ve doğrusal olmayan (non lineer) olarak ifade edilir. Bu terimler, IEEE96 'da sunulan tanımlara dayanmaktadır. Dolanım hatası, doğrusal olmayanlık ve kararsızlık sistematik hatalardır. Kesinlik ve tekrarlanabilirlik terimleri rastgele hataları tanımlar. Sistematik hatalar tanımlanmış koşullarda tekrarlanabilir ve bir dereceye kadar kalibre edilerek telafi edilebilir. Raslantısal hatalar tekrarlanmaz ve kalibre edilerek kaldırılamaz.

Çözünürlük terimi mesafede çözülebilecek mesafede en küçük değişiklik anlamına gelir. Eğer okunan skala dijitalse skaladaki en küçük dijital anlamına gelir. analog skalada çözünürlük terimi skalada çözülebilecek en küçük değişiklik anlamına gelir ve optik netlik veya sayıyı belirten iğnenin genişliği gibi bazı faktörler tarafından sınırlanır. 3B mesafe ölçerlerde ayrıca çözünürlük dikey ve yatay eksenlerde önemlidir ve optik ve mekanik faktörler tarafından sınırlanabilir.

Tek atış hassasiyeti terimi ölçmede rastlantısal hata tarafından sınırlanan belirsizlik olarak tanımlanır ve bazı sabit mesafeler ölçüldüğünde dağılımın istatistiksel varyansı (σ-değeri) tanımlanmıştır. Hassasiyet ölçüm sonuçlarının yeterince büyük bir grubundan

hesaplanır. Tek atış hassasiyeti σ_t gelen darbenin dönüş hızına ve tüm gürültü kaynaklarının kareleri toplamına bağlıdır:

$$\sigma_t^2 = \frac{\sigma_t^2}{(dV/dt)_{V=D}^2}$$

buradaki σ_n^2 tüm kare gürültü voltaj kaynaklarının toplamıdır ve $(dV/dt)_{V=D}$, giriş sinyalinin dönüş hızıdır. Formül, sabit bir seviyeyi geçen bir darbe için türetilir. Zamanlama noktası, gürültü ve dönüş hızı arasındaki oranın en küçük olacağı şekilde seçilmelidir. Tek atış ölçümleri n kez tekrarlanırsa ve vericinin ve zaman ölçüm ünitesinin osilatörleri senkronize değilse (tek atış ölçümleri birbirinden bağımsızdır), ortalama sonucun kesinliği, tek atış hassasiyetine kıyasla n faktörü ile geliştirilmiştir.

Tekrarlanabilirlik sabit bir mesafe defalarca sabit koşullarda ölçüldüğünde rastlantısal tüm hataları içerir. Tekrarlanabilirlik ve hassasiyet arasındaki fark şudur: tekrarlanabilirlik, tüm ölçüm prosedürünün tekrarlanabilirliğini, hassasiyet ise art arda bağımsız tek atış ölçümleri arasındaki farkları tanımlar.

Dolanım hatası, zamanlama ayırmıcısında oluşan alınan ölçüm darbesinin genliğindeki değişimlerden, sırayla mesafe, yansıma katsayısı ve ölçüm açısı, mesafe ölçüm sonuçlarındaki hatayı ifade eder. Dolanım hatası TOF lazer mesafe ölçerde önemli bir faktördür çünkü alınan darbenin gücündeki değişim büyüktür.

Doğrusal olmama veya doğrusallık terimi, koordinatta en büyük ve en küçük ölçülmüş mesafe arasındaki veya tek ölçüm noktası için en küçük RMS düz bir çizgiden sapmasını veren ölçüm sonuçlarının an düz bir çizgiden sapmasını tanımlar.

Kararlılık terimi, genellikle uzun bir süre boyunca ölçüm sonuçlarındaki değişiklikleri tanımlar. Bununla birlikte kararlılık daha da kötüleşebilir bu yüzden kalibrasyonla telafi edilemez.

Doğruluk terimi tanımlanmış bazı ölçüm aralıklarında ve tanımlanmış zaman aralıklarında en büyük hatayı ifade eder. Doğruluk istatistiksel ve istatistiksel olmayan hataların her ikisini de içerir bu nedenle test ölçümleri yapılarak doğruluk ve cihazın sıcaklık ve nem gibi değişken koşullarda kalibre edilerek geliştirilebilir.

3.3 Hata Kaynakları ve Performansın Sınırlayıcı Faktörleri

Ölçüm hataları elektrik ve optik sinyallerinin gecikmeleri darbe şekli ve genliğindeki darbe şekilleri değişikliklerine neden olur, örneğin. Ayrıca işlemin ölçüm biriminde zamanı uzun bir arada istatistiksel değişimler oluşturur, fakat gecikmedeki değişimler farklı ölçüm mesafeleri uzun zaman periyodu boyunca aynı etkiye sahiptir. Eğer farklı hata kaynakları birbirinden bağımsız olan aynı hata etkilerini oluşturuyorsa toplam rms (kök-ortalama-kare) farklı hata bileşenleriyle birlikte karelerini toplayarak oluşturulmuştur.

Lazer menzil bulucudan meydana gelen gürültü, foto diyotun karanlık akım gürültüsü, kendi sinyal atış gürültüsü ve toplanan gürültüler çıkış foto diyotunda çoğalarak kararsızlık oluşturur. Ayrıca dışarıdan gelen elektriksel parazit yükselticinin gürültü seviyesinde artışa neden olabilir.

Ölçüm sinyal seviyesindeki değişimler başlıca hedefin yansıma katsayısında değişimlere, ölçüm mesafesine veya sıcaklığa neden olur. Hedeften yansıyan sinyalin gücü değişebilir, örneğin, menzilde 1:100 aralığında hareketsiz hedefler(ağaç, kâğıt, metal) menzilde 1-11 m arasında mesafe değişikliğidir (17). Yansıma katsayısı ϵ genellikle 0.1 ile 1 menzildeki hareketsiz hedefle de değişir. Optikler her mesafe ölçümünde ayrı ayrı odaklanırsa alıcı sinyaldeki değişimler ikincil mesafe ölçüm gücüne göre değişir. Sıcaklıktaki değişimler gücü ve lazerdeki dalga boyunu ve APD' deki kazancı etkiler. Ayrıca dalga boyundaki değişimler alıcıdaki gücü değiştirebilir, örneğin. Dik geçiş bantı dalga boyu filtreleri alıcının veya vericinin önünde kullanılmıştır.

Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak, darbe şekli değişebilir lazerlere yüksek güçlü sıvı hal lazerler örnek gösterilebilir.. Diğer olasılık, özellikle genlikler ve darbe şeklindeki bozulmalarla yükseltici doğrusal olmaz. Diğer elektriksel darbeler alıcı entegre devresinin içinde veya basılmış devre tahtasında ölçüm sinyalleriyle parazit oluşturabilir bunun sonucunda ölçüm hatalarına neden olur. Girişim darbeleri örneğin lojik devreler, diğer alıcı kanaldan darbeler veya bir anahtarlama güç kaynağından bozulmalar olabilir. Darbe şekli ayrıca hedef düzleminde yansıtıldığında ışın ölçüsü ile neredeyse paralel

olabilir. Bunun sonucunda alıcı darbe verici darbeden daha geniştir. Eğer ölçüm ışıını farklı mesafelerde yerleştirilmiş iki farklı hedefi vurursa alıcı parça iki farklı yapıda inşa edilmiş olabilir veya zaman ölçeğinde birbirinden bütünüyle ayrılmış olabilir. Ayrıca darbe şekli fiber optikteki bükülme nedeniyle veya çoklu mod fiberlerindeki bozulmalarla değişebilir.

Ölçüm sinyalinde yolun değişmesi, optik ve elektriksel olarak ölçüm mesafesini doğrudan etkiler. Çoklu mod fiberlerde mod saçılması genişlemeye ve darbenin genişlemesine ve zamana bağlı fiber gecikmelere neden olur. Ayrıca zayıflatıcılarda ve yükselticilerde kazanç gecikmesi zayıflatıldığında, sistemin kazancı veya sıcaklığı değiştiğinde farklılık gösterebilir. Diferansiyel yükselteçler ve tek bir kanal kullanarak, menzil bulucu yapısı hassaslığı azaltmaya kazanç ve sıcaklığı değiştirmeye yardımcı olabilir. (10)' da tek bir kanal yapısı kullanılan sıcaklık hassasiyeti TDC' nin baskınlığında olan sıcaklık hassasiyeti pratikte daha fazla azalmıştır. Üçüncü bir alternatif gecikmedeki değişiklikler havadaki sıcaklık veya basınçla değişebilir.

Eğer BAŞLATMA ve DURDURMA darbeleri arasındaki zaman gecikmesi doğru olsa bile, zaman ölçme birimi kendi hatasını oluşturabilir. Polarlama voltajı veya akımdaki değişimler bir analog zaman ölçme biriminde sonucu etkileyebilir. Bir dijital zaman ölçme biriminde osilatör frekansı, zamanın bir fonksiyonu ve sıcaklıkla oluşan ilave hata olarak değişebilir.

Bir darbeli TOF lazer mesafe ölçerin performansı, fizik yasaları veya kullanılan yarıiletken teknolojisi tarafından belirlenmiştir. Bir sınırlayıcı faktör de ölçüm darbesindeki genliğin sınırlı olmasıdır. En küçük ölçülebilir sinyal genliği alıcı yükseltici kanalında mevcut gürültü miktarı ile sınırlandırılmıştır. Ölçüm darbesi ile çoğu gürültü darbesini karıştırmamak için gürültü Gauss dağılımına sahip olduğu varsayıldığında gürültünün efektif değeri sinyalin genliği zirvedeyken en az 10 kat daha büyük olmalıdır. Yükselticilerden emilen maksimum voltaj değeri transistörlerin maksimum çalışma voltajı tarafından sınırlandırılmış bu da yükselticilerin çalışma voltajını sınırlandırmıştır. Piyasada mevcut yükselticiler kullanıldığında, bant genişliği sürekli artmaktadır. Lazer darbelerinin genişliği lazerde kullanılan çalışma modu tarafından sınırlandırılmıştır (19). Önemli bir sınırlama ayrıca, yeteri kadar güçlü bir lazer dalga boyudur. Ayrıca dalga boyu ve güç güvenlik sınıfı tarafından gerekli olarak

düzenlenebilir. Güvenlik sınıfı başlıca lazerin dalga boyuna bağlıdır çünkü uzun dalga boyları ($>1.4\mu\text{m}$) insan gözünün retinasına odaklanmamaktadır- bu yüzden birkaç onluk devre daha yüksek tepe güçlerinde dalga boyu $1\mu\text{m}$ 'den daha az kullanılır. Ancak mevcut olan en güçlü yarıiletken lazerler menzili 800-900 m dalga boyu aralığında kullanılabilir.

3.4 Darbeli Lazer Üretici (Verici)

3.4.1 Genel Yapı

Genliği ayarlanmış bir verici bir lazer ve darbe elektronikleri içerir. Bir yarı iletken darbe lazerinin en çok karşılaşılan tipi diyot lazer mesafe bulucudur çünkü o küçük, nispeten ucuz, dayanıklıdır. Yüksek güçler genellikle 5-100W aralığında değişir ve gereken akım darbeleri birkaç amper ile onlarca amper arasında değişir. İstenen güç ölçüm mesafesi, optik zararlar ve hedeften yansıma faktörü tarafından tanımlanmıştır. Gereken güç ne kadar yüksekse lazerin boyutları o kadar büyük olur. Mesafe aralığında birkaç metre için onlarca metre hem tek heteroyapı hem çift heteroyapı tipli lazerler kullanılabilir. Lazer yapısı birbirine istiflenmiş 1-3 lazer çipini içerebilir ve maksimum güç seviyesi bir çip lazerle 2 ila 30 W'da ve birkaç çip lazerle 5 ile 150W arasında değişir. Kullanılan yarı iletken GaAs, GaAlAs veya InGaAs alaşımlardır ve 850-910 nm dalga boyu aralığında çalışırlar. Hedefin yansıtıcılığının yüksek olması durumunda, örneğin fiber gerilimi veya sıvı seviyesinin ölçülmesinde olduğu gibi, ayrıca küçük boyutlu ve uzun dalga boylu kullanılan CW 30 lazerler öncelikle (1300-1500 nm, öncelikle fiber telekomünikasyonda kullanılır.) darbeli TOF lazer mesafe bulucularında kullanılabilir.

Temel bir lazer tipi, GaAs aktif tabakalı AlGaAs/GaAs tekli heteroyapı lazerdir. Kısa darbeli yarı iletken lazerler, (onlarca pikosaniyeden yüzlerce pikosaniye arasında değişen darbe uzunluğu) fiber telekomünikasyonlarda, optik sinyal işlemede, LIDAR'larda, doğrusal olmayan optik sistemler için pompalama lazeri olarak ve biyolojik olarak önemli olan analiz için kullanılan zaman çözümü spektroskopide kullanılır. Yarı iletken lazerdeki teknolojik ilerleme fiber telekomünikasyon endüstrisinin ihtiyaçlarını oldukça güçlü bir şekilde takip ediyor. Cam fiberleri için zayıflama minimatları nedeniyle, 0.9 mikrometre, 1.3 mikrometre ve özellikle 1.5

mikrometre dalga boyları tercih edilmektedir. Ortak hedef yüksek etkenlik ve düşük eşik akımıdır. Lazer boşluğundaki kazanç, elektriksel ve optiksel olarak aktif bölgenin mümkün olduğu kadar küçük bir hacme yer edilmesi ile arttırılabilir ve heteroyapı bağlantılarıyla elde edilebilir. Yük taşıyıcılar hem SH hem de DH yapılarıyla lokalize edilebilir (kazanç yönetme) ancak optik radyasyon DH yapısı ile daha iyi odaklanabilir (indeks kılavuzu, kırınım kayıpları daha küçüktür). Yüksek güçlü SH lazerleri son yıllarda ticari olarak yükseltmekteydi ancak teknolojik olarak eski yapılar marketlerde eksiliyorlar. Multikuantum çukurlu lazerle DH lazerlere göre yüksek kazançlar ve daha kısa darbeler elde edilebilir, çünkü durum yoğunluğu değerlik ve iletken bant kenarlarına yüksek konsantredir, böylece duyarlılık daha iyidir ve eşik akımları DH lazerlerinden daha küçük olur.

Yarı iletken bir lazerden optik darbeler üretmenin en basit yolu, kazancı ve optik çıkış gücünü etkileyen akımı modüle etmektir. Eşik akımın üstünde çalışan optik çıkış gücü, CW modunda akım ve uzun darbelerle doğrusal olarak artar. Bununla birlikte, optik lazer darbesinin uzunluğu, kısa akım darbeleri, yani, gecikmenin gecikmesi kullanıldığı sürece, akım darbesinin uzunluğu ile doğrusal olarak ilişkili değildir. Darbe elektroniğinin en basit devresi, lazere yüksek güçle deşarj edilen bir kapasitör içerir. En yaygın kullanılan anahtar türü bir çıkış transistörüdür.

Optimum darbe uzunluğu, bant genişliği ile tanımlanır. Optik lazer darbesi, alıcı bant genişliğinden hesaplanan FWHM'lerden açıkça kısaysa, alıcının tam kazancına ulaşamaz. Darbe daha uzun ve yükselip düşerse, zaman yavaşlarsa, hassasiyet bozulacaktır. Uygulamada, akım darbesinin minimum uzunluğu, anahtarın hızı ile sınırlandırılacak ve akım darbesinin minimum uzunluğu, anahtarın hızı ve devredeki yüksek akım döngüsünün seri indüktansları ile sınırlandırılacaktır. kW sınıfı çıkış güçlerine veya uzun dalga boylarına ihtiyaç duyulursa, örneğin bir PGT: Nd-lazer veya bir CO₂-lazer kullanılabilir. Göze duyarlı bir lazer gerekiyorsa, dalga boyu 1.4 mikrometreden fazla olmalıdır. Örneğin, CO₂-lazerlerde, Nd: YAG-lazer ile aynı güvenlik sınıfına 2000 kat daha fazla güç erişmesine izin verilir. Uzun ölçüm mesafelerinde, atmosferdeki sıcaklık ve basınç farklarından kaynaklanan ölçüm hataları, HeNe ve HeCd lazerleri gibi farklı lazerler kullanılarak telafi edilebilir. Fiber lazerler ve mikroçip lazerler, kilowatt darbe gücüne sahip kısa darbelerin gerekli olduğu

uygulamalarda yarı iletken lazerlerin alternatifidir. Örneğin, 1kW nabız gücünde ve ns nabız uzunluğuna, sırasıyla 1.053 mikrometre ve 1kHz dalga boyunda ve tekrarlama frekansında 31 fiber lazer ile ulaşılmıştır. Q-anahtarlama Nd: YVO₄ mikroçip lazer, 160 kHz darbe frekansında ve 1.064 mikrometre dalga boyunda, FWHM ve sırasıyla 68 ps ve 5.4 kW tepe gücü ile bir darbe üretme kabiliyetine sahiptir. Hem fiber lazerler hem de mikroçip lazerler boyut olarak daha büyüktür ve yapıları yarı iletken lazerlere göre daha karmaşıktır, çünkü bir pompalama lazeri gereklidir.

3.4.2 Yüksek Hızlı Lazer Darbe Üretimi İçin Alternatif Yollar

Kısa lazer kullanımı için birçok yaygın yol kullanılır; anahtarlama kazancı, kilitleme modu. Q anahtarlama ya da bir CW lazer modülasyonu harici bir optik düzenleyici ile yapılır. Mod anahtarlama teknik sınırı bazı tercih edilenler için çalışma frekansı kullanılır. Q-anahtarlama, kazanç anahtarlama ve optik modülatörlerin tümü, çalışma frekansını sıfırdan, örneğin lazerin aşırı ısıtılmasıyla sınırlı maksimum kullanılabilir frekansa kadar seçmeye izin verir.

Bir yarı iletken lazer akım darbesinin yüksek dönüş hızı kullanılarak kazanç – anahtarlama modunda çalıştırılabilir. Tipik optik çıkış azalan genlikle kısa darbelerin bir darbe dizisini içerir. Darbenin FWHM' si pikosaniyenin onlarcası olabilir ve ilk darbenin zirve gücü wattın birkaç onlarcası olabilir. Eğer lazer anahtarlama mod kazancında çalıştırılırsa, lazerin fiziksel parametreleri ve genliği ve akım darbelerinin yükselme zamanı tüm FWHM' de tanımlanır ve optik çıkış darbesinin genliğidir.

Kilitleme mod prensibinde, aynı faz için yankılayıcının boyuna modlarının bir kısmı ya da hepsini kilitlemektir. Bu arada darbe gücü kilit modunun sayıları tarafından arttırılır. Kilit modu aktif ya da pasif olabilir. Bir aktif mod kilitleme, ortalama zaman ayarlanacak olan modülasyon akım darbelerinin uçları arasındadır, lazer boşluğu ya da çoklularının sonları ucundaki fotonların geçiş zamanı anlamındadır. Aktif mod kilitlemede lazerin boşluğu bir dış lensle ve aynayla uzaklaştırılmıştır, çünkü aksi takdirde tekrarlama sıklığı birkaç gigahertz çok yüksek olur. Pasif mod kilitleme lazer orta ve diğer ayna uçlarında bulunan doyurulabilir bir soğurucu modülasyon optik

kayıplar tarafından elde edilebilir. Ayarlanabilir soğurucu uzunlamasına mod frekansı için otomatik kilitlenir ve akım modülasyonu gerekli değildir.

Bir aktif ya da pasif Q anahtar kısa lazer darbe başarısı için en yağın yollardan biridir. Q anahtarlama lazer yankılayıcı içinde kilitlenir ve lazer boşluğun kalite faktörü optik kayıpları değiştirerek değiştirilir. Başlangıçta Q anahtar kapalı durumdadır (Q seviyesi düşük) ve nüfus ter çevirimi çok yüksek bir değere ulaşabilir. Q anahtar açık durum olarak değiştirildiğinde, döngü kazancı ayrıca optik kayıpları da içerir, hızla artar ve sonuç kısadır, çok güçlü optik darbedir. Aktif bir Q anahtarı, aktif lazer ortamı ve benzerleri arasında bir dış optik anahtarlayıcı olarak sürekli bağlanır. Q anahtarlarla en yaygın lazer kullanım tipi, fiber lazerler, Nd:YAG – lazerleri ve CO₂ lazerleri. Aktif, dış Q anahtarlar örneğin elektro-optik yoğunluk modülatörler, optik radyasyonun kutuplaşma açısı dolanımdır. Birçok lazer türüyle, yarı iletken lazerler dahil , ayrıca pasif bir Q anahtar kullanılabilir, lazer ortamına ayarlanabilir bir soğurucu eklenerek gerçekleştirilebilir. Kirlilik iyonları, ortamda farklı enerjisel boşluklar arasında değerlik vardır ve iletim bantları lazer ortamda karşılaştırılır ve enerji depoları gibi davranır, başlangıçta enerji soğurucudur fakat lazer etki oluşmaz. Enerji deposu tam dolduğunda, lazer etki başlar ve enerji depoları fotonlar oluşturur, lazer sürecinde yer alır. Ayarlanabilir soğurucularda enerji depolanmıştır ve iki yolla serbest bırakılır; band içi taşıyıcı- taşıyıcı saçılma ve termalizasyon, bir pikosaniyeden daha az ve bindirme ile ve bantlar arası rekombinasyon süreç, nanosaniyeler için pikosaniyelerden işlem süresi değişir. Örneğin 1.5 kW' ın darbe gücü, 4.6 ns' nin darbe genişliği ve 3.5 kHz'in tekrarlama frekansı bir YAG lazerde ayarlanabilir bir soğurucu gibi Cr- ions kullanımıyla başarıldı.

Elektriksel modülasyon için bir alternatif seçim, yeterince güçlü bir CW lazerin çıkışı optik olarak modüledir. Optik modülasyon akustik- optik ya da elektro optik modülatörleriyle gerçekleştirilir, ayrıca dış Q anahtarlama olarak kullanılabilir. Akustik optik modülatörleriyle megahertz'in yüzlercesinin bir bant genişliği başarılabılır ve solid-durum elektro- optik modülatörleri bile 20 GHz frekans olarak başarıldı. Akustik optik modülatörlerde kristalin kırılma indeksi ayarlanabilir bir optik ızgarada, ultrasonik akustik dalgalarla modüle edilir, lazer ışığı kırar. Akustik optik modülatörlerin avantajı, aktif geniş bir alan ,buna karşılık dezavantajı wattın onlarında bile yüksek güç

tüketimidir. Elektro optik modülatörler, aynı zamanda Pockel hücreler olarak bilinen, en çok kullanılan modülatör tipleri özellikle yüksek frekanslarda optik haberleşme elektroniğidir. Pockel hücrelerde elektrik alan modülesi doğrudan modülatör araçların kırılma indeksi ve kırılma modüle indeksinde ya kutuplama ya da ışığın değişimidir. İkinci durumda (düşük voltaj lityum niyobant modülatör), ışık iki yol boyunca geçerken farklı kırılma indeksleri birbiriyle karşılaşır, bu duruma genlik modülasyonu neden olur. Optik aktif alan birkaç milimetrenin diametresi ve $t_r = 300\text{ps}$ daha yavaş Pockels hücresi, aktif materyalde potasyum dihidrojen fosfat, pikosaniyenin yüzlercesinin genişlik darbesiyle gigawatt da bile maksimum güçtedir. Onlar birkaç kilovoltta bir voltaj kontrolüne ihtiyaç duyar. Tek bir darbeyi, bir Pockels hücresiyle 100 MHz tekrarlama frekansına sahip, pasif mod kilitli bir lazer darbe dizisinden ayırmak mümkündür.

Ancak, tüm dış modülatörler vericinin boyutunu, ödülünü ve karmaşıklığını artırır. Katı hal ve gaz lazerleri genellikle pahalıdır ve zahmetlidir. Yarı iletken lazer, küçük, güvenilir ve nispeten ucuz bir bileşendir. bu nedenlerden dolayı lazer vericisini gerçekleştirmenin en basit ve en cazip yolu, kazanç veya Q-anahtarlama modunda çalışan sadece tek bir darbeyi yarı iletken lazer kullanmaktır.

3.5 Alıcı

3.5.1 Gerekli Özellikler ve Alıcılar İçin Alternatifler

Alıcı bir foto-diyot, bir ön yükselteç ve bir post yükselteç içeren bir elektrondur. Foto-diyot ile kullanılmış ön yükseltici bir geçirgenlik yükseltici ve bir yüksek empedans yükselticidir. Bir geçirgenlik yükseltici geçirgenliği tanımlayan basit bir yükselticidir ya voltaj yükseltici veya akım yükseltici ve geri besleme içerir. Negatif geri besleme, etkin giriş empedansını küçük tutar ve yüksek bir bant genişliği sağlar. Geri besleme direnci, esas olarak, değerin bant genişliği ve gürültü arasında bir uzlaşma(orta nokta) olduğu geçirgenlik değerini tanımlar. Geçirgenlik yükselticinin dezavantajı, geri besleme ve fotodiyot kapasitesinin yüksek değerlerde salınımlara duyarlı olmasıdır. Yüksek-empedans yükseltici, foto-diyot akımını voltaja aktarmak için nispeten yüksek değerli bir direnç ve bir voltaj yükseltici içerir (20). Yüksek-empedans yükselticinin dezavantajı dengelemeye ihtiyaç duymasıdır çünkü kombine yüksek direnç ile foto-

diyot kapasitansı geçiş bandının üst frekans limitini nispeten düşük bir değerde sınırlar. Ayrıca giriş gücünün dinamik menzili sınırlandırılmıştır çünkü düşük frekanslar, yükselticinin giriş direncinde yüksek frekanslarda daha fazla yükseltilir. Dengeleme değeri, tek foto-diyot madde ve foto-diyotun beyz voltajına, sıcaklığına göre değişken olan giriş kapasitansının değerine bağlıdır. Yüksek empedanslı yükselteç pratikte geçirgenlik yükselticiden daha duyarlıdır(daha düşük gürültü), çünkü geçirgenlik yükseltici geri besleme direncinin değeri yüksek geçirgenlik yükselticinin giriş direncinden daha düşük değerlidir böylece termal görüntü daha yüksek oluşur. Geçirgenlik yükseltici, yüksek frekanslarda ışık alıcısından daha yaygın bir tip olması nedeniyle giriş gücünün dinamik menzilini yükseltir.

Amplifikatör kanalı, kullanılan dinamik giriş gücü aralığında doğrusal olmalıdır. Normalde fotodiyot dinamik aralığı sınırlamaz, çünkü silikon fotodiyotun lineer aralığı 1: 107 veya hatta 1:1000 derecesinde yüksektir. Elektriksel bir zayıflatıcı kullanılıyorsa (21)'de olduğu gibi, foto-diyotun geniş dinamik aralığı önemlidir. Dinamik aralığın alt limiti gürültü ile sınırlıdır ve üst limit, diyotun en büyük çıkış akımı ve amplifikatörün kullanılabilir en yüksek çıkış gerilimi genliği ile sınırlıdır. Alt sınırdaki baskın olan gürültü kaynağı, amplifikatörlerin elektriksel gürültüsüdür. Tipik olarak, silikon fotodiyottan en yüksek tepe akımları birkaç on mili amper aralığındadır. Amplifikatörden gelen en yüksek çıkış genliği işletme voltajı ile sınırlıdır ve tipik olarak 1-2 V aralığındadır.

Mümkün olan en iyi tek atış hassasiyetini elde etmek için, gürültü en aza indirilmeli ve alıcıda ölçüm darbesi yavaşlatılmamalıdır. 47 Pratikte, amplifikatörün frekans tepkisinin sinyalin frekans spektrumuna eşit olması gerektiği anlamına gelir (eşleşen filtre). Zamanlama ayırıcısındaki karşılaştırmacı olmadan, tüm yükseltici kanalın dürtü yanıtı, eşleşen filtrenin dürtü yanıtının türevi olmalıdır. Türevlendirme (pasif bileşenlerle) amplifikatörden sonra yapılır (21).

Eşleşen filtrenin tasarımında kullanılan darbe, radar teorisine göre hedefe gönderilen darbe olmalıdır. Bununla birlikte, foto-diyotlar, GHz frekanslarındaki ölçüm darbesini önemli ölçüde genişletebilir ve foto-diyotun kapasitansı, yükselticideki yüksek frekanslı gürültüyü de artırır, bu da alıcı kanalın tasarımında kesinlikle eşleşen filtre teorisinin

kullanılmasını zorlaştırır. Amaç, bir sinyalin gürültü ve dönüş hızı arasındaki oranı, simülasyonla da test edilebilecek en aza indirmektir.

3.5.2 Fotodiyotların Özellikleri

Fotodiyot seçenekleri, PIN, χ ğ ve MSM (metal-yarı iletken metal) foto-diyotlardır. Bir foto-diyottan istenen özellikler, tüm amplifikatörün gereklilikleri ile aynıdır: kullanılan dalga boyunda (genellikle 850-900nm) mümkün olduğu kadar iyi tepki (A/W), yeterince iyi doğrusalılık, yeterince yüksek bant genişliği ve küçük gürültü. Özellikler tip (MSM, PIN, APD), malzeme (silikon, GaA'lar), doping ve foto-diyotun boyutu ile tanımlanır. En iyi cevaba χ ğ diyotuyla ulaşıldı (PIN diyottan 50-200 kat daha yüksek) fakat χ ğ katlayıcı üreticileri ekstra gürültüdür ve yüksek besleme gerilimi gereklidir (50-200 V). PIN diyotlar yaklaşık silikon AP'nin(en yüksek f_3 dB $\approx 1-2$ GHz) bant genişliğine eşit silikondan üretilmiştir fakat MSM silikonuyla 100 GHz frekansta 400 nm'lik bir dalga boyunda ölçüm yapabilir (22).

Bant ipinin genişliği tarafından tanımlanmış cevap, foto-diyodun yapısı ve dalga genişliğinde yarıiletken malzemelerin soğurma katsayısı kullanılır. MSM foto-diyotlar cevapları PIN diyotlardan daha düşüktür, çünkü metal ibreler aktif alanın bir kısmını gizler. Silikon 900 nm' ye iyi uyumludur, çünkü dalga genişliği üzerinde sadece maksimuma duyarlıdır. PIN ve MSM foto-diyotlar 1uF altındaki dalga genişliği için ya silikondan ya da GaAs' ten üretilmiştir. Aslında silikon, yalnızca mevcut malzemenin türü APD'ler için 0. 8-1um genişliğinde dalga boyu mesafesindedir, çünkü GaAs-APD'ler yavaştır. Bir APD' nin hızı elektronların ve deliklerin sırasıyla α_e ve α_h darbe oluşturma katsayılarıyla tanımlanmalıdır. Hızlı tepki almak için α_e katsayısı α_h katsayısından açıkça daha geniş ve daha kısa olması amaçlanmalıdır. Eğer $k_r = \alpha_e / \alpha_h$ oranı bire yakın ise elektron ve deliklerin ikisi işlemci çarpanlarının iç kısmına ve yük taşıyıcıları geriye hareket eder ve ileri anot ve katot arasında sonuçlanan uzun bir cevap zamanıdır. Eğer $k_r = \infty$ ise zaman yanıtı bir elektronun karşıya geçiş süresine eşittir. Genelde α_e silikonu α_h silikonundan 30-50 kat daha geniştir fakat GaAs' te $\alpha_e = \alpha_h$ tır.

Fotodiyodun aktif alanı, maksimum güç ve minimum arka plan gürültü için lazerin aktif alanından eşit ayarlar için daha mantıklı ya da biraz daha büyük olması amaçlanır.

Fotodiyot alanı minimize kapasite için minimize edilmelidir. Aşırı kapasitans stabiliteyi azaltabilir ve yüksek frekanslarda yükselticinin gürültüsünü arttırabilir. PIN' in uygun büyüklük fotodiyotlarının kapasitansları (çapları 100-500 μm) ve çığ fotodiyotlar 1.5-2 pF mesafededir. Eşit büyüklük MSM diyetotlar 0.15-1.6 pF mesafedeki kapasitanslara sahiptir, bu yüzden düşük kapasitans yüksek frekans uygulamalarında PIN fotodiyotlarından daha sık tercih edilir. PIN kapasitansı ve çığ fotodiyotları artan besleme voltajı tarafından çok az azalmıştır.

Bant genişliğinin üst frekans limiti 3 faktör ile tanımlanır: tüketim (depletion) bölgesi için fotonun yayılma süresi, doyma hızıyla aktif (depletion) bölge boyunca fotonların geçiş süresi ve yük direnci ve fotodiyot kapasitesi tarafından oluşan RC zaman sabiti. Aktif bölge I-(intrinsinc(iç)) katmana eşit olduğunda PIN ve çığ fotodiyot ile tükenme bölgesine yaklaşık eşittir. I-katman boyutlandırmada uzlaşmaya ihtiyaç vardır çünkü genişletmek duyarlılığı artırır ama diyetot tepkisi yavaşladığında geçiş süresi artırır. APD'lerde çarpma süresi de bant genişliğini etkiler. Küçük çarpma faktörü değerleriyle, RC ürünü baskın olur ve çarpma faktörü M arttığında bant genişliği yaklaşık eşit kalır ama M'in büyük değerleriyle kazanç-bantgenişliği- ürün (GBW) sabittir. Aktif bölge boyunca yük taşıyıcılarının geçiş süresi dizide APD'nin bant genişliğini maksimuma çıkarmak için yük direnci ve fotodiyot kapasitansı tarafından tanımlanan RC zaman sabitine eşit olmalıdır. MSM diyetotlarda aktif bölgenin genişliği esas olarak tanımlandığında metal parmaklar arasındaki mesafedir. Bununla birlikte, metal parmakların altında derin bir şekilde yayılan yük taşıyıcıları darbe tepkisini yavaşlatır. Silikonda soğurma katsayısı darbe yanıtında yavaş kuyruk oluştuğunda giriş sinyali uzun dalgaboyu içerirse uzun dalga boyunda yavaştır (silikonda $1/e$ girim derinliği 12.7 μm @ 830 nm ve GaAs de 0.25 μm @ 800 nm). Bu nedenle silikon-MSM diyetotları kısa dalga boyları için en uygun olanıdır. Silikon MSM lerin üst frekans limiti örneğin derin bir şekilde nüfuz eden bir fotonun yavaşlama etkisini en aza indirmek için aktif ince silikon tabakasının altında izole eden bir SiO_2 katman yerleştirilerek artırılabilir (23).

Bir APD'nin darbe cevabı çarpma faktörü küçük, 100 ia 1000 arasında, karanlık akımı küçük, nanoamper ve geriplan radyasyonu küçükse Gaussian darbesi olarak yaklaştırılabilir. Gerçek bir Gauss darbesi ve 1 GHz bant genişliği ile optik darbenin FWHM değeri 314 ps'dir. $f_{3\text{dB}} = 1/(2 \cdot \text{FWHM})$ formülünde 1GHz bant genişliği için 500

ps FWHM de sonuçlanan darbe cevabı ölçümlerine dayanan hızlı fotodiyot için sunulmuştur (24). Gerçek Gaussian darbesiyle karşılaştırıldığında fark üstel bir darbe kuyruğu verildiğinde fotodiyotun kısmen RC sınırlı bant genişliğinden kaynaklanır.

Fotodiyotların gürültü akımı, karanlık akım gürültüsü, arka plan sinyal akımı gürültüsü, sinyal akımı gürültüsü ve yük ve öngerilim dirençlerinden kaynaklanan termal gürültüden oluşur. Genellikle öngerilim direncinden kaynaklanan gürültü akımı, yük dayanımından açıkça daha küçüktür, çünkü önyargı direnci değer bakımından çok daha büyüktür. İyi kalitede PIN fotodiyotlarında karanlık akım gürültüsü azdır ve sinyal akımı gürültüsü ile birlikte elektronikten gelen gürültü hakimdir. Küçük sinyal seviyelerinde, elektronik kaynaklı gürültü diğer tüm gürültü kaynaklarına hakimdir. Fotodiyotun kapasitansı arttığında, alıcının gürültüsü özellikle yüksek frekanslarda artar. Giriş kapasitansının etkisi, MOSFET- ve BJT-amplifikatörlerinde, gürültü zirvesine yol açan benzerdir. Bir MSM alıcısındaki toplam gürültü, MSM fotodiyotun daha küçük kapasitansı nedeniyle normal olarak bir PIN alıcısından daha küçüktür.

Çığ fotodiyotlarında, tüm kare akımı gürültü terimleri $M^2 \cdot F(M)$ faktörü ile çarpılır. APD, yüzey kaçağı akımının neden olduğu çarpılmayan bir karanlık akım gürültü terimine de sahiptir, ancak diğer gürültü terimlerine kıyasla çok küçüktür. Aşırı gürültü faktörü $F(M)$, k_r parametresi ve çarpma faktörü M ile hesaplanabilir ve yanlılık voltajı ve çarpma faktörü yüksek değerlere yükseltildiğinde, kuvvetli bir şekilde artar:

$$F(M) = k_r M + (2 - 1/M)(1 - k_r)$$

Örneğin silikonda, k_r parametresi 0.006 değerine sahip olabilir, bu da $M=100$ olduğunda $F(M)=2.58$ aşırı gürültü faktörünü verir. M için ortak bir değer 50 ile 200 arasındadır. Bir APD alıcısında öngerilim voltajı arttığında, S/N- oranı, APD aşırı gürültüsünün elektronik gürültüden daha güçlü olduğu noktaya kadar artar (24).

Çarpım faktörü M ayrıca sıcaklığa da bağlıdır, bu nedenle bir ön gerilim voltaj kompanzasyonu (tip 0.7 V/°C/RCA88/) veya sıcaklık stabilizasyonu gereklidir. APD yanlılığı voltajının dalgalanması da olası bir gürültü kaynağıdır.

MSM ve PIN diyetlerin ana amaçlarından biri yükselteçleriyle aynı çip üzerinde entegrelenebilirler. Entegre yapılarının avantajları daha basit bir yapı, daha ucuz fiyat ve rastgele kapasitans ve indüktansların azaltılması nedeniyle daha kısa kablolar yapıştırılır ve daha küçük pedler yapıştırılır, bu da gürültüyü azaltır. Fotodiyot için mutlaka uygun

olmayan amplifikatör yarı iletken malzemeden pratik bir problem ortaya çıkabilir. Genelde tercih edilen silikondur çünkü düşük fiyatlıdır ve son derece gelişmiş üretim teknolojisine sahiptir. Bir alt tabaka silikon üzerinde GaAs fotodiyotlar yetiştirmek de mümkündür, pratikte henüz zor olsada. Örneğin, MSM fotodiyodu MOSFET' lerle aynı işlemcideki entegreler için iyi uyumludur. Bir matris formdaki entegre PIN foto diyotlar için ortaktır fakat aynı zamanda hızlı APD' ler ($t_r = 0.9 \text{ ns}$) 8x8 matrislik entegrelerden oluşur. PIN diyotlar ve CMOS yükselteçler 1 Gb/s baud hızıyla aynı tip bir alıcıya entegrelenmiş silikondan üretildi. Bir 40 Gb/s alıcısı InGaAs PIN fotodiyotlar ve InP/InGaAs SHBT (mikronaltı heterojonksiyonlu iki kutuplu transistörler)' ler kullanılarak üretildi. Aynı çip üzerinde yer alan çoklu entegre fotodiyotlarının ve yükselticilerinin bir ek avantajı, çoklu hedef mesafelerini aynı anda ölçmeleridir, düşük çözünürlüklü bir tarama mesafe bulucu ile aynı işlevi yerine getirir. Bir dört kanal sinyal lazer mesafe bulucuda gerçekleştirildi.

Her uygulama için en iyi fotodiyot tipi, optik güce, bant genişliğine ve amplifikatör kanalının yapısına (entegre / entegre değil) bağlıdır. 100 MHz lazer mesafe bulucu yükseltici kanalı eğer giriş gücü birkaç mikrowatt ya da daha yükseğe bir PIN fotodiyot tercih edilerek ölçülmüştür. Kullanışlı çalışma aralığı onlarca nanowatt giriş gücünden APD ile başlar.

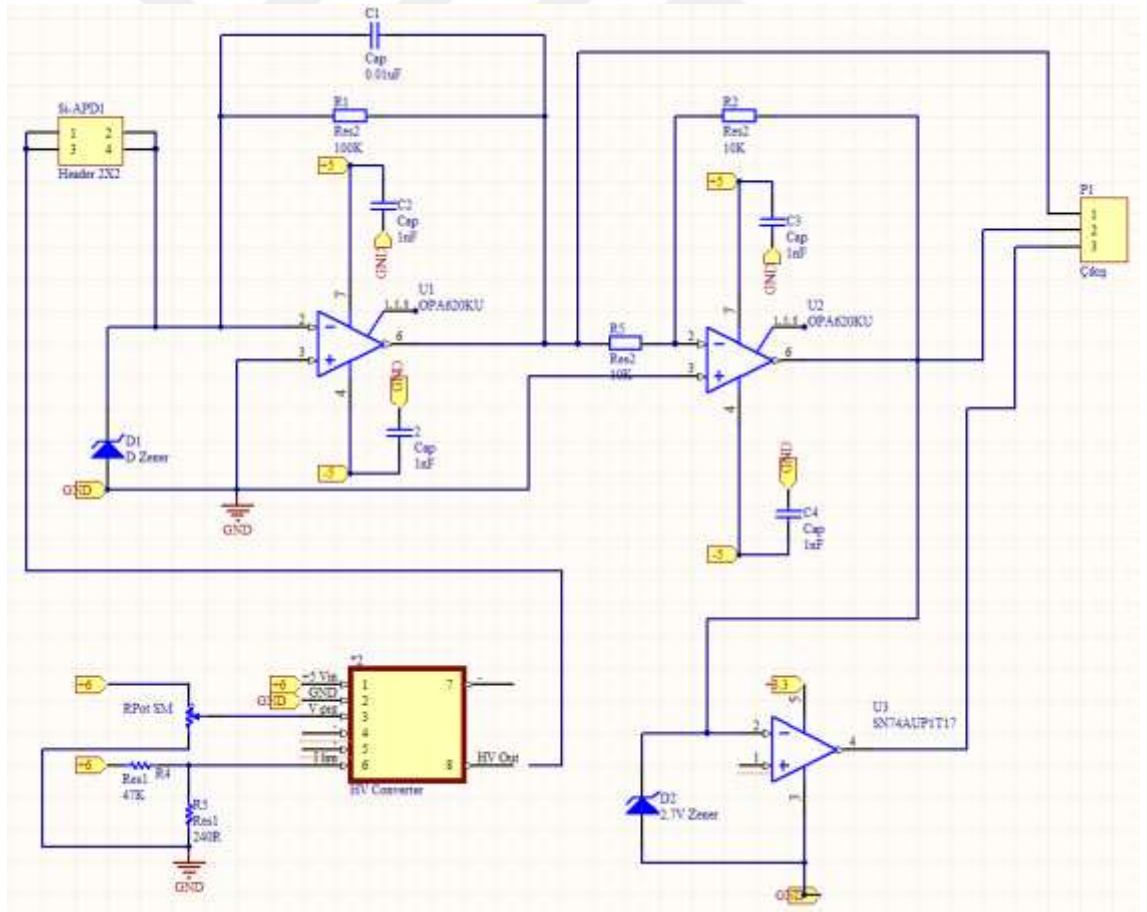
4.BÖLÜM

ÇALIŞMA KONUSU TOF MESAFE ÖLÇER TASARIMI

4.1 Çalışmaya Özgü Elektronik Kart Tasarımları

4.1.1.Alıcı Kanal Tasarımı

Teze konu olan sistemde alıcı,verici zaman sayacı ve mikroişlemci elektronik kart tasarımları yapılmıştır.



Şekil 4. 1 Alıcı Kanal Tasarımı

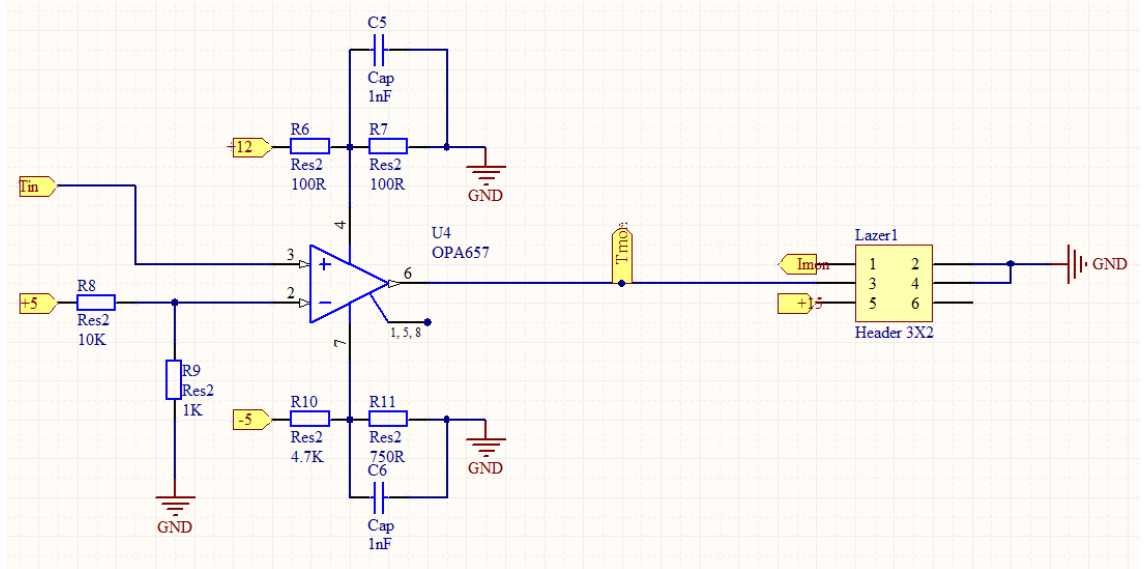
Şekil 4.1’ de Alıcı kanal tasarımı görülmektedir. Kullanılan yüksek voltaj çevirici sayesinde 5VDC kullanılarak elde edilen 350VDC gerilim APD’nin anoduna uygulanmaktadır. U1 ve U2 kuvvetlendiricileri ile gerekli kuvvetlendirme, filtreleme ve alınan sinyalin maksimum genliğinin 5V ile sınırlandırılması işlemi gerçekleştirilmektedir. Hedefe gönderilen ışın darbesinin hedeften yansiyarak APD’ye ulaşması sonucu alıcı kanal çıkışından elde edilen sinyalin maksimum genliği 5V’dur ve zaman sayıcı entegre olan TDC için DUR sinyali olarak kullanılacaktır. Kullanılan op-amp’lar 1.2 GHz bant genişliğine sahiptir ve yükselme zamanları mikrosaniye başına 700V’dur. Yüksek bant genişliği ve yükselme zamanı elektronik tasarımın alıcı kanalın APD tarafından algılanan fotonların TDC’ ye dur sinyalini göndermesi esnasındaki gecikmeleri en aza indirmektedir. Ayrıca alıcı kanalda dış ortamdan gelen dalga boylarını filtrelemek için yalnızca 905nm dalga boyundaki ışınları geçiren optik filtre ve ışınları paralel hale getirip APD merkezine düşüren optik düzenekler kullanılmıştır.

4.1.2.Verici Kanal Tasarımı

Alıcı Kanalda lazer ışın kaynağı 905nm boyunda ve 25W gücünde bir lazer diyottur. Lazer diyot çıkışında hedefe gönderilen ışınları tek bir noktada toplayabilmek için ışınları paralel hale getiren optik lensler kullanılmıştır. Alıcı kanalda kullanılan 905nm optik filtre (solda), odaklama lensi (sağda) Şekil 4.2. de görülmektedir. Ayrıca verici lazer diyot ışın paralelleyici Şekil 4.2. de altta görülmektedir.

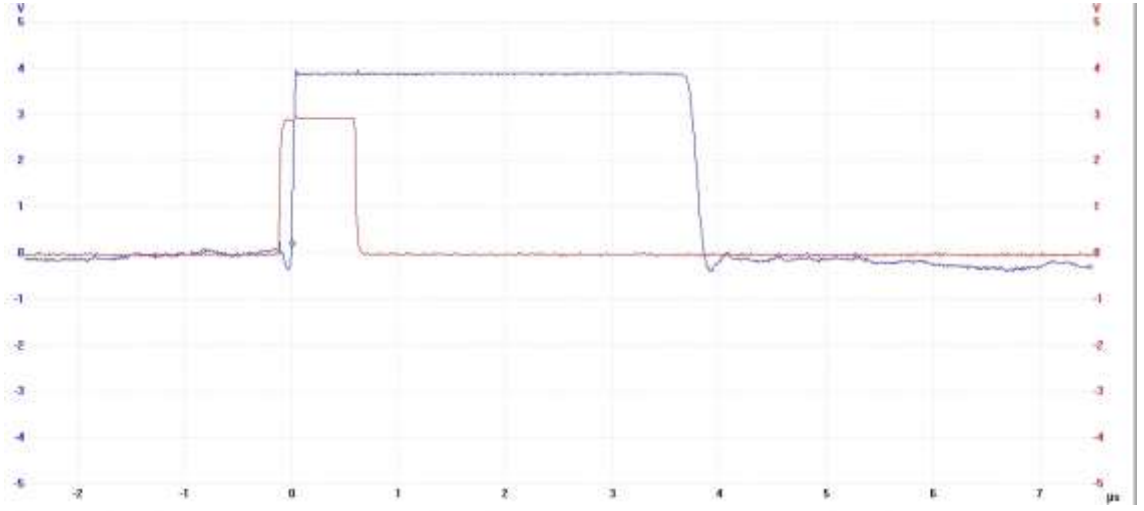


Şekil 4. 2. Alıcı-Verici Kanalda Kullanılan Optik Lensler



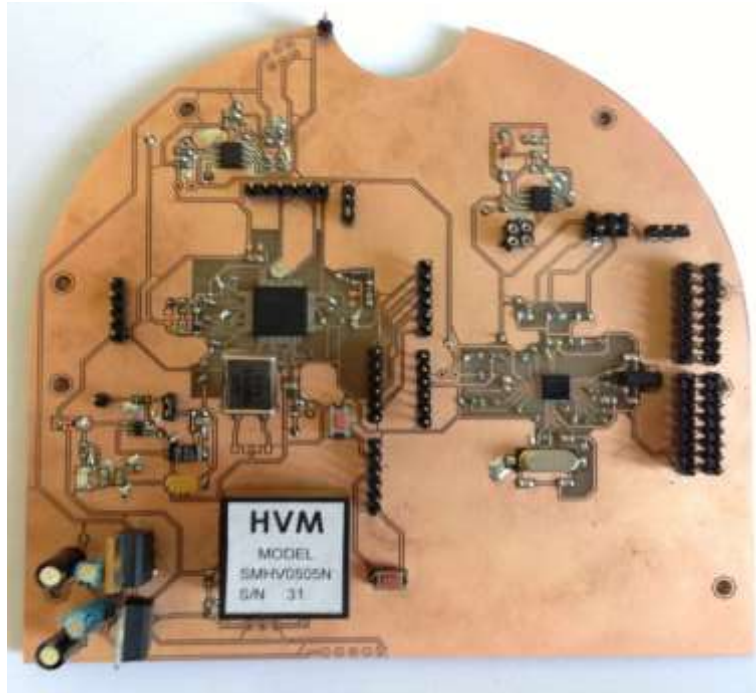
Şekil 4. 3. Alıcı Kanal Tasarımı

Şekil 4.3 de lazer darbe üretici devre tasarımı görünmektedir. Bu devre mikroişlemciden aldığı darbe işaretlerini kuvvetlendirmeye yardımcı olarak lazer sürücüyü kısa darbeler



Şekil 4. 5 Verici-Alıcı sinyalleri

Gönderilen ve alınan sinyal arasındaki zaman farkının yarısı ışının kaynak ile hedef arasında aldığı yolun süresini belirlemektedir. Bu Süre TDC ile ölçülüp, hava ortamı için ışık hızı ile çarpılıp mesafe bilgisi elde edilmiştir. Şekil 4.6. De tasarımı ve lehimleme işlemi yapılmış devre kartının bir görüntüsüne yer verilmektedir.



Şekil 4. 6 Elektronik Kartın Son hali

4.2.Tasarımda Kullanılan Elektronik Malzemeler

Cihazda kullanılan zaman ölçer entegre ACAM firmasının ürettiği TDC-GP21' dir. İlgili entegre ile ilgili daha detaylı bilgiye firmanın 25 Mayıs 2012' de yayınladığı DB_GP21_e V 1.4 numaralı dökümandan ulaşılabilir. Verici lazer diyot, LASER COMPONENTS firmasının ürettiği 905nm dalga boyuna sahip 905D1S3J03UA kodlu lazer diyodudur. Alıcı kanalda kullanılan APD, LASER COMPONENTS firmasının ürettiği SARF500 ürünüdür. APD besleme devresinde kullanılan ve 0 ile -500V arasında gerilim üretebilen DC-DC dönüştürücü HVM firmasının ürettiği SMHV0505N modelidir. Ayrıca tasarımda kullanılan op-amp lar TEXAS INSTRUMENTS firmasının ürettiği OPA657 kodlu 1.6 GHz band genişliğine sahip ürünüdür.

5.BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1.Tartışma-Sonuç ve Öneriler

Yapılan çalışma sonucunda 905nm lazer diyot, APD, TDC, mikroişlemci, optik düzenekler ve karşılaştırmacı devreler, kuvvetlendirici devreler kullanılarak bir lazer mesafe ölçüm sistemi geliştirilmiştir.

Cihazla yapılan deneysel ölçümler sonucu hedefteki malzemenin parlaklık, renk ve yüzey kalitesinin ölçüm sonucunu doğrudan etkilediği görülmüştür. Malzemenin cinsine göre farklı oranlarda bir sapma görülmüştür.

Tablo 5.2 de cihazdan alınan ölçüm sonuçlarının hedef yüzeyine bağlı olarak nasıl değiştiği gerçek ölçüm sonuçları ile birlikte gösterilmektedir.

Tablo 5. 1 Deneysel Ölçüm sonuçları

<u>Gerçek mesafe =</u>	460 cm	220 cm	120 cm
Beyaz Vernikli Tahta	450-470 cm	225-230cm	140-160cm
Beyaz Mat Karton	600 -620 cm	320-340 cm	300 -310 cm
Bakır Plaka	425-430 cm	2.15-220 cm	160- 170 cm
Siyah Kumaş	700- 720 cm	430-450 cm	420-460 cm

Ölçümlerden elde edilen sonuçlara göre yüzey yansıma katsayısı ve pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Metal veya parlak yüzeylerde mesafe daha kısa mat ve pürüzlü yüzeylerde mesafe daha uzun ölçülmektedir. Bunun ana sebebi algılanan darbedeki işaretin yükselme zamanı ile doğrudan etkili olduğu görülmüştür. Mat, koyu, ve pürüzlü yüzeylerde malzeme cinsine de bağlı olarak algılanan işaretin yükselme zamanı oldukça yüksektir. Parlak yüzeylerde ise işaretin yükselme zamanının oldukça kısa olduğu görülmüştür. Bu da zaman ölçeği devre için karşılaştırma ve tetikleme zamanını doğrudan etkilediğinden sonuçlarda büyük sapmalara neden olmaktadır.

Ölçüm sonuçlarını doğrudan ve yüksek oranda değişmesinin malzeme ve elektronik kaynaklı sebepleri ilerleyen çalışmalarımda ayrıntılı olarak incelenecektir. Tasarlanan bu sistem robotik sistemlerde malzeme ayırt edici ve algılayıcı olarak kullanılabilirliği oldukça yüksektir.



KAYNAKÇA

1. Hovanessian S.A., 1988, Introduction to Sensor Systems. Artech House, 2pp.
2. Peremans H., Audenaert K., Van Campenhout J.M., 1993, A High-Resolution Sensor Based on Tri-aural Perception, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 546pp.
3. Fisher P., 1992, Improving on police radar. IEEE Spectrum July 1992, 38-43pp.
4. Bosch T., Lecure M., 1995, **Selected Papers on Laser Distance Measurements, SPIE Milestone Series, 115**, 115 pp.
5. Jarvis R.A., 1983, A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision, **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-5(2)**.
6. Ohya94 Ohya A., Shoji E., Yuta S. Intelligent Robots and Systems '94. 'Advanced Robotic Systems and the Real World', IROS '94. **Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on, 3**, 1759 –1763 pp.
7. Besl P.J., 1988, **Active Optical Range Imaging Sensors. Machine Vision and Applications, 1.**, 127-152 pp.
8. Lewis R.A., Johnston A.R., 1977 A scanning laser rangefinder for a robotic vehicle. 5th, International Conference on Artificial Intelligence, 762-768 pp.
9. Strand T.C., 1985, Optical three-dimensional sensing for machine vision., **Optical Engineering, 24 (1)**, 33-40 pp.
10. Määttä K, Kostamovaara J., Myllylä R., 1993, Profiling of hot surfaces by pulsed time-of-flight laser range finder techniques., Applied Optics, 5334-5347 pp.
11. Zahid M., Smith J.S., Lucas J., 1997, High-frequency phase measurement for optical rangefinding system, **IEE Proc. Sci. Meas. Technol., 144**, 141-148 pp.
12. Koskinen M., Kostamovaara J., Myllylä R., 1992, Comparison of the continuous and ulsed time-of-flight laser rangefinding techniques, **Optics, Illumination and Image Sensing for Machinen Vision VI, SPIE 1614**, 296-305 pp.
13. Smith D.E., 1980, Electronic Distance Measurement for Industrial and Scientific Applications. Hewlwt-Packard Journal, June 1980, 3-11 pp.
14. Halmos M. J., Wang J.H.S. (1993) Laser radar systems and applications. In: Optical Tecnologies for Aerospace Sensing. Pearson, J. E. (ed.) **Bellingham, Washington, SPIE CR47**, 308-338 pp.

15. Riegl 2001 Riegl USA Inc., 2001, Application sheets.
16. Krotkov E., Hoffman R., 1994, Terrain Mapping for a Walking Planetary Rover. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, **10.**, No. 6, 728-739 pp.
17. Kaisto I., Kostamovaara J., Manninen M., Myllylä R., 1993, Laser radar based measuring systems for large scale assembly applications, **SPIE Proceedings**. **2088** 121-131 pp.
18. Lyöri V., Määttä K., Nissilä S. Kopola H., Englund M., 1997, A high precision fresnel-OTDR for distributed fibre-optic sensor network applications. 12th International Conference on Optical Fibre Sensors, Oct 28-31, 1997, USA, 520-523 pp.
19. Vainshtein S., Kostamovaara J., Kilpelä A., Määttä K., 1997, A novel compact 35 A/150 ps current pulse generator for a new generation of the laser radars., **Proceedings of the 40th Midwest Symposium on Circuits and Systems**, **1**, 148 –151 pp.
20. Yano H., Aga K., Kamei H., Sasaki G., Hayashi H., 1990, Low-Noise Current Optoelectronic Integrated Receiver with Internal Equalizer for Gigabit-per-Second Long-Wavelength Optical Communications. **Journal of Lightwave Technology**, **8**, No.9, 1328-1333 pp.
21. Rehak P., 1983, Detection and signal processing in high-energy physics. In. Bologna G & Vincelli M. (ed.) Data acquisition in high energy physics., North-Holland, Amsterdam, Netherlands.
22. M.Y. Liu, S.Y. Chou, S. Alexandrou, C.C. Wang., 1993, 110 GHz Si MSM Photodetectors, **IEEE Transactions on Electron Devices**, **40**, 2145-2146 pp.
23. Honkanen K., Hakkarainen N., Määttä K., Kilpelä A., Kuivalainen P., 1999, High-Speed Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors Fabricated on SOI-Substrates. **PhysicaScripta**, **Vol. T79**, 127-130 pp.
24. Bhattacharya P., 1997, Semiconductor Optoelectronic Devices, Prentice-Hall Inc.,
25. Myllylä R., 1978,, A Modern Positron Lifetime Spectrometer, Nuclear Instruments and Methods 148, 267-271 pp.
26. Ahola R., Myllylä R., 1984, A Time-of-Flight Laser Sensor for To and Fro Motions, International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Tokyo, Japan, Oct. 1984, 812-818 pp.

27. Moring, I., Heikkinen, T., Myllylä, R., Kilpelä, A., 1989, Acquisition of three dimensional image data by a scanning laser range finder. **Optical Engineering**, **28(8)**,897-902pp.
28. Kostamovaara J., 1986 Techniques and Devices for Positron LifetimeMeasurement and Time-of-Flight Laser Rangefinding. Doctoral Thesis, University of Oulu, 69 pp.



EKLER

EK 1. Mikroişlemci Yazılımı ve TDC İle Haberleşme

Mikroişlemci Yazılımı ve TDC İle Haberleşme

C++ dilinde yazılan sistemin kontrol ve değerlendirme işlemini yapan mikroişlemci yazılımı;

```
#include <SPI.h>
#include <LiquidCrystal.h>
const int chipSelectPin = 2;
const long confreg0 = 0x00041012;
const long confreg1 = 0x01C10012;
const long confreg2 = 0x00000002;
const long confreg3 = 0x20000034;
const long confreg4 = 0x20000056;
const long confreg5 = 0x08000078;
const long confreg6 = 0x00102090;
LiquidCrystal lcd(8,9,4,5,6,7);
void setup()
{
    pinMode (chipSelectPin, OUTPUT);
    digitalWrite (chipSelectPin, HIGH);

    SPI.begin();
    SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
    SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV2);
    SPI.setDataMode(SPI_MODE1);
    Serial.begin(9600);

    const int intpin = 5;
    pinMode (intpin, INPUT);
    Power on Reset to GP21
```

```

digitalWrite(chipSelectPin, LOW);
SPI.transfer(0x50);
digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
delay(1);
    TDCwrite(0x00,confreg0, 4);
    TDCwrite(0x01,confreg1, 4);
    TDCwrite(0x02,confreg2, 4);
    TDCwrite(0x03,confreg3, 4);
    TDCwrite(0x04,confreg4, 4);
    TDCwrite(0x05,confreg5, 4);
    TDCwrite(0x06,confreg6, 4);

    digitalWrite(chipSelectPin, LOW);
    SPI.transfer(0x04);
    digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
    delay(0.5);
    digitalWrite(chipSelectPin, LOW);
    SPI.transfer(0x03);
    digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
    delay(0.5);
    digitalWrite(chipSelectPin, LOW);
    SPI.transfer(0x01);
    digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
    delay(0.1);
}
void loop()
{
    float readreg[9];
    float readreg2[9];
    float readregort=0;
    float readregort2;
    int i=0;
    for (i = 0; i < 10; i = i + 1)

```

```

{
    digitalWrite(chipSelectPin, LOW);
    SPI.transfer(0x70);
    digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
    delay(0.01);
    readreg[i] = TDCread(0x00,2);
    Serial.println(readreg[i]);
    readreg2[i] = (readreg[i])*(0.0225)*0.3;
    readregort=(readregort+readreg2[i]);
}
readregort2 = readregort/10;
Serial.println(readregort2);
lcd.print("Mesafe=");
lcd.print(readregort2);
lcd.print("m");
delay(500);
lcd.clear();
}

long configure() {
}

void TDCwrite(byte reg, long contents, int numbytes)
{
    reg = reg | 0x80;
    digitalWrite(chipSelectPin, LOW);
    SPI.transfer(reg);
    SPI.transfer((contents >> 24) & 255);
    SPI.transfer((contents >> 16) & 255);
    SPI.transfer((contents >> 8) & 255);
    SPI.transfer( contents & 255);
    digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
}

long TDCread(byte reg, int numbytes)

```

```

{
    long inbyte;
    long regcontent;
    reg = reg | 0xB0;
    digitalWrite(chipSelectPin, LOW);
    SPI.transfer(reg); //reg to read
    regcontent = SPI.transfer(0x00);
    numbytes--;
    for (int x = numbytes; x > 0; x--)
    {
        regcontent = regcontent << 8;
        inbyte = SPI.transfer(0x00);
        regcontent = regcontent | inbyte;
        numbytes--;
    }
    digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
    return(regcontent);
}

```

```

void TOeeprom ()
{
    digitalWrite(chipSelectPin, LOW);
    SPI.transfer(0xC0);
    delay(200);
    digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
}

void FROMeeprom ()
{
    digitalWrite(chipSelectPin, LOW);
    SPI.transfer(0xF0);
    delay(200);
    digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
}

```

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı : Hüseyin TOPÇUOĞLU
 Uyruğu : Türkiye (TC)
 Doğum Tarihi ve Yeri : 24Ağustos 1989, Kayseri
 Medeni Durumu : Bekar
 Tel : +90 506 557 36 32
 Email : huseyin@marsotomasyon.com
 Yazışma Adres : Anbar Mah. 54.Cad. No:15/D Melikgazi/KAYSERİ

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	ERÜ, Mühendislik Fak., Elektrik-Elektronik Müh. Böl.	2012
Yabancı Dil	ERÜ, Yabancı Diller Y.O.	2008
Lise	N.Mehmet Baldöktü A.L.	2007

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2017-Halen	Mars Otomasyon Teknoloji	Proje Yöneticisi
2017-2017	Ravaber Yapı Ürünleri	Otomasyon Mühendisi
2015-2017	Simfer Dayanıklı Tüketim Malları	Otomasyon Mühendisi
2013-2015	HTA Mühendislik	Proje Yürütücüsü
2012-2013	Fotonik Teknoloji	Ar-Ge Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce