

AGV Navigasyon Amaçlı Bir LIDAR Tasarımı

Muhammed Mert Ulupınar

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2020



A LIDAR Design for AGV Navigation

Muhammed Mert Ulupınar

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Electrical Electronics Engineering

June 2020

AGV Navigasyon Amaçlı Bir LIDAR Tasarımı

Muhammed Mert Ulupınar

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan DINDİŞ



## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğretim Üyesi Gökhan Dındış danışmanlığında hazırlamış olduğum “AGV Navigasyon Amaçlı Bir LIDAR Tasarımı” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 22/06/2020

Muhammed Mert Ulupınar

İmza

## ÖZET

LIDAR, lazer darbeleri kullanılarak bir nesne veya bir yüzeyin uzaklığını ölçmeye yarayan teknolojidir. Uzaklığı ölçülecek nesne ya da yüzeye gönderilen lazer darbesinin gönderilme süresi ile nesneye çarpıp yansıyan sinyalin tekrar kaynağa ulaşma süresi arasındaki zaman farkı ölçülerek mesafe ölçümü yapılır. Bu iki sinyal arasındaki zamanın ölçülmesi için hızlı ve hassas kart tasarımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü ölçümlerdeki 1 eşlik hata 15 santimetrelik hatalı ölçüme sebep olur. Ayrıca LIDAR sistemleri donanım, yazılım ve tasarım yönünden farklı disiplinler içermesinden ötürü karmaşık ve pahalı sistemlerdir. Bu sebeple bu çalışmanın amacı düşük maliyetli devre elemanları kullanarak entegre elektronik ve optoelektronik devreler tasarlamak, geliştirmek ve test etmektir. Tasarlanan devreler pasif elemanlar, transistörler, işlemsel yükselteçler kullanılarak laboratuvar ortamında baskı kartı üzerine lehimlenmiştir. Lazer sinyalinin darbe genişliğini ve çıkış güç değerini ayarlayan bir lazer sürücü devresi yapılmıştır. Hedef nesneden yansıyan zayıf sinyali güçlendirmek için kullanılan bir yükselteç devresi yapılmıştır. Yansıyan ışığın fotodiyot üzerine düştüğü bir alıcı devresi yapılmıştır. Son olarak lazer diyotun çalışması için gerekli pulsi üretmek için mikroişlemci kullanılmıştır. Mesafe ölçümünü yapmak için analog dijital dönüştürücü kullanılmıştır. ADC temelli ölçümlerde mesafe ölçümünün doğruluğu ve hassasiyeti ADC'nin bant genişliğine, örnekleme frekansına ve yansıyan sinyalin karakteristiğine bağlı olduğu için yansıyan sinyaller üzerinde çeşitli algoritmalar kullanılarak mesafe ölçülmeye çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Işık ile mesafe ölçümü, uçuş süresi, pin fotodetektör, lazer diyot.

## SUMMARY

LIDAR is technology for measuring the distance of an object or surface using laser pulses. The distance measurement is measured by measuring the time difference between the duration of the laser pulse sent to the object to be measured or the distance of the laser pulse and the time it reaches the source. Fast and precise card designs are needed to measure the time between these two signals. Because the error of 1 ns in the measurements causes an incorrect measurement of 15 centimeters. In addition, LIDAR systems are complex and expensive systems because they contain different disciplines in terms of hardware, software and design. Therefore, the aim of this study is to design, develop and test integrated electronic and optoelectronic circuits using low cost circuit elements. The designed circuits are soldered on the printing card in the laboratory environment using passive elements, transistors, operational amplifiers. A laser driver circuit is made that adjusts the pulse width and output power value of the laser signal. An amplifier circuit is used to amplify the weak signal reflected from the target object. A receiver circuit is made in which the reflected light falls on the photodiode. Finally, the microprocessor was used to produce the required pulse for the operation of the laser diode. An analog digital converter is used to measure the distance. Since the accuracy and sensitivity of the distance measurement in ADC based measurements depends on the bandwidth, sampling frequency and characteristic of the reflected signal, distance algorithms have been tried to be measured on the reflected signals.

**Keywords:** Light Detection and Ranging, time of flight, pin photodetector, laser diode.

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamda; konunun belirlenmesinde, gerçekleştirilmesinde ve sonuçlandırılmasında her türlü bilimsel katkı ve manevi destek sağlayan, hiçbir konuda yardımlarını esirgemeyen, tecrübe ve görüşleriyle bana her zaman çözüm yolu gösteren danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Gökhan DINDİŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca başarılarımı borçlu olduğum, maddi ve manevi desteklerini ve yardımlarını benden hiç esirgemeyen sevgili aileme minnet dolu sonsuz teşekkürlerimi sunarım.





## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>vi</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>vii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>viii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1. GİRİŞ VE AMAÇ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>5</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>9</b>
3.1. Mesafe Ölçüm Teknikleri .....	9
3.1.1. Uçuş Süresi Yöntemi .....	9
3.1.2. Üçgenleme Yöntemi .....	11
3.1.3. Faz Kayması Yöntemi .....	12
3.1.4. Method Seçimi .....	13
3.2. Alıcı Devre .....	14
3.2.1. Detektör Özellikleri .....	14
3.2.2. Detektör Hassasiyeti .....	15
3.2.3. Kuantum Verimi .....	15
3.2.4. Frekans Yanıtı .....	16
3.2.5. Gürültü Eşdeğeri Güç (Noise Equivalent Power) .....	16
3.2.6. Yükselme Süresi (Rise Time) .....	17
3.3. Fotodetektör Türleri .....	17
3.3.1. Fotodiyot .....	18

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.3.2. Pin Diyot .....	18
3.3.3. Çığ Fotodiyot .....	19
3.3.4. Fototransistör.....	20
3.3.5. Fotodirenç .....	21
3.3.6. Fotoçoğaltıcı Tüpler .....	21
3.3.7. Fotodetektör Seçimi .....	21
3.3.8. Pin Diyot ve APD Diyot Karşılaştırması .....	22
3.4. Optik Lensler .....	24
3.5. Sinyal Yükseltme Devresi .....	25
3.5.1. İlk Yükseltme Devresi.....	26
3.5.2. İkinci Yükseltme Devresi.....	27
3.6. Verici Devre.....	28
3.6.1. Lazer Türleri.....	28
3.6.2. Katı Hal Lazerleri.....	28
3.6.3. Diyot Lazerler .....	29
3.6.4. Lazer Dalga Boyu .....	29
3.6.5. Lazer Güvenliği.....	30
3.7. Mikroişlemci Birimi .....	30
3.8. LIDAR'ın Navigasyon Uygulamalarında Kullanımı.....	32
3.9. Mesafe Ölçüm Algoritmaları .....	33
3.9.1. Ön Kenar Ayırıcı (Leading Edge Discrimination).....	33
3.9.2. Tepe Değeri Tahmini (Peak Estimation).....	34
3.9.3. Çapraz Korelasyon (Cross Correlation).....	34

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.9.4. İnterpolasyon (Interpolation) .....	35
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>37</b>
4.1. Lazer Sürücü Devre .....	37
4.2. Alıcı Devre.....	40
4.3. Örnekleme Devresi .....	42
4.4. Gürültünün LIDAR Sistemi Üzerindeki Etkileri.....	42
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>45</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	<b>47</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Farklı Firmalara Ait LIDAR Ürünleri .....	8
3.1. Uçuş Süresi Yöntemi .....	13
3.2. Optik Üçgenleme Yöntemi .....	13
3.3. Faz Kayması Yöntemi .....	13
3.4. Yükselme Süresi .....	17
3.5. Pin ve Çıg Fotodiyot Yapısı .....	20
3.6. Lazer İçin Optik Alıcı Lens .....	24
3.7. Fotodiyot İçin Optik Alıcı Lens.....	25
3.8. İlk Yükseltme Devresi .....	26
3.9. İkinci Eviren Yükselteç Devre .....	27
3.10. 360° Tarama Özelliğine Sahip RPLIDAR A1M8 .....	33
3.11. Ön Kenar Ayırıcı .....	34
3.12. Tepe Değeri Tahmini.....	35
3.13. Çapraz Korelasyon İşlemi .....	35
4.1. Lazer Sürücü Devre .....	38
4.2. Lazer Sürücü Devre PCB Şema.....	39
4.3. 555 Zamanlayıcı Devre .....	39
4.4. Lazer Sürücüye Gönderilen Dalga .....	40
4.5. Lazer Diyot Çıkış Grafiği .....	41
4.6. Alıcı Devre .....	42
4.7. Alıcı Devre PCB Şema .....	42

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Çizelge

### Sayfa

1.1. LIDAR sistemini oluşturan yapılar.....	1
3.2. Dalga boylarına göre fotodetektör türleri .....	15
3.3. Çeşitli fotodetektör parametleri .....	23



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

3B	3 Boyutlu
ADC	Analog-Digital Converter
CCD	Charged Coupled Device
GPS	Global Positioning System
LED	Işık Yayan Diyot
LIDAR	Light Detection and Ranging
MPPC	Multi-Pixel Photon Counters
NEP	Noise Equivalent Power
PCB	Baskı Devre Kartı
PWM	Pulse Width Modulation
SNR	Sinyal-Gürültü Oranı
TIA	Transimpedance Amplifier
TOF	Time of Flight

### Simgeler

### Açıklamalar

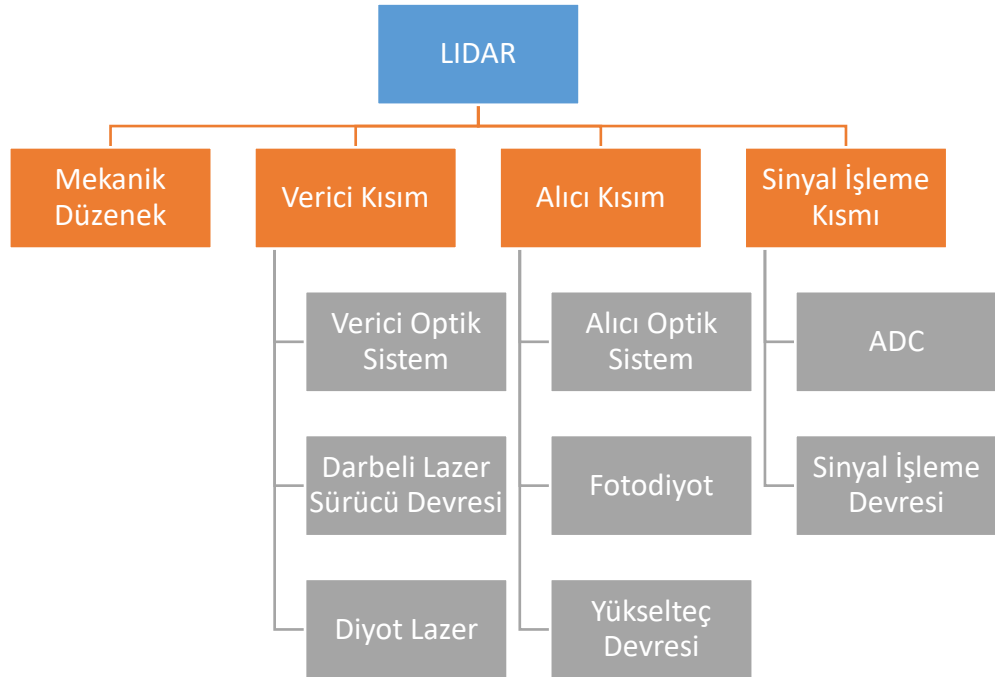
$c$	Işık Hızı
Hz	Hertz
$f$	Odak Uzaklığı

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

LIDAR kelime olarak radar kelimesinden ilham alınarak türetilmiştir. Mevcut radar sistemlerinde elektromanyetik radyo dalgaları kullanılırken LIDAR sistemlerinde radyo dalgası yerine lazer ışını kullanılmaktadır. Bundan ötürü LIDAR, ışık ve radar kelimelerinin İngilizce karşılıkları olan light ve radarın birleştirilmesiyle ortaya çıkmıştır. Özetle LIDAR için ışık ile ölçüm yapan radar sistemi denilebilir ve bu sistemler santimetre ile ifade edilen kısa mesafeler ile kilometre ile ifade edilen uzak mesafeleri ölçmek için kullanılan yüksek çözünürlüklü sistemlerdir.

LIDAR sistemleri ışın demeti gönderen bir verici devresi, yansıyan ışını alan bir alıcı devresi, gönderilen ışın ile yansıyan ışın arasında geçen süreyi hesaplayan zamanlayıcı devresi, sistem kontrolünü sağlayan ve mesafe ölçüm işlemini yapan bir mikroişlemciden oluşur (Schmid vd., 2008). LIDAR sistemini oluşturan yapılar Çizelge 1.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. LIDAR Sistemini Oluşturan Yapılar



Mesafe ölçümü yapmak için lazer diyota sinyal gönderilir. Sinyalin gönderilmesi ile birlikte zaman ölçme ünitesi sayma işlemini başlatır. Lazer diyotun yaydığı ışın herhangi bir nesneye çarptıktan sonra alıcı devrede bulunan fotodiyota ulaşır ve zaman ölçme ünitesi sayma işlemini bitirir. Yansıyan sinyal çok zayıf olduğu için yükselteç devrelerinde yükseltilir. Zaman ölçme devresi iki sinyal arasında geçen süreyi hesapladıktan sonra süre bilgisi, mesafeyi hesaplamak için mikroişlemciye gönderilir.

LIDAR, elektromanyetik enerji kaynağı olarak lazeri kullanır. Lazerin kısa dalga boyu ve az saçınım yapmasından dolayı ölçüm sonuçları diğer yöntemlere göre daha doğru ve yüksek çözünürlükte olacaktır. Ek olarak, çeşitli dalga boylarında lazerler mevcut olmasından dolayı lazerlerin kullanım alanları oldukça fazladır.

LIDAR sistemlerinde belirli bir dalga boyunda elektromanyetik sinyal gönderilerek aynı dalga boyuna sahip sinyaller alınarak mesafe, konum, hız ve geri saçılma yoğunluğu hakkında bilgiler elde edilmektedir (Hebert, 2000). LIDAR sistemleri, elektromanyetik radyasyonu optik radyasyonda kısa dalga boylarıyla iletir ve bu sayede sistemin çözünürlüğü daha yüksek olur (Schmid vd., 2008). Lazer ışının farklı dalga boylarına sahip olması, kısa dalga boylarıyla iletilmesi ve saçılma miktarının az olmasından dolayı LIDAR sistemlerinde kullanılmaktadır. LIDAR sistemleri kullanıcıya mesafe, konum ve saçılma miktarı hakkında bilgi vermek amacıyla birçok uygulamada kullanılır.

LIDAR temel olarak mesafe ölçümlerinde kullanılır. Bu mesafeler santimetre ile ifade edilen çok küçük mesafeler olabildiği gibi kilometre ile ifade edilen çok büyük mesafeler de olabilir. LIDAR sistemleri mesafe bilgisi sağlamasından ötürü otonom araçlarda kullanılmaktadır. Günümüzde araç üreticileri GPS, radar, mesafe sensörlerine ek olarak LIDAR'ı alternatif olarak araçlarında kullanmaktadırlar. LIDAR araca geniş açıyla tarama yapacak şekilde monte edildiği zaman, yol üzerindeki engellerin tespiti için kullanılmaktadır. Bu sayede araç yolda ilerlerken önündeki araç yavaşladığında veya yolda bir engel ile karşılaştığında otonom sistem LIDAR sayesinde bunlardan haberdar olur ve duruma göre fren yapabilir veya rotasını değiştirebilir. Ayrıca bulunduğu çevreyi hızlı bir şekilde tarayıp üç boyutlu bir harita oluşturabilir. Böylece otonom sistem oluşturulan harita sayesinde farklı rotalar belirleyebilmektedir.



LIDAR sistemleri hava araçlarına monte edilerek çeşitli uygulamalarda kullanılır. Örneğin bir hava aracına monte edilmiş LIDAR, sürekli uzaklık ölçümü yaparak topografik değerler elde edilmesini sağlar. LIDAR ile hava kirliliğini de ölçmek mümkündür. Hava aracından yere gönderilen ve yerden hava aracına yansıyan sinyallerin enerji miktarları karşılaştırılarak atmosfer kirliliği hakkında bilgi edinilebilir. Kirlilik fazla ise yansıyan sinyalin enerjisi azalacaktır. Ayrıca uçak enkazlarının yerinin tespitinde LIDAR'dan faydalanılabilir. Bazı boya maddeleri üzerine düşen lazer dalga boyunu değiştirerek yansıtırlar. Örneğin yeşil renkli lazer, boya tarafından kırmızı olarak yansıtılır. Üzeri önceden bu özellikte boya ile kaplanmış bir uçak enkazını bulmak için ortam yeşil lazerlerle taranır ve kırmızı ışığın yansıdığı yer enkaz noktası olarak belirlenebilir (Özek, 1995).

LIDAR başlarda kısa mesafeli ölçümlerde kullanılmasına rağmen şu an kullanım alanı oldukça geniştir. Meteorolojide havadaki kimyasalların ölçümlerinde, uydu üzerinden çok hassas haritalama işlemlerinde, mimarlıkta, petrol ve doğalgaz aramalarında, mesafe ölçümlerinde, orman ve su altı araştırma alanları gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Diğer sistemler gibi LIDAR sisteminin de eksi yönleri vardır. Bunların başında maliyetinin yüksek olması gelmektedir. LIDAR sistemlerin araçlarda kullanımında sundukları doğruluk çok yüksek olmasına rağmen kullanılan diğer sistemlere göre fiyatları oldukça yüksektir. Diğer problem ise yüksek veri akışı probleminin olmasıdır. Çok kesin taramalar yapmak için çok fazla veri akışı olacaktır. Bu verilerin işlenmesi için güçlü bilgisayarlara ihtiyaç vardır.

LIDAR, lazer darbeleri kullanarak bir nesne veya bir yüzeyin uzaklığını ölçmeye yarayan teknolojidir. LIDAR sistemleri donanım, yazılım ve tasarım yönünden farklı disiplinler içermesinden ötürü karmaşık ve pahalı sistemlerdir. Bu sebeple bu çalışmanın amacı düşük maliyetli devre elemanları kullanarak entegre elektronik ve optoelektronik devreler tasarlamak, geliştirmek ve test etmektir. Tasarlanan devreler pasif elemanlar, transistörler, işlemsel yükselteçler kullanılarak laboratuvar ortamında baskı kartı üzerine lehimlenerek test düzeneğine monte edilmiştir. LIDAR sisteminin donanım kısmını düşük maliyetle tamamladıktan sonra yazılım kısmı ile ilgilenilmiştir. Yazılım kısmında uçuş zamanı süresini doğru belirlemek için çeşitli algoritmalar incelenerek algoritmanın mesafe ölçümüne etkisi üzerine bilgi birikimi sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasının giriş kısmında tezin amacından bahsedilmiştir. İkinci kısımda bu alanda yapılan çalışmalarla ilgili literatür araştırmalarına yer verilmiştir. Üçüncü kısımda literatürde yer alan mesafe ölçüm tekniklerinin avantajları ve dezavantajlarından, LIDAR sistemini oluşturan elektronik malzemelerin neler olduğuna ve bu malzemeleri seçerken nelere dikkat edilmesi gerektiği üzerinde durulmuştur. Ayrıca daha doğru sonuç elde etmek amacıyla kullanılan mesafe ölçüm algoritmalarının kullanımından bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde elde edilen deney sonuçlarına yer verilmiştir. Deney sonunda alınan değerler Matlab programı ile çizdirilmiştir. Son kısım ise bulguların sonuçlarını ve bu sonuçlar doğrultusunda çalışmaya ek olarak yapılabilecek önerileri içermektedir.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Nejad ve Olyae (2008) çalışmalarında düşük gürültülü ve yüksek hassasiyete sahip bir uzak mesafe ölçüm cihazı tasarlamışlardır. Verici devresinde 1064 nm dalga boyuna sahip bir lazer kullanmışlardır. Alıcı devrede ise silikon çığ fotodiyot kullanılmıştır. Zemax ve C++ yazılımları ile ZnS/MgF<sub>2</sub> optik filtre tasarımı yapmışlardır. Cihaz saniyede maksimum 20 örnek alabilmektedir.

Lopez (2012) çalışmasında maliyeti düşük, darbe genişliği kısa olan bir uzaktan ölçüm cihazı yapmak için elektronik ve optoelektronik devreler tasarlamıştır. Yaptığı ölçüm cihazı az güç tüketimine sahip, hızlı ölçüm yapabilen, hafif ve 60 metreye kadar ölçüm yapabilen bir cihazdır. Cihaz, verici devreden objeye bir sinyal gönderir ve yansıyan sinyal alıcı devreye ulaşana kadar geçen süreyi hesaplayarak ölçüm yapar. Çalışma, lazer ışınının kısa ve güçlü darbelerini hedefe gönderen bir ışın yayan devre, hedef nesneden yansıyan ışını alan ve bu sinyali yükselten bir alıcı devre, gönderilen sinyal ile yansıyan sinyal arasındaki süreyi ölçen bir zamanlayıcı devre ve sistem kontrolünü sağlayan, mesafe ölçümünü yapan bir mikroşlemciden oluşur.

Kaldén ve Sternå (2015) çalışmalarında çevresini 360° tarayabilen ve maliyeti düşük bir ürün ortaya çıkarmaya çalışmışlardır. Ürün 0,05 metrelik bir ölçüm hassasiyetiyle 0,5 metre ile 5 metre arasında bir ölçüm aralığına sahiptir. Ürün 360° görüş alanını 1 derecelik açısal çözünürlük ile taramaktadır. Bu ürün için belirledikleri maksimum bütçe 120 Euro'dur. Çalışmalarında yaptıkları zaman ölçme, verici ve optik devreler ile hedefledikleri ölçümleri elde etmişlerdir. Fakat yansıyan sinyal çok zayıf olduğu için sinyalin güçlendirilmesinde problemlerle karşılaşmışlardır.

Jang vd. (2013) LIDAR'ı bir mesafe ölçüm cihazı olarak kullanmak için LIDAR'ın mesafe, doğruluk ve çözünürlük parametrelerinin iyi hesaplanması gerektiğini belirtmiştir. Gönderilen sinyalin ışın yoğunluğu arttıkça ölçülen mesafinin uzunluğu da arttığı için LiIDAR'ın optik tasarımı iyi tasarlanmalıdır. Optik tasarımın yanı sıra doğru ölçüm yapabilmek için elektronik devre tasarımı da iyi olmalıdır. Çünkü ölçüm mesafesine göre değişen fotoelektrik akım ölçüm hatalarına neden olabilir. Çalışmalarında yüksek

çözünürlük ve doğrusallık elde etmek amacıyla optik sistem tasarımı, sinyal işleme alanında çalışmalar yapmışlardır.

Kilpelä (2004) çalışmasında ölçüm sonuçlarını kısa sürede elde etmek amacıyla tek darbe hassasiyetini mm düzeyinde ölçmek istemiştir. Tek darbe hassasiyetini arttırmak için yansıyan sinyalin alıcı devreye daha hızlı ulaşması gerektiğini belirtmiştir. Bu sebeple lazer vericisinin optik darbelerinin daha dar ve daha güçlü olması gerektiğine çalışmasında yer vermiştir. Ayrıca alıcı devrenin bant genişliğinin de olabildiğince yüksek olması gerektiğini belirtmiştir.

Konolige vd. (2008) açık havada, ışık altında ve bazı kapalı ortamlarda çalışabilen, 360° ortamı tarayan, minimum 0,2 m, maksimum 6 m'ye kadar mesafe ölçümü yapabilen ve açısal çözünürlüğü 1° olan, saniyede 4000 örnek alan, küçük, az güç tüketimi olan, düşük fiyatlı yaklaşık 30 Dolar altında bir ürün ortaya çıkarmaya çalışmıştır.

Tez ile ilgili çalışmalara başlamadan önce firmaların yapmış oldukları LIDAR'lar ve LIDAR'ların özellikleri incelenmiştir. İlk olarak SICK firmasının üretmiş olduğu NAV245 ürünü incelenmiştir. Bu ürün küçük ve orta ölçekli mesafelerde hassas ve güvenilir şekilde ölçüm yapan bir cihazdır. Bu ürün içerisinde ışık kaynağı olarak 905 nm dalga boyunda lazer diyot bulunmaktadır. İç ve dış ortamlarda 30 metreye kadar mesafe ölçümü yapabilmektedir. Cihaz dâhili navigasyona sahiptir. Ayrıca reflektörlü de çalışabilir. Cihazın tarama açısı 270 derecedir. Tarama frekansı 15 Hz, hassasiyeti 10 mm ile 1 cm arasındadır. Çalışması için gerekli gerilim 10,8 V ile 30 V arasında değişebilmektedir. Bu ürün genellikle temizlik robotu ve mal taşıma sistemlerinde kullanılmaktadır. İçerisindeki dâhili ısıtıcı sayesinde ve yüksek titreşime karşı dayanıklılık gibi özelliklere sahip olmasından ötürü açık alanda ve soğuk hava depolarında kullanıma uygundur.

SICK NAV350 ürünüde, NAV245 gibi ışık kaynağı olarak 905 nm dalga boyunda bir lazer kullanılmıştır. Sick Nav350 ürünü genellikle iç ortamlarda kullanılmak amacıyla tasarlanmıştır. Nav245 ürünü 270° tarama açısına sahipken Sick Nav350 ürünü 360° tarama açısına sahiptir. Tarama frekansı 8 Hz ve hassasiyeti 4 mm'dir. İç ve dış ortamlarda 70 metreye kadar ölçüm yapabilmektedir. Çalışması için gerekli gerilim 24 voltur.

Hokuyo URG-04LX-UG01 ortam taramasında kullanılan bir lazer sensördür. Sensörün ışık kaynağı 785 nm dalga boylu kızılötesi lazerdir. Tarama alanı maksimum yarıçapı 4000 mm olan 240 derecelik yarım dairedir ve tarama frekansı 10 Hz'dir. Dâhili navigasyona sahip değildir. Reflektörlü kullanılabilir. İç ortamda 10 metreye kadar ölçüm yapabilirken dış ortamda 8 metreye kadar ölçüm yapabilmektedir. Besleme voltajı 5 voltur. Hafif ve küçük boyutundan dolayı robotik alanında yapılan çalışmalar için uygundur.

Hokuyo URG-04LX-UG01 mesafe ölçüm yöntemi olarak faz farkı yöntemini kullanır. Faz farkı yöntemi, nesnenin renginden ve yansımından az etkilendiği için daha doğru ölçümler verir. Ürün 360° dönebilme özelliğine sahiptir. Tarama frekansı normalde 5,5 Hertz olmakla beraber maksimum 10 Hertz'e kadar çıkarılabilir.

RPLIDAR A1, Slamtec tarafından geliştirilen düşük maliyetli iki boyutlu bir lazer tarayıcıdır. Sistem 6 metreye kadar 360 derece tarama yapabilmektedir. Üretilen iki boyutlu nokta bulutu verileri; haritalama, yerleştirme ve nesne-ortam modellemesinde kullanılabilir. Robotlarda navigasyon amacıyla ve üç boyutlu ortam modellemesinde kullanılır.

Benewake TF Mini Micro LIDAR modülü ışık kaynağı olarak 850 nm dalga boyuna sahip bir lazer kullanmaktadır. TF Mini ürününün algılayabileceği maksimum uzaklık 12 metredir ve 6 metrede 100 Hz örnekleme çözünürlüğü sağlar. Sinyal, parazitlerden etkilenmez ve dış ortamda rahatça kullanılabilir. Çalışması için gerekli besleme gerilimi 5V'tur. Bu ürün mesafe ölçümü için uçuş süresi ölçüm prensibi ile çalışır. Uçuş süresi prensibi şu şekilde çalışır. Lazerden nesneye doğru kızılötesi bir ışın gönderilir ve bu ışın nesne tarafından yansıtılır ve alıcı devreye ulaşır. Lazer ışınının gönderilmesi ve alınması arasında geçen süre hesaplanarak mesafe ölçümü yapılır. Bu ürün insansız hava araçlarının yerden yüksekliğini ölçmede, makine kontrolünde, güvenlik sensörlerinde ve robotların navigasyonu için kullanılır.

LIDAR-Lite v3, Garmin firması tarafından üretilen küçük boyutlu ve yüksek performanslı optik mesafe sensörüdür. Robot, drone ve insansız araç uygulamaları için iyi bir üründür. Kullanımı basit olan bu sensörün ölçebileceği maksimum uzaklık 40 metredir.

Güç tüketimi çok azdır ve ölçüm esnasında 130 mA kadar akım çeker. Bunlara ek olarak sensör konfigüre edilerek hassasiyet, menzil ve ölçüm süresinde değişiklikler yapılabilmektedir. LIDAR-Lite v3 modülünde 905 nm dalga boyunda ve 12,5 mm optik diyaframlı lazer bulunmaktadır. 5V DC gerilimde sürekli ölçüm halinde yaklaşık 100 mA akım çeker. I2C ve PWM çıkış bulunmaktadır. Şekil 2.1.'de farklı firmalara ait LIDAR ürünleri gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Farklı Firmalara Ait LIDAR Ürünleri

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde mesafe ölçümünde kullanılan tekniklerin özellikleri hakkında ve LIDAR sistemini oluşturan elektronik devre elemanlarının seçiminde dikkat edilecek hususlar hakkında çalışmalara yer verilmiştir. Ayrıca daha doğru sonuçlar elde etmek amacıyla mesafe ölçüm algoritmaları üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

#### 3.1. Mesafe Ölçüm Teknikleri

Lazer algılama ve mesafe ölçüm sistemleri; nesne algılama, konum ve geri saçılma gibi bilgileri elde etmek amacıyla kullanılır. Bir nesneye olan mesafe veya menzil, bir lazer darbesinin ışık hızında havada yayılması, nesneye çarparak yansması ve iletim kaynağındaki bir optik alıcıya dönmesi için geçen süre ölçülerek bulunur. Işık hızında ilerleyen bir sinyalin doğru uçuş zamanını ölçmek zordur ve kesin ölçümler tutarlı bir şekilde elde edilemez (Jordan, 1978; Zhi, 2008, Csanyl, 2007). İlerleyen bölümlerde zaman aralığını tahmin etmek için LIDAR sistemlerinde yaygın olarak kullanılan çeşitli algoritmalar bahsedilecektir. Bu yöntemlerden bazıları verileri topladıkça işler. Bu yüzden gerçek zamanlı işlem yaparlar (Csanyl, 2007; Richmond, 2010, Cho, 2006). Bazı yöntemler ise verileri toplar ve daha sonra zaman aralığını tahmin etmek için dijital sinyal işleme algoritmalarını uygular (McMahon vd., 2008). Bosch ve Leccure (1995) optik mesafe ölçüm tekniklerini uçuş zamanı, üçgenleme ve faz kayması olarak üç gruba ayırır.

##### 3.1.1. Uçuş Süresi Yöntemi

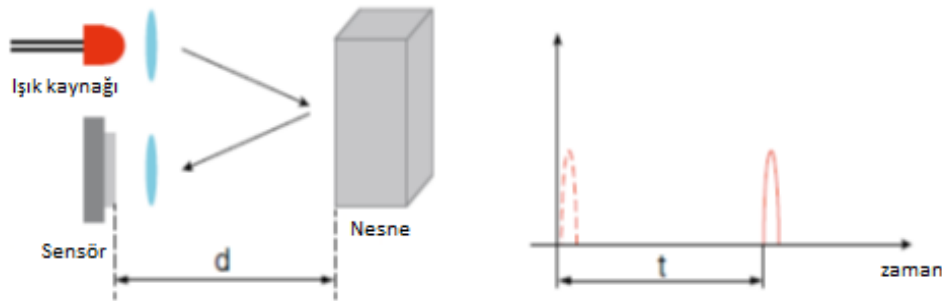
Uçuş süresi yöntemi en yaygın kullanılan ve anlaşılması en kolay olan yöntemlerden bir tanesidir. Bu yöntemde lazer darbeleri kullanılarak bir nesne veya bir yüzeyin uzaklığını ölçmek amaçlanır. Uzaklığı ölçülecek nesne ya da yüzeye gönderilen lazer darbesinin gönderiliş zamanı ile nesneye çarpıp gelen yansımanın tekrar kaynağa ulaşma süresi arasındaki fark sayesinde uzaklık ölçülür (Goldstein vd.,1967). Gönderilen sinyal aynı yolu iki defa aldığı için zaman ikiye bölünür.  $c$  ışık hızı,  $t$  zaman ve  $d$  mesafe olmak üzere mesafe aşağıdaki formül ile hesaplanır (Amann vd., 2001).

$$d = c \cdot \frac{t}{2} \quad (3.1)$$

Uçuş süresi yöntemi ile uzun mesafe ölçümleri yapabilmek için yüksek lazer gücü gerekir. Uçuş süresi yöntemi yüksek ölçüm aralığı sağlar. Uçuş zamanı yönteminde ölçülecek zaman aralıkları çok kısa ve gereken doğruluk pikosaniye mertebesinde olduğu için hızlı, kararlı elektronik ve optoelektronik devrelere ihtiyaç vardır. Lazer darbesinin güçlü olması göz sağlığına zarar verebileceği için kullanılırken dikkat edilmelidir ve lazere çıplak göz ile bakılmamalıdır. Zaman ölçüm ünitesi çok hızlı ölçümlerde yüksek enerji tüketiminden dolayı soğutma ile ilgili problemlere neden olabilir. Enerji tüketimi 20 watta kadar çıkabilir (Palojärvi, 2003). Şekil 3.1.'de bu yöntemin çalışma prensibi gösterilmiştir.

Bu yöntemde tek seferde bir darbe gönderildiği için ölçüm hızı sınırlıdır. Fakat ışık hızı çok yüksek olduğu için ölçüm hızını arttırmak mümkündür. Bazı ölçüm metotları ile ölçüm hızı daha hızlı gerçekleştirilebilir.

Zamanı kesin olarak ölçmenin birkaç yolu vardır. Bu teknolojiyi kullanan ve lazer üretimi yapan birçok şirket, bu projenin bütçesi ve kapsamı dışında kalan kendi uygulamalarına özgü bütünleşmiş devreler tasarlamışlardır. Bununla birlikte, zaman-dijital dönüştürücüler veya zaman ölçüm birimleri olarak adlandırılan bazı bütünleşmiş devreler de mevcuttur. Fakat bu ürünler piyasada yaygın değildir ve fiyatları oldukça yüksektir.



Şekil 3.1. Uçuş Süresi Yöntemi



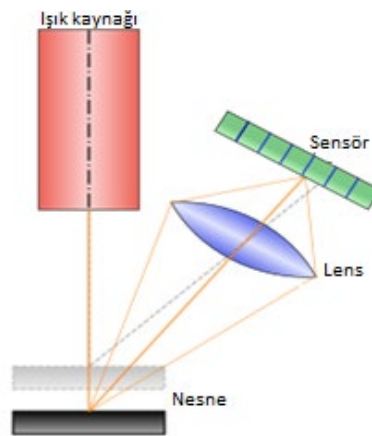
### 3.1.2. Üçgenleme Yöntemi

Üçgenleme yöntemi Şekil 3.2.'de gösterilmektedir. Lazerden gönderilen ışın, toplayıcı bir mercekle toplanır ve hedef yüzeyde bir lazer noktası oluşturur. Detektör üzerindeki lazer noktasının konumuna bağlı olarak, mesafeyi belirlemek için 3.2.'deki denklem kullanılır (Buzinski vd., 1992).

$$R = R_0 - \frac{f \Delta x}{\Delta x \cos(\theta) + d \sin(\theta)} \quad (3.2)$$

Nesnenin LIDAR sisteminden uzaklığı  $R$ ; lazer ve detektör arasındaki açı, odaklama merceğinin odak uzunluğu ve lazer spot görüntüsünün detektör üzerindeki konumu kullanılarak hesaplanır.

Bu yöntemde ölçümü yapılacak mesafe arttıkça ölçüm doğruluğu azalmaktadır. Bu yüzden genellikle kısa mesafeli ölçümlerde tercih edilmektedir. Üçgenleme yöntemi, uçuş süresi yöntemine göre daha az menzile sahip olmasına rağmen kısa mesafeli ölçümlerde ölçüm hassasiyeti daha yüksektir. Uçuş süresi yönteminde hassas uzaklık ölçümü milimetre seviyesindeyken üçgenleme yönteminde bu değer  $10^{-5}$  m seviyelerinde olabilmektedir.



Şekil 3.2. Optik Üçgenleme Yöntemi

### 3.1.3. Faz Kayması Yöntemi

Faz kayması yöntemi mesafe ölçmek için kullanılan diğer bir yöntemdir. Bu yöntemde iletilen ve yansıyan sinyaller arasındaki faz farkı alınarak mesafe ölçümü yapılır. Modülasyon frekansı  $f_0$ , hedef uzaklığı  $d$  ve kırılma indisi  $n$  olan bir sistemde faz farkı aşağıdaki denklemlerle hesaplanmaktadır.

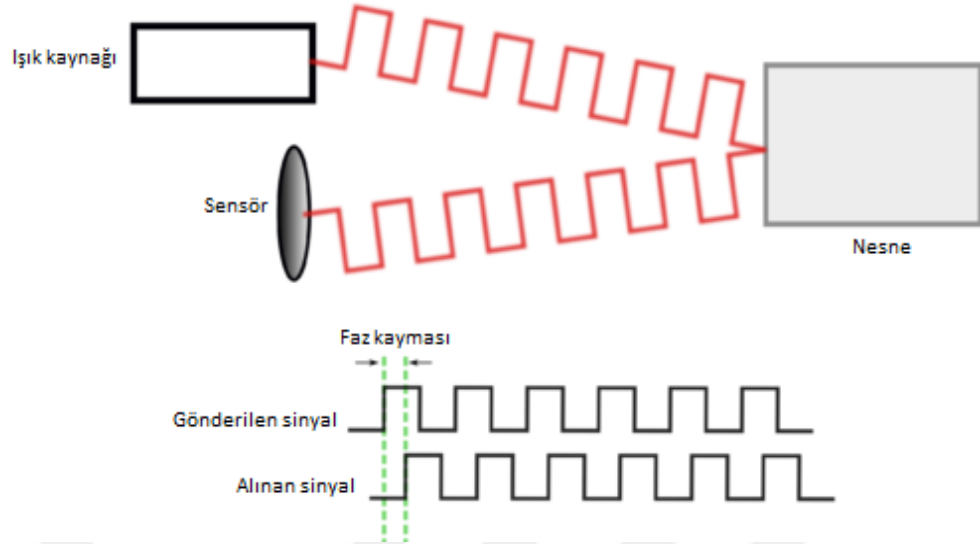
$$\Delta\phi = \frac{4\pi n f_0 d}{c} \quad (3.3)$$

Mesafe ve faz farkı arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$d = \frac{c \Delta\phi}{n 4\pi f_0} \quad (3.4)$$

Mesafe ölçümünün doğruluğu modülasyon frekansına bağlıdır. Çoğu zaman, doğrudan akım miktarını değiştirerek lazeri modüle etmek mümkündür. Faz kayması yönteminin çözünürlüğü ne kadar yüksek olursa mesafe ölçümü o kadar hassas olur. Yansıyan sinyalin tepe değeri önemlidir. Fotodiyotların merceklelerinin alanına ve lazerin aktarımına bağlı olarak yansıyan sinyalin gücü maksimize edilebilir ve böylece mesafeye ölçümündeki hatalar azaltılabilir. Elde edilen veri noktalarına zarar veren elektriksel gürültüler merceklelerle en aza indirilir.

Faz kayması yönteminde sürekli ve tahmin edilebilir bir sinyal kullanıldığı için ölçümlerin yapılması kolaydır ve sistem gürültüden en az miktarda etkilenir. Mesafe ölçümünün doğruluğu nesnelerin yansımaya katsayısı ile değişir. Yansımaya katsayısı ne kadar yüksek olursa ölçüm doğruluğu o kadar yüksek olur. Bu yöntem genellikle 10 metreye kadar olan nesnelerin uzaklığını ölçmede kullanılır. Şekil 3.3.'te faz kayması yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Faz Kayması Yöntemi

### 3.1.4. Method Seçimi

Çalışmamda kullanmak üzere seçtiğim yöntem uçuş süresi yöntemidir. Bu yöntemde, uzaklığı ölçülecek nesne ya da yüzeye gönderilen lazer darbesinin gönderiliş zamanı ile nesneye çarpıp gelen yansımanın tekrar kaynağa ulaşma süresi arasındaki fark kullanılarak uzaklık ölçümü yapılır. Bu yöntem için kullanılacak devre maliyeti diğer yöntemlere göre daha ucuzdur. Her noktada birkaç ölçüm yaparak diğer yöntemlere göre daha doğru veriler almak mümkündür. Ayrıca yüksek hassasiyet ve SNR avantajı da vardır. Darbeli lazer kullanmak, sistemde göz güvenilirliğini sağlarken daha güçlü bir dönüş sinyali veren daha yüksek bir çıkış gücü sağlar. Optik tasarım kısmı, diğer iki yöntemden daha kolaydır. Zor olan kısım ise yansıyan sinyali temiz bir şekilde kuvvetlendirmek ve örneklemdir.

### 3.2. Alıcı Devre

Alıcı devrenin amacı, nesneden yansıyan lazer ışınlarını almak, alınan ışınları bir elektrik sinyaline dönüştürmek ve daha sonra uygun seviyelere yükseltmektir. Ayrıca, bu sinyal ile iletilen sinyal arasındaki faz farkını belirli bir doğrulukla ölçmelidir. Bu durum devre tasarımı üzerinde birçok kısıtlama getirmektedir. Bu bölümde seçilen devre topolojisi tanımlanacak ve değerlendirilecektir. Alıcı devre fotodiyot, işlemsel yükselteçler ve mercekten oluşur.

Fotodiyotlar gelen ışını, yani optik sinyali, eşdeğer bir elektrik sinyaline dönüştüren elemanlardır. İdeal olarak, bu optoelektrik eleman, SNR'yi sabit tutarak optik sinyali elektrik sinyaline çok hızlı bir şekilde dönüştürür. Sinyalin kuvvetlendirilmesi ve diğer işlemler için sinyalin bir kopyasını oluşturur. Fotodetektörler, ışık detektörü veya fotosensör olarak da adlandırılır. Bu diyotlar ters yönde çalışacak şekilde üretilmişlerdir. Detektörün p tarafı pilin negatif kısmına n tarafı ise artı kısmına karşılık gelir. Bu tür diyotlar ışığa karşı özel bir yapıya sahiptirler. Böylece diyotun üzerine ışık düştüğü zaman ışığı kolayca elektrik akımına dönüştürebilirler. Işıma girişi birimleri Lux, Watt veya mWatt/m<sup>2</sup> olabilir. Elektrik çıkış birimleri ise amper veya voltur. Her biri belirli bir uygulamaya uyarlanmış çeşitli diyotlar mevcuttur. Ne yazık ki hiçbiri ideal özelliklere sahip değildir. Bu nedenle uygun fotodiyotu seçmek amacıyla çeşitli parametreler incelenmiştir.

#### 3.2.1. Detektör Özellikleri

Bu bölümde uygun fotodetektörü bulabilmek için detektörlerin özellikleri incelenmiştir. Detektör seçiminde dikkat ettiğim özellikler ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

### 3.2.2. Detektör Hassasiyeti

Detektör hassasiyeti en temel özelliklerdendir ve ışığa girişine karşılık detektör çıkışı olarak tanımlanır. Detektörden detektöre detektör hassasiyeti farklılık gösterir. Genellikle gelen ışığın açısındaki değişimlerden, yansıyan yüzeyin farklılıklarından dolayı sabit olmayan bir özelliktir. Sabit olmadığı için genellikle foton enerjisine karşı dalga boyu şeklinde grafiksel gösterimi yapılır. Bundan dolayı fotodetektör seçerken kullanılan dalga boyunu algılayabilecek detektörler seçilmelidir. Detektör hassasiyeti hangi tür detektör kullanılacağını belirleyen bir parametredir. LIDAR uygulamalarında genellikle pin ve çığ(APD) fotodiyot kullanılır. Çığ fotodiyotların ışığa karşı hassasiyetleri pin diyotlara göre daha yüksektir. Bu durum çığ diyotları ön plana çıkarmasına rağmen gürültü seviyesinin çığ diyotlarda daha fazla olmasından dolayı tercih edilmemişlerdir. Çalışmada düşük maliyetli ve az gürültüye sahip olan pin detektör kullanılmıştır. Çizelge 3.2.'de farklı malzemelerden yapılmış çeşitli diyotlar ve dalga boyları verilmiştir.

Çizelge 3.2. Dalga boylarına göre fotodetektör türleri

Fotodetektör Türü	Dalga Boyu
Silikon PIN	550-850 nm
Silikon PIN	850-950 nm
InGaAs	1310-1550 nm
InGaAs APD	1310-1550 nm
Germanium	1000-1500 nm

### 3.2.3. Kuantum Verimi

Bir fotonun, detektör akımına katkıda bulunacak elektron ve oyuk çifti oluşturma olasılığıdır. Aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$n = \frac{I_{\text{ÇIKIŞ}}/q}{\frac{P_{\text{GİRİŞ}}}{hf_{\text{opt}}}} = \frac{I_{\text{ÇIKIŞ}}}{q} \cdot \frac{h \cdot f_{\text{opt}}}{P_{\text{GİRİŞ}}} \quad (3.5)$$

Burada,

$P_{GİRİŞ}$ : Detektör girişindeki optiksel güç

$I_{ÇIKIŞ}$ : Detektör çıkışındaki foto akım

$h$ : Planck sabiti ( $6.63 \times 10^{-34}$  Joule.sn)

$q$ : Elektron yükü ( $1.6 \times 10^{-19}$  Coulomb)

$f_{opt}$ : Sinyal frekansı

### 3.2.4. Frekans Yanıtı

Frekans yanıtı, ışığa yanıt olarak parçanın çıktı spektrumunun nicel ölçümüdür. Kesim frekansı, bant genişliği, sinyalin yükselme ve düşme zamanı olarakta isimlendirilir. Hızlı bir detektör yüksek frekansa sahipken yavaş bir detektör daha düşük bir frekansa sahiptir. Hızlı bir detektör zaman domaininde hızla değişen sinyalleri daha hızlı bir şekilde yeniden üretebilir. Bir fotodiyotun frekans yanıtı kullanılan malzemelerin kalitesine göre değişmektedir. Yüksek standartlarda üretilen ürünler yüksek frekans yanıtına sahiptir. Ürünlerin kalitesi arttıkça fiyatlarıda artmaktadır.

### 3.2.5. Gürültü Eşdeğeri Güç (Noise Equivalent Power)

Bir detektörün eşdeğer gücü(NEP), belirli bir dalga boyunda minimum optik sinyal gücüne ve algılayabileceği sinyal bant genişliğine göre hassasiyetinin bir ölçüsüdür ve çıkışta SNR=1 elde etmek için gereken optik güç olarak tanımlanır. Birimi  $W / \sqrt{Hz}$ 'dir. Daha zayıf sinyalleri tespit edebilmek için NEP değeri daha düşük detektörler kullanılmaktadır.

Tüm detektörler gürültü üretirler. Gürültü miktarı çalışma koşulları ve üreticisinden dolayı detektörden detektöre farklılık gösterir. Çalışmada kullanmak üzere seçilen detektörün gürültü seviyesi az olmalıdır. Çünkü gürültü miktarının fazla olması çıkış sinyalini olumsuz etkiler. Mesafe ölçümü yaparken yansıyan sinyalde gürültü miktarı fazla ise sinyalin yükselen kenarını tespit etmek zor olacaktır.

$$NEP = \frac{\text{rms gürültü seviyesi}}{\text{detektör tepkisi}} = \frac{Nrms}{R} \quad (3.6)$$

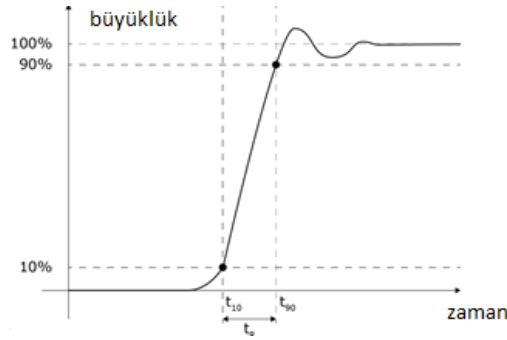
### 3.2.6. Yükselme Süresi (Rise Time)

Detektör çıkış akımının en yüksek değerinin %10'undan %90'ına ulaşabilmesi için geçen süreye yükselme süresi denir ve sinyal değişimlerine detektörün ne kadar hızlı yanıt verdiğinin bir ölçüsüdür. Aşağıdaki formül ile hesaplanır (Chen, 2003). Şekil 3.4.'de yükselme süresi grafiği verilmiştir.

$$tr = \frac{0.35}{\Delta f} \quad (3.7)$$

Burada,

$\Delta f$ : Detektörün frekans bandgenişliğidir.



Şekil 3.4. Yükselme Süresi

### 3.3. Fotodetektör Türleri

Piyasada yapıldıkları malzemedan kullanım alanlarına kadar birçok fotodetektör bulunmaktadır. İlerleyen bölümlerde çalışmada kullanmak amacıyla incelediğim fotodetektörler hakkında bilgileverilmiştir.

### 3.3.1. Fotodiyot

Üzerine ışık düştüğünde iletken olarak katot ucundan anot ucuna doğru akım geçiren elemanlara fotodiyot denir. Üzerine düşen ışık şiddeti arttığında ters yön sızıntı akım değeri artmaktadır. Fotodiyotlar, ışık etkisiyle katottan anoda doğru akım geçirirler. Germanyum veya silisyumdan üretilirler. Genellikle germanyum fotodiyotlar, ışığa karşı daha duyarlı olmasına rağmen karanlıkta sızıntı akımı daha fazla olduğu için pek tercih edilmezler.

Fotodiyotlar doğrultmaç diyotlara benzerler. Tek fark fotodiyotların birleşim yüzeyinin ışık alıyor olmasıdır. Bu elemanlar devreye ters bağlanırlar ve ışık ile ters yöndeki sızıntı akımlarının artması ile çalışırlar.

Fotodiyot girişine ışıma düşmediği durumlarda çıkış gözlemlenebilir. Gerektiği gibi soğutulmayan detektörlerde ısı etkisi ile oluşan bu akım karanlık akım (dark current) olarak adlandırılmaktadır ve sistem için bir gürültü kaynağıdır (Özek, 1995).

Fotodiyotlara gelen ışığın şiddetine göre katotdan anoda doğru akan düşük değerli akım değişir. Geçen akım, ışığın şiddetine bağlı olarak 100 mA ila 150 mA arasında değişirken gerilim 0,14 ile 0,15 volt arasında değişmekte olup çok küçüktür. Fotodiyotların çalışma hızı son derece yüksektir. Bu hızlı davranışları ve boyutlarının küçük olması sebebiyle fiber optik kablolar aracılığı ile veri iletiminde, ışık ölçüm aygıtlarında, ışık detektörlerinde, elektronik alarm düzeneklerinde, elektronik flaşlarda, optokuplörlerde, televizyon ve müzik setlerinin kumanda alıcılarında kullanılırlar.

### 3.3.2. Pin Diyot

Pin diyotlar ve çığ diyotlar optik sinyalleri akım sinyaline dönüştüren elemanlardır. Bu optik sinyaller uzaklık ölçüm uygulamalarında genellikle pA ile nA arasında değer alırlar (Carmo vd., 2008). Pin fotodiyotların bant genişliği ve ışığa karşı duyarlılığı oldukça yüksektir. Lazerin atomlardan kopardığı elektron ve oluşan delikler, eklem bölgesi yüksek derecede saf olması sebebiyle hiçbir engel ile karşılaşmadan direk pin dışına çekilirler. Bu yüzden yükselme ve alçalma süreleri kısadır. Böylece yüksek frekansta gelen lazer darbelerini ayırt etmek mümkün olur. Çığ diyotlar gibi yüksek besleme gerilimine ihtiyaç



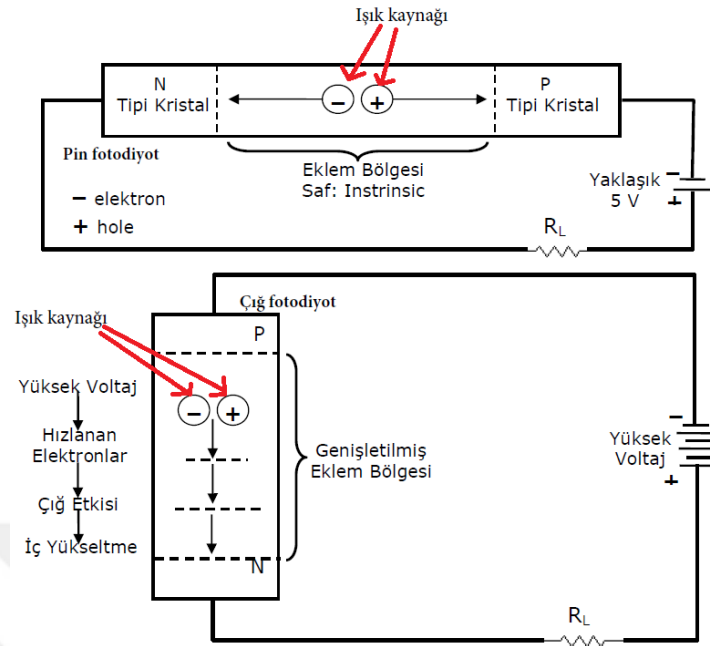
duymazlar (Wilson , 1989; Majumdar vd., 2008). Düşük besleme voltajı ile çalışırlar. Çalışmada fiyat ve kalite gibi parametreler ele alındığında Vishay Temd1040 marka pin fotodiyotun çalışma için yeterli olacağına karar verilmiştir.

### 3.3.3. Çığ Fotodiyot

Çığ fotodiyotlar yüksek hassasiyete sahip çok hızlı yarı iletken ışık sensörleridir (Bosenberg vd., 1997). Çığ fotodiyotlara büyük miktarda ters gerilim uygulandığı zaman tükenme bölgesindeki elektrik alan kuvveti 200 kV/cm kadar olabilir. Böylece, gelen bir foton tarafından bir elektron deliği çifti yaratıldığında her iki yük taşıyıcısının hızı artmış olur. İstatistiksel olarak elektron ve delik, bir ortalama yol aldıktan sonra kafes içindeki bir atomla çarpışacaktır ve böylece yüksek elektriksel alandan dolayı enerjiyi kafes içinde çarpıştığı atoma aktaracaktır. Bu yolla başka bir elektron-delik çifti oluşacaktır. Bu olaya çarpışma iyonizasyonu adı verilir. Hem orijinal hem de yeni oluşturulan elektron, çarpışana kadar elektrik alanı tarafından hızlandırılır ve daha sonra her bir elektron, yeni bir elektron çifti oluşturur. Akımdaki bu hızlı artış çığ etkisi olarak isimlendirilir ve iç kazancın oluşmasında etkilidir. Çığ fotodiyotlar çok fazla gerilim altında çalışacak şekilde üretilmektedir. Bu tip diyotlarda uygulanan voltaj miktarı arttıkça kazanç miktarı da artmaktadır.

Çığ etkisi oluşurken gürültüler meydana gelir. Gürültü miktarı, bileşen veri sayfasında verilen aşırı gürültü faktörü F olarak belirtilir. Bu durum iç kazancı olmayan pin diyotlardan daha fazla gürültüye sahip olduklarını gösterir. Ayrıca çığ fotodiyotun ihtiyaç duyduğu ters besleme gerilimi pin diyottan daha fazladır. Bu durum devre tasarımında problemlere neden olur.

Çığ fotodiyotlar sıcaklığa hassas olarak üretilir ve bu durum bu tür diyotlar için dezavantajdır. Uygulamadan uygulamaya değişmesine rağmen bu tür diyotlar kullanılırken ters gerilim uygulandığında bir sıcaklık sabitleyiciye sahip voltaj kaynağı kullanılması iyi olacaktır. Başka bir seçenek ise çalışma esnasında sıcaklığı sabit tutmak için termoelektrik soğutucu kullanmaktır. Bazı APD'lerde soğutma entegre devresi paket içerisinde gelmektedir. Şekil 3.5.'te pin ve çığ fotodiyot yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Pin ve Çiğ Fotodiyot Yapısı

### 3.3.4. Fototransistör

Fototransistörler teknik olarak üzerine ışık düştüğünde kollektör-emiter uçları arasındaki direnç değeri azalan elemanlardır. Genellikle bir yükün ışık ile kontrol edilmesinde anahtarlama elemanı olarak kullanılır. Fototransistörler normal transistörler gibi npn veya pnp tipinde üretilebilirler. Fototransistörlerin beyz ucuna ışık düştüğünde kollektör-emiter arasından akım geçişi sağlanır. Fotodiyotlardan farklı olarak gelen ışığın genliğini yükseltirler. Bu özellikleri sayesinde fotodiyotlardan çok üstündürler. Fotodiyotların üzerinden geçen akım miktarı mikroamper düzeyindedir. Fototransistörler ise miliamper düzeyinde bir akım geçişini mümkün kılar. Akımın büyük olması başka bir devreyi çalıştırmada kolaylık sağlar.

### 3.3.5. Fotodirenç

Fotodirençler tepkimede üzerine düşen ışık yoğunluğu arttıkça elektrik direnci azalan elemanlardır. İç ve dış yapıları yarı iletken elemanlara benzemektedir. Bu yüzden dalga boyuna bağlı hassasiyet gibi özellikleri kontrol edilebilmektedir.

Fotodirençler genel olarak doğru ışık seviyesi ölçümleri yapmak yerine ışığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla kullanılır. Direnç değerleri sıcaklıkla beraber yüksek miktarda değişime uğrar. Bunun nedeni mevcut termal enerji değerlik bandından iletkenlik bandına elektronların uyarılmasına neden olabilir ve böylece iletkenliği artırılabilir. Ayrıca fotodirençler milisaniye mertebesinde yükselme ve düşme sürelerine sahip yavaş cihazlardır. Yavaş cihazlar oldukları için yüksek frekanslı sinyalleri tespit etmek için kullanılmazlar.

### 3.3.6. Fotoçoğaltıcı Tüpler

Fotoçoğaltıcı tüpler (PMT), vakum tüp ailesinin bir üyesidir ve vakum tüplerinden özel olarak çok daha hassas ışığın, örneğin ultraviyole, görülebilir ve yakın kızılötesi dalga boylarındaki elektromanyetik spektrumunu kapsayan sensöre sahiptir. Bu detektörler gelen ışıklardan kaynaklı akım değerini bir miktar yükseltirler. Bu yükseltme sürecinde fotonların tek tek gözlemlenmesi mümkün olur ve ışığın akısı çok düşüktür. Çoğu vakum tüpünün aksine modası geçmiş deşillerdir ve günümüzde kullanıldıkları alanlar mevcuttur.

Yüksek verim, düşük gürültü, yüksek frekans tepkisi ve geniş yüzey alanı gibi özelliklerinden dolayı fotoçoğaltıcı tüpler nükleer fizik alanında, yüksek enerji fiziğinde, astronomide, kan testlerini de içeren medikal teşhislerde, medikal görüntüleme sistemlerinde, hareketli fotoğraf taramada, radar yayını bozma ve yüksek bitli tarayıcılarda kullanılmaktadır.

### 3.3.7. Fotodetektör Seçimi

Alıcı devre için fotodetektörde aranan özellikler hız ve hassasiyettir. İlk olarak, kullanılan lazerin dalga boyu için fotodetektörün hassasiyeti yüksek olmalıdır. Çalışmada kullanılmış olduğumuz lazerin dalga boyu 940 nm'dir ve bu dalga boyuna uygun fotodetektör

seçimi yapılacaktır. Dikkat edeceğimiz ikinci özellik ise bant genişliğidir. Çünkü modüle edilmiş sinyali uygun şekilde yeniden üretebilmek için yüksek MHz mertebesinde bant genişliğine ihtiyaç duyulacaktır. Bu iki özellik dikkate alındığı zaman fotoresistörler ile fototransistörlerin istenilen özelliklere sahip olmadığı görülür. Uygulamalarda problemler yarattığı için fotoçoğaltıcı tüpler elenmiştir. Bunun sebebi gün ışığına hassas olmaları ve gün ışığına maruz kaldıklarında zarar görmeleridir. Çalışma voltajlarının yüksek olması ve fiyatının pahalı olmasından dolayı çalışma için uygun görülmemiştir. Geriye pin ve çığ fotodiyotlar kalmıştır. Pin ve çığ fotodiyotlar için ayrıntılı inceleme yapılmıştır.

### 3.3.8. Pin Diyot ve APD Diyot Karşılaştırması

Kullanılacak olan fotodetektör mümkün olduğu kadar ışığa duyarlı olmalıdır. Çığ fotodiyotlar iç kazançları nedeniyle pin fotodetektörlere göre daha fazla kazanç sağlamaktadır. Normal şartlar altında bir çığ fotodetektör kullanılarak bine yakın kazanç faktörü elde etmek mümkündür. Fakat bu tip detektörler aynı zamanda yüksek gürültüye sahip oldukları için çalışmada kullanılmamıştır (Biber vd.,2001).

Pin diyot kullanılarak oluşturulan bir alıcı devresi ile çığ fotodiyot kullanılarak oluşturulan alıcı devresi birbirlerine benzerdir. Bunun sebebi her iki diyotunda akım kontrollü olmasıdır. Bu yüzden her iki devrede de ilk yükseltme kısmı transempadans yükselteç ile yapılacaktır. Bu iki diyot devresi arasındaki tek fark çalışmaları için verilmesi gereken voltaj değeridir. Pin diyotlar genellikle 5 V ile çalışırken çığ diyotlar 100 V gibi çalışmaları için yüksek voltaj değerlerine ihtiyaç duyarlar. Pin diyotların çalışması için yüksek voltaja gerek olmadığı için devre üzerinde kullanması daha kolay olacaktır. Ayrıca yüksek voltaj kullanmak PCB tasarımında iyi bir izolasyon yapılmasını gerektirir.

Gürültü eşdeğeri gücü bakımından iki diyot arasında büyük farklar yoktur. Aralarındaki fark diyot türünden ziyade ürün fiyatı ile ilgilidir. Pahalı ürünler daha düşük gürültü eşdeğeri gücüne sahipken ucuz ürünlerde bu değer daha fazladır. Yüksek fiyat üretim aşamasında ve kontrol aşamasında kendini belli etmektedir.

Proje için bant genişliği ve ışığa duyarlılık gibi özellikleri sağlayan her iki türde birçok detektör bulunduğu için kazanç ve gürültü performansı parametreleri ile

ilgileneceğiz. Pin diyotlar iç kazanca sahip olmadıklarından zayıf optik sinyal zayıf elektrik sinyaline dönüştürülecektir. Bu durum yükseltme aşamalarında düşük gürültü oluşturacaktır. Çünkü yansıyan sinyal zayıf ve eğer gürültü miktarı fazla olursa sinyal ayırt edilemeyebilir. Çığ diyotların iç kazancı vardır ve zayıf sinyali yüksek oranda kuvvetlendirirler. Ancak bunun yanında gürültü miktarı da artacaktır ve bu istenilen bir durum değildir. Çünkü yansıyan sinyalin yükselen kenarı tespit edilirken yanlışlıkla gürültü ile ölçümler yapılırsa ölçüm hatalı olacaktır.

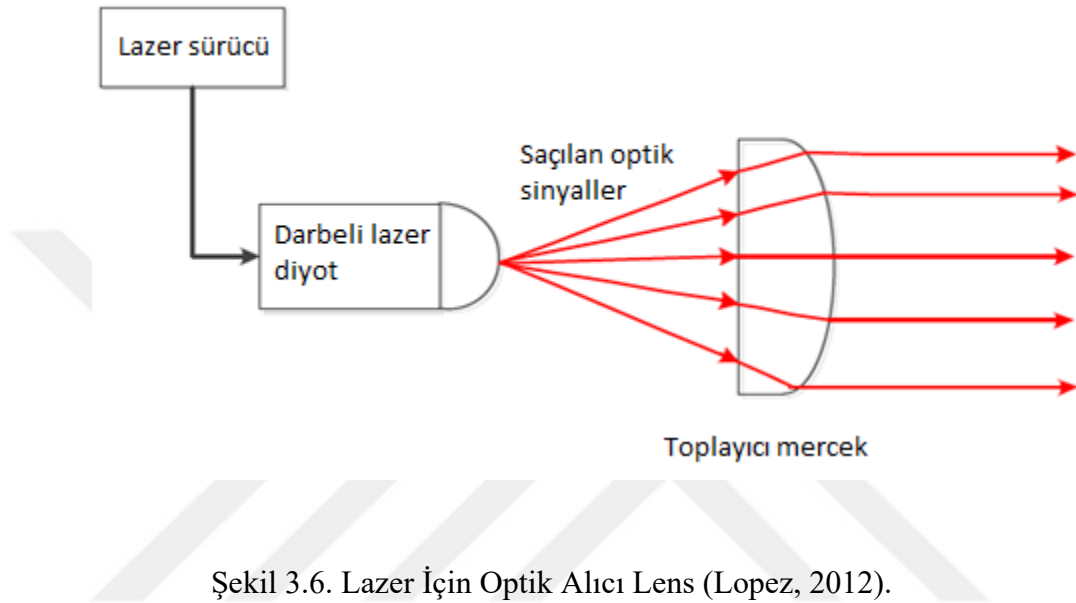
Her iki diyot, tipik olarak aktif alanda hiçbir ışık olmadığında nano amper seviyelerinde karanlık akım oluşturur. Daha yüksek fiyatlı ürünler genellikle daha düşük karanlık akıma sahiptir. Aynı zamanda detektörün bant aralığı da önemlidir. Geniş bant aralığına sahip bir fotodetektör, daha dar bir bant aralığına sahip detektöre göre daha düşük karanlık akıma sahiptir. Aynı zamanda, ters besleme gibi çalışma koşulları karanlık akımı etkileyebilir. Çığ fotodiyotlar pin fotodiyotlara göre daha fazla gürültü oluşturur. Çeşitli detektörlere ait özellikler Çizelge 3.3.'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Çeşitli fotodetektör parametreleri

Parametre	MPPC	APD	PIN fotodiyot
Mesafe	Uzun	Uzun	Kısa
Doğruluk	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Devre	Basit	Kompleks	Kompleks
Kazanç	$10^5$	10-100	1
Sıcaklığa duyarlılık	Orta	Yüksek	Düşük
Tepki Süresi	Hızlı	Orta	Orta
Ortam Işığı Bağışıklığı	Orta	Orta	Yüksek
Bant Aralığı	Dar	Geniş	Geniş

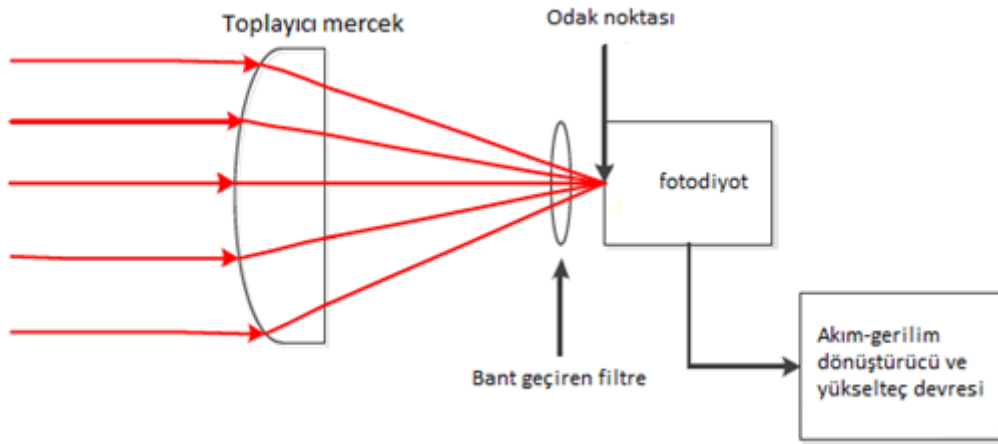
### 3.4. Optik Lensler

Lazer tarafından yayılan kızılötesi ışık darbeleri verici mercek tarafından toplanır. Lazer ışınlarının dağılmamasını sağlamak ve ışınların sapmasını en aza indirmek amacıyla optik lensler kullanılır. Optik lens örneği Şekil 3.6.'da görülmektedir.



Şekil 3.6. Lazer İçin Optik Alıcı Lens (Lopez, 2012).

Hedefte yansıyan optik sinyal, bir optik lens ve optik bant geçiren filtre ile toplanır, odaklanır ve filtrelenir. Dışbükey mercek, hedefte yansıyan lazer ışınını pin fotodiyota odaklamak için kullanılır. Bant geçiren filtre pin fotodiyota entegre edilmiştir ve çevredeki ışığı daha fazla engellemek için kullanılır. Optik lens ve bant geçiren filtre kullanmak, daha iyi bir sinyal - gürültü oranı elde etmek amacıyla kullanılır ve arka plan ışığının etkisini en aza indirir. Şekil 3.7.'de optik alıcı lens devresi görülmektedir.



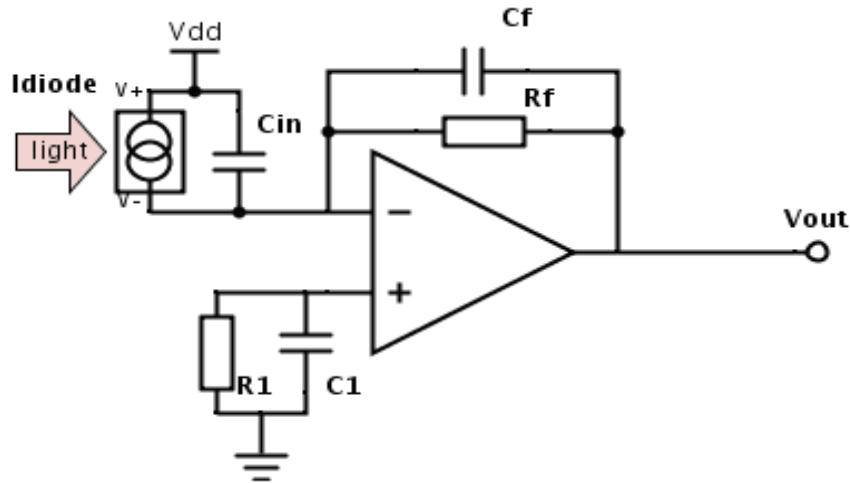
Şekil 3.7. Fotodiyot İçin Alıcı Lens (Lopez, 2012).

### 3.5. Sinyal Yükseltme Devresi

Yansıyan sinyalinin büyüklüğü hedef mesafenin karesiyle orantılı olarak azaldığından, fotodiyot tarafından üretilen küçük akımı tespit etmek için düşük gürültüye sahip yükseltme devresi gereklidir. Ayrıca, değişen doğruluk ve çözünürlükten dolayı GHz aralığında çok yüksek alıcı bant genişliği ve yüksek alıcı hassasiyetine ihtiyaç vardır. Bu nedenle alıcı hassasiyetini arttırmak için yüksek kazanç, düşük gürültüye ve geniş bant aralığına sahip bir yükselteç devresi kullanılmalıdır. Operasyonel yükselteçlere (op-amp) dayanan transempedans amplifikatörünün (TIA) tasarımı genellikle kazanç, gürültü ve bant genişliği gibi terimler göz önüne alınarak tasarlanır. Sonuç olarak, maliyeti arttıran bant genişliğini arttırmak için ultra düşük gürültülü ve yüksek hızlı bir op-amp gereklidir. Zayıf sinyali tek bir yükselteç devresiyle yeteri miktarda yükseltmediğimizden dolayı iki yükselteç devresi kullanılmıştır. Gelen sinyalin ilk olarak yükseltildiği kısma ilk yükseltme devresi, diğer yükseltme devresine ise ikinci yükseltme devresi adı verilmiştir.

### 3.5.1. İlk Yükseltme Devresi

İlk yükseltme devresinde, fotodiyot tarafından üretilen akım sinyali voltaja dönüştürüldükten sonra yükseltme işlemi yapılır. Bu tip yükselteçler transempedans yükselteç (TIA) adını alır. Bu aşama, alıcı zincirindeki ilk aşama olduğundan, Friis formülüne göre gürültünün etkisi çok fazla olacağı için kullanılan op-ampın gürültü katsayısı oldukça düşük olmalıdır (Groeneveld, 2010). Bu nedenle düşük akım gürültüsüne ve yeterli bant genişliğine sahip LM628 projede kullanılmıştır. Şekil 3.8.'de ilk yükseltme devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.8. İlk Yükseltme Devresi

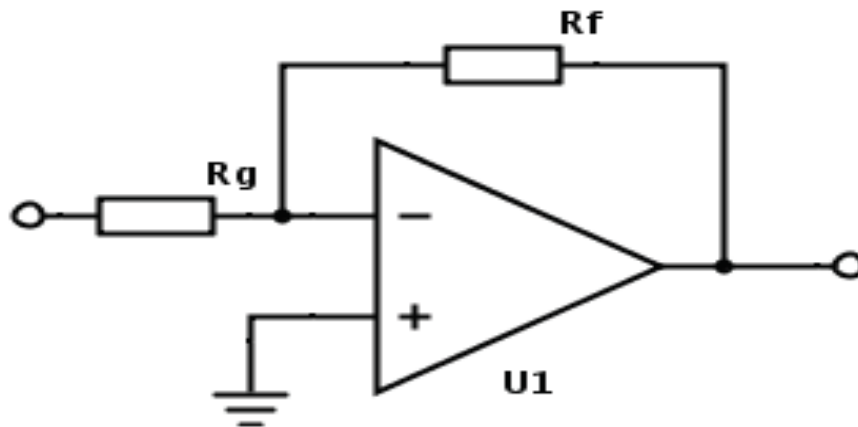
Herhangi bir DC voltaj yükselmesini engellemek için  $R_1$  direnci  $R_f$  direncine eşit olmalıdır. Böylece bu dirençlerle çıkıştaki tüm DC ofsetler ortadan kaldırılır.  $C_1$  kondansötürü evirmeyen girişe bağlıdır ve toprak görevi görür.  $R_1$  direncinin görevi oluşan gürültüleri engellemektir. Devrenin kazancı  $R_f$  ile belirlenir ve bant genişliği  $C_f \times R_f$  ile sınırlandırılır (Hasnain, 2002).  $C_f$  kondansatörü kararsızlığı önlemek için  $R_f$  direncine paralel bağlanır. Kararsızlığı önlemek amacıyla daha yüksek bir kapasitör seçilebilir. Hesaplanan değerlerde kapasitör kullanmak kararsızlık sınırında devrenin çalışması anlamına gelir ve



problemlere neden olabilir (Westerman, 2007). Bu nedenle hesaplanan değerden yüksek kapasitör kullanmak daha iyi olacaktır.

### 3.5.2. İkinci Yükseltme Devresi

Yukarıda belirtildiği gibi, birinci kısım yükseltme devresinde yeterli kazanç elde edilemez. Bunun sebebi bant genişliğini sınırlandıran  $C_f$  kapasitörünün eklenmesi değildir. İkinci bir yükselteç devresine ihtiyaç vardır ve burada gürültünün miktarı çok önemli değildir. Fakat sinyal hala zayıf olduğu için düşük gürültüye sahip op-amp kullanmak daha iyi olacaktır. Bu yüzden devrede kullanılmak için LM628 seçilmiştir. Burada  $R_f/R_g$  oranında yükseltme işlemi yapılır. Şekil 3.9.'da ikinci yükseltme devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.9. İkinci Eviren Yükselteç Devre

### 3.6. Verici Devre

Verici devrenin en temel görevi lazer diyot ışınlarını belirli bir frekansta göndermek ve sürekli yayılan lazer ışınlarını modüle etmektir. Lazer sürücü devresi lazerin kararlı, düşük gürültü ile istenilen frekansta sinyal gönderimini sağlamak amacıyla kullanılır. Lazerler hassas yapıları komponentlerdir. Bu sebeple besleme geriliminden fazla enerji verilmesi lazere zarar verecektir.

#### 3.6.1. Lazer Türleri

Lazer ışınları tek dalga boyuna sahip oldukları için monokromatik yapıdadır. Gönderilen ışın sapmaya ve dağılmaya uğramaz. Dalga boyunun kısa olması ışınların saçılmasını büyük miktarda azaltmaktadır Yüksek frekanslı ve kısa dalga boyuna sahip olmalarından dolayı birçok uygulamada lazerler kullanılır. Bir lazer diyot akım kontrollüdür. Bu durum, çıkış gücünün voltajdan ziyade akım tarafından kontrol edildiği anlamına gelir. Akım eşik akım değerinin üzerine çıktığında, diyot bir miktar doğrusal olarak ışık yaymaya başlar. Lazer diyotlar genellikle yüksek bir frekansta çalışmasından ötürü, çıkış gücünü kontrol etmek için darbe genişliği modülasyonu (PWM) gibi standart kontrol teknikleri kullanılmaz. Ayrıca, lazer diyodun çıkış verimliliği (amper başına optik watt miktarı) sıcaklık arttıkça azaldığından, ışıktan geri bildirim sıklıkla gereklidir. Gönderilen darbe çok kısa olduğundan dolayı lazerin darbeler arasında soğuması için zamana ihtiyacı vardır. Bu nedenle çıkış gücü zamanla fazla değişmeyecektir. Lazerin sağladığı güç miktarı lazer seçiminde önemlidir. Çünkü gönderilen sinyan ne kadar güçlüyse yansıyan sinyal de o kadar güçlü olur. Piyasada çalışma için birçok lazer çeşidi mevcut olmasına rağmen boyutu ve fiyatından dolayı diyot lazerler ve katı hal lazerleri incelenmiştir.

#### 3.6.2. Katı Hal Lazerleri

Bu tür lazerler, aktif ortam olarak katı haldeki lazer materyallerini kullanan lazerlerdir. Bu tür lazerler iletim malzemesi olarak iyonları kullanır. Bu iyonlar genellikle nadir elementler olarak bilinen Nd, Yb, Er gibi materyallerden, geçiş metallere ve Cr, Ti gibi elementlerden olduğu görülür. Bunun yanı sıra  $AL_2O_3$ , YLF( $YLiF_4$ ), YAG( $Y_3Al_5O_{12}$ ), LiSAF( $LiSrAlF_6$ ) gibi kristaller veya Silicate ( $SiO_2$ ), phosphate ( $P_2O_5$ ) gibi

bileşikler de kullanılır. Bu tür lazerlerin bir ucu yarı geçirgen ayna ile kaplıdır. Diğer ucu ise geçirgen olmayan bir ayna ile kaplanmıştır. Yapısal özelliklerinden dolayı spesifik bilgilerle ihtiyaç olduğundan dolayı bu tür lazerlerin kullanımı oldukça zordur. Ayrıca bu tür lazerler pahalı oldukları için çalışmada kullanılmamıştır.

### 3.6.3. Diyot Lazerler

Diyot lazerler bir kazanç ortamı olarak Galyum Arsenid (GaAs) yapısını kullanır ve doğrudan ışın elektrik akımı ile güçlendirilir. Bu durum diyot lazerlerin kontrol edilmelerini kolaylaştırır ve güç beslemelerinde fayda sağlar. Küçük boyutlu ve düşük fiyatlıdır. Katı hal lazerler ile karşılaştırıldığında ışın gönderme kalitesi daha düşüktür. Diyot lazerler kullanırken yanında bir mercekte kullanılmalıdır. Fiyatının düşük olması, küçük boyutu ve kullanım kolaylığı sebebiyle çalışmada diyot lazer kullanılmıştır.

### 3.6.4. Lazer Dalga Boyu

Lazer seçiminde dalga boyu önemlidir. Genel olarak farklı özelliklere sahip üç farklı dalga boyu vardır. Bunlar 650 nm, 850-950 nm ve 1550 nm dalga boyudur.

650 nm dalga boyundaki ışın harici bir ekipman kullanılmadan çıplak gözle görülebilir. Çıplak gözle ışının görülebilmesi geliştirme sırasında bir avantaj sağlar. Bu dalga boyunda fotodetektör az olduğu için nadir kullanılırlar.

850-950 nm dalga boyundaki lazerler yaygın olarak kullanılır. Bu nedenle piyasada birçok lazer ve detektör mevcuttur. Haberleşme sistemleri 850-950 nm dalga boyunda çalıştığı için darbeleri lazerler oldukça yaygındır. Bu sebeple bu dalga boyundaki bir lazeri uygun bir fiyata satın almak mümkündür. Bunlara ek olarak bu aralıkta çalışan lazerler silikondan üretilirler ve GaAs'den üretilen lazerlere göre daha ucuzdur. Bu bölgedeki lazerlerin çok fazla yaygın olmasının dezavantajları vardır. Örneğin çevredeki diğer uygulamalarda aynı dalga boyu kullanıldığı için gürültü miktarı fazla olacaktır. Bu dalga boyuna sahip ışınları çıplak gözle görmek mümkün değildir. İnsan veya hayvanların gözüne çarpması durumunda zarar verici olabilir. Bu nedenle lazerler kullanırken direk göze tutulmamalıdır.

1550 nm dalga boyu fazla kullanılan bir dalga boyu değildir. En önemli avantajı insan gözüne odaklanmamasıdır. Bu özelliği sayesinde 1550 nm dalga boyu insan sağlığı için güvenlidir. Lazer taşıyabildiği kadar gücü dışarıya yayar. 1550 nm dalga boyundaki ışınlar zararlı olmadığı için güç miktarında sınırlandırmaya gidilmez. Bu dalga boyuna sahip lazerler diğer iki dalga boyuna sahip lazerlere göre fazla yaygın olmadıkları için fiyat olarak pahalıdır. Ayrıca standart yarı iletken teknikleri kullanılarak 1550 nm dalga boyuna sahip lazer üretimi mümkün değildir. Bu nedenle üretim aşamasındaki zorluklardan ötürü fiyatı diğer lazerlere göre pahalıdır. Fiyatının pahalı olmasının diğer sebebi ise yapı malzemesi olarak silikon kullanılmamasıdır.

Bu incelemelere göre kullanılacak lazerin dalga boyu 850-950 nm aralığındadır. Bu dalga boyundaki lazerlerin piyasada yaygın olmasından dolayı fiyatları uygundur. Çalışmada kullanmak için istenilen performans kriterlerini sağlamaktadır. Göz sağlığı için zararlı olmaları nedeniyle çıkış gücü sınırlandırılarak kullanılır.

### **3.6.5. Lazer Güvenliği**

Lazer ışını insan vücudunda özellikle göz bölgesinde zararlı olabileceğinden dolayı kullanılan lazerin dalga boyu önceden bilinmelidir ve kullanırken direk çıplak gözle bakılmamalıdır.

### **3.7. Mikroişlemci Birimi**

Mikrodenetleyiciler, LIDAR sisteminde işlerin algoritmik bir şekilde ve sırayla yapılmasında önemli bir rol üstlenirler. Onlarsız bir elektronik denetleme işlemi karmaşık ve yapılabirlikten uzak bir hale gelir. Mikrodenetleyiciler sadece elektronik sistemin denetlenmesi değil, toplanan verilerin depolanması, filtrelenmesi, yorumlanması ve uygun bir akış hızında diğer sistemlere aktarılmasında da önemlidir.

Çalışmaların farklı basamaklarında zaman zaman farklı denetleyicilerin kullanımına başvurulmuştur. Deney aşamalarında örneğin Arduino NANO işlemci kartı ile periodik sinyaller üretilmiş ve osiloskopta zamanlama analizleri yapılmıştır. Yine tekil veya periodik

olarak çoğul darbe sinyalleri üretilip, lazer sürme devre çıkışları, fotodiyottan gelen sinyallerin kuvvetlendirilmiş çıkışları gözlemlenebilmiştir.

Bir LIDAR sisteminin donanımsal ve yazılımsal istekleri dikkate alındığında 32 bitlik ARM tabanlı bir işlemcinin problemi çözebileceği varsayılarak çalışmalara başlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda STM32F103 işlemcisinin yeterli performansı gösterdiği kanaatine varılmıştır. Yapılan TDR uygulama çalışmaları da bunu doğrulamaktadır (Ulupınar vd.,2020).

Mikrodenetleyicinin LIDAR sistemindeki görevleri, zaman ölçümü işlemlerinin yapılmasını sağlamak, zaman ölçüm biriminden alınan zaman ölçüm değerini kaydetmek, zaman ölçümlerinin ortalamasını almak ve mesafeyi hesaplamak ile başlar. Mesafe hesaplandıktan sonra, veriler işlenerek belirli uzaklık profilinde nesnelere varsa uyarı çıkışı veya alarm çıkışı üretebilir. Veriler gerekirse ham veya yarı işlenmiş olarak bir seyrüsefer (navigasyon) işlemcisine gönderilerek haritalama, rota belirleme işlemlerinde kullanılabilir.

Mikrodenetleyici zaman ölçümü işlemlerinin yapılmasını sağlarken önce başla sinyali gönderir. Bu bir sayısal darbenin tırmanan kenarı şeklindedir. Bu sinyal hem lazer ışık darbesinin gönderilme prosesini başlatır, hem de yansıma ölçümleri değerlendirilmeye başlar. Yansıyan sinyal belirli bir eşik seviyesinin üzerindeyse ölçüm sonlandırılır. Bu çalışmada off-line yani kayıt sonrası değerlendirme tekniği kullanılmıştır. Önce sinyal ADC ile kaydedilmiş, kaydın sona ermesi “ölçüm sonlandırıldı” olarak değerlendirilmiştir. Bu elektronik devre tasarımlarını basitleştiren, yazılımsal esneklikler sağlayan bir tekniktir. Sinyal seviyeleri gerekiyorsa bir sonraki ölçümde artırılarak veya eksiltilecek kuvvetlendirici devresinin kazanç kontrolü de akıllı algoritmalarla sağlanabilmektedir.

Navigasyon amaçlı olarak kullanılacak LIDAR’larda işlemci seçilirken ve ölçme devreleri tasarlanırken gerekli performansı sağlayıp sağlayamayacakları önceden değerlendirmeye alınmalıdır. Örneğin dairesel olarak 1 derecelik açısal aralıklarla ve saniyede 15 tarama yapacak bir LIDAR için saniyede  $15 \times 360 = 5400$  ölçüm alınması ve işlenmesi gerekmektedir. Bu da her ölçüm ve değerlendirme işinin 185us den uzun sürmemesi anlamına gelmektedir. Arduino platformunun kullandığı ATMEGA328 gibi

16MHz hıza sahip 8 bitlik işlemciler deneysel çalışmalarda tek ölçümlük uygulamalarda iş görse de bu tür gerçek zamanlı performans uygulamalarında fazlasıyla yavaş kalmaktadır.

### 3.8. LIDAR'ın Navigasyon Uygulamalarında Kullanımı

Navigasyon amaçlı kullanılan LIDARlar 270° veya 360° ortamı tarama özelliğine sahiptir. Ortamı tarayan LIDARlarda motorun dönüş hızı istenilen çözünürlük değerine bağlı olarak senkronize edilmelidir.

Hareketli nesnelere yansıyan sinyallerin genlikleri kısa mesafelerde güçlüyken nesne uzaklaştıkça yansıyan sinyalin genliği azalır. Yansıyan sinyallerin genliklerindeki büyük farklılıklar hatalı ölçümlere neden olur. Daha doğru sonuçlar elde edebilmek amacıyla otomatik kazanç kontrol devreleri kullanılır. Kazanç kontrolü ile zayıf sinyaller daha kuvvetli yükseltilirken güçlü sinyallerin kuvvetlendirme oranı düşürülür. Bu işlem ile beraber tüm sinyallerin genlikleri yaklaşık olarak aynı ölçülebilir sınırlara getirilmektedir. Navigasyon amaçlı kullanılan LIDARların tarama açısı ve örnek sayısı uygulama türüne göre farklı değerler alabilir. Tarama açısı değerine göre hızlı ve küçük nesnelere LIDARların görüş alanının dışında kalabilir. Uygulama türüne göre istenilen tarama açısına sahip LIDARlar mevcuttur. Şekil 3.10.'da verilen RPLIDAR A1M8 360° tarama yapabilmektedir. Genellikle nesne ve çevre modellemek için kullanılır.



Şekil 3.10. 360° Tarama Özelliğine Sahip RPLIDAR A1M8

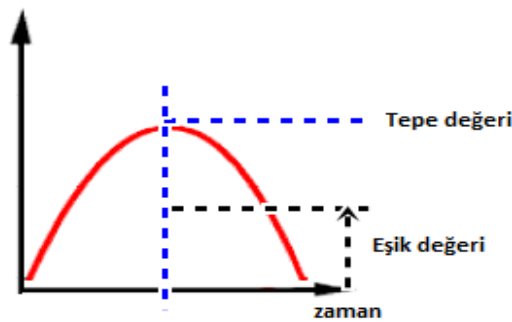
### 3.9. Mesafe Ölçüm Algoritmaları

Mesafe, hedefe gönderilen lazer darbesiyle alıcıya ulaşan yankı sinyali arasında geçen süre kullanılarak ölçülür. Zaman ölçümü yüksek hızda çalışan bir sayıcı ile gerçekleştirilir. İletilen ve algılanan lazer darbelerinin gönderildiği ve alındığı anda sayacı açma veya kapatma kararı, mesafe ölçümünün doğruluğunu etkiler. Bu nedenle, doğru ölçümler almak için çeşitli algoritmalar kullanılır. Literatürde var olan algoritma teknikleri aşağıda verilmiştir.

- Ön Kenar Ayırıcı (Leading Edge Discrimination)
- Tepe Değeri Tahmini (Peak Estimation)
- Çapraz Korelasyon (Cross Correlation)
- İnterpolasyon (Interpolation)

#### 3.9.1. Ön Kenar Ayırıcı (Leading Edge Discrimination)

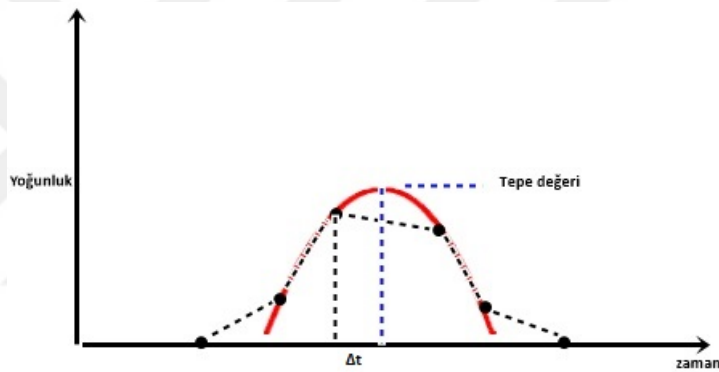
Bu yöntem kullanılırken ilk önce lazer darbesinin daha önce belirlenmiş eşik seviyesini geçtiği nokta bulunur. Lazer darbesi eşik seviyesine ulaştığı anda sayaç saymaya başlar ve geçen süre hesaplanır. Yansıma sinyali belirtilen eşik seviyesini geçtiğinde sayaç sayma işlemini bitirir. Ardından sayaç uçuş süresini gösterir. Bu yöntem çok basit olmasına rağmen gürültü ve yetersiz sayaç çözünürlüğünden dolayı darbe genişliği doğru ve kesin olarak ölçülememektedir. Şekil 3.11.'de ön kenar ayırıcı yöntem gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Ön Kenar Ayırıcı (Brown, 2010).

### 3.9.2. Tepe Değeri Tahmini (Peak Estimation)

Hedefe gönderilen ve yansıyan lazer sinyalinin tepe noktaları ayrı ayrı belirlenir. Sayaç her iki tepe noktası arasında sayma işlemi yapar ve uçuş süresini hesaplar. Zirve noktasının doğru tespiti, sistemde kullanılan analog-dijital dönüştürücünün çözünürlüğü ile doğrudan ilgilidir. Analog-dijital dönüştürücünün sınırlı çözünürlüğünden dolayı gerçek tepe noktası ile ölçülen tepe noktası arasında fark oluşacaktır. Bu problem, ayırık değerlerin interpolasyonu ile kısmen azaltılabilir. Bununla birlikte, interpolasyon algoritmaları tipik olarak gerçek zamanlı sistemler için optimize edilmemiştir. Ayrıca yansıma sinyalinin analog tepe noktası doğrudan bir karşılaştırıcı yardımı ile ölçülebilir. Şekil 3.12.'de tepe değeri tahmini yöntemi gösterilmiştir.



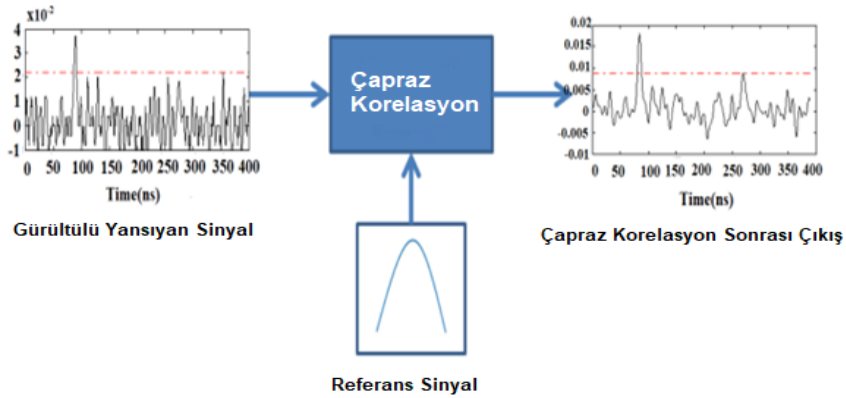
Şekil 3.12. Tepe Değeri Tahmini (Brown, 2010).

### 3.9.3. Çapraz Korelasyon (Cross Correlation)

Çapraz korelasyon işleminde darbeler kullanılarak uygun bir referans sinyali belirlenir ve yansıma sinyali ile referans sinyali arasında çapraz korelasyon işlemi yapılır. Gauss darbe modeli en yaygın kullanılan referans sinyal modelidir. ADC tarafından örneklenen yankı sinyali hafızaya kaydedilir. Daha sonra referans sinyal ile karşılaştırıldığında en yüksek korelasyon değeri yankı sinyalinin maksimum değerini verir. Korelasyon yardımı ile eko sinyalinde mevcut olan gürültü azaltılır. Şekil 3.13.'de gürültülü yansıyan sinyal, Gaussian referans sinyali ile çapraz korelasyon işlemine sokulmuştur.



Çapraz korelasyon sonrası sinyaldeki gürültü miktarı azalmıştır ve tepe değerini daha kolay tespit etmek mümkün olmuştur.



Şekil 3.13. Çapraz Korelasyon İşlemi (Brown, 2010).

Çapraz korelasyon işlemi ile LIDAR verilerinde en yüksek korelasyon dizini bulunur. Uygun bir filtrenin, gerçek yansıma darbesinin yerini doğru bir şekilde belirleme yeteneği, referans dalga formunun detayı ve şekli ile sınırlıdır (Burriss, 2006). LIDAR sistemindeki gürültü miktarını ters parabol, Gauss ve Poisson fonksiyonları olarak tanımlamak için referans dalga formu modelleri geliştirilmiştir (Jordan, 2009). Bununla birlikte, lazer vericisi, nesnenin yansıtma katsayısı, menzil ve optik alıcı gibi diğer parametreler yansıyan sinyalin şeklini etkiler. Sonuç olarak, tüm sistemler için tipik olan uygun bir referans dalga modeli seçmek çok zordur.

Çalışmada yansıyan sinyal osiloskop ekranında incelenmiştir. Korelasyon işlemi hassas bir işlem olması sebebiyle gönderilen sinyal ile osiloskobun sayacı senkron olmadığı için net ölçümler yapılamamıştır. Çalışmanın bu kısmında problemler ortaya çıkmıştır.

### 3.9.4. İnterpolasyon (Interpolation)

Dijital LIDAR sistemlerinde, gerçek darbe şekli veya tepe noktası analog-dijital dönüştürücü tarafından belirlenmediyse uçuş süresi hesaplanmasında ve yoğunluk değerlerinin bulunmasında hatalar ortaya çıkabilir. Örneğin, bir dijital tepe detektörü ayrı bir örnek seti üretmek ve yansıma sinyalinin maksimum değerini bulmak için uygun bir

örnekleme işlemi yapar. Yansıma sinyalinin gerçek tepe noktası iki örnek arasında herhangi bir yerde kalabilir. Bu nedenle, örnekleme hızı zamanlama çözünürlüğünü ve geri saçılma yoğunluğunu sınırlar.

İnterpolasyon, örnekler arasındaki noktaları tahmin ederek verileri örnekleme için kullanılır. Daha açık bir ifadeyle bilinen bir veri nokta kümesi içine interpolasyon işlemi ile yeni veri noktaları eklenir. Örneklenen bir dalga biçiminin dijital işleminde kullanıldığında, interpolasyon ile toplanan örnekler arasında süper örnek değerleri olarak adlandırılan yeni veri noktaları oluşturulur. Analog-dijital dönüştürücü, eşit aralıklarla veri topladığından dolayı interpolasyon işlemi ile daha yüksek bir örnekleme yapmak mümkündür. Örnekleme hızı, tipik olarak  $L$  ile gösterilen, interpolasyon faktörü olarak adlandırılan bir tamsayı ile çarpılır. Daha sonra kullanılan interpolasyon türüne göre örnekler arasında kalan boşluklara yeni değerler eklenir.

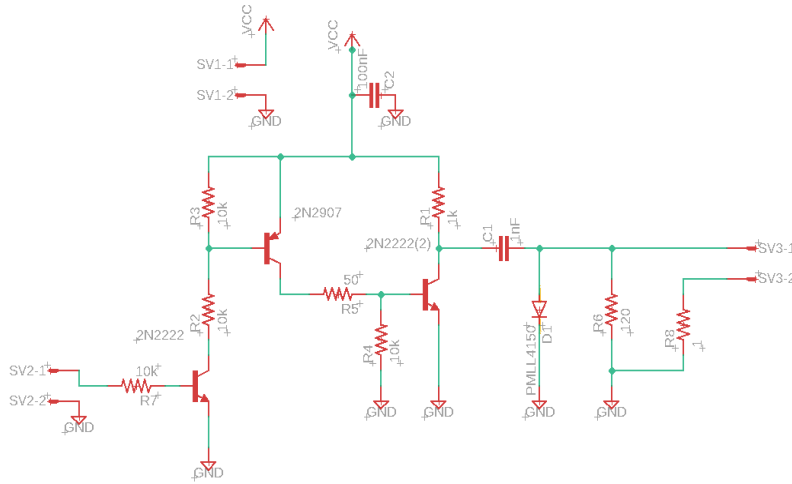
Çeşitli interpolasyon yöntemleri mevcuttur. Bazı interpolasyon yöntemleri, eklenen yeni veri noktalarını en yakın orijinal örneklerle aynı değere atadığı için hesaplama süresi gerektirmez veya çok az süre gerektirir. Verileri çok hızlı bir şekilde örnekleme için kullanılan diğer bir interpolasyon yönteminde veri örnekleri arasına sadece sıfır eklenir. Doğrusal interpolasyon, eşit aralıklı boş elemanları doldurmak için bilinen iki veri noktasının doğrusal bir fonksiyonunu kullanır. Düşük hesaplamalı interpolasyon yöntemleri tepe tahmin ediciyle beraber kullanıldığında veri kümesinin aralık değerini arttırmaz. Çünkü yeni eklenen veri noktaları her zaman mevcut örneklere eşit veya daha azdır. Bu nedenle maksimum numune sayısı aynı kalır. Yoğun interpolasyon yöntemleri örnekler arasında daha doğru veri noktalarını tahmin etmek amacıyla daha yüksek dereceli polinomlar ve daha fazla çevre noktası kullanır. Örneğin kübik interpolasyon yöntemi, daha yumuşak, sürekli ve daha doğru sonuçlar üretmek için toplam dört örnek kullanır.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Lazer Sürücü Devre

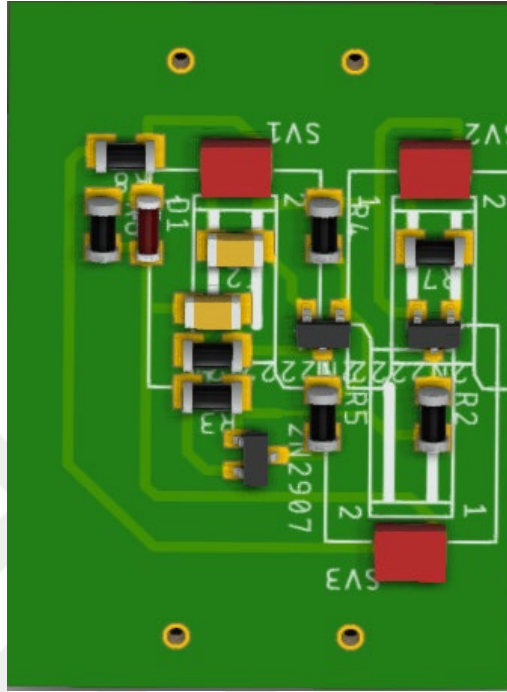
Lazer sürücü devresinin amacı lazerin çıkış gücünü optimize etmektir. Lazerin kısa darbelerde yüksek güç sağlayabilmesi önemlidir. Gönderilen sinyal ne kadar güçlü olursa alıcıya ulaşan yansıyan sinyal de o kadar güçlü olur. Lazer diyotun çıkış gücü sıcaklık arttıkça artar ve belli sıcaklık değerinden sonra devre zarar görebilir. Lazer diyotun maksimum çıkış güç değeri veri sayfasında yazmaktadır ve bu değer kısa süreli geçilse bile lazer diyot zarar görebilir. Bu nedenle, bir geri besleme döngüsü kullanarak çıkış gücünü ölçmek, sürücü akımını kontrol etmek ve sıcaklık dalgalanmalarını azaltmak gerekir.

Aşağıda çalışmada kullanmış olduğum lazer sürücü devresine ait devre şemaları verilmiştir. Lazer sürücü devresi 5V DC ile çalışmaktadır. Arduino Nano ile lazer diyotun çalışması için 10  $\mu$ s genişliğinde sinyal üretilmiştir. Osiloskop yardımıyla lazere gönderilen sinyal ve lazerin çıkışında gözlemlenen sinyal kaydedilmiştir. Matlab programı ile elde edilen veriler işlenmiştir. Lazer sürücü devresinin Eagle programı ile çizilmiş devre şeması Şekil 4.1.'de verilmiştir.



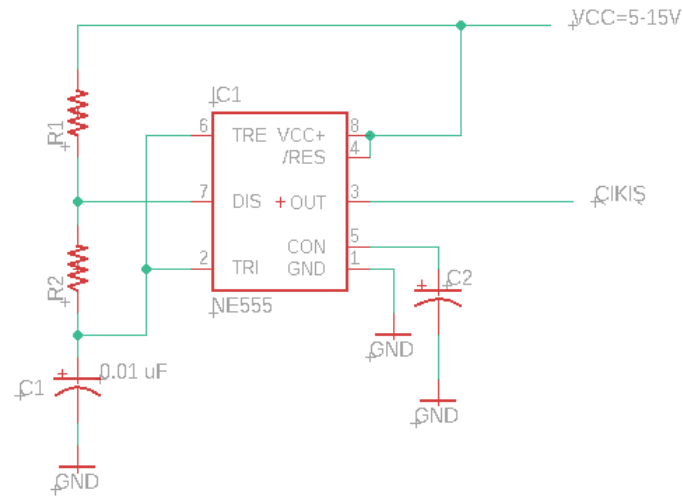
Şekil 4.1. Lazer Sürücü Devre

Lazer sürücü devresinin Autodesk Fusion 360 programı ile yapılmış PCB şeması Şekil 4.2.'de verilmiştir. Lazer sürücü devresi, bakır plaket üzerine SMD komponentler lehimlenerek kart tasarımı yapılmıştır.



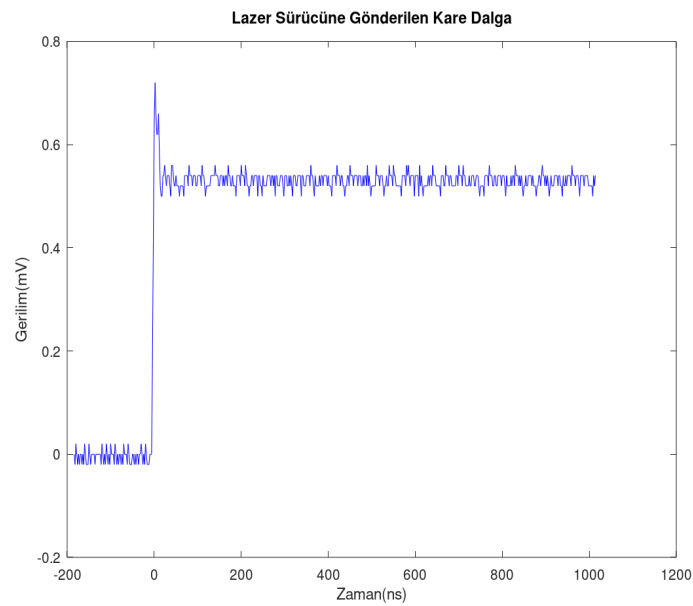
Şekil 4.2. Lazer Sürücü Devre PCB Şema

Lazer sürücü kartında lazer ve lazer sürücünün çalışması için gereken 5V besleme voltajı için giriş kısmı bulunur. Arduino Nano ile lazere sinyal gönderdiğimiz bir giriş kısmı ve lazerin çıkışını gözlemlediğimiz bir çıkış kısmı bulunur. Lazere 10  $\mu$ s saniye genişliğinde bir sinyal gönderebilmek için ilk olarak 555 zamanlayıcı devresi kullanılmıştır. 555 entegresi 8 bacaklı bir elemandır. Besleme gerilimi 8. baktan verilir ve 1. bacak toprağa bağlanır. Kare dalganın alındığı çıkış ise 3. baktan alınır. 555 tümdevresinin içerisinde sabit akım kaynağı, üçgen dalga üretici ve diğer devreler entegre içerisinde bulunmaktadır. İstedğimiz periyotta kare dalga üretebilmek için kondansatör ve dirençlerin değerlerini doğru hesaplamamız yeterli olacaktır. Şekilde gösterilen bağlantı şekli astabil bağlantı şeklindedir ve kare dalganın frekansı değiştirilebilir. Şekil 4.3.'de 555 zamanlayıcı devresi gösterilmiştir.



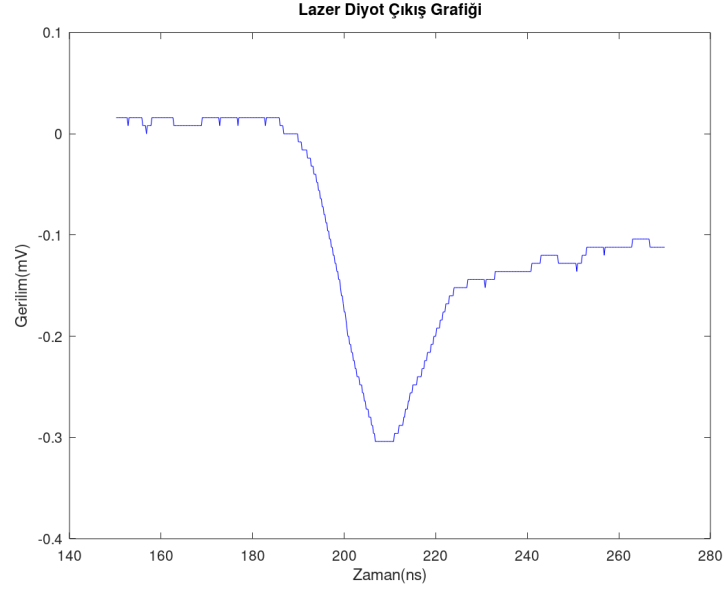
Şekil 4.3. 555 Zamanlayıcı Devresi

Zamanlayıcı devresinin çıkışında görülen değerler Şekil 4.4.'te verilmiştir. Tezin ilerleyen aşamalarında gerekli darbe Arduino Nano ile üretilmiştir.



Şekil 4.4. Lazer Sürücüne Gönderilen Dalgı

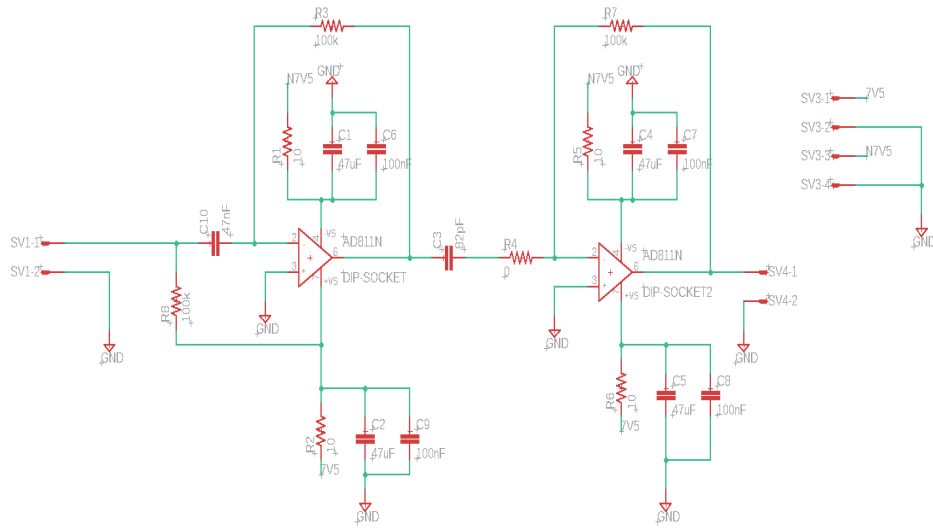
Lazer sürücü devresinin çalışma için 5V besleme gerilimi verilmiştir. Arduino Nano ile darbe uzunluğu kısa sinyaller üretilerek lazere gönderilmiştir. Lazer sürücünün çıkışından alınan sinyal Şekil 4.5.'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Lazer Diyot Çıkış Grafiği

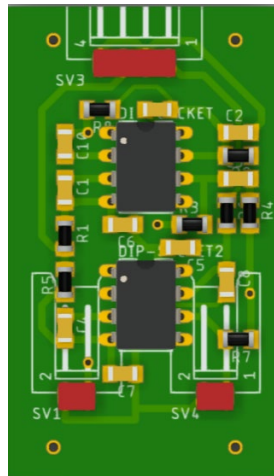
## 4.2. Alıcı Devre

Şekil 4.6.'da alıcı devresinin Eagle programı ile çizilmiş görseli mevcuttur. Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi kazanç yeterli olmadığı için iki yükselteç devresi kullanılmıştır. SV1-1 bağlantı noktasına fotodiyotun çıkışı bağlanarak çıkış sinyali kuvvetlendirilmek istenmiştir. İşlemsel yükselteç olarak çalışma hızı nedeniyle LM628 kullanılmıştır. Kuvvetlendirilen sinyalde çok fazla gürültü olduğu için görseller eklenmemiştir. Daha temiz sinyal elde edebilmek amacıyla otomatik kazanç devrelerine ihtiyaç duyulmuştur.



Şekil 4.6. Alıcı Devre

Şekil 4.7.'de Fusion 360 programı ile çizilmiş alıcı devrenin PCB üzerine komponentlerin eklenmiş hali gösterilmiştir..Kart tasarımı laboratuvar ortamında hazırlanmıştır.



Şekil 4.7. Alıcı Devre PCB Şema

### 4.3. Örnekleme Devresi

Çok yakın mesafelerde yansıyan sinyal üzerinden örnekler alınabilmektedir. Daha uzak mesafelerde yansıyan sinyal ve gönderilen sinyalin toprak etkileşimleri sebebiyle temiz bir sinyal elde edilememiştir. Gürültülü bir sinyal gözlemlenmiştir. Bu nedenle yansıyan sinyal üzerinde örnekleme işlemi yapılamamıştır. Daha temiz bir sinyal elde etmek için çok katmanlı baskı devre tasarımları yapılabilir. Komponentler küçültülebilir ve kart üzerindeki yol uzunlukları azaltılabilir. Bu çalışmalara ek olarak Şekil 3.9'un çıkışı daha iyi bir kuvvetlendirme işlemi için otomatik kazanç devresinde kuvvetlendirilmelidir. Elde edilen sinyal temiz olmadığı için otomatik kazanç devresi üzerinde çalışılmamıştır. Düşük bütçeli örnekleme devreleri üzerinde çalışılmıştır.

Benzer devreler yüksek kazanç gerektirmeyen kablo radarı sistemlerinde de kullanılmaktadır. Kablo ile yapılmış olan çalışmalarda sinyal temiz bir şekilde elde edilmiştir. Yansıyan sinyalde zayıflama miktarı çok az olduğu için kuvvetlendirme işlemi yapılmamıştır. Hatta potansiyometre ile osiloskop ekranına sığacak şekilde zayıflatılmıştır. TDR üzerine yapılmış olan çalışma ile kabloda temiz sinyalin elde edilebileceği gözlemlenmiştir. LIDAR sisteminde ise temiz sinyal elde edebilmek için otomatik kazanç kontrol devresinin kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Otomatik kazanç devresi ile yansıyan sinyal istenilen oranda kuvvetlendirildikten sonra çeşitli algoritmalar kullanılarak mesafe ölçümü doğru bir şekilde yapılabilir.

### 4.4. Gürültünün LIDAR Sistemi Üzerindeki Etkileri

Sistemin performansı çeşitli gürültülerden dolayı sınırlandırılacaktır. Gürültü kaynaklarına ortamdaki ışık, fotodiyot tarafından oluşturulan foto-akım ve yükselteç devresinde oluşan gürültüler örnek verilebilir. Gürültü oluşturan devre elemanları önceden belirlenmeli ve gürültü miktarını azaltmak için çalışmalar yapılmalıdır. Sinyal-gürültü oranı sistemin performansını değerlendirmek amacıyla kullanılan yararlı bir kavramdır. Gönderilen sinyalin çevre ve diğer kaynaklardan yayılan gürültü sinyaline oranı şeklinde ifade edilir. Temiz bir sinyal elde etmek için sinyal-gürültü oranının birden büyük olması gerekmektedir. Çeşitli yöntemler kullanarak gürültü miktarını azaltmak mümkündür. Ortamdaki ışık fotodetektör için gürültü kaynağı olacaktır. Çevre kaynaklı gürültüleri



azaltmak için bant geçiren filtreler kullanılmalıdır. Farklı tip fotodetektörlerin oluşturdukları gürültü miktarları farklıdır. Çığ fotodiyotlarda meydana gelen çığ olayı sebebiyle oluşan gürültü miktarı pin fotodiyottan daha fazladır. Pin diyotlar daha az gürültüye sahip oldukları için çalışmada kullanılmıştır. Fotodetektör üzerine düşen sinyal çok zayıf olduğu için yükselteç devrelerinde yükseltilir. Tek yükseltme devresi ile yeteri kadar kuvvetlendirme işlemi yapılamadığı için iki yükselteç devresi kullanılmıştır. Fotodiyota ulaşan sinyal çok zayıf ve gürültülü olduğu için ilk yükseltme devresinin gürültü miktarı çok az, bant genişliği ve kazancının ise çok yüksek olması gerekmektedir. İkinci yükseltme devresinde gürültü miktarı çok önemli olmamasına rağmen yine de daha az gürültülü yükselteç devreleri kullanılmalıdır. Sinyallerin yükseltilmesi işleminde sinyallerin şekilleri ve yükselme süreleri değişebilmektedir. Sinyalde bozulmalara neden olan kuvvetlendirme işlemi hatalı ölçümlere neden olur. Bu nedenle sinyal kuvvetlendirme işleminin belirli bir oranda yapılması gerekir. Mümkünse otomatik kazanç devreleri kullanarak tüm sinyalleri aynı genliğe getirmek gerekmektedir. Özellikle ticari amaçlı üretilmiş LIDAR’larda otomatik kazanç devreleri kullanılmaktadır ve otomatik kazanç devresiz temiz sinyal elde etmek oldukça zordur.

Çalışmada kullanılan devreler laboratuvar ortamında bakır plaket üzerine SMD komponentler kullanılarak yapılmıştır. PCB tasarımı oldukça önemli bir konudur. Bazı ince tasarım kriterlerine dikkat edilmediği takdirde sistemde gürültü miktarı artacaktır. Çalışmada gürültü miktarını azaltmak amacıyla kart tasarımında bazı kriterler üzerinde durulmuştur. İletilen sinyalin dalga boyunun 1/20’sinden uzun yollar anten gibi davranır ve etrafında bulunan yarı iletken malzemelere gerilim indüklemesi yapar. Bu olaya endüktif kuplaj ismi verilir. PCB hattının endüktansını tahmin etmek oldukça zordur. Temel bir formül ile endüktans değerini etkileyen değişkenlerin neler olduğunu bulmak mümkündür.  $N$  dönüş sayısı,  $\mu$  geçirgenlik,  $l$  yol uzunluğu ve  $A$  kesit alanı olmak üzere endüktans 4.1.’deki denklem ile hesaplanır.

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (4.1)$$

Endüktif kapasitansı en aza indirmek için PCB tasarımında dikkat edilmesi gereken kriterler vardır. Devreyi tamamlamak üzere toprağa akan sinyallerin yollarını kısa çizmek önemlidir. Güç ve veri sinyali taşıyan yollarda manyetik alanlar meydana gelir. Oluşan manyetik alan en aza indirmek amacıyla en az bir katman toprak katmanı yapılmalıdır. Çalışmada tek katmanlı kart tasarımları yapılmıştır. Katman sayısı artırılarak gürültü miktarını azaltmak mümkündür. Yüksek frekanslı sinyaller hassas analog sinyallerin yakınından geçtiğinde analog sinyallerde bozulmalara neden olur. Sinyallerdeki bozulmaları engellemek amacıyla Faraday kafesleri kullanılmalıdır veya bu tür sinyaller birbirine yakın yollarla taşınmamalıdır.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi çalışmada ucuz malzemeler kullanılmıştır. LIDAR'lar, yüksek hassasiyetli karmaşık sistemlerdir. Bu nedenle çalışır bir prototip elde etmek için daha kaliteli ve pahalı malzemelerin kullanılması gerekir. Malzeme kullanımına ek olarak LIDAR farklı disiplinler içerdiği için ekip çalışması ile çalışır bir prototip oluşturmak daha kolay olacaktır.

Çalışmada fotodetektör olarak fiyatı ve besleme voltajının düşük olması nedeniyle pin fotodiyot kullanılmıştır. Pin fotodiyot yerine  $\text{çığ}$  fotodiyot kullanıp daha temiz bir yansıyan sinyal elde etmek mümkün olabilirdi.  $\text{çığ}$  fotodiyot yapısı gereği iç kazanca sahiptir. İç kazanca sayesinde daha kuvvetli bir sinyal elde etmek mümkündür.  $\text{çığ}$  diyottan yükselteç devresine gönderilen sinyalin genliği daha yüksek olacağı için gürültüden daha az etkilenecektir. Fakat  $\text{çığ}$  fotodiyotların besleme voltajı yüksek olduğu için PCB tasarımında problemler meydana gelir. Dolayısıyla  $\text{çığ}$  fotodiyot kullanımının fayda sağlayıp sağlamayacağı belirsizdir.

Nesneden veya yüzeyden yansıyan sinyal çok zayıf olduğu için tek yükseltme devresi ile yeterince kuvvetlendirilememiştir. Bu nedenle iki yükselteç devresi kullanılmıştır. LIDAR'larda sinyalin kuvvetlendirme sürecinde problemler yaşanmaktadır. Düşük bütçeli LIDAR tasarımlarında temiz bir yansıyan sinyal almak ve alınan sinyali örneklemek oldukça zordur. Temiz sinyal elde etmek için hızlı ve bant genişliği yüksek op-amp'lara, daha hassas fotodetektörlere ihtiyaç duyulmuştur. Yansıyan zayıf sinyali kuvvetlendirmek amacıyla otomatik kazanç devrelerine ihtiyaç vardır. Ticari amaçla üretilen LIDAR'larda otomatik kazanç devresi kullanılmaktadır. Çalışmada otomatik kazanç devreleri kullanılmadığı için temiz sinyal elde edilememiştir. Gelecek çalışmalarda otomatik kazanç devreleri üzerine çalışmalar yapılacaktır.

Düşük bütçeli örnekleme devreleri üzerinde çalışılmıştır. Gönderilen ve yansıyan sinyali örneklemek amacıyla 8 bitlik ADC kullanılmıştır. LIDAR uygulamaları için bu

özünürlükte bir ADC yetersiz kalmıştır. Yüksek frekanslı sinyalleri gözlemlemek ve örnekleme amacıyla daha iyi ekipmanlara ve yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur.

LIDAR üzerine yapılacak çalışmalarda özellikle yükseltme devreleri üzerine yoğunlaşılmalı ve oluşan gürültü miktarını azaltmak amacıyla çalışmalar yapılmalıdır. Gürültü miktarını azaltmak için PCB tasarımına dikkat edilmelidir. PCB tasarımda küçük elektronik elemanlar kullanılmalı, yollar kısa çizilmeli, katman sayısı artırılmalı ve en az bir katman toprak katmanı yapılmalıdır.

Yapılan çalışmayla piyasada bulunan malzemelerle düşük performanslı bir LIDAR tasarlanmanın mümkün olduğunu görülmüştür. Çalışır bir prototip ortaya çıkmamış olmasına rağmen gelecekteki çalışmalarda oluşabilecek problemlerin çözümleri konusunda yararlı çalışmalar yapılmıştır. Karşılaşılan problemler hakkında çözüm yolları sunulmuştur.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Amann, M., Bosch, T. , Lescure, M., Myllylä R., Rioux, M., 2001, Laser ranging: A Critical review of usual techniques for distance measurement, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers 40, no. 1, p.10–19.
- Biber, A., Seitz P., Jäckel, H. 2001, Avalanche photodiode image sensor in standard silicon BiCMOS technology, Sensors and Actuators A: Physical, p.1-7.
- Brooker, G., Sensors and Signals, University of Sydney, 2006.
- Brown, J., 2010, Real-Time Hardware Design for Improving Laser Detection and Ranging Accuracy, The Florida State University, p.1–6.
- Bosch, T., Leccure, M., 1995, Selected papers on laser distance measurements, SPIE Optical Engineering Press.
- Bosenberg, J., Brassington, D., Simon, P., 1997, Instrument Development for Atmospheric Research and Monitoring : Lidar Profiling, DOAS and Tunable Diode Laser Spectroscopy.
- Buzinski, M., Levine, A., Stevenson, H., 1992, Laser Triangulation Range Sensors: A Study of Performance Limitations.
- Carmo, J.P., Moebius, B., Pfennigbauer, M., Bond, R., Bakalski, I., Foster, M., Bellis, S., Humphries, M., Fisackerly, R., Houdou, B., 2008, Imaging lidars for space applications, Novel Optical Systems Design and Optimization XI.
- Chang-Hasnain, C.J., 2002, Modulation and demodulation, <http://light.eecs.berkeley.edu/ee233f02/Receiver.PDF>. Erişim tarihi: 15.11.2007
- Chen, M., 2003, Review of free-space optical communications links, <http://hkn.eecs.berkeley.edu/~chenm/>. Erişim Tarihi: 13.01.2019
- Cho, P., Anderson, H., Hatch, R., Ramaswami, P., 2006, Real-time 3-D LADAR imaging, HPCMP Users Group Conference.
- Csanyi, N., 2007, Improvement of LIDAR data accuracy using LIDAR-specific ground targets, Photogrammetric Eng. & Remote Sensing, p.385-396.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Groeneveld, D.J.A., 2010, Bandwidth extension and noise cancelling for TIAs, M.Sc. thesis, University of Twente, 53 p.(published).
- Goldstein, B., Dalrymple, G., 1967, Gallium Arsenide Injection Laser Radar, Proceedings Of The Lexe, p. 181-188.
- Hebert, M., 2000, Active and passive range sensing for robotics, IEEE International Conference on Robotics and Automation.
- Jordan, S., 2009, “Range Estimation Algorithm Comparison in 3-D Flash LADAR Data, M.Sc. thesis, Dept. Elect. And Comp. Eng., Air Force Institute of Tech, 102 p.(published).
- Junhwan, J., Hwnag, S., Park, K., 2013, Design of Indirect Time-of-Flight Based Lidar for Precise Three-Dimensional Measurement Under Various Reflection Conditions, The Fourth International Conference on Sensor Device Technologies and Applications.
- Kaldén, P., Sternå, E., 2015, Development of a low-cost laser range-finder (LIDAR), M.Sc thesis, Chalmers University of Technology, 67 p. (published).
- Kilpelä, A., 2004, Pulsed time-of-flight laser range finder techniques for fast, high precision measurement applications, M.Sc. thesis, University of Oulu, 98 p. (published).
- Konolige, K., Augenbraun, J., Donaldson, N., Fiebig, C., Shah, P., 2008, A Low-Cost Laser Distance Sensor, IEEE International Conference on Robotics and A Automation.
- Li, X., Yang, B., Xie, X., Xu, L., 2018, Influence of Waveform Characteristics on LiDAR Ranging Accuracy and Precision, Sensors.
- Lopez, M., 2012, Design and Development of a Low Cost and Lightweight Laser Rangefinder, M.Sc. thesis, Department of Electrical Engineering of City College of New York, 37 p. (published).

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Majumdar, A.K., Ricklin, J.C., 2008 , Free-space laser communications principles and advances., s. 417.
- McNeill, M., Williams, L., Chu, H., 1999, Design of a Time of Flight Range-Finder, 29th IEEE Frontiers in Education Conference.
- McMahon, J., Cain, S., Martin, R., 2008, Improving 3-D LADAR range estimation via spatial filtering, IEEEAC.
- Nejad, S.M., Olyaei, S., 2008, Low-Noise High-Accuracy TOF Laser Range Finder, The Fourth International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, American Journal of Applied Sciences.
- Palojärvi ,P. , 2003, Integrated electronic and optoelectronic circuits and devices for pulsed time- of-flight laser range finder, Ph.D. Thesis, University of Oulu, 56 p. (published).
- Richmond, R., Cain, S., 2010, Direct-Detection LADAR Systems, Tutorial Text in OpticalEngineering v. TT85. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Press.
- Schmid, K., Waters, K., Dingerson, L., Hadley, B., Mataosky, R., Carter, J., Dare, J., 2008, LIDAR 101: an introduction to LIDAR technology, data, and applications, NOAA Coastal Services Center.
- Özek, F., 1995, Optoelektronik., AÜFF, Ankara.
- Ulupınar, M.M., Çukul, H., Dındış, G., 2020, A Low Cost Time Domain Reflectometer (TDR) Design for Educational Use, 8. International Conference on Engineering& Natural Sciences, Ankara.
- Westerman, D., 2007, Understand and apply the transimpedance amplifier, <https://www.planetanalog.com/understand-and-apply-the-transimpedance-amplifier-part-1-of-2>, erişim tarihi :11.01.2020.
- Wilson, J., Hawkes, J.F.B., 1989. Optoelectronics. , Prentice Hall, s. 363.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

Zhi, X., 2008, A progressive quality control to improve the accuracy of LIDAR data Processing, ISPRS Journal, p.421-426.

