

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÜŞÜK GÜÇLÜ LIDARLAR İÇİN SİNYAL İŞLEME ALGORİTMALARININ
FPGA ÜZERİNDE GERÇEKLENMESİ

Burak Han BENLİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2023

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÜŞÜK GÜÇLÜ LIDARLAR İÇİN SİNYAL İŞLEME ALGORİTMALARININ FPGA ÜZERİNDE GERÇEKLENMESİ

Burak Han BENLİ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Sultan CAN

Bu tezde düşük güçlü LIDAR sistemlerin, uzun mesafe ölçüm performansı incelenmiştir. Yapılan testler ile gürültünün yüksek olduğu koşullarda; Hareketli ortalama, dalgacık analizi ve Wiener filtre sinyal işleme algoritmalarının lazer darbesini tespit etme performansları karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda bu sinyal işleme algoritmaları FPGA'ya uyarlanarak gerçek zamanlı çalışabilme kabiliyetleri, kaynak kullanımları ve performansları göz önüne alınarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda hareketli ortalamanın, rastgele dağılmış Gaussian gürültünün LIDAR sinyallerinden temizlenmesinde çok önemli bir rolü olduğu ve diğer sinyal işleme algoritmalarının tek başlarına atmosfer koşullarında, sinyali gürültüden temizlemede yeterli olamadıkları görülmüştür. Dalgacık analizi ve Wiener filtrenin, hareketli ortalamayı takiben uygulanması sonucunda 3 km'ye kadar mesafe tespiti yapılabildiği ve bu iki algoritmanın performanslarının birbirine çok benzer olduğu gözlemlenmiştir. Wiener filtrenin kaynak kullanımının dalgacık analizine göre çok fazla olduğu ve bunun yanı sıra Wiener filtrenin ölçüm süresini çok uzattığı tespit edilmiştir.

Eylül 2023, 51 sayfa

Anahtar Kelimeler: LIDAR, Hareketli Ortalama, Dalgacık Analizi, Wiener Filtre, FPGA, düşük güçlü LIDAR, uzun mesafe ölçümü

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

IMPLEMENTATION OF SIGNAL PROCESSING ALGORITHMS ON FPGA FOR LOW POWER LIDARS

Burak Han BENLİ

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Sultan CAN

In this thesis, the performance of low-power LIDAR systems in long-range measurements has been investigated. Through conducted tests under high noise conditions, the performance of signal processing algorithms including Moving Average, Wavelet Analysis, and Wiener Filter in detecting laser pulses has been compared. Additionally, these signal processing algorithms have been adapted to FPGA for real-time operation, and their comparative analysis has been conducted taking into account their resource utilization and performance. The findings of this study indicate that Moving Average plays a significant role in removing random distributed Gaussian noise from LIDAR signals, while other signal processing algorithms alone are not sufficient for noise removal under atmospheric conditions. Wavelet Analysis and Wiener Filter, when applied after Moving Average, enable distance detection up to 3 km, and their performance is observed to be very similar. However, it is noted that Wiener Filter is a challenging algorithm to implement on FPGA, as it requires significant computational resources and considerably prolongs the measurement time.

September 2023, 51 pages

Key Words: LIDAR, Moving Average, Wavelet Analysis, Wiener Filter, FPGA, low-power LIDAR, long-range detection

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu süreç boyunca beni destekleyen eşime, çalışmalarımı yönlendiren, araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek akademik ortamda olduğu kadar beşeri ilişkilerde de engin fikirleriyle yetişme ve gelişmeye katkıda bulunan danışman hocam sayın Dr. Sultan CAN'a, LIDAR konusundaki uzmanlığı ile bana önderlik ederek bu çalışmayı yapmamda büyük katkıları olan Dr. Mehmet TİKEN'e ve Prof. Dr. Halil Berberoğlu'na teşekkür ederim.

Burak Han BENLİ

Ankara, Eylül 2023

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. MESAFE TESPİT ETME YÖNTEMLERİ	4
2.1 Öncü Kenar Tespiti.....	4
2.2 Tepe Noktası Tespiti	5
2.3 Eşleşen Fitre Tespiti (Matched Filter).....	6
3. LIDAR SİNYALLERİNDE GÜRÜLTÜ	8
4. LİTERATÜR TARAMASI	10
5. BU TEZDE KULLANILAN GÜRÜLTÜ TEMİZLEME YÖNTEMLERİ.....	17
5.1 Hareketli Ortalama Teorisi.....	17
5.2 Dalgacık Eşik Analizi Teorisi (Wavelet Thresholding Technique – WT).....	17
5.2.1 Sürekli ve ayrık dalgacık analizi (Discrete Wavelet Transform - DWT)	19
5.3 Wiener Filtre Teorisi	20
6. ALGORİTMALARIN MATLAB İLE TEST EDİLMESİ.....	22
6.1 Matlab ile Hareketli Ortalama Analizi	22
6.2 Matlab ile Dalgacık Eşik Analizi Analizi	26
6.3 Matlab ile Wiener Filtre Analizi.....	34
7. ALGORİTMALARIN FPGA’E UYARLANMASI	37
7.1 Hareketli Ortalamanın FPGA’e Uyarlanması	38
7.2 Dalgacık Eşik Analizinin FPGA’e Uyarlanması	42
7.3 Wiener Filtrenin FPGA’e Uyarlanması	44
8. SONUÇ	47
KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ.....	51

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

km	kilometre
m	metre
us	mikrosaniye
ns	nanosaniye
s	saniye

Kısaltmalar

ADC	Analog-Dijital Dönüştürücü
FPGA	Alan Programlanabilir Kapı Dizileri
WDT	Ayrık Dalgacık Dönüşümü
WGN	Beyaz Gauss Gürültüsü
CPU	Central Processing Unit (İşlemci)
WT	Dalgacık Dönüşümü
cD	Detay Katsayıları
HDL	Donanım Tasarım Dili
FT	Fourier Dönüşümü
IP	Intellectual Property
PLD	Programlanabilir Mantık Cihazları
PIC	Programlanabilir Mikroişlemci
PWM	Pulse-Width Modulation
RF	Radyo Frekans
SNR	Sinyal-Gürültü Oranı
ASIC	Uygulamaya Özel Tümleşik Devre
cA	Yaklaşım Katsayıları
TDC	Zaman-Dijital Dönüştürücü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Öncü kenar tespiti	5
Şekil 2.2 Tepe noktası tespiti	6
Şekil 4.1 LIDAR mesafe tespit akış diyagramı.....	10
Şekil 6.1 Dedektörden toplanan veriler (LIDAR sinyali)	23
Şekil 6.2 Ortalama işlemi sonucunda elde edilen sinyal (n=100).....	24
Şekil 6.3 Sinyalin Dalgacık analizi ile bileşenlerine ayrılması işlemi	27
Şekil 6.4 Örnek Dalgacık analizi ile bileşenlerine ayrılması işlemi	28
Şekil 6.5 Dalgacık ayrıştırma ağacı Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği	28
Şekil 6.6 İdeal lazer darbesi dalga biçimi	29
Şekil 6.7 Sistem etkileri ile düzenlenmiş lazer darbesi dalga biçimi.....	30
Şekil 6.8 Daubechies 6 ölçekleme fonksiyonu Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği	31
Şekil 6.9 a) Düşük geçiren filtre bileşenlerine ayırma katsayıları, b) Yüksek geçiren filtre bileşenlerine ayırma katsayıları, c) Düşük geçiren filtre yeniden yapılandırma katsayıları, d) Yüksek geçiren filtre yeniden yapılandırma katsayıları Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği.....	31
Şekil 6.10 Hareketli ortalama ile gürültüden temizlenmiş LIDAR sinyali	32
Şekil 6.11 Dalgacık analizi detay katsayıları Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği	33
Şekil 6.12 Dalgacık analizi ile gürültüden temizlenmiş LIDAR sinyali.....	34
Şekil 6.13 Wiener filtre için kullanılan darbe sinyali	35
Şekil 6.14 Wiener filtre ile gürültüden temizlenmiş LIDAR sinyali	36
Şekil 7.1 1 lazer darbesi ile elde edilen LIDAR sinyalinin Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği.....	39
Şekil 7.2 250 lazer darbesi kullanılarak hareketli ortalaması alınmış sinyalin Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği	40
Şekil 7.3 500 lazer darbesi kullanılarak hareketli ortalaması alınmış sinyalin Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği	40
Şekil 7.4 1000 lazer darbesi kullanılarak hareketli ortalaması alınmış sinyalin Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği	41
Şekil 7.5 Hareketli Ortalama Vivado sentez sonucu.....	41
Şekil 7.6 Dalgacık eşik analizi ile FPGA’da gürültüden temizlenmiş sinyalin Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği	43
Şekil 7.7 Dalgacık eşik analizi algoritması Vivado sentez sonucu.....	44
Şekil 7.8 Wiener filtre algoritması Vivado sentez sonucu	45
Şekil 7.9 Wiener Filtre ile FPGA’da gürültüden temizlenmiş sinyalin Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Mesafe tespit yöntemlerinin karşılaştırılması	7
---	---



1. GİRİŞ

Uzaktan algılama, gözlem altındaki nesneye fiziksel olarak dokunmadan bir süreci veya nesneyi gözlemlemek, ölçmek veya izlemek için kullanılan bir tekniktir. Optik ve radyo teleskoplar, kameralar, radarlar, LIDARlar gibi çeşitli cihazlar uzaktan algılama cihazlarıdır. LIDAR (Light Detection and Ranging), menzil çözümlü ölçümler yapmak için ışık huzmelerinin kullanıldığı bir uzaktan algılama tekniğidir. LIDAR, incelenen ortam veya parçacıklarla etkileşime giren bir ışık ışını yayar ve bu ışığın bir kısmı LIDAR alıcısına doğru geri saçılır (LIU ve HE 2008).

LIDARlar temelde, araştırılan nesneye gönderilen ışınların yansımalarını analiz ederek o nesnenin LIDAR'a olan uzaklığını belirlemek için kullanılırlar. Ancak yansıyan ışınların zayıflığı ve beraberinde oluşan sistem gürültüleri bunu zorlaştırmaktadır. Genellikle mesafenin tespitindeki zorluk, LIDAR ve incelenen nesnenin birbirine uzaklığının artışıyla ortaya çıkar. Yani efektif mesafe ölçümündeki ana kısıtlayıcı faktör, mesafenin artışıyla sinyal-gürültü oranının (SNR - Signal to Noise Ratio) hızla düşmesidir (Lerkvarnyu 1998).

Uygulamada, LIDAR verilerinin kalitesini iyileştirmek için bazı verimli prosedürler benimsenmelidir. Örneğin, güç sinyali, genellikle birkaç yüz veya binlerce lazer darbesinin ortalaması alınarak elde edilir. Bu ortalama alma işleminin rolü, bu rastgele gürültüleri ve parazitleri azaltmak ve dijitalleştirmenin kesinliğini artırmaktır. Bununla birlikte, kalan gürültüler, özellikle daha yüksek mesafelerde sonuçları hala güçlü bir şekilde etkileyebilir. Genel olarak, benekli gürültülü LIDAR sinyalleri, hareketli ortalama veya filtreleme yöntemleri gibi bazı yöntemlerle iyileştirilebilir. Hareketli ortalama yöntemi yalnızca sinyalin mesafe boyunca düzleştirilmesini garanti edebilir. Diğer bir deyişle, özellikle gürültülerin ürettiği negatif değerler olmak üzere, o noktadaki değerleri ortadan kaldıramaz (Lerkvarnyu 1998).

Spektral tahmin analizine göre, LIDAR sinyalindeki gürültü daha geniş bir bantta dağılırken, sinyal hemen hemen aynı bant aralığında dağılır. Bu nedenle, bir kesim frekansı seçen dijital filtreler kullanarak gürültüyü ortadan kaldırmak çok zordur (Sun ve

Huang 2005). Sinyal-gürültü oranını iyileştirmek için hareketli ortalama yönteminin yaygın olarak kullanıldığı LIDARlarda veri işlemede foton sayma yöntemi kullanılmaktadır.

Literatürde, LIDARlarla mesafe tespiti üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, LIDARlar ile mesafe ölçüm yöntemleri, nesneden geri yansıyan ışınlarla ait sinyallerin gürültüden temizlenmesi için kullanılan sinyal işleme algoritmaları ve bu algoritmaların uygun sistemlerle uygulanması konu alınmıştır. Literatürde yapılan çalışmaların birçoğunda yüksek güçlü lazerler kullanılmıştır veya düşük güçlü lazerler kullanarak kısa mesafelerin ölçülmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır (Zhirong 2013).

LIDAR sistemlerinde kullanılan lazerlerin çıkış gücü hedef cismin tespiti ve kaynağa olan uzaklığının ölçülebilmesi için çok önemli bir parametredir. Atmosferdeki ışık yoğunluğu, güneş ışınlarının dedektöre olan açısı, çevredeki yapay ışık kaynaklarının yayılım gücü ve yoğunluğu ile birlikte atmosferdeki sis ve diğer etkenlere bağlı görüş mesafesinin ne seviyede olduğu LIDARlar ile yapılan ölçümleri etkileyen temel faktörleri oluştururlar. Bu faktörlerin LIDAR sistemlerine etkisini azaltmanın en kolay yolu lazer kaynağının gücünü arttırmaktır. Bu nedenle günümüz LIDAR sistemlerinde uzak mesafe ölçümlerde çoğunlukla yüksek güçlü lazerler kullanılmaktadır. Ancak yüksek güçlü lazerler insan sağlığı ve çevresel etkileri dolayısıyla sivil alanlarda çok fazla tercih edilememektedirler. Bu nedenle otonom araçlar gibi sivil kullanım alanlarında düşük güçlü lazerlerin kullanımı daha yaygındır. Ancak düşük güçlü lazerlerin hem bahsettiğimiz faktörler nedeniyle hem de lazer kaynaklarının saçılım açıları nedeniyle uzun mesafelerde kullanımı oldukça zordur.

Literatürde yapılan çalışmalarda çoğunlukla yüksek güçlü lazerler ile uzun mesafe ölçümleri veya düşük güçlü lazerler ile kısa mesafelerde nesne tespiti gibi konular ele alınmıştır. Düşük güçlü lazerler ile uzun mesafe tespiti üzerine yapılan araştırmalar oldukça kısıtlı olsa da farklı yaklaşımlar ve sinyal işleme algoritmaları üzerine çalışmalar da vardır.

Bu tezde, düşük güçlü LIDAR sistemleri ile mesafe tespiti üzerine bütünsel bir çalışma yapılarak;

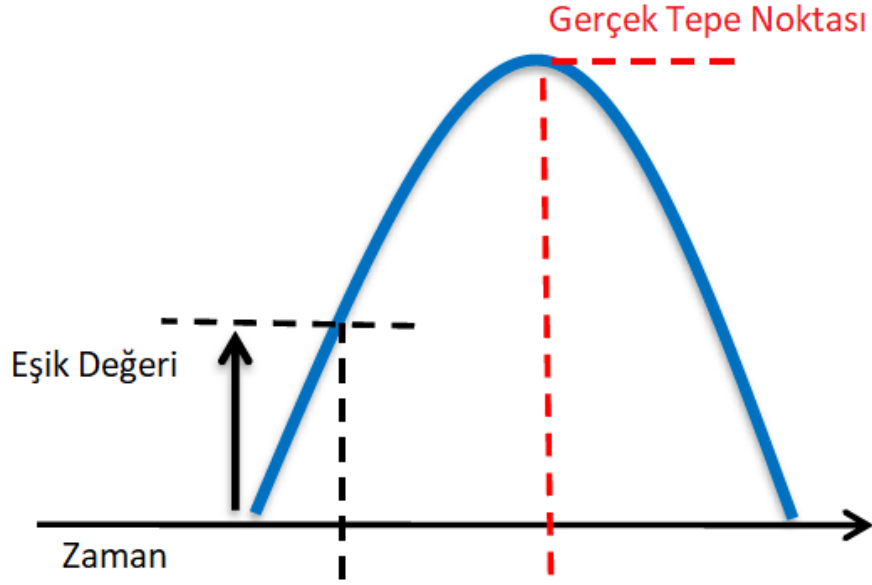
- Dedektör aracılığı ile toplanan, hedef nesneden yansıyan LIDAR sinyallerinin gürültüden temizlenmesinde kullanılan hareketli ortalama, dalgacık dönüşümü ve Wiener filtre sinyal işleme algoritmalarının performans analizleri yapılarak aralarında bir karşılaştırma yapılacaktır.
- Bu filtrelerin Alan Programlanabilir Kapı Dizileri'ne (FPGA) uygulanabilirlikleri ve gerçek zamanlı kullanımda avantaj ve dezavantajları tartışılacaktır.
- FPGA'ya uyarlanan sinyal işleme algoritmalarının testleri gerçek veriler ile yapılarak gerçek zamanlı uygulamalardaki performansları test edilecektir.

2. MESAFE TESPİT ETME YÖNTEMLERİ

LIDAR sistemlerde toplanan dalga formu verilerinden, yansıyan lazer darbesini tespit etmek için kullanılan üç tip tespit yöntemi vardır: Öncü kenar tespiti, tepe noktası tespiti ve eşleşen filtre tespiti (Matched Filter) olarak sınıflandırılan bu yöntemlere sonraki bölümlerde yer verilecektir. Bahsi geçen tespit yöntemlerinin üçü de elektronik devreler kullanılarak analog olarak tespit edilen sinyallerin önce bir ADC (Analog-Digital Converter – Analog-Dijital Dönüştürücü) ile örneklenip daha sonra dijital ortama alınması ile uygulanabilir.

2.1 Öncü Kenar Tespiti

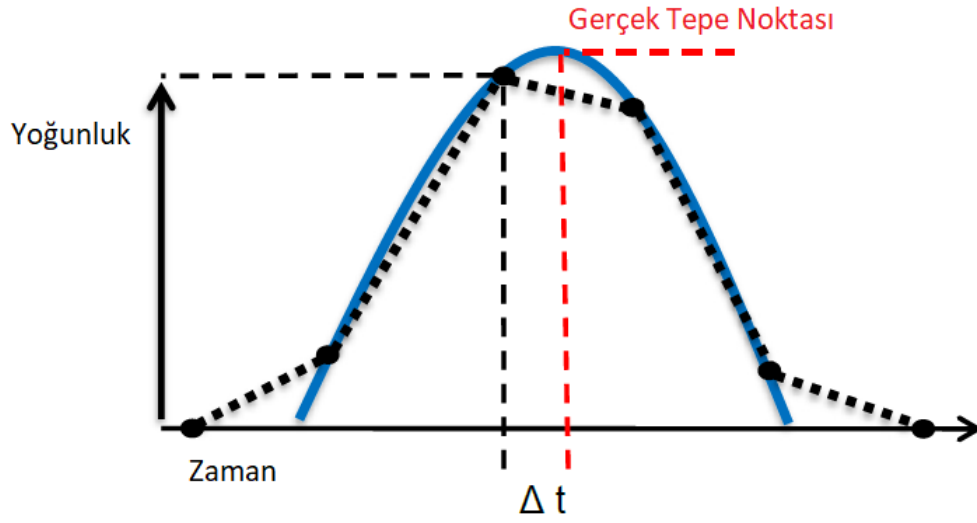
Basit bir öncü kenar tespiti sisteminde, LIDAR dalga biçiminin bir eşik değerini geçtiği zaman bulunarak bir LIDAR darbesi tespit edilmektedir (Richard 2010). Bir eşik değeri kullanılarak LIDAR darbesinin tespit edilmesi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Eşik aşıldığında, ön kenarın zamanını yakalamak için zamandan dijitale dönüştürücüye bir etkinleştirme sinyali gönderilir. Alternatif olarak, bazı sistemler, bir sistem saatinin başlangıç ve dönüş darbeleri arasındaki saat döngülerini saymasını sağlayarak öncü kenar tespiti yöntemini kullanır (Fisher vd. 2000). Sinyal örneklenirse, darbeler arasındaki örnek sayısı uçuş süresini yani ışığın kaynaktan çıkıp, hedefteki cisimden yansıyarak dedektöre ulaşana kadar geçen süresini belirler. Öncü kenar tespiti, gerçek zamanlı olarak uçuş süresini doğru bir şekilde ölçebilir ve uygulamak için gereken mantık basittir (Mitra 2006); bununla birlikte, bu algılama yönteminin gelişmiş varyasyonları bile darbe yoğunluğunu doğru bir şekilde yakalama yeteneğine sahip değildir. Bu nedenle, geri saçılan lazer darbe yoğunluğu yakalanamadığından, öncü kenar tespiti, askeri uygulamalar ve düşük güçlü lazerler için tercih edilen bir darbe algılama yöntemi değildir.



Şekil 2.1 Öncü kenar tespiti (Jarrod 2012)

2.2 Tepe Noktası Tespiti

Tepe noktası tespiti yönteminde, LIDAR dalga biçimindeki maksimum genlik bulunarak bir LIDAR darbesi tespit edilir (Richard 2010). İletilen ve geri saçılan darbeler, ilgili pencerelerde maksimum genlikler bulunarak ayrı ayrı tespit edilir. Uçuş süresi daha sonra iletilen tepe noktasından geri saçılan tepe noktasına kadar gerçek zamanlı olarak ölçülür. Bu yöntemde uçuş süresi, bir zaman-dijital dönüştürücü, bir sistem saatindeki sayaç veya darbeler arasındaki örnek sayısı kullanılarak ölçülebilir. Geri saçılan darbe zirvesinin genlik değeri, geri saçılım yoğunluğu değeri olarak yakalanır. Tepe Noktası Tespiti için, bir ADC hassasiyetine bağlı olarak gerçek darbe tepe noktasını doğru şekilde yakalayamayabilir. Bu nedenle, iki ayrı örnekleme arasında kesin konum ve doğru geri saçılma yoğunluğu değeri mevcut olabilir ve bu da hatalı uçuş süresi ve yoğunluk ölçümlerine neden olur. Gelişmiş tepe noktası tespiti sistemleri, ayrık verilerden süper örnek değerleri kurtarmak için enterpolasyon yöntemlerini kullanır (Jordan 2009). Ancak, bu yöntem her ne kadar hızlı bir yöntem olsa da enterpolasyon algoritmalarına ihtiyaç duyulması nedeniyle gerçek zamanlı olarak uygulanamaz ve düşük lazer gücüne sahip sistemlerde hata oranı çok yüksektir.



Şekil 2.2 Tepe noktası tespiti (Jarrod 2012)

2.3 Eşleşen Fitre Tespiti (Matched Filter)

Eşleşen fitre tespiti, LIDAR dalga biçimini kaydeder ve bir LIDAR darbesini tespit etmek için bir referans dalga biçimi modeliyle çapraz korelasyon gerçekleştirir; maksimum korelasyon değeri, dedektör ile yakalanan darbenin tepe noktasını temsil eder. Çapraz korelasyonu başarılı bir şekilde gerçekleştirmek için önce tüm darbe şeklinin yakalanması gerekir. Darbenin bir kısmı yakalanmazsa, hatalı aralık hesaplamaları meydana gelir (Jordan 2009). Tipik olarak, LIDAR dalga formunu örneklemek ve kaydetmek için bir ADC kullanılır. LIDAR sistemlerinde normalde kullanılan hızlı örnekleme oranları ve uzun tarama süreleri nedeniyle, bir LIDAR dalga biçimi taramasının tüm örneklerini kaydetmek için büyük miktarda bellek gerekir. Hâlihazırda, bellekte saklanan veri miktarını azaltmak için, LIDAR dalga formunun yalnızca dönüş darbesini içeren kısmını yakalamak için ekstra ayarlamalar yapılabilir (Richard 2010). Bunu yapabilmek için ölçülmek istenilen mesafenin, kesin olarak belirli bir uzaklıktan daha büyük olması gerekmektedir. ADC'den gelen örnekler, örneklenen dönüş darbesinin tüm uzunluğunu tutacak kadar uzun bir belleğe kaydedilir. Bir eşik devresi, dönüş darbesinin gelişini algılar ve bir etkinleştirme sinyali iletir. Daha sonra bellekteki örnekler, yakalama sonrası sinyal işleme için saklanır.

Eşleşen filtre tespiti, tepe noktası tespitinden daha doğru ve tutarlı uçuş süresi ölçümleri sağlar. Ancak, tepe noktası tespitine benzer şekilde, örnekler arasında meydana gelen veriler toplanmaz. Bu nedenle, eşleşen filtrelemenin doğruluğu, ADC'nin örnekleme hızı ile de sınırlıdır. Eşleşen filtre dedektörünün bir başka dezavantajı, LIDAR dalga biçimini yakalamak ve bir darbeyi algılamak için yakalama sonrası çapraz korelasyon gerçekleştirmek için gereken gecikme süresidir. Şu anda, hiçbir LIDAR sistemi eşleşen filtre tespiti ile gerçek zamanlı olarak sonuç üretme yeteneğine sahip değildir (Richard 2010).

Sunulan üç yöntem aşağıdaki çizelgede tartışılmıştır.

Çizelge 2.1 Mesafe tespit yöntemlerinin karşılaştırılması

	Öncü Kenar Tespiti	Tepe Noktası Tespiti	Eşleşen Filtre Tespiti
Gerçek zamanlı sistemlere uyarlabilirlik	İyi	Kötü	Kötü
Düşük güçlü lazerlerle kullanılabilirlik	Kötü	Orta	İyi
Bellek ihtiyacı	İyi	Orta	Kötü
Uygulama kolaylığı	İyi	Orta	Kötü

3. LIDAR SİNYALLERİNDE GÜRÜLTÜ

Elektronik devre ve sistemlerde, gürültü kelimesi sisteme uygunsuz veya beklenmedik herhangi bir uyarıyı ifade etmek için kullanılır. Aynı zamanda, gürültü kaotik veya rastgele davranış sergileyen sinyaller için de kullanılır. Gürültünün kaynağı sistem içinde veya dışında olabilir. Örneğin, tümleşik devre cihazlarındaki termal ve darbe gürültüsü içsel gürültü kaynaklarıdır ve elektromanyetik parazitler yoluyla ortamdan alınan gürültü ise harici bir kaynaktır (Demir ve Sangiovanni-Vincentelli 1998).

Gürültü elektronik sistemlerin performansını büyük ölçüde etkileyebilir, özellikle yüksek frekanslı sinyallerin bulunduğu sistemlerde daha belirgin hale gelir. Gürültü, özellikle radyo frekansı (RF) cihazları, mikroelettronik devreler ve telekomünikasyon sistemleri gibi hassas uygulamalarda ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Bu uygulamalarda, gürültü, sinyal kalitesinde bozulmaya, veri kaybına ve hatta sistem çökmesine neden olabilir (Kozat ve Arslan 2013).

Gürültüyü azaltmak için kullanılan teknikler arasında sinyal filtreleme, topraklama, ekranlama ve güç kaynağı filtrelemesi bulunur. Bu teknikler, sisteme giren gürültüyü temizler ve sistem performansını artırır (Yates ve Brooks 2001).

Gerçek uygulamalarda, LIDAR sinyallerini etkileyebilecek birçok gürültü ve parazit kaynağı vardır. Bunlar aşağıdaki gibi tarif edilebilir:

- (1) Genel olarak, rastgele parazitler ve gürültüler esas olarak LIDAR sistemi tarafından üretilir. Sinyale uygulanan Smoothing Process (sinyallerin yumuşatılması), LIDAR verileri üzerindeki etkilerini azaltabilir. (Fang ve Huang 2004)
- (2) Lazer darbesi sırasında lazer devrelerinde anahtarlanan yüksek akımların ürettiği parazitler de mevcuttur. LIDAR sinyallerinde zamandan bağımsız arka plan gürültüsüne neden olurlar. Optik gönderici ve alıcı arasındaki mesafe çok yakın olduğundan, bu tür parazitlerin basit bir ekranlama tekniği ile ortadan kaldırılması

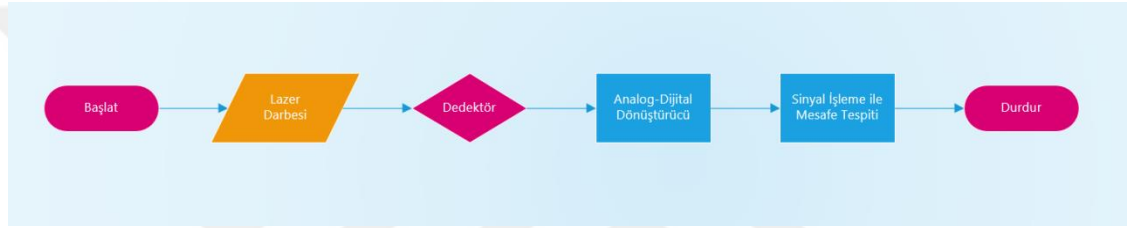
genellikle çok zordur. Bu parazitleri kolayca ortadan kaldırmak için, LIDAR'daki lazer bloke edildiğinde (yani, gökyüzünden istenen hiçbir sinyal alınmadığında) arka plan gürültüsü kaydedilmelidir. Sonuç olarak, gerçek yankılardan arka plan gürültüsü çıkarılarak pratik LIDAR sinyalleri elde edilebilir. (Fang ve Huang 2004)

- (3) Ayrıca LIDAR sistemi dışındaki Güneş, Ay, Yıldızlar vb. kaynaklardan da parazitler veya gürültüler meydana gelir. Bunlar lazerdeki ani boşalmalar nedeniyle oluşan parazitlere benzer şekilde ortadan kaldırılabilirler. (Fang ve Huang 2004)
- (4) Işık istatistikleri, LIDAR sisteminin kesinliği için bir başka önemli parametredir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, LIDAR gücünün ortalama foton sayısı ile ifade edilmesidir. Genel olarak, foton, dedektör (fotodiyot veya fotoçoğaltıcı) ile etkileşime girdiğinde, rastgele bir akım tepe noktası üretecektir. (Fang ve Huang 2004)
- (5) Son olarak, genellikle bir dijitalleşme gürültüsü vardır ve sinyali analog biçimden dijitale dönüştüren cihazların sınırlı hassasiyeti nedeniyle meydana gelir. (Fang ve Huang 2004)

Gürültü veya parazit dağılımı çok karmaşıktır, bu nedenle gerçek uygulamalarda kişiler gürültü veya parazit hakkında önceden bilgi sahibi olamazlar. Bu nedenle gürültülü ortamlarda sinyal bileşenlerinin nasıl tespit edileceği sorusu uzun süredir birçok araştırmacının kafasını meşgul etmektedir.

4. LİTERATÜR TARAMASI

Sinyal işleme algoritmaları, lazer tabanlı mesafe ölçümü sistemleri için oldukça yaygın bir kullanıma sahiptir. Bu algoritmalar, lazerden yansıyan sinyallerin uçuş süresi (time-of-flight) prensibine dayanan mesafe ölçümü işlemini gerçekleştirmek için kullanılır. Bu sinyaller, bir dedektör tarafından algılanır ve ardından analog-dijital dönüştürücü (ADC) kullanılarak sayısal verilere dönüştürülür. Daha sonra, sinyal işleme algoritmaları kullanılarak bu sayısal verilerin işlenmesi ve hedef nesnenin mesafesinin hesaplanması sağlanır. Bu sürece ait akış diyagramı aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4.1 LIDAR mesafe tespit akış diyagramı

Aşağıda, düşük güçlü lazerler ile mesafe tespiti için kullanılan sinyal işleme algoritmalarının kullandığı temel ölçüm yöntemlerinden bazıları açıklanmıştır:

Time-of-Flight (ToF – Uçuş Süresi): Bu algoritma, lazer ışığının hedef nesneye çarptıktan sonra yansımalarının algılanması için gereken süreyi hesaplar. Bu süre, hedef nesnenin mesafesine bağlıdır. ToF algoritması, lazer tabanlı mesafe ölçümü sistemleri için oldukça yaygın bir kullanıma sahiptir.

Phase-shift (Faz Kaydırma): Bu algoritma, lazer ışığının yansımalarının faz değişimini hesaplar. Hedef nesnenin mesafesi, lazer ışığının yansımalarının faz değişimine bağlıdır. Phase-shift algoritması, ToF algoritmasına alternatif olarak kullanılabilir.

Frequency-Modulated Continuous-Wave (FMCW – Frekans Modüleli Sürekli Dalga): Bu algoritma, lazer ışığının frekansının değiştirilerek hedef nesneden yansıyan

sinyalin frekansındaki değişimi hesaplar. Bu frekans değişimi, hedef nesnenin mesafesine bağlıdır.

Pulse-Width Modulation (PWM – Darbe Genişlik Modölasyonu): Bu algoritma, lazer ışığının genlik veya darbe genişliğinin değiştirilerek hedef nesneden yansıyan sinyalin genlik veya darbe genişliği değişimini hesaplar. Bu değişimler, hedef nesnenin mesafesine bağlıdır.

LIDAR sistemlerde gürültü seviyesini düşürmek ve dedektör üzerine düşen sinyalin gücünü arttırmak için birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Gürültüden temizleme yöntemlerinin yanı sıra dedektör üzerindeki gürültüyü azaltarak lazer darbesinin, sinyal içerisindeki belirginliğini arttırmak ve filtre ihtiyaçlarını minimize etmek de bu yöntemlerden biridir. Bunu yapabilmek için sistemin termal duyarlılığı azaltmak, daha güçlü bir lazer kullanmak ya da gürültünün çok daha az etkili olduğu ışık dalga boylarında çalışmak gibi yöntemler kullanılabilir. Ma (2008) yaptığı çalışmalarda LIDAR sistemleri için önemli bir konu olan optik tasarımın LIDAR sinyallerindeki gürültüye olan etkisinden detaylı olarak bahsetmiş ve daha temiz sinyaller toplayabilmek için bir optik tasarım önerisinde bulunmuştur.

Dijital olarak filtreleme algoritmaları için literatürde, ampirik mod ayrıştırması (EMD) (Wu vd. 2006), Kalman filtreleme Yöntemi (Francisc vd. 1999), dalgacık eşik analizi (Mao 2011) ve Fourier filtreleme pencere yöntemi gibi birkaç gürültü giderme veya filtreleme yöntemi mevcuttur. LIDAR sinyalleri, kullanılan lazerin dalga boyu ve güneş ışığının dalga boyundaki eşleşme düzeyi, yansıma sinyallerinin doğrusallık ve doğrusal olmama özellikleri nedeniyle, donanım filtreleme yöntemleri ile etkili bir şekilde gürültüden temizlenemeyebilir, ancak sinyaller toplandıktan sonra uygulanacak olan dijital filtreleme işlemi ile gürültüden temizlenebilirler. Fourier filtreleme pencere yöntemi zaman-frekans lokalizasyon eksikliği nedeniyle uzamsal çözünürlüğünü feda eder; Kalman filtresi, atmosferik sönümleme katsayısı keskin bir şekilde değiştiğinde büyük hatalara yol açar, yani zaman-frekans lokalizasyonu zayıftır (Francisc vd. 1999); EMD filtresi, özellikle gece tespiti için nispeten yüksek sinyal gürültü oranı için uygun olup SNR düşük sinyal işlemede özellikle faydalıdır (Barnhart ve Eichinger 2011);

Dalgacık analizi, zaman-frekans lokalizasyonunun iyi özelliklerine sahiptir ve sinyallerin çok ölçekli analizi ile farklı frekans bileşenlerine ayrıştırılmasını sağlar ve özellikle düşük SNR'lı sinyalleri işlemede güçlü bir araçtır (Alexander vd. 2000). Mao (2011) makalesinde dalgacık eşik analizini detaylı bir şekilde ele almış ve dalgacık eşik analizini temel alan farklı yöntemlerden bahsederek bunları karşılaştırmalı bir şekilde, bir LIDAR sinyali üzerinde test etmiştir. Bu yöntemlerden biri olan eşik değeri tespiti yönteminin içlerinde en verimli yöntem olduğundan bahsederek dalgacık eşik analizinin LIDAR sinyallerindeki gürültü temizleme performansını verilere dayandırarak ortaya koymuştur. Yine aynı şekilde Zhirong (2013) yumuşak eşik değeri ile dalgacık eşik analizi yöntemini kullanarak LIDAR sinyallerinde gürültü temizleme yönteminin testlerini gerçekleştirmiş ve dalgacık eşik analizinin, yüksek atmosfer ışık bileşenlerinin olduğu zayıf sinyalleri gürültüden temizlemede oldukça başarılı olduğunu veriler ile ortaya koymuştur.

Dalgacık eşik analizi yöntemi üzerinde çalışmalar yapan Xu (2017) genel olarak kullanılan yumuşak (soft) ve sert (hard) eşik analizi yöntemlerine alternatif olarak yeni bir eşik analiz yöntemi önermesinde bulunmuştur. Bu eşik analizi yöntemlerini deneysel verilerle test ederek performanslarını karşılaştırarak, genelleştirilmiş eşik analizi yöntemi olarak belirttiği yöntemin daha verimli olduğunu belirtmiştir. Ancak Xu'nun makalesinde kullanılan deney düzeneğinin kapalı bir ortamda olması ve 50 metre mesafedeki bir cisimden yansıyan ışınların dedektör üzerinde oluşturduğu potansiyelin veri seti olarak kullanılmış olması, bu yöntemin atmosfer koşullarında ne kadar verimli olacağı konusunda soru işaretleri oluşturmaktadır.

LIDAR sinyaller için bir diğer önemli dijital filtreleme yöntemi olan hareketli ortalama yöntemini detaylandıran Kang (2007) "The Diode Laser Range Finder(DLRF) using the Cumulative Binary Detection Algorithm(CBDA)" başlıklı makalesinde, LIDAR sinyallerinin kümülatif olarak toplanmasının SNR'a katkısından bahsetmiştir ve N adet LIDAR sinyalinin SNR'ı $\sqrt{N}$ kadar arttırdığını ileri sürmüştü. Yaptığı testlerde, 20 Watt güce sahip bir lazer ile 25-1000 metre aralığında mesafe tespitinin yüzde 0.5 hata ile gerçekleştiğini belirterek LIDAR sinyallerinin kümülatif toplanmasının sıfır ortalamalı Gaussian dağılımına sahip gürültüleri temizlemede ne kadar önemli olduğunu vurgulamıştır.

Kang'ın (2007) çalışmalarından yola çıkarak hareketli ortalama yönteminin LIDAR sinyallerinde gürültüyü ne derecede temizleyebildiği ve sınırlarının ne olduğu konusunda çalışma yapan Dandawate (2015) makalesi "FPGA based Low Power Laser Range Finder" ile önemli bulgular ortaya koymuştur. Yaptığı çalışmalar ile ölçülmek istenilen mesafenin artmasına bağlı olarak ortalama dahil edilen LIDAR sinyallerinin sayısının üstel olarak artması gerektiğini ortaya koymuştur. Hareketli Ortalama ile yaptığı gürültü filtrelemeyi takiben Barker kodu ile filtreleme yaparak 10 Watt gücünde bir lazer kaynağı ile 2000 metreye kadar mesafe tespiti yapabildiğini belirtmiştir. Ancak 2000 metreye varan mesafe ölçümlerinde ortalama kullanılacak LIDAR sinyali sayısının yaptığı kestirimle 20000 adet olması gerektiğini ifade etmiştir. Buna bağlı olarak FPGA için yaptığı uyarlamada ölçüm süresinin 5 saniye olduğu ifade edilmiştir. Ancak gerçek zamanlı olarak mesafe tespiti yapılmak istenilen bir sistem için 5 saniye çok yüksek bir süredir ve sistemin performansını büyük oranda düşürecektir.

Hareketli ortalamanın LIDAR sinyallerini temizlemede yüksek performansa sahip olması nedeniyle üzerinde birçok çalışma yapılmış ve verimliliğini artırmak için farklı yöntemler denenmiştir. Jianke (2009) makalesinde bu amaç ile yeni bir yöntem ileri sürmüştür. Çoklu darbe akümüasyonu olarak adlandırabileceğimiz bu yöntemde, bir hedef üzerine belirli aralıklarla birbirini takiben birden fazla lazer darbesi gönderilmiştir (M adet) ve bu işlem N kez tekrarlanır. Dedektör ile toplanan sinyaller standart ortalama işlemine tabi tutulduğunda N sinyalin ortalaması alınmış olur ancak gürültüden temizlenen sinyalde M adet lazer darbesi bulunmaktadır. N kez ortalaması alınmış sinyal kullanılarak; her bir seride atılan M adet darbenin ne kadar gecikme ile atıldığı bilindiğinden uygun şekilde kaydırılarak M adet yeni sinyal oluşturulur ve bunların ortalaması alınır. Bu sayede $M \times N$ kadar ortalama alınmış olur ve SNR $\sqrt{M \times N}$ oranında artar ve bu iyileşme N adet serinin toplanma süresinde elde edilmiş olur. Ölçüm süresi M oranında azalır. Hareketli ortalama en önemli parametrenin ölçüm süresini ortalama adedine bağlı olarak arttırıyor olması olduğu düşünüldüğünde, yöntemin verimini büyük oranda arttırdığı söylenebilir. Ancak bu yöntem her LIDAR sistemi için uyarlanabilir değildir. LIDAR sistemlerinde kullanılan lazer kaynakları üzerlerinden geçen yüksek akımın etkisiyle çok fazla ısınır ve soğumaları için belirli bir süreye ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle aynı genişliğe sahip birden fazla darbe atılması her sistem için mümkün olmamaktadır. Bu tarz

sistemlerde bu durum ancak darbe genişliğinin M oranında küçültülmesiyle gerçekleştirilebilir. Ancak bunun yapılması genişliği küçülen lazer darbesinin atmosferde kaybolmasını kolaylaştıracaktır ve dolayısıyla gürültü içerisinde tespitini zorlaştıracaktır.

Bahsi geçen bu çalışmalarda farklı güç seviyelerine sahip lazerler kullanılmıştır ve bu tezlerin birçoğunun asıl amacı filtreleme yöntemlerinin performans analizini yapmak ya da bazı yeni filtreleme yöntemleri ilerimsürmektir. Ancak bunlardan farklı olarak düşük güçlü lazerler üzerine yapılmış olan çalışmalardan biri Huang (2002) tarafından yayımlanan "Digital Integration of LIDAR System Implemented in a Low-Cost FPGA" başlıklı makaledir. Makalede uçuş süresi hesaplanarak mesafenin tespiti yapılmakta ve TDC (time-to-digital converter - zaman-dijital dönüştürücü) ve FPGA kıyaslanması yapılarak düşük maliyetli FPGA'lar kullanarak LIDAR sisteminin uygulanması anlatılmaktadır. Huang'ın çalışmasında, bu tezde de kullanılacak olan SPL-90 AT lazer diyodu kullanılmıştır ve bu lazer kullanılarak tarama yöntemi ile belirli bir cismin 2 boyutlu şekline dair bir çıkarım yapılmaya çalışılmıştır. Makalede yapılan çalışmalarda herhangi bir gürültü temizleme yoluna gidilmemiştir çünkü ölçülmesi hedeflenen maksimum mesafe 10 metredir ve bu kadar düşük bir mesafede sinyal üzerinde olabilecek gürültü düzeyi çok düşüktür. Ölçülmek istenilen mesafenin kısıtlılığı, kullanılan diyodun ne kadar düşük güçlü bir diyot olduğu ve uzun mesafe ölçümlerinde kullanımın ne kadar zor olabileceği hakkında bir izlenim oluşturmaktadır. Huang'ın makalesinde kullanılan LIDAR sistemi hakkında detaylı bilgiler verilmiş, lazer sürücü devresi ve dedektör devresi hakkında temel bir anlatı yapılmıştır.

Jutzi (2006) makalesinde, birçok çalışmadan farklı olarak hedef cismin şeklini tahmin edebilmek için Wiener filtre kullanmıştır. LIDAR ile hedef cisme gönderilen çok dar genişliklere sahip darbelerin yansımaları ilk olarak alçak geçiren filtreden geçirmiştir. Jutzi'ye göre LIDAR sistemlerinde bir darbenin tespiti için darbe, en az 5 ns süreyle gürültünün standart sapmasının üç katına kadar yüksek olmalıdır. Burada gürültünün standart sapması lazer darbesinin olmadığı bir anda alınan sinyalden hesaplanabilir. 1000 adet sinyalin ortalamasını alarak elde ettiği sinyali kullanan Jutzi, Wiener filtre ile bir kestirim yaparak 2 adet cismin kaynağa olan uzaklığını bulmuştur. Yaptığı çalışmalarda düşük güçlü bir lazer ve dar darbe genişliği kullanmıştır. Darbe genişliğinin de çok dar

olması nedeniyle sinyalin örneklenmesi GHz hızlarında yapılmıştır. Genel olarak, kısa lazer darbelerinin gücü daha düşüktür ve tespit edilmesi daha zordur. Düşük bir sinyal-gürültü oranına sahip sinyallerde, eşleştirme filtresi kullanılabilir (Jutzi ve Stilla 2004). Yapılan çalışmalarda cisimler, lazer kaynağına 100 metre uzaklıkta konumlandırılmıştır. Ölçüm mesafesinin bu kadar az olduğu uygulamalarda ölçüm hassasiyeti yüksek olmalıdır çünkü bu tarz uygulamaların asıl amacı kesin konum tahmini ya da cismin geometrik şeklinin tahmin edilmesidir.

Geleneksel lazer mesafe ölçerler genellikle birkaç megavatlık yüksek güçlü lazerler kullanırlar ve hedeften yansıyan sinyallerin (hedef sinyalleri) şiddetleri, optik gürültü, dedektör gürültüsü ve amplifikatör gürültüsü gibi sistem gürültülerinin şiddetlerinden çok daha yüksektir. Bu nedenle, lazer mesafe ölçerler basit bir eşik değer saptama yöntemiyle hedef sinyallerini kolayca algılayabilirler. Ancak, yüksek güçlü lazerler insan gözlerine zarar verebileceğinden, lazer çıkışları son zamanlarda düzenlenmiş ve gözler için güvenli olan düşük güçlü lazer diyotları kullanan mesafe ölçerlerinin ihtiyacı ortaya çıkmıştır ve düşük maliyetle yapılabilirler. Bu nedenle, aralıkları artırmak için yeni sinyal işleme teknolojisi çalışmaları aktif olarak devam etmektedir. (Kang 2007)

LIDAR denklemine göre, bir LIDAR yankı sinyalinin gücü, atmosferik sönümleme katsayısının üssel azalması ve LIDAR ile hedef arasındaki mesafenin karesiyle azalır. Bu nedenle, kullanışlı ölçüm bilgilerini içeren daha küçük yankı sinyalleri, elektriksel dalgalanmaların ve yan ışığın gürültüsü tarafından kolayca kontamine olur ve bu durum LIDAR sisteminin etkili tespit aralığını ve doğruluğunu doğrudan etkiler. (Zhou vd. 2013)

Düşük güçlü LIDAR sistemlerinin kullanımın önemi otonom araçlarla birlikte giderek artmıştır. Uzun mesafe ölçümlerinde ve atmosfer koşullarında düşük güçlü LIDAR ile ölçüm yapmak birçok zorluk barındırmaktadır ve bu zorluklara şimdiye kadar değindik. Bunların yanı sıra LIDAR sistemlerinin gerçek zamanlı çalışabilmesi oldukça önemlidir ve günümüz teknolojisinde gerçek zamanlı sistemler için en cazip çözümleri FPGA'lar sunmaktadır. Yüksek hızlarda paralel çalışabilme kabiliyetleri sinyal işleme algoritmalarında kullanımını kolaylaştırmaktadır. Ancak bu avantajının yanı sıra logic

yapıları nedeniyle FGPA’larda karmaşık matematiksel işlemleri yapmak zordur. Farklı yaklaşımlar kullanılarak sinyal işleme algoritmaları FPGA’ya uygun olarak yeniden tasarlanmalı ve donanım tasarım dilleri (HDL) ile yazılmalıdır.

Bu tezde, şimdiye kadar bu konu hakkında yapılan çalışmalar ışığında görece düşük güce sahip bir lazer kaynağı kullanarak, atmosfer koşullarında uzun mesafe ölçümleri yapılmıştır. Daha önce üzerinde çalışmaların da yapıldığı farklı sinyal işleme algoritmaları ile testler yapılarak hedef nesnelerin mesafe tespiti yapılarak bu algoritmaların performansları karşılaştırılacaktır. Literatürde üzerinde çalışmalar yapılmış olan bu sinyal işleme algoritmaları çoğunlukla yüksek güçlü lazerler ile ya da kısa mesafelerde test edilmiş ve bulgular üzerinde tartışmalar yapılmıştır. Yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak bu tezin hedeflerinden biri farklı çalışmalarda kullanılan bu sinyal işleme algoritmaların düşük güçlü LIDARlar ile uzun mesafe ölçümlerinde nasıl bir performans sergileyeceklerini görmektir. Aynı zamanda gerçek zamanlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılan FPGA’lara uygulanabilirlikleri incelenecek ve performansları Matlab kullanılarak karşılaştırılan sinyal işleme algoritmalarının FPGA kullanıldığında performanslarının ne seviyede değiştiği analiz edilecektir.

5. BU TEZDE KULLANILAN GÜRÜLTÜ TEMİZLEME YÖNTEMLERİ

Sinyalin gürültüden temizlenmesi, istenmeyen etkilerin ortadan kaldırılabilmesi ve verilerden anlamlı bilgiler elde edilebilmesi için gereklidir. Bu kısımda tezde kullanılacak gürültü temizleme yöntemlerinin teorik altyapısı oluşturulacaktır.

5.1 Hareketli Ortalama Teorisi

Hareketli ortalama, sinyal işlemede yaygın olarak kullanılan bir filtredir, çünkü anlaşılması ve kullanılması çok kolaydır. Adından da anlaşılacağı gibi, hareketli ortalama filtresi, çıkış sinyalindeki her noktayı üretmek için giriş sinyalinden bir dizi noktanın ortalamasını alarak çalışır. Hareketli ortalama için büyük sayı seçildiğinde, sinyal-gürültü oranı çok iyi artar çünkü LIDAR sistemlerinde atmosferden kaynaklı oluşan gürültü beyaz gürültüdür. İdeal koşullarda m tane lazer darbesinin toplanması sonucu sinyal gücü m^2 kadar katlanır. Gürültünün rastgele olmasından dolayı gürültü m kadar ve gürültünün varyansı σ , $\sqrt{m}$ kadar katlanır (Sheng 1996). Bu durumda gücün SNR (Signal-Noise Ratio – Sinyal-Gürültü Oranı) değerinin ortalama ile ilişkisi Denklem 1 ile gösterilebilir.

$$SNR'_p = \left(\frac{P_N}{P_S} \right) = \frac{m^2 P_N}{m P_S} = m SNR_p \quad (\text{Denklem 1})$$

Denklemden de görülmektedir ki gücün SNR değeri m kadar artarsa buna bağlı olarak genlik SNR değeri $\sqrt{m}$ kadar artacaktır.

5.2 Dalgacık Eşik Analizi Teorisi (Wavelet Thresholding Technique – WT)

Dalgacık analizi, çok boyutlu bir sinyal analiz yöntemidir. Dalgacık analizinin iyi zaman-frekans lokalizasyonu sayesinde, sinyalin farklı frekans bileşenleri Dalgacık eşik analizi kullanılarak ayrıştırılabilir. Bu, sinyal filtreleme, sinyal-gürültü ayrımı, güçlü gürültü arka planı altında zayıf sinyal çıkarımı gibi uygulamalar için etkili bir araç sağlar (Xiang 2006).

Dalgacık eşik analizi (WT), bir sinyali bir dizi temel işleve ayrıştırabilen bir dönüşüm anlamına gelir, ayrıca dalgacık temeli olarak da adlandırılır. Bir sinyalin WT'si, sinyal ve genişlemiş dalgacıklar arasındaki korelasyon fonksiyonu olarak tanımlanır. Fourier dönüşümüne (FT) benzer şekilde, WT ayrıca sinyali başka bir alana, frekans alanına eşlemektir. Bununla birlikte, FT, küçük veya aniden değişen özelliklerle ilgili bilgileri çok geniş bir frekans aralığında yaymaya çalışırken, WT çok küçük bir zaman aralığında lokalize olur. Bu nedenle, WT, geçici, periyodik olmayan sinyalleri analiz etmek için uygulanmak için daha uygundur (Rioul ve Vetterli 1991).

Günümüzde dalgacıklar, sinyal işleme alanında giderek daha önemli bir araç haline gelmektedir. WT'nin avantajı, zamanla değişen bir sinyalden hem zaman hem de frekans bilgisini verimli bir şekilde çıkarabilmesi gerçeğinde yatmaktadır. WT, bilgiyi çeşitli çözünürlük seviyelerinde orijinal sinyalde görüntüleyen her sabit iletme faktörü için zaman kaydırmalı bir fonksiyon olarak düşünülebilir. Bu süreçte, WT'nin katsayıları orijinal sinyalle aynı enerjiye sahiptir. Genişletme faktörü sıfıra yaklaştıkça, WT, sinyalin yüksek frekans özelliklerini görüntüler. Öte yandan, faktör arttıkça, daha kaba düşük frekans özellikleri görüntülenir.

Dalgacıklar, zamanla değişen bir sinyalden hem zaman hem de frekans bilgisinin çıkarılmasında etkilidir. Dalgacık tabanlı fonksiyonun önemli bir özelliği, bunların hem zaman hem de frekans alanındaki konumlarıdır. Kabul edilebilirlik koşulunu sağlayan bir kare integrallenebilir fonksiyonun $w(t)$ 'nin, bir sinyali önce analiz etmek ve sonra bilgi kaybı olmaksızın yeniden oluşturmak için kullanılabileceği gösterilebilir (Sheng 1996).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|w(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty \quad (\text{Denklem 2})$$

Denklem-2, $w(\omega)$, $w(t)$ 'nin Fourier dönüşümünü temsil eder. Kabul edilebilirlik koşulu, $w(t)$ 'nin Fourier dönüşümünün sıfır frekansta ortadan kalktığını ima eder (Denklem-3).

$$|w(\omega)|^2_{\omega=0} = 0 \quad (\text{Denklem 3})$$

Sıfır frekansında sıfır, aynı zamanda zaman alanındaki dalgacığın ortalama değerin sıfır olması ve dolayısıyla salınımlı olması gerektiği anlamına gelir. Bu nedenle, neredeyse tüm ölçülen sinyaller, FT'ye benzer olan WT tarafından kolaylıkla ayrıştırılabilir.

5.2.1 Sürekli ve ayrık dalgacık analizi (Discrete Wavelet Transform - DWT)

Bir sürekli Dalgacık analizi Denklem-4'teki gibi gösterilebilir.

$$W(s, b) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega_{(s,b)}(t) f(t) dt \quad (\text{Denklem 4})$$

Burada $W(s, b)$ WT katsayısı; s ölçek faktörü ve $\frac{1}{\sqrt{s}}$ enerjinin normalizasyon faktörüdür.

Ölçek faktörü s , frekansın bir ölçüsü olarak yorumlanabilir. Daha küçük bir ölçek faktörü, dönüştürülmüş sinyaldeki yüksek frekanslı bileşenlerin çıkarılmasını gösterirken, büyük bir ölçek faktörü, karşılık gelen düşük frekanslı bileşenlerin çıkarılmasını gösterir. Denklem-6 zaman alanında dalgacık fonksiyonu ile sinyalin bir evrişimi olarak da yorumlanabilir. WT, LIDAR sinyali gibi geçici sinyallere duyarlıdır. Ayrıca WT, gürültü ve sinyal üzerinde farklı çözünürlüklere sahip olduğundan, LIDAR sinyali üzerinde gürültü giderme işlemini gerçekleştirebilmektedir.

DWT'nin amacı, rastgele bir $f(t)$ sinyalini, farklı ölçeklerdeki tüm olası dalgacık tabanlarının bir toplamına ayrıştırmaktır. Orijinal giriş sinyali $f(t)$, bu iki tamamlayıcı filtreden geçer ve her ölçekte iki sinyal olarak ortaya çıkar. Sezgisel olarak, iki bant geçiren filtre kombinasyonlarının ardışık dizisi olarak yorumlanabilir. Genel olarak dalgacık fonksiyonu $w(t)$, ölçekleme fonksiyonlarının lineer bir kombinasyonu olarak yazılabilir.

$$\phi\left(\frac{t}{2}\right) = \sqrt{2} \sum_n h_n \phi(t - n) \quad (\text{Denklem 5})$$

$$w\left(\frac{t}{2}\right) = \sqrt{2} \sum_n g_n \phi(t - n) \quad (\text{Denklem 6})$$

DWT'de biri yüksek geçiren filtre ile ilişkili olan (h_n) ve diğeri alçak geçiren filtre ile ilişkili olan (g_n) iki katsayı vardır. Her ölçekte, iki filtre, giriş sinyallerine eşzamanlı olarak uygulanır. Bu iki filtrenin frekans yanıtlarının gerçek şekilleri, kullanılan dalgacık

fonksiyonlarının türleri tarafından belirlenir. WT, çok katmanlı bir ayrıştırma dönüşümüdür. Orijinal sinyal yüksek ve düşük frekans bileşenlerine ayrıştırılır, ardından karşılık gelen düşük frekans bileşeni tekrar iki parçaya ayrıştırılır ve bu böyle devam eder. Her ardışık ölçekte, filtrelerin üzerinde çalıştığı vektörün uzunluğu yarıya iner; buna desimasyon denir. Böylece, kullanılabilir ölçeklerin toplam sayısı N olur, burada N , girdi veri vektörünün uzunluğudur.

DWT'nin katsayıları sadece giriş sinyali $f(t)$ ile değil, aynı zamanda ana dalgacık $w(t)$ ve onun ölçekleme fonksiyonu $\phi(t)$ ile de ilgilidir. Sinyal özelliklerine en çok uyan bir ana dalgacık seçildiğinde, sinyalin DWT katsayıları, her ölçekte gürültülü sinyale gömülü gürültünün katsayılarından açıkça daha büyük olacaktır. Dalgacık eşik analizine dayalı gürültü giderme tekniğinin başarısı, WT tarafından sinyalin birkaç daha büyük katsayılara ayrıştırılabilmesi ve gürültünün yalnızca birçok daha küçük katsayılara dönüştürülebilmesi gerçeğinde yatmaktadır. Sinyaldeki gürültüyü gidermek için dalgacık eşik analizi yöntemini kullanmasının tercih edilmesi bu prensibe dayanmaktadır.

Dalgacık ayrıştırma yoluyla, sinyal ve dalgacık arasındaki dalgacık katsayıları olarak adlandırılan bir benzerlik indeksi $W(s, b)$ fonksiyonu hesaplanır. İndeks, dalgacık $w(t)$ 'nin orjinal sinyal ile ne kadar yakından ilişkili olduğunu gösterir. $W(s, b)$ indeksi daha büyükse, benzerlik daha güçlüdür; aksi takdirde daha zayıftır. Sonuç olarak, $f(t)$ 'yi yeniden oluşturmak için Denklem 7'yi kullanabiliriz.

$$f(t) = w(s, b) \otimes w(t) \quad (\text{Denklem 7})$$

Burada $\otimes$ işlemi ters DWT'yi temsil etmektedir.

5.3 Wiener Filtre Teorisi

Geri saçılan LIDAR dalga biçimi, esas olarak yayılan dalga biçiminin ve hedef kesitinin bir konvolüsyonudur. Gürültü etkisinin olmaması durumunda, yayılan dalga biçimi, frekans alanında bir bölme işlemi ile kolayca filtrelenebilir. Ancak gürültü kaçınılmazdır ve basit ters dekonvolüsyon sürecinde büyük bir sayısal hataya neden olabilir. Bu

nedenle, sağlam bir dekonvolüsyon yöntemi, gürültünün etkisini azaltabilmelidir (Wang 2015).

Wiener filtresi, beklenen yüzey yanıtı ile tahmini yüzey yanıtı arasındaki ortalama karesel hatayı en aza indirmek için kullanılan optimal bir doğrusal filtredir (Moon ve Stirling 2000). Wiener filtre (WD), gürültü ve sinyalin istatistiksel olarak bağımsız olduğunu varsayar. Wiener Filtre frekans alanında şu şekilde ifade edilen bir Wiener Filtresi $F(f)$ kullanarak bozulmamış hedef kesit alanı $P(t)$ ile tahmini hedef kesit alanı $\underline{P}(t)$ arasındaki ortalama kare hatasını en aza indirir:

$$F|f| = \frac{|w_T(f)|^2}{|w_T(f)|^2 + K} \quad (\text{Denklem 8})$$

Burada K gürültüye bağlı sabit bir katsayıdır. İdeal K katsayısı, yapılan denemeler ve testler sonucu en optimal şekilde seçilir. Wiener Filtresinin sınırlamalarının birincil kaynağı, sinyalin frekans alanında iyi karakterize edilmemiş olmasıdır. Sinyali düz bir güç spektrumuna sahip bir Gauss rastgele vektörü olarak modellerken, Wiener filtresi, sinyal ile beyaz Gauss gürültüsünü (White Gaussian Noise - WGN) ayırt etmede zorlukla karşılaşır (Parrish ve Scarpace 2007).

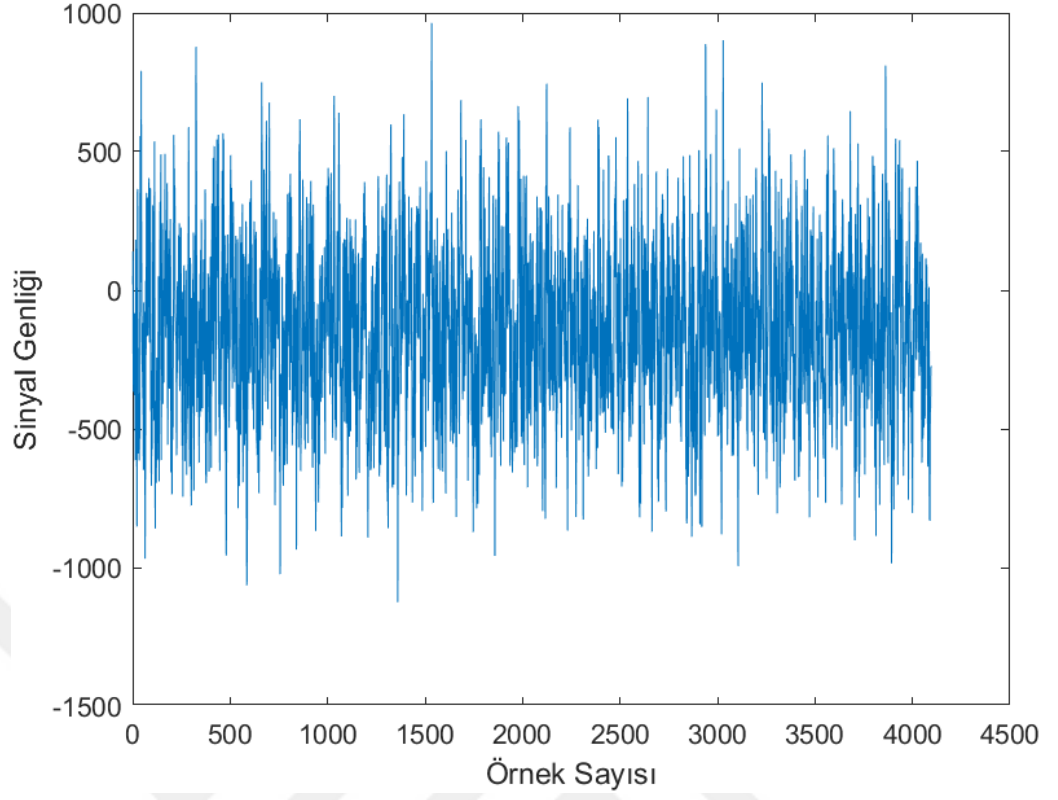
6. ALGORİTMALARIN MATLAB İLE TEST EDİLMESİ

Bu kısımda bir önceki bölümde teorik altyapısını oluşturduğumuz gürültü temizleme yöntemleri Matlab kullanılarak test edilecektir.

Bu tez çalışmasında kullanmak üzere 500 m mesafede, 3 km mesafeye karşılık gelecek şekilde zayıflatılmış lazer darbelerinin dedektör üzerinde oluşturduğu potansiyel, 14 bit ADC ile 125 MHz’de örneklenmiştir. Aynı ayrı toplanan bu sinyaller FPGA üzerinden bilgisayara aktarılmış ve Matlab’da algoritmaları test etmek için kullanılmıştır. Sonuçların doğruluğundan emin olabilmek için verilerin kontrollü bir ortamda toplanması gerekmektedir. Lazer mesafe ölçerlerin Avrupa standartlarına uygunluğunun test edilmesi için de buna benzer bir yöntem kullanılmaktadır. 4 metrekaare büyüklüğünde bir hedef 500 metre uzaklığa yerleştirildikten sonra lazer sinyali zayıflatılarak ölçümün yapılabildiği maksimum zayıflatma değeri belirlenmektedir ve kullanılan maksimum zayıflatma değeri ile ölçülebilir gerçek maksimum mesafe hesaplanarak lazer mesafe ölçerler sertifika edilmektedir.

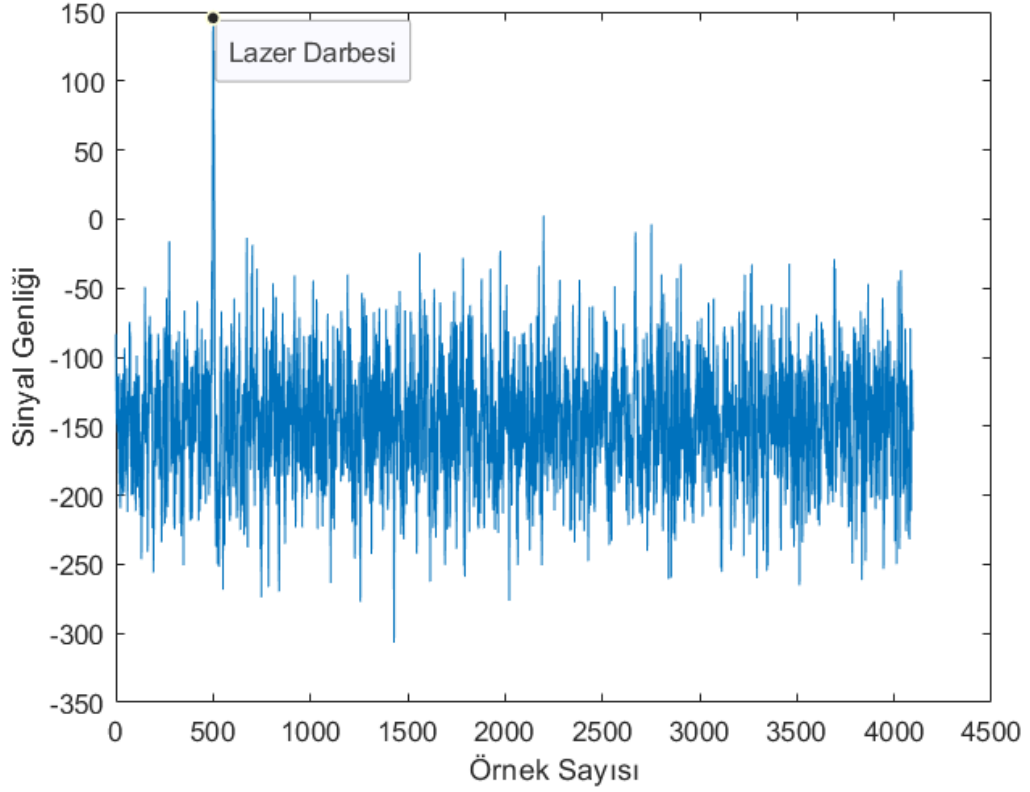
6.1 Matlab ile Hareketli Ortalama Analizi

Lazer sinyalleri birçok gürültü kaynağı tarafından etkilenmektedirler. Bu gürültü girişimlerinin büyük bir kısmını beyaz gürültü oluşturmaktadır. Beyaz gürültüler Gaussian dağılıma sahiptirler ve bu nedenle ortalama almak sinyali büyük oranda gürültüden temizler. Şekil 6.1’de verilen şekil bir Lazer darbesinin 500 metre mesafeden yansarak dedektör üzerinde oluşturduğu potansiyeli göstermektedir. Şekil incelendiğinde lazer sinyalinin, gürültü seviyesi altında kaldığı ve tespit edilmesinin mümkün olmadığı anlaşılabilmektedir.



Şekil 6.1 Dedektörden toplanan veriler (LIDAR sinyali)

Arka arkaya, aynı hedeften yansıyan lazer sinyalleri toplandığında ve bu lazer sinyallerini ortalaması alındığında elde edilen sinyal Şekil 6.2’de verilmiştir. Ortalama işlemi ile gürültünün büyük ölçüde temizlendiği ve buna bağlı olarak lazer sinyalinin SNR değerinin büyük oranda arttığı söylenebilir.



Şekil 6.2 Ortalama işlemi sonucunda elde edilen sinyal (n=100)

Ortalama işlemini basit bir şekilde Denklem 9'daki gibi ifade edebiliriz:

$$S_T = \sum_{i=1}^n S_i \quad (\text{Denklem 9})$$

Burada n sayısı ortalamada kullanılan LIDAR sinyallerinin adedini belirtmektedir. Ortalamada kullanılan sinyal adedi arttıkça SNR oranı yükselecektir. Ancak bir noktada beyaz gürültünün ortalaması diğer gürültü kaynaklarından meydana gelen gürültülerin seviyesine iner ve ortalamada kullanılan sinyal sayısının artırılması SNR'ı daha fazla iyileştiremez. Bu doyum noktası oldukça önemlidir çünkü sinyal, ortalama işlemi ile büyük oranda gürültüden arındırılmış olsa da ortalama işleminin gerçek zamanlı uygulamalar için büyük bir dezavantajı vardır.

Lazerler atmosferde ışık hızında hareket ederler ve LIDAR sistemlerinde mesafenin tespit edilebilmesi için hedeften yansıyan ışınların detektör üzerinde bir potansiyel oluşturması gerekmektedir. Lazer kaynağından çıkan ışınların yansiyarak tekrar LIDAR'a dönmesi için hedefin uzaklığına bağlı olmak üzere bir uçuş süresi gereklidir. Bu LIDARlarda ölçüm hızını etkileyen en büyük faktördür. Ortalama işleminin alınabilmesi için aynı hedeften n kadar sinyal alınması gerekmektedir. Bu durum, ölçüm süresinin $t \cdot n - 1$ kadar uzamasına neden olmaktadır.

Atmosferdeki ışıktan kaynaklanan bu beyaz gürültünün sisteme etkisi, dedektörün hassasiyetine ve lazer kaynağının gücüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Atmosferden kaynaklanan gürültünün ölçümdeki etkisini azaltmak için daha az hassas dedektörler kullanılabilir ya da ışığın daha az yoğun olduğu dalga boylarında çalışılabilir. Ancak bu yöntemlerin de kendi dezavantajları vardır.

Hassasiyeti düşük dedektörler kullanılmak istendiğinde daha yüksek güce sahip lazer kaynakları kullanılmak zorundadır. Lazer kaynaklarında güç arttıkça üretim zorluğu ve buna bağlı olarak da maliyet fazlasıyla artmaktadır. Bunun yanı sıra, yüksek güçlü lazer kaynakları sistemi fazlasıyla büyötmektedir. Gücün yüksek olması çalışma sırasında meydana gelecek ısının artması anlamına gelir ve bu ısının sisteme büyük etkileri vardır. Aynı zamanda yüksek güçlü lazerler daha büyük saçılım açlarına sahiptirler ve bu daha karmaşık ve büyük optik sistemler kullanılması zorunluluğunu beraberinde getirir.

LIDAR sistemlerinde, atmosferde daha az bulunan dalga boylarına sahip lazerler ve bu dalga boylarına özel üretilen dedektörler kullanmak da seçeneklerden biridir. Ancak yüksek dalga boyları insan sağlığına fazlasıyla zararlıdır ve Avrupa Standartları LIDARlar gibi insan ve canlı popölasyonunun yüksek olduğu alanlarda kullanılacak sistemler için bu dalga boylarının kullanılmasını uygun bulunmamaktadır.

Sistemin ihtiyaçları doğrultusunda dalga boyu, lazer gücü ve dedektör hassasiyeti gibi parametreler göz önüne alınmalıdır. Bütün bu bilgiler ışığında bütün dezavantajlarına rağmen canlı popölasyonunun yoğun olduğu bölgelerde düşük ve orta güçlü lazerleri kullanılması en uygun lazerlerdir. Düşük lazer güçlerinde atmosferden kaynaklanan bu

beyaz gürültü ölçümleri çok zorlaştırmaktadır. Bahsedilen dezavantajına rağmen beyaz gürültünün çok yoğun olduğu, atmosferdeki ışıktan kaynaklı gürültülerin temizlenmesi için en uygun yöntem hareketli ortalama yöntemidir.

6.2 Matlab ile Dalgacık Eşik Analizi Analizi

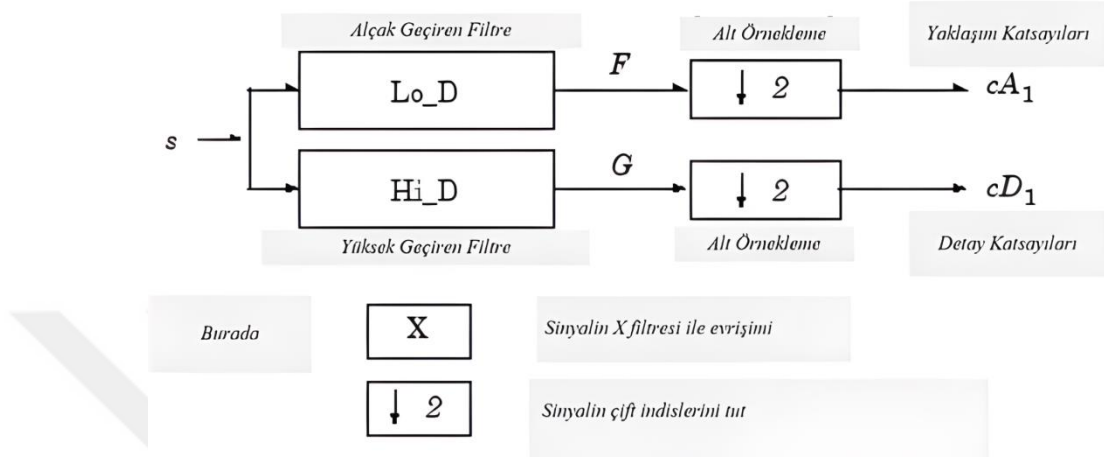
LIDAR sistemlerinde, sistem gürültüleri ve atmosfer gürültüleri başta olmak üzere birçok gürültü tipi vardır. Ancak bunların yanı sıra lazer kaynağından çıkan ışınlar, atmosferdeki toz zerreciklerinden ve çevredeki diğer cisimlerden yansarak dedektör üzerinde bir potansiyel oluşturabilir. Dedektör üzerinde oluşan bu yanıltıcı potansiyeller alınan sinyalde nesnenin gerçek konumundan farklı noktalarda tepe değerler oluştururlar. Bu tepe değerler bazen gerçek nesnenin oluşturduğu değerden daha da büyük olabilir. Ancak bu tepe noktaları gerçek darbeden ayıran belirgin bir özellik vardır.

Lazerler doğaları gereği sürekli çalışmaya uygun değildirler. Üzerlerinden uzun süre akım geçirilen lazer kaynakları aşırı ısınır ve yapısı bozulur. Bu yüzden lazerler, belirli bir frekansta ve belirli genişlikte darbeler üretilerek sürülürler. LIDAR sistemlerinde kullanılan optik sistemlerin de yardımıyla lazer kaynağından çıkan ve belirli bir genişliğe sahip darbeler, mesafesi ölçülmek istenen nesneden yansarak dedektör üzerinde neredeyse aynı darbe genişliğine sahip bir potansiyel oluşturur. Dedektör üzerinde oluşan diğer tepe noktalar ise lazer darbe genişliğinden çok daha dardır. Bu bilgiden faydalananlar, lazerleri sürmek için kullanılan sinyal ile detektörden alınan yansıma sinyalinin konvolüsyonu gerçek darbenin bulunması için kullanılabilecek bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak basit konvolüsyon işlemi bu denli karmaşık bir sinyal için yeterince verim sağlamamaktadır. Sinyal içerisinde belirli bir yapıyı aramak için kullanabileceğimiz dalgacık eşik analizi yöntemi, lazer darbesinin dedektörden alınan sinyal içerisinde bulunması için kullanılabilir.

Birçok sinyal için düşük frekanslı bileşenler en önemli kısımlardır. Sinyale kimliğini veren bu düşük frekanslı bileşenlerdir. Öte yandan yüksek frekanslı bileşenler detayları oluşturmaktadır. Dalgacık analizinde genellikle yaklaşımlardan ve ayrıntılardan

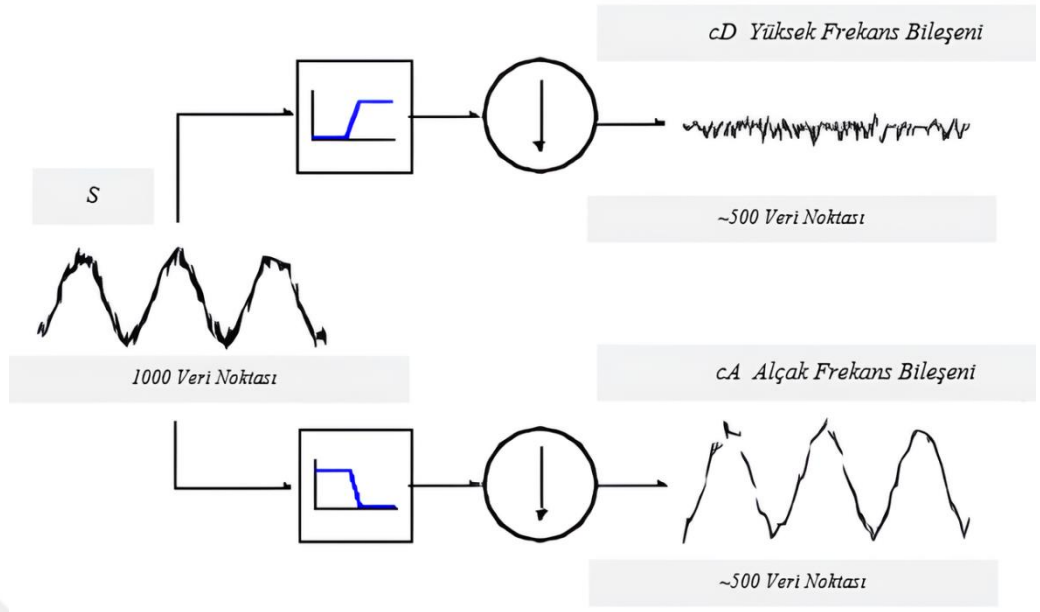
bahsederiz. Yaklaşımlar, sinyalin yüksek ölçekli, düşük frekanslı bileşenleridir. Ayrıntılar, düşük ölçekli, yüksek frekanslı bileşenlerdir.

En temel düzeyde filtreleme işlemi şöyle görünür.



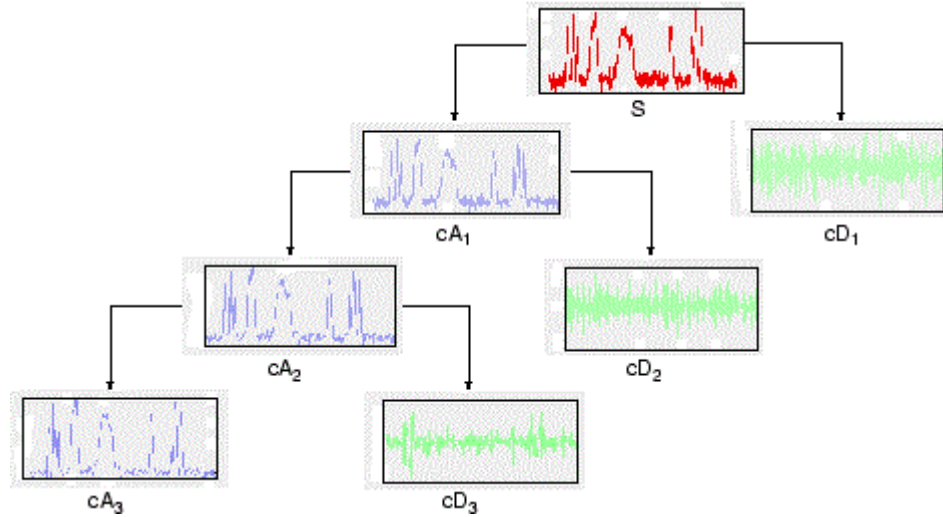
Şekil 6.3 Sinyalin Dalgacık analizi ile bileşenlerine ayrılması işlemi (Matlab - Wavelet Toolbox)

S sinyalinden başlayarak, ilk adım iki katsayı seti üretir: kestirim katsayıları (approximation coefficients) cA_1 ve detay katsayıları (detail coefficients) cD_1 . Bu vektörler, kestirim katsayıları için alçak geçiren filtre Lo_D ile ve detay katsayıları için yüksek geçiren filtre Hi_D ile S sinyalinin evrilmesi (convolve) ve ardından ikili desimasyon (decimation) ile elde edilir. Şekil 6.4’de bu süreci daha iyi anlamak için, bir sinyalin tek aşamalı ayrık dalgacık eşik analizini gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.4 Örnek Dalgacık analizi ile bileşenlerine ayrılması işlemi (Matlab – Wavelet Help Center)

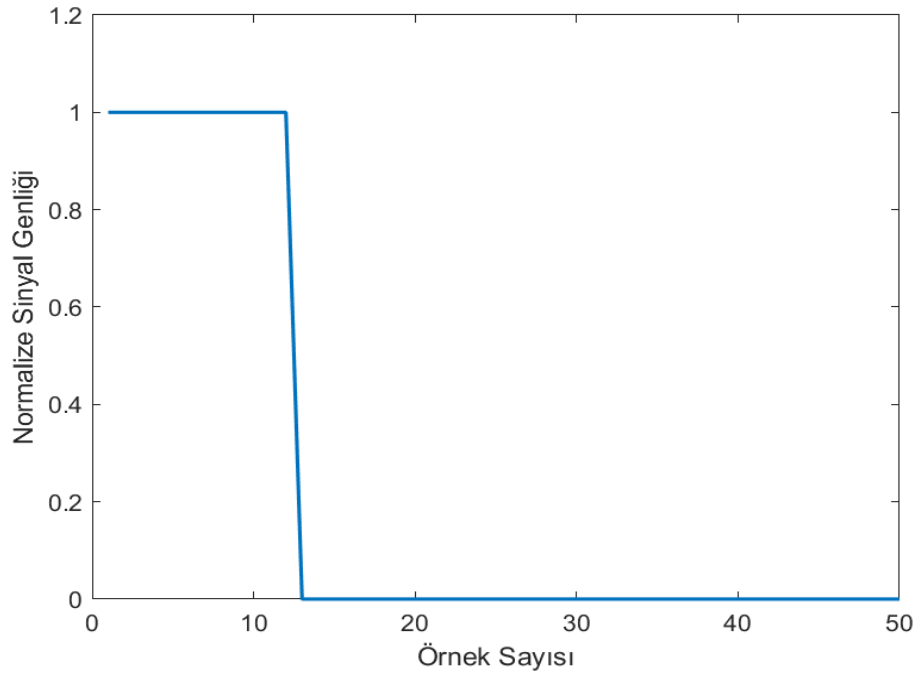
Ayrıştırma işlemi, ardışık yaklaşımların sırayla ayrıştırılmasıyla yinelenebilir, böylece bir sinyal birçok düşük çözünürlüklü bileşene bölünür. Buna dalgacık ayrıştırma ağacı denir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 Dalgacık ayrıştırma ağacı Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği (Matlab – Wavelet Help Center)

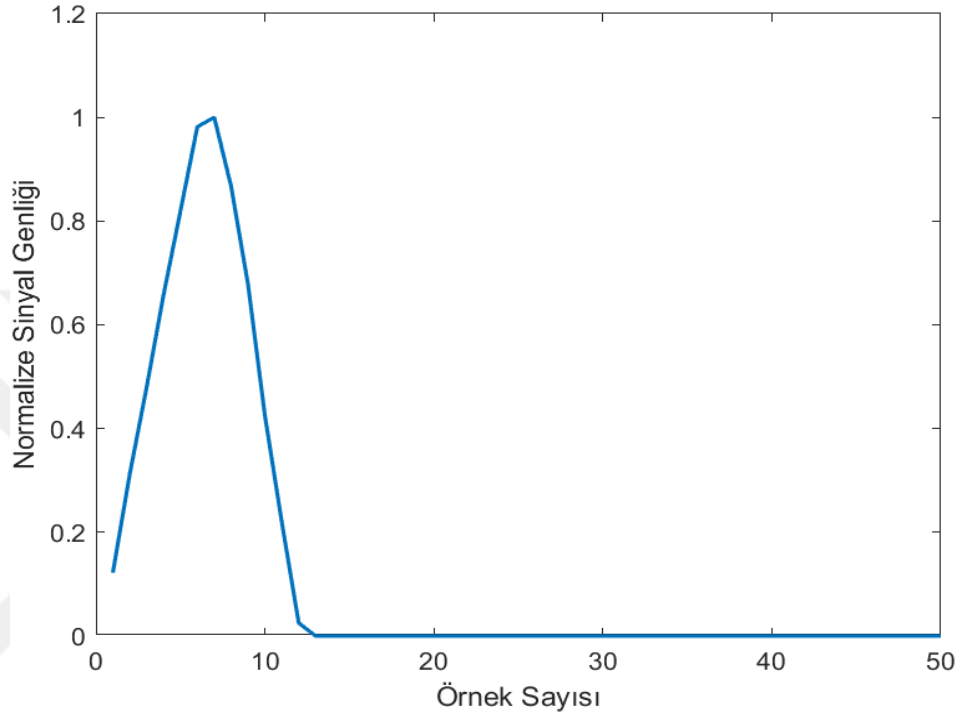
Elde edilen düşük frekanslı bileşenleri kullanarak, ters dalgacık eşik analizi ile S sinyalini yeniden elde edebiliriz. Bu aşamaya yeniden yapılandırma (reconstruction) denir. Ancak alçak geçiren ve yüksek geçiren filtreler sonrasında yaptığımız desimasyon işlemi sonucunda veri sayımız seviyeye bağlı olarak azalacaktır. Bu yüzden yeniden yapılandırma işlemi gerçekleştirilirken her veri arasına sıfır yerleştirilerek veri sayısı 2 katına çıkarılır (Upsampling).

Burada kullanılan alçak geçiren filtre katsayıları ve yüksek geçiren filtre katsayıları, gürültüden temizlenmek istenen sinyalin karakteristik özelliklerine göre seçilmelidir. Bu tez için referans olarak kullandığımız LIDAR sisteminde, lazer darbesi 1ms periyotlarla ve 100ns darbe genişliğindedir. Bu değerler, optimum çalışma performansının yakalanabilmesi için kullanılan lazerin veri sayfasından alınmıştır. 125 MHz’de çalışan sistemimizde, dedektörden 8ns aralıklarla örnek toplanmaktadır. Bu doğrultuda 4096 veri uzunluğuna sahip sinyalimizde 100ns’lik darbe 12 veri noktası ile temsil edilebilir. Teorik olarak lazer darbesini ve dolayısıyla dedektörde oluşturacağı potansiyeli aşağıdaki gibi verebiliriz.



Şekil 6.6 İdeal lazer darbesi dalga biçimi

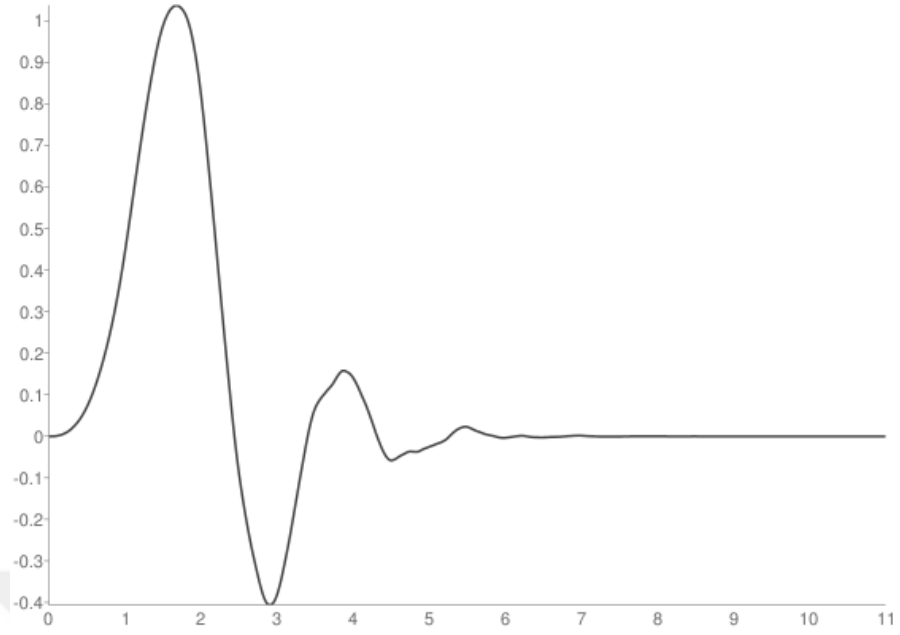
Ancak 125 MHz gibi yüksek bir hızda ve 100ns gibi dar bir zaman aralığında bir darbe sinyalinin oluşturularak lazeri sürmek neredeyse imkânsızdır. Kullanılan anahtarlama elemanları ve diğer çevre elemanların karakteristik kapasite, endüktans ve direnç değerlerinin etkisiyle lazer kaynağına iletilen darbe sinyali aşağıdaki şekli alır.



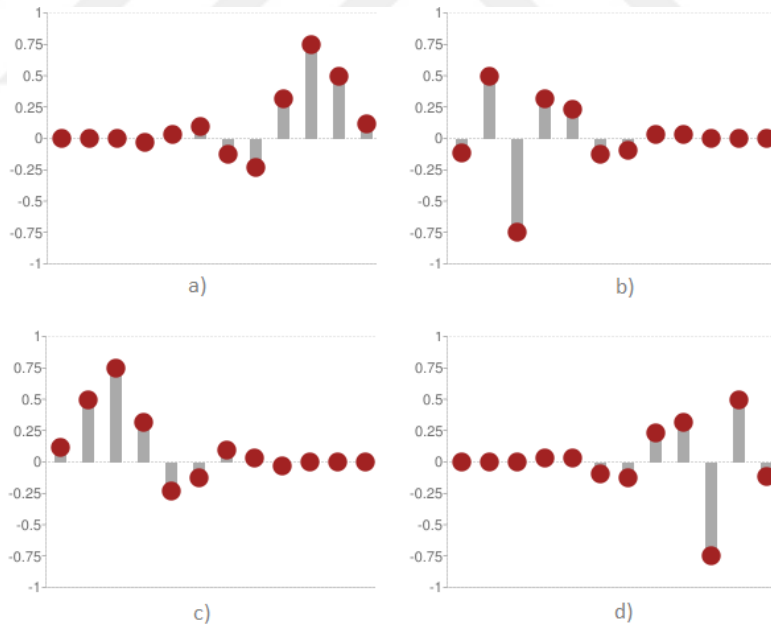
Şekil 6.7 Sistem etkileri ile düzenlenmiş lazer darbesi dalga biçimi

Dedektörden alınan S sinyali içerisinde bu darbe sinyalinin aranması ve yerinin net olarak tespit edilmesi ile mesafe ölçümü gerçekleştirilebilir. O halde sinyal içerisinde aranacak darbe yapısını göz önüne alarak filtre katsayılarını belirlemeliyiz. Katsayıları belirlerken dikkat edilmesi gereken temel unsur, filtre katsayılarının sinyal içerisinde aradığımız lazer darbesi ile benzer bir dalga biçimine sahip olmasıdır.

Şekil 6.7’de verilen grafikten yola çıkarak dalgacık ailelerini incelediğimizde, Daubechies 6’nın (db6) LIDAR sistemimiz için en uygun ölçekleme fonksiyonuna sahip olduğunu görebiliriz (Şekil 6.8). Daubechies 6 filtre karakteristikleri ise Şekil 6.9’da verilmiştir.

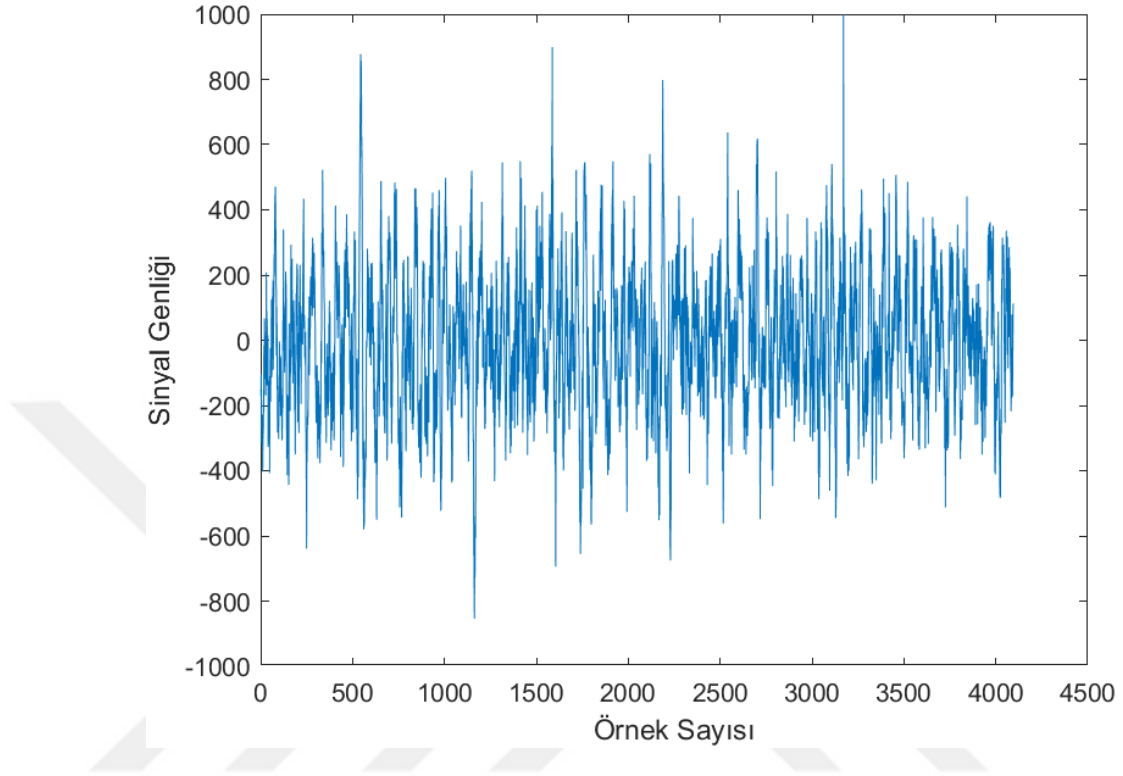


Şekil 6.8 Daubechies 6 ölçekleme fonksiyonu Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği (PyWavelets - Discrete Wavelet Transform in Python)



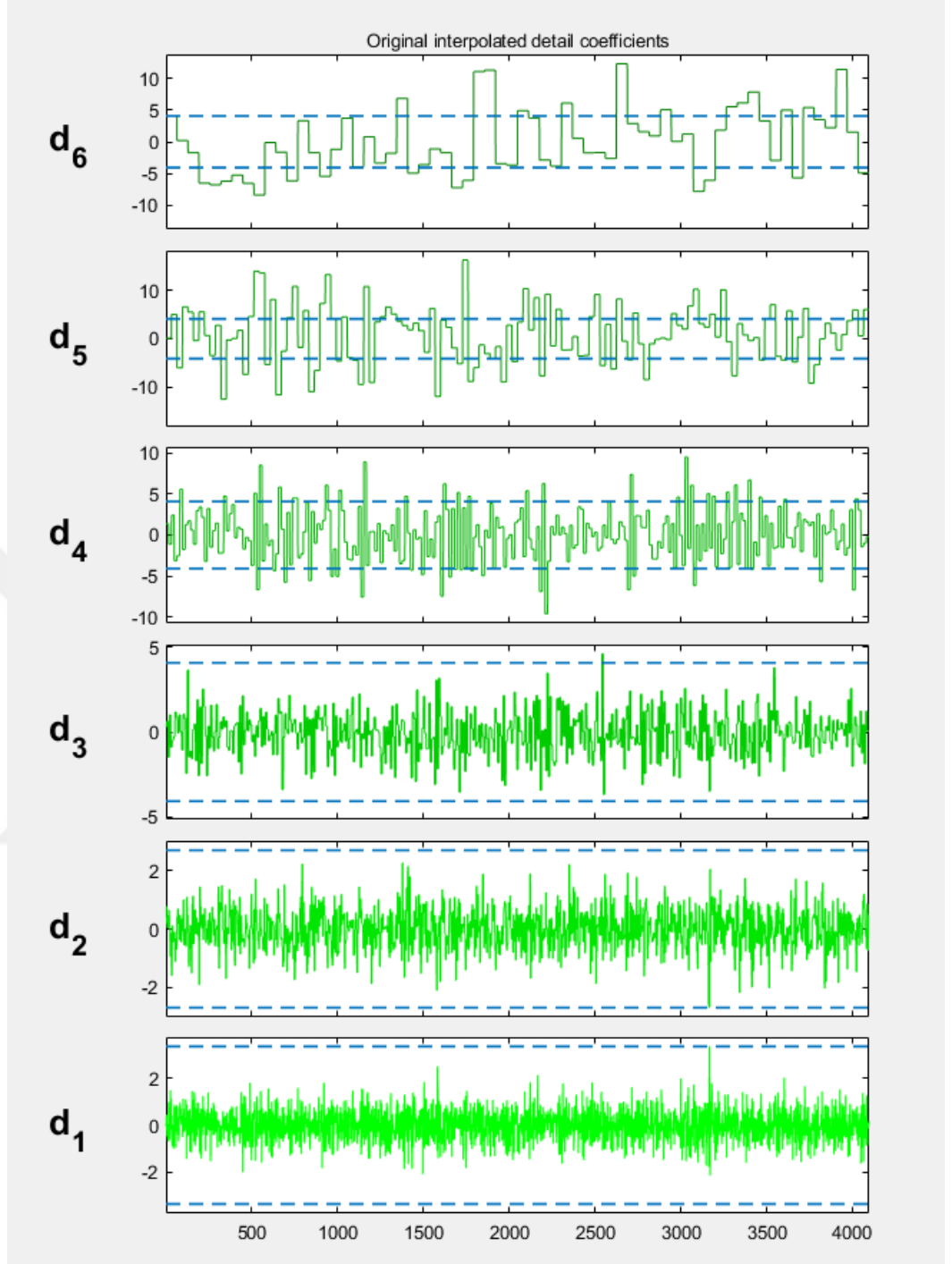
Şekil 6.9 a) Düşük geçiren filtre bileşenlerine ayırma katsayıları, b) Yüksek geçiren filtre bileşenlerine ayırma katsayıları, c) Düşük geçiren filtre yeniden yapılandırma katsayıları, d) Yüksek geçiren filtre yeniden yapılandırma katsayıları Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği (PyWavelets – Discreate Wavelet Transform in Python)

Şekil 6.10’da hareketli ortalama ile beyaz gürültüden temizlenmiş bir LIDAR sinyali verilmiştir.

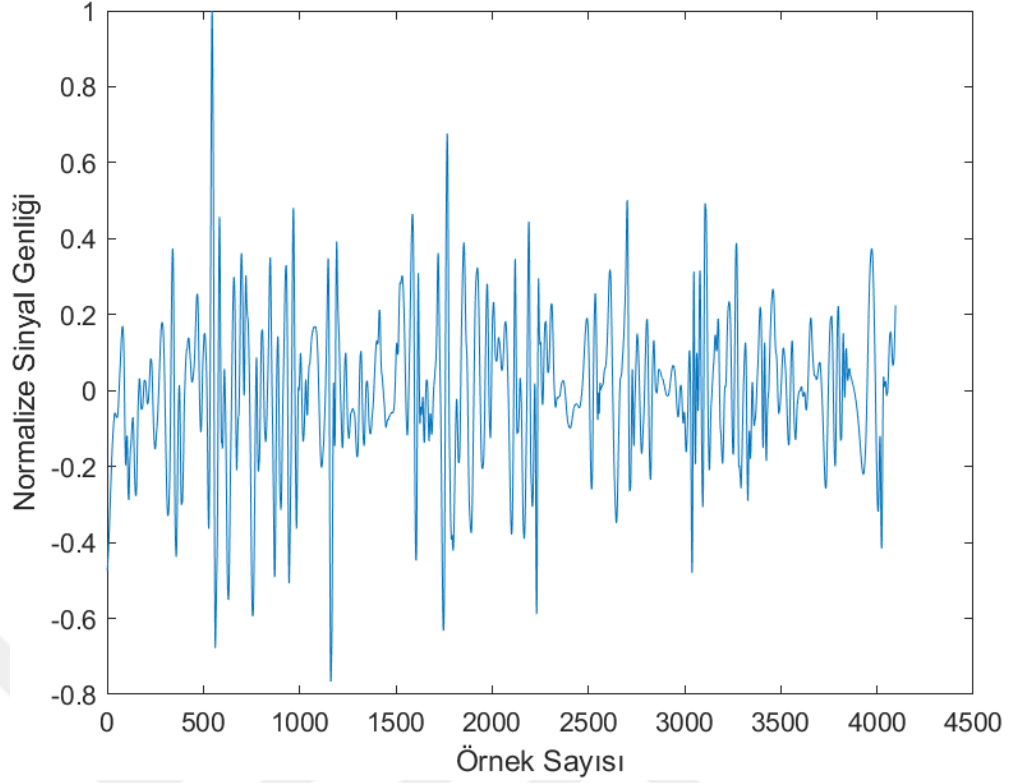


Şekil 6.10 Hareketli ortalama ile gürültüden temizlenmiş LIDAR sinyali

Şekil 6.10’da görüldüğü üzere sinyal, hareketli ortalama ile beyaz gürültüden temizlenmiş olmasına rağmen üzerinde çok fazla gürültü barındırmaktadır ve bu haliyle sinyaldeki lazer darbesini tespit etmek mümkün değildir. Bu sinyal Matlab araçlarında bulunan “Wavelet Analyzer” ile incelenerek detay katsayılarına ayrılmış ve gürültüden temizlenmiştir.



Şekil 6.11 Dalgacık analizi detay katsayıları Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği (Matlab - Wavelet Toolbox)



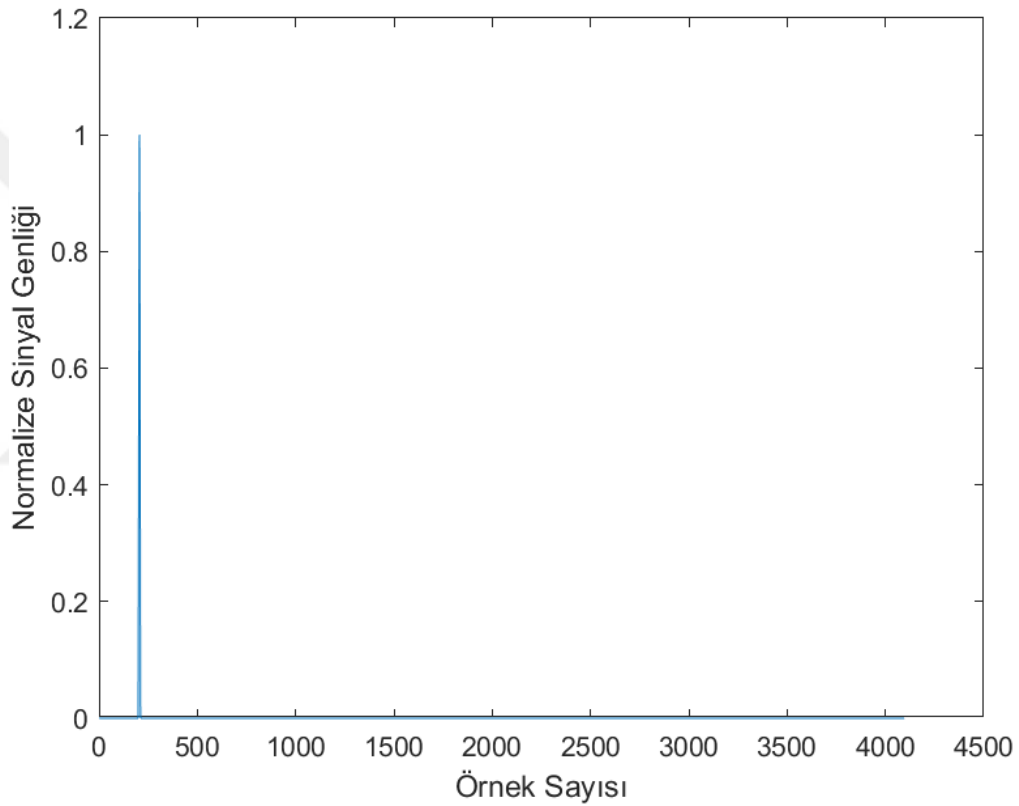
Şekil 6.12 Dalgacık analizi ile gürültüden temizlenmiş LIDAR sinyali

Şekil 6.12 incelendiğinde, dalgacık eşik analizi sonrası sinyaldeki gürültünün belirgin bir biçimde azaldığı ve lazer darbesi tepe noktasının, diğer gürültü tepeliklerinden yüksek olduğu görülecektir. Dalgacık eşik analizi yüksek frekansa bağlı gürültüleri temizleyerek lazer darbesini sinyal içerisinde öne çıkartmış ve sinyalin SNR'ını belirgin bir şekilde arttırmıştır.

6.3 Matlab ile Wiener Filtre Analizi

Dalgacık eşik analizinde de bahsettiğimiz üzere LIDAR sistemlerde mesafenin tespiti için referans olarak kullanabileceğimiz bir lazer darbe sinyali vardır. Wiener filtre, mesafesi ölçülmek istenen nesneden yansıyan sinyal ile bu lazer darbesinin korelasyonunun analizini temel alır. Bir zaman serisi olan, havadan belirli aralıklarla topladığımız sinyal ile bu sinyal içerisinde bulunduğundan emin olduğumuz darbenin veri setinin çapraz korelasyon analizi yapılmasıyla, bu iki sinyal arasında benzerliğin en yüksek olduğu noktayı tespit edebiliriz.

Şekil 6.7’de belirlediğimiz darbe sinyalini Wiener filtre katsayılarını elde etmek için kullanacağız. Ancak dalgacık eşik analizinden farklı olarak Wiener filtrede nesneden yansıyan ışınlarla elde ettiğimiz sinyalin içerisinde darbe sinyalini aramak yerine, filtreleme işlemi sonucunda elde etmek istediğimiz sinyal ile korelasyonunu almamız gerektiğinden darbe sinyalinin uzunluğunu filtrelemek istediğimiz sinyal ile aynı yapmalıyız. Bunun sonucunda filtrelenerek elde edilmek istenilen sinyalin şekli Şekil 6.13’deki gibi olur.

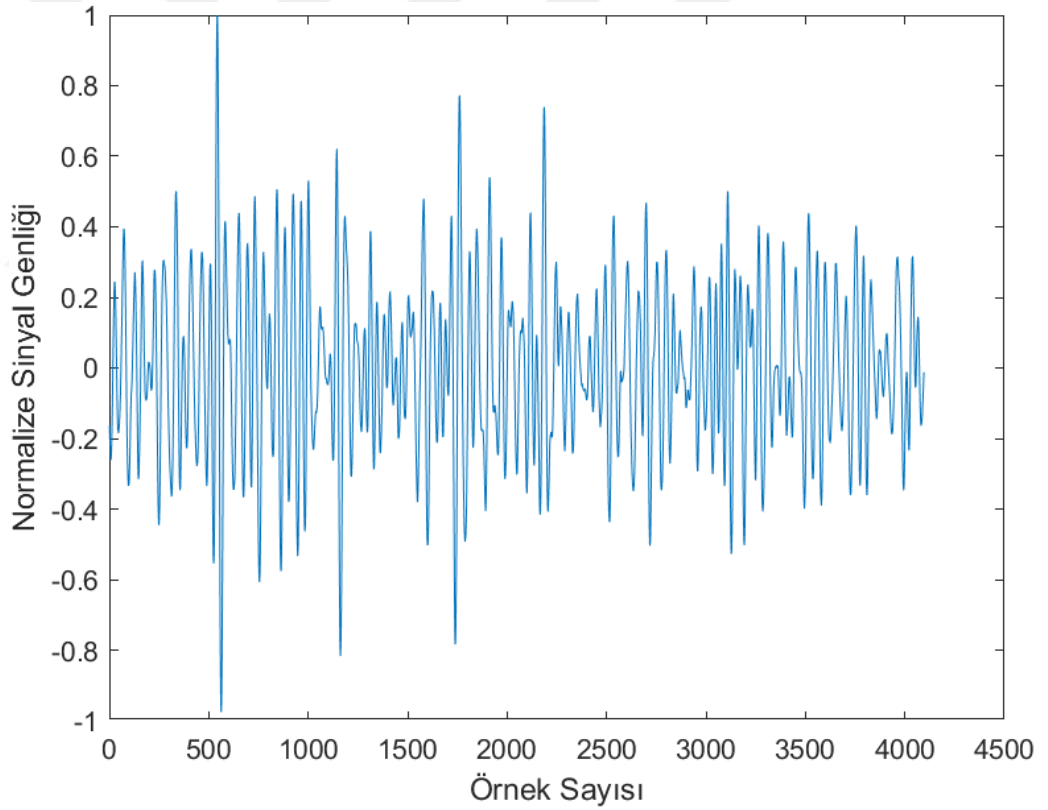


Şekil 6.13 Wiener filtre için kullanılan darbe sinyali

Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus elde edilen sinyalin içerisinde bir darbe aramaktan ziyade gürültülü sinyalin, gürültüden temizlenmiş sinyal ile olan benzerliğinden yola çıkarak darbenin yerinin tespit edilmeye çalışılıyor olmasıdır. Bu durumda 4096 noktadan oluşan gürültülü sinyalde, genişliği 20 noktadan oluşan bir darbenin konumunu hassas olarak tespit edebilmek için bulunmak istenilen sinyal 4096 farklı şekilde işleme alınmalıdır.

4096 örnek ile kapsanmak istenilen mesafenin tümünü tarayabilmek için Şekil 6.13’de verilen sinyal, tepe noktası 4096 farklı noktada olan 4096 farklı sinyal olarak elde edilmeli ve bu sinyallerin, gürültülü sinyal ile korelasyonu alınmalıdır. Bu durum Wiener filtrenin işlem yükünü çok arttırmakta ve bu tarz bir uygulamada kullanılmasını zor kılmaktadır.

Elde edilmek istenilen 4096 farklı sinyal ile 4096 farklı Wiener filtre katsayısı elde edilecektir. Daha sonra bu filtre katsayılarının analizini yaparak, mevcut sinyale en uygun Wiener filtre katsayısını tespit etmeliyiz ve sinyale filtreyi uygulamalıyız. Dalgacık analizi için kullandığımız veri setini Matlab üzerinde Wiener filtre için kullandığımızda Şekil 6.14’deki sinyali elde ederiz.



Şekil 6.14 Wiener filtre ile gürültüden temizlenmiş LIDAR sinyali

7. ALGORİTMALARIN FPGA'E UYARLANMASI

HDL (Hardware Design Language-Donanım Tanımlama Dili) ve FPGA (Field-Programmable Gate Array-Alan Programlanabilir Kapı Dizisi) cihazları, tasarımcılara sofistike bir dijital devreyi hızlıca geliştirme ve simüle etme, prototip bir cihazda gerçekleştirme ve fiziksel uygulamanın çalışmasını doğrulama imkanı sağlar. Bu teknolojiler olgunlaştıkça ana akım uygulama cihazları haline gelmiştir. Artık, bir PC ve ucuz bir FPGA prototipleme kartı kullanarak karmaşık ve sofistike bir dijital sistem oluşturulabilmektedir. (Chu 2008)

Özel elektronik tasarımlar için bir donanım platformu seçerken tasarımcılar için birçok seçenek bulunmaktadır; bunlar, gömülü işlemcilerden, uygulamaya özel tümleşik devrelere (ASIC'ler), programlanabilir mikroişlemcilere (PIC'ler), FPGA'lere ve programlanabilir mantık cihazlarına (PLD'ler) kadar uzanmaktadır. FPGA gibi belirli bir teknolojiyi seçme kararı, bir teknik tercih yerine tasarım gereksinimlerine bağlı olmalıdır. (Wilson 2016)

Bir FPGA, programlanabilir mantık sistemlerinin esnekliği ve yeniden kullanılabilirliği korurken, uygun bir performans seviyesi sunar. Paralel çalışma ve pipeline özellikleri ile çok büyük ölçekli algoritmaları çalıştırabilir. (Wilson 2016)

Matlab ile bir algoritmanın performans analizini sağladığı araçların da yardımıyla çok kolay bir şekilde yapabiliriz. Ancak gerçek bir uygulamada kullanmak için Matlab'de oluşturulan algoritmanın mikroişlemcilere, CPU'lara (Central Processing Unit - İşlemci) ya da FPGA gibi cihazlara gömülebilir hale getirilmesi gerekir.

Bu kısımda Matlab üzerinde performans analizlerini yapmış olduğumuz sinyal işleme algoritmaları FPGA üzerinde bir kez daha test edilecektir. Bu testlerin yapılmasının ana nedeni; Matlab ile çalışırken sayılar 'double precision' hassasiyetinde kullanılırken FPGA' de bu durumun mümkün olmamasıdır. Sinyaller 'double' olarak işleme aldığı anda veri bit uzunluğu 64 bit olacaktır ve yüksek matematiksel işlemler gerektiren sinyal

işleme algoritmalarında 64 bit uzunluğundaki sayılar çok daha yüksek bit genişliklerine ulaşacaktır. Bunun sonucunda FPGA’de kaynak kullanımı çok artacaktır ve bu durum algoritmaların FPGA’e uyarlanmasını zorlaştıracaktır. ADC’nin 14 bit örnekleme ile çalıştığını göz önüne alınarak FPGA’de veri bit uzunluğu 32 bit olarak ayarlanacaktır ve testler bu şekilde tekrar gerçekleştirilecektir.

7.1 Hareketli Ortalamanın FPGA’e Uyarlanması

Daha önceki kısımlarda da bahsedildiği üzere hareketli ortalama, mesafesi ölçülmek istenilen nesneye birden fazla Lazer darbesinin atılmasını gerektirmektedir. Nesneye atılan lazer darbe sayısı, mesafenin ölçüm süresinin uzamasına neden olur. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ölçülmek istenilen maksimum mesafenin uzunluğudur. Çünkü maksimum mesafenin artması, bir lazer darbesinin hedefe ulaşma süresini arttıracaktır ve bu durumda hareketli ortalama almak için gönderdiğimiz lazer darbeleri, ölçüm sonucunun gecikmesini darbe sayısına doğrusal oranda artıracaktır. Hareketli ortalamanın bir ölçüme etkisini göstermek için aşağıda verilen değişkenler ile gerekli hesaplamalar yapılırsa gerekli minimum ölçüm süresi bulunacaktır.

$$\begin{aligned} \text{Işık Hızı}(V) &= 300.000 \frac{\text{km}}{\text{s}} \text{Ölçülmek İstenilen} \\ \text{Maksimum Mesafe}(L_{max}) &= 6\text{km} \text{Darbe Sayısı}(P) = 10.000 \end{aligned} \quad (\text{Denklem 10})$$

Maksimum ölçüm mesafesi gidiş geliş 12 km’dir ve bu mesafeyi 1 darbe ile ölçmek için gereken süre;

$$t = \frac{L_{max} \times 2}{V} = 40\mu\text{s} \quad (\text{Denklem 11})$$

olarak hesaplanır. Bu durumda mesafenin ölçülmesi için gereken süre;

$$t_{max} = 10.000 \times 40 = 400\text{ms} \quad (\text{Denklem 12})$$

olur.

Hesapladığımız bu ölçüm süresi, ışığın hareket hızından ve ölçülmek istenilen maksimum mesafeden doğan doğal bir ölçüm süresinin yansıtmaktadır. Ancak ölçüm süresini

etkileyen bu iki parametrenin yanı sıra lazerlerin teknik kısıtlılıkları da ölçüm süresinin etkileyecektir. Lazer diyotlar üzerlerinden anlık olarak çok yüksek akımlar geçirmekte ve buna bağlı olarak aşırı ısınmaktadırlar. Bu yüzden lazerlerin soğutulması önemli bir araştırma konusudur. Ölçümlerin yapılması için kullanılan lazer diyotu da bu dezavantajın etkisi ile sürekli olarak çalışmamaktadır. 100ns'lik bir lazer darbesi atılmasının ardından, yeni bir lazer darbesi atabilmek için 100µs beklenmesi gerektiği sistemde kullanılan lazerin teknik dökümanlarında belirtilmiştir. Bu durumda iki lazer darbesi arasında geçen süre uçuş süresinden daha uzundur ve bu yüzden ölçüm süresini uçuş süresi değil lazerin soğuması için gereken süre belirler.

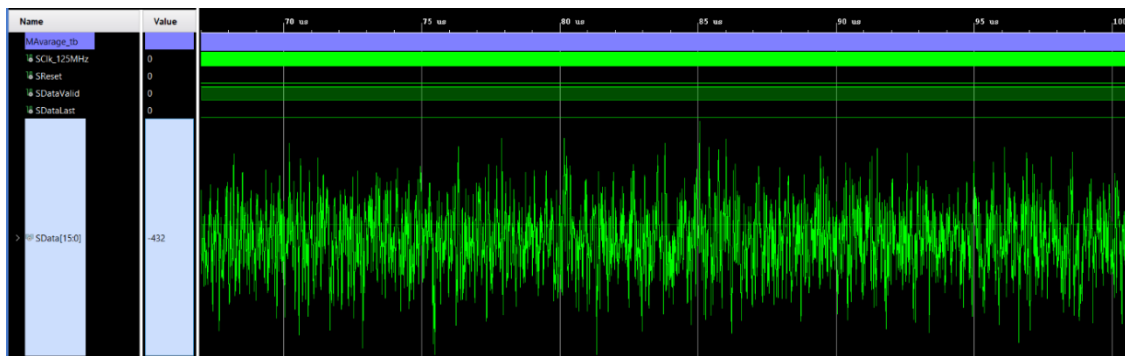
Bu durumda 10.000 lazer darbesi için hesaplanan ölçüm süresi Denklem 13'deki gibi hesaplanır.

$$t_{max} = 10.000 \times 100\mu s = 1s$$

(Denklem 13)

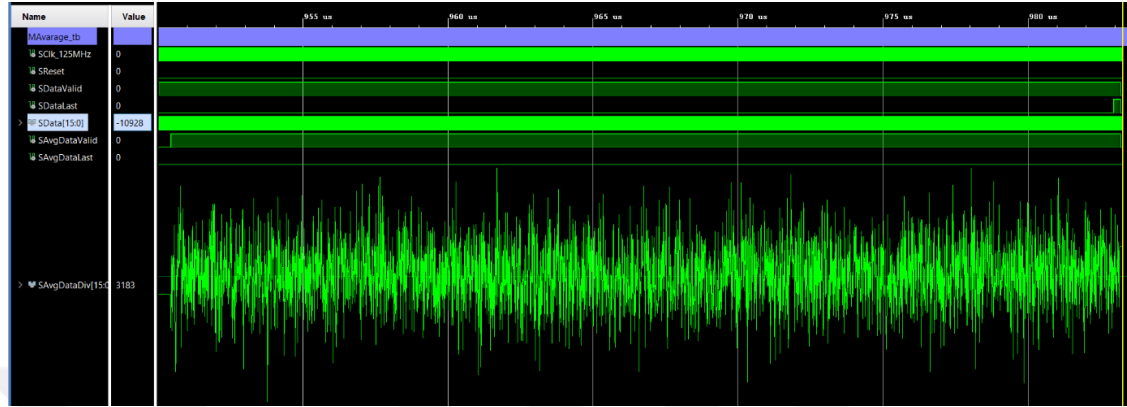
Yapılan testler sonucunda ortalama olarak 10.000 darbeye kadar gürültünün azaltılabildiği ancak bu noktadan sonra atılan lazer darbelerinin etkisinin çok düşük olduğu gözlemlenmiştir.

FPGA için yapılan çalışmada, gerçek zamanlı olarak ortalama alabildiği için teorik olarak hesaplanan ölçüm süresi değişmemektedir. Şekil 7.1'de 1 lazer darbesi ile elde edilen sinyal görülmektedir.

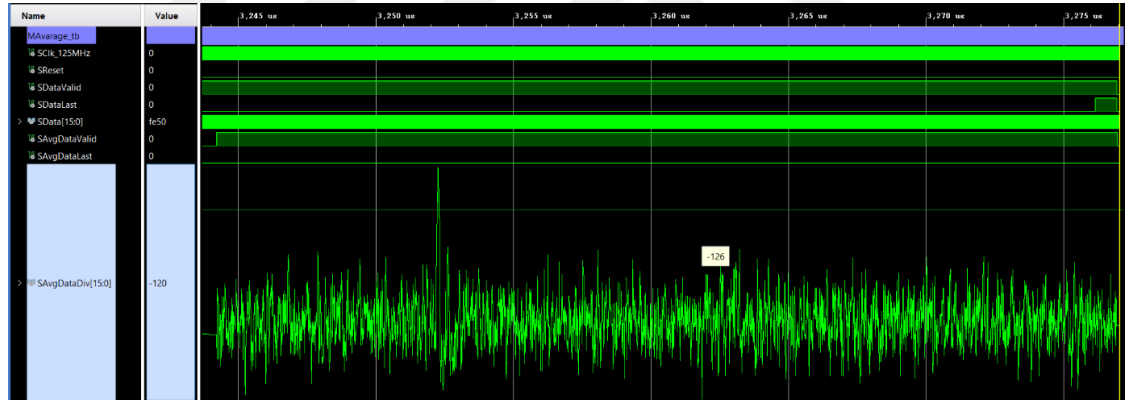


Şekil 7.1 1 lazer darbesi ile elde edilen LIDAR sinyalinin Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği

Şekil 7.2’de ise 250 lazer darbesi kullanılarak hareketli ortalaması alınmış sinyali ve Şekil 7.3’de 500 lazer darbesi kullanılarak hareketli ortalaması alınmış sinyal verilmiştir.



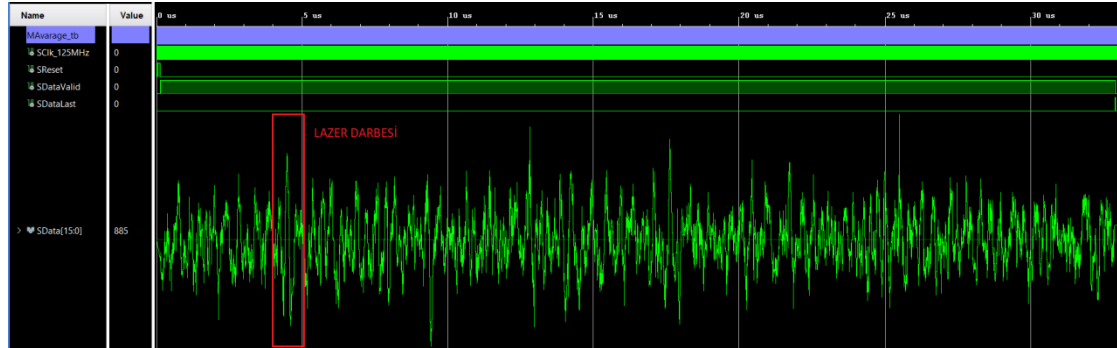
Şekil 7.2 250 lazer darbesi kullanılarak hareketli ortalaması alınmış sinyalin Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği



Şekil 7.3 500 lazer darbesi kullanılarak hareketli ortalaması alınmış sinyalin Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği

Şekil 7.3’de de açıkça görülmektedir ki hareketli ortalama ile sinyalin gürültü seviyesi büyük oranda temizlenmiştir ve lazer darbesinin sinyal içerisinde tespit edilebilirliği büyük oranda artmıştır. Şekil 7.2 ve Şekil 7.3 karşılaştırıldığında ortalaması alınan lazer sayısı 250’den 500’e çıkartıldığında sinyalin çok daha iyi bir şekilde gürültüden temizlendiği açıkça görülmektedir. Ancak hareketli ortalama yöntemi bütün gürültü

durumlarında tek başına yeterli olmamaktadır. Bir önceki sinyalden farklı koşul ve ortamlarda alınan ve 1000 ortalama ile elde edilen sinyal Şekil 21’da verilmiştir.



Şekil 7.4 1000 lazer darbesi kullanılarak hareketli ortalaması alınmış sinyalin Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği

Şekil 7.4’de lazer darbesinin yeri kırmızı olarak işaretlenmiştir. Sinyal incelendiğinde lazer darbesinden daha yüksek olan birden fazla tepecik olduğu görülmektedir. Bu durum darbenin yerinin bulunmasını imkansız kılmaktadır.

İki farklı sinyal kullanarak testlerini gerçekleştirdiğimiz hareketli ortalama yönteminin, ortalamada kullanılan darbe sayısına bağlı olarak performansının arttığı ancak her zaman tek başına yeterli olmadığı anlaşılmaktadır. Aynı zamanda yüksek performansının yanı sıra hareketli ortalama yöntemi FPGA’de çok az kaynak kullanmaktadır. Hareketli ortalama yöntemi Vivado programı ile sentezlendiğinde Şekil 7.5’de verilen kaynak kullanım değerleri elde edilmiştir.

LUT %	FF %	BRAM %	URAM %	DSP %	LUTRAM %
0.55	0.27	11.4	0.00	0.00	0.00
LUT	FF	BRAMs	URAM	DSP	LUTRAM
294	287	16.0	0	0	0

Şekil 7.5 Hareketli Ortalama Vivado sentez sonucu

Bir sonraki bölümlerde Şekil 7.4’de verdiğimiz sinyali kullanarak 2 farklı gürültü temizleme yönteminin FPGA üzerinde analizi yapılacaktır ve hareketli ortalama ile olan farkları ortaya koyulacaktır.

7.2 Dalgacık Eşik Analizinin FPGA’ye Uyarlanması

FPGA’lar yüksek hızlarda ve paralel çalışabildikleri için sinyal işleme algoritmalarında çokça tercih edilmektedirler. Ancak dalgacık eşik analizi gibi yüksek matematiksel işlemler içeren ve birden fazla birbirini takip eden aşamadan oluşan algoritmalarda avantajlarının yanı sıra birçok dezavantaj da ortaya çıkmaktadır.

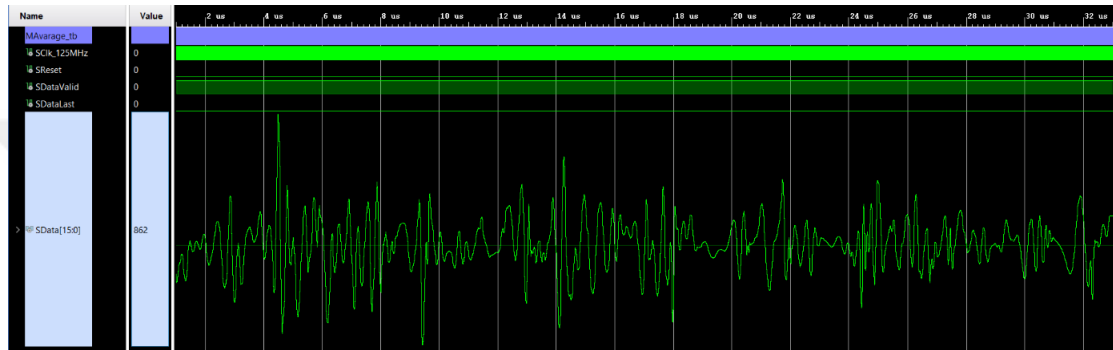
Bölüm 6.2.’de detaylarından bahsedilen dalgacık eşik analizi algoritması 6 seviyeden oluşmaktadır ve bit hassasiyeti yüksek olan sayıların çarpımını içermektedir. Bu durum algoritmanın FPGA’a uyarlanmasını zorlaştırmakla beraber kaynak kullanımını büyük oranda arttırmaktadır. ‘double’ yani 64 bit hassasiyetinde Matlab üzerinde testleri gerçekleştirilen dalgacık eşik analizi algoritması FPGA’e uyarlanırken kaynak kullanımını minimize etmek için ‘single’ yani 32 bit hassasiyetinde çalışılmaktadır.

Saha verileri 14 bit ADC kullanılarak topladığı için ‘single’ hassasiyetinde çalışmak giriş verisini etkilemeyecektir ancak Matlab’de üretilen filtre katsayıları ‘double’ hassasiyetinde sayılardan oluşmaktadır. Ancak filtre katsayılarının üstel kısmı ‘single’ hassasiyetinde çalışmaya uygun olduğu için ve virgülden sonraki hassasiyeti de ‘single’ sayılarda da hala çok yüksek olduğu için filtre performansında negatif bir etki oluşturmamaktadır.

14 bit ADC ile toplanan veriler tam sayıdır ve kayan nokta ile ifade edilmemektedir. Toplanan bu verileri filtreden geçirebilmek için Xilinx’in Floating-Point IP’sini (Intellectual Property) kullanarak kayan nokta sayı formatı ile ifade edilmelidir. Bu noktadan itibaren kayan nokta sayı formatında çalışılacağı için çarpma ve toplama işlemlerinde Xilinx’in Floating-Point IP’sini kullanılabilir. Bu sayede karmaşık

matematiksel işlemlerde FPGA'ler içerisinde bulunan DSP bloklarını kullanarak hem zamandan hem de kaynak kullanımından kazanç elde edilmiştir.

FPGA için yeniden düzenlenen algoritmanın simülasyon sonuçları Şekil 7.6'da verilmiştir. Şekil 7.6'da görüldüğü üzere hareketli ortalama ile gürültüden yeteri kadar temizlenemeyen sinyal dalgacık eşik analizi ile lazer darbesi seçilebilecek şekilde gürültüden temizlenmiştir.



Şekil 7.6 Dalgacık eşik analizi ile FPGA'da gürültüden temizlenmiş sinyalin Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği

Burada dikkat edilmesi gereken, bu gürültüden temizlenmiş sinyalin sadece dalgacık eşik analizi kullanılarak elde edilmediğidir. Dalgacık eşik analizi, 1000 adet lazer darbesi ile alınmış hareketli ortalama takiben uygulanmıştır. Rastgele dağılmış Gaussian gürültüyü temizlemek için kullandığımız Hareketli Ortalama yöntemi olmadan dalgacık eşik analizi kullanıldığında, giriş sinyalinin yeteri kadar gürültüden temizlenmediği yapılan testler sonucunda net bir şekilde ortaya koyulmuştur. Dalgacık eşik analizine verilen giriş sinyalinin gürültüden temizlenmiş hali $140\mu s$ gibi kısa bir sürede elde edilmiştir. FPGA'da paralel çalışma kabiliyetinden yararlanarak oluşturulan algoritma sayesinde birbirini takip eden, birden fazla aşamadan oluşan dalgacık eşik analizini mümkün olduğunca hızlı hale getirilmiştir. Ancak 1000 adet lazer darbesinin hareketli ortalama ile filtrelemek 1 saniye süreceği için toplanan verinin dalgacık eşik analizi ile temizlenmesi 1 saniyeyi aşkın bir sürenin sonunda tamamlanacaktır.

Vivado ile derlediğimiz algoritmanın kaynak kullanımı sonuçları Şekil 7.7’de verilmiştir.

LUT %	FF %	BRAM %	URAM %	DSP %	LUTRAM %
30.03	25.30	20.4	0.00	87.27	8.07
LUT	FF	BRAMs	URAM	DSP	LUTRAM
15977	26921	28.5	0	192	1405

Şekil 7.7 Dalgacık eşik analizi algoritması Vivado sentez sonucu

7.3 Wiener Filtrenin FPGA’ye Uyarlanması

Wiener filtre, dalgacık eşik analizinden farklı olarak her sinyal için kullanılan tek bir filtre kat sayısına sahip değildir. Dedektör ile toplanan her bir sinyal dizisi için yeni bir filtre hesaplanır ve bu sinyal bu filtre ile gürültüden temizlenir. Bu nedenle Wiener Filtre gürültüleri temizlemede oldukça başarılıdır. Ancak her bir sinyal için yeni filtre katsayısı hesaplamak gerçek zamanlı uygulamalar için büyük bir dezavantaj oluşturmaktadır.

Wiener filtre için en önemli kısım filtre katsayılarının belirlenmesidir keza Wiener filtre için en çok işlem yükü de bu kısımdadır. Filtre katsayıları bölüm 6.2’de bahsedilen ve Şekil 6.6’da gösterilen ideal lazer darbesi kullanılarak belirlenir. Dedektör ile toplanan sinyalin ve ideal lazer darbesinin çapraz korelasyonun alınması sonucu filtre katsayıları elde edilir. Ancak lazer darbesinin bütün sinyal içerisinde hangi noktada oluştuğu bilinemeyeceği için ideal lazer darbesi sinyal boyunca gezdirilir ve birden fazla katsayı oluşturulur.

Bu tezde çalışmalar 4096 örnekleme noktası ile yapılmıştır. Bu durumda, yapılacak işlemlerle 4096 farklı filtre katsayısı elde edilecektir. Elde edilen bu filtre katsayıları içerisinde en uygunu minimum ortalama kare hata tahmincisi ile tespit edilir ve sinyal bu filtre kullanılarak gürültüden temizlenir.

Wiener filtrenin bu detayları göz önüne alındığında; çapraz korelasyonun 4096 kez yapılması gerektiği ve her filtre katsayısının minimum ortalama kare hata tahmincisi

kontrol edilmesi gerektiği için işlemlerin çok uzun süreceği öngörülmektedir. Aynı zamanda çapraz korelasyon işlemi fazlasıyla karmaşık bir işlemdir. Hassasiyetin korunabilmesi için sayıların ‘single’ hassasiyetinde olması da kaynak kullanımını maksimuma çıkaracaktır.

HDL ile yazılan ve filtre katsayılarını bulmak için kullanılan çapraz korelasyon yazılım bloğunu pipeline çalıştırarak kaynak kullanımı minimize edilmiştir. Ancak içerisinde birçok karmaşık matematiksel işlem bulunduran çapraz korelasyon ve minimum ortalama kare hata tahmincisi kaynak kullanımı açısından FPGA’ye uygulanması çok zor işlemlerdir. HDL ve Xilinx IP’leri ile tasarımını ve uygulamasını yaptığımız Wiener filtrenin Vivado ile sentezlenmesi sonucu elde edilen kaynak kullanımı aşağıdaki şekilde verilmiştir.

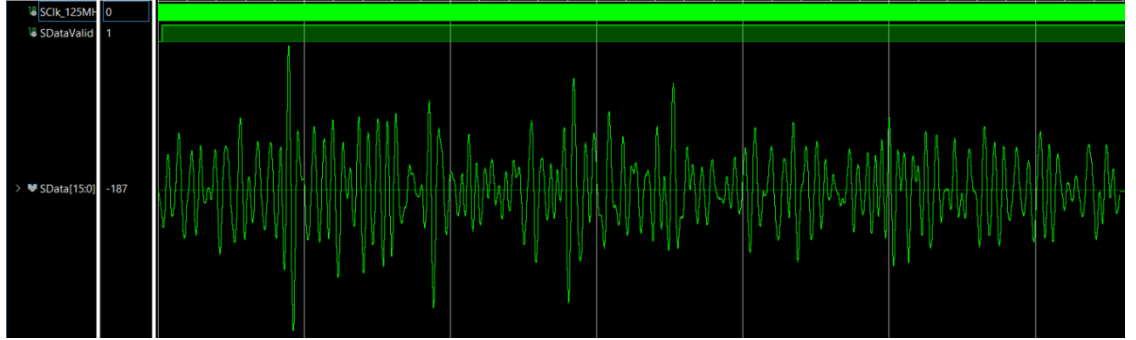
LUT %	FF %	BRAM %	URAM %	DSP %	LUTRAM %
196.46	36.13	63.2	0.00	92.73	35.66
LUT	FF	BRAMs	URAM	DSP	LUTRAM
104519	38440	88.5	0	204	6205

Şekil 7.8 Wiener filtre algoritması Vivado sentez sonucu

FPGA aileleri içerisinde oldukça fazla kaynak bulunduran Zynq-7015 serisi aileden bir FPGA için bile kaynak kullanımının ne kadar fazla olduğu Şekil 7.8’de görülmektedir. Kaynak kullanımının bu kadar fazla olması Wiener filtrenin gerçek zamanlı olarak FPGA’lar ile uygulanmasını imkansız kılmaktadır. Mikroişlemciler gibi kaynak kısıtlılığı pek olmayan ve işaretçileri kullanarak sıralı işlemlerde hafıza paylaşımının yapılabildiği işlemci tipleri Wiener filtre gibi bir filtre için daha uygundur. Ancak bu tip işlemciler için dahi hesaplama sürelerinin çok uzayacağı göz önüne alınmalıdır.

FPGA’nın paralel çalışma kabiliyetinden faydalanılmasına ve algoritmanın pipeline çalışmaya uygun tasarlanmasına rağmen girişteki sinyalin gürültüden temizlenmesi 1.5s sürmektedir. FPGA’yı kullanarak gerçek zamanlı olarak mesafenin ölçülmesi hedeflenen

bir çalışma için 1.5s oldukça uzun bir süredir. Vivado’da testleri yapılan Wiener filtrenin giriş sinyali için verdiği sonuç Şekil 7.9’da verilmiştir.



Şekil 7.9 Wiener Filtre ile FPGA’da gürültüden temizlenmiş sinyalin Sinyal Genliği-Örnek Sayısı grafiği

Şekil 7.9’dan da görüldüğü üzere Wiener filtre sinyali gürültüden temizleyerek lazer darbesinin tespit edilebilir bir seviyede belirginleştirmiştir. Ancak dalgacık dönüşümü analizi ile kıyaslandığında kaynak kullanımı ve algoritmanın sonuç verme süresi çok uzun olmasına rağmen bariz bir fark ortaya koymamıştır.

8. SONUÇ

Yapılan testler sonucunda hareketli ortalamanın lazer darbesinin tespiti için kullandığımız yöntemler arasında en önemli yöntem olduğu ve ortalama alınmadığı durumda diğer sinyal işleme algoritmalarının darbe tespiti yapamadığı görülmüştür. Zynq-7015 için yapılan FPGA uyarlamasında hareketli ortalamanın çok az kaynak kullandığı ancak ortalamada kullanılacak sinyal sayısına bağlı olarak ölçüm süresinin arttığı görülmüştür. Wiener filtre ve dalgacık analizi ile yapılan testlerde, her iki yöntem de hareketli ortalamanın yeterli olmadığı durumlarda lazer darbesini tespit etme konusunda benzer sonuçlar vermiştir. Ancak Wiener filtre, Zynq-7015 gibi yüksek kaynak kapasitesine sahip bir FPGA için bile çok fazla kaynak kullanmıştır ve Wiener filtrenin FPGA'a uyarlanması pek mümkün olmadığı görülmüştür. Simülasyonlarla elde edilen sonuçlarda, dalgacık analizi'nin ölçüm süresini 1s uzatırken Wiener filtre için ölçüm süresini çok daha fazla uzattığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak; hareketli ortalamanın düşük güçlü LIDAR sistemleri ile uzun mesafe ölçülmesi durumunda kullanılması en önemli yöntem olduğu tespit edilmiştir. Hareketli ortalamada kullanılacak olan darbe sayısı hava koşullarına, nesnenin kaynağa olan tahmini uzaklığı gibi parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterecektir. Hareketli ortalamanın yanı sıra ikincil bir filtreleme yöntemi olarak dalgacık analizinin kullanımı tercih edilebilir. Wiener filtre, dalgacık analizine benzer sonuçlar vermesine rağmen FPGA'lara uygulanabilirliğinin zayıf olduğu sonucuna varılmıştır. Kaynak kullanımı çok yüksektir ve ölçüm süresi çok uzamaktadır.

KAYNAKLAR

- Alexander M., Baumgartner R., Summers A., Windischberger C., Klarhoefer M., Moser E. 2000. Method for improving signal-to-noise ratio and contrast in MR images. *Magn Reson Imaging* 2000;18(2):169–80.
- Barnhart B., Eichinger W. 2011. Empirical mode decomposition applied to solar irradiance, global temperature, sunspot number, and CO₂ concentration data *Atmos Sol Terr Phys* 2011;73(13):1771–9.
- Brown, Jarrod. 2012. Real-Time Hardware Design for Improving Laser Detection and Ranging Accuracy. Master Thesis, The Florida State University College of Engineering, Florida
- Chu, P. 2008. FPGA Prototyping by Verilog Examples. Wiley, 15, New Jersey
- Dandawate, Y., Upadhyay, P., Jaywant, S., 2015. FPGA based Low Power Laser Range Finder. 2015 International Conference on Computing Communication Control and Automation. Pune
- Demir, A., Sangiovanni-Vincentelli A. 1998. Analysis and Simulation of Noise in Nonlinear Electronic Circuits and Systems. Graduate Division of the University of California, Berkeley
- Fang, H., Huang, D. 2004. Noise reduction in LIDAR signal based on discrete wavelet transform. *Optics Communications*, Volume 233, Issue 1-3, 67–76
- Fisher, P., Pyhtilä, D., John W. 2000. Timing Quantization Error in LIDAR speed-measurement devices. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 1, 276-280.
- Francesco R., Cecilia S., Adolfo C., José-María B. 1999. LIDAR inversion of atmospheric backscatter and extinction-to-backscatter ratios by use of a Kalman filter. *Appl Opt* 1999;38(15):3175–89.
- Huang, J., Ran, S., Wei, W., Yu, Q. 2022. Digital Integration of LIDAR System Implemented in a Low-Cost FPGA. *Symmetry* 2022, 14, 1256.
- Jianke L., Baojun Z., Linbo T., Xiaoxia Z. 2009. Digital Signal Processing Method and Implementation For Pulse Laser Rangefinder. *ICEMI'2009*, 1, 289-293. Florida
- Jordan, P. 2009. Range Estimation Algorithm Comparison in 3-D Flash LADAR Data. M.S. Thesis, Dept. Elect. And Comp. Eng., Air Force Institute of Tech., Wright-Patterson AFB, OH.

- Jutzi, B., Stilla, U., 2004. Extraction of features from objects in urban areas using space-time analysis of recorded laser pulses. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 35 (Part B2), 1–6.
- Jutzi, B., & Stilla, U. (2006). Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener Filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(2), 95–107.
- Kang, K. 2007. The Diode Laser Range Finder(DLRF) using the Cumulative Binary Detection Algorithm(CBDA). *Conference on Lasers and Electro-Optics*. Pacific Rim
- Kozat S., Arslan H. 2013. Noise in Electronic Systems. *IEEE Communications Magazine*.
- Lerkvarnyu, S. 1998. Moving Average Method For Time Series LIDAR Data. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang
- LIU, Z., HE, Q. 2008. Detection Circuit Design for Weak Signals in LIDAR Systems[J]. *Periodical of Ocean University of China*, Vol.38, No. 1, pp.125-128
- Ma, Z., Zhang, C. 2008. Signal-to-noise ratio improvement in LIDAR system utilizing EDFA[J], *Infrared and Laser Engineering*, Vol. 37, No. 4, 656-659.
- Mao, J. 2011. Noise reduction for LIDAR returns using local threshold wavelet analysis. *Opt Quant Electron* (2012) 43:59–68. Yinchuan
- Matlab Help Center. Web Sitesi: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/gs/discrete-wavelet-transform.html>, Erişim Tarihi: 14.05.2022
- Matlab. Wavelet Toolbox (App). Erişim Tarihi: 14.05.2022
- Mitra, S. 2006. *Digital Signal Processing: A Computer Based Approach* 3rd ed. McGraw Hill, 972, CA
- Moon, T.K., Stirling, W. C. 2000. *Mathematical Methods and Algorithms for Signal Processing*. Prentice Hall, NJ 07458: Prentice Hall, ch. 17, 717–743, NJ
- Parrish, C., Scarpace, Frank L. 2007. Investigating Full-Waveform LIDAR Data for Detection and eform LIDAR Data for Detection and Recognition of Vertical Objects. *ASPRS 2007 Annual Conferance Tampa, Florida*
- PyWavelets - Discrete Wavelet Transform in Python. Web Sitesi: <http://wavelets.pybytes.com/wavelet/db6/>, Erişim Tarihi: 14.05.2022
- Richard, D. 2010. *Direct-Detection LADAR Systems*. Tutorial Text in Optical Engineering v. TT85. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Press

- Rioul, O., Vetterli, M. 1991. Wavelet and Signal Processing. IEEE SP Mag. 8, 14, Berkley
- Sheng, Y. 1996. Wavelet transform in: A.D. Poularikas (Ed.), The Transforms and Applications Handbook, The Electrical Engineering Handbook Series, CRC Press 747, Boca Raton, FL.
- Sun, B., Huang, D., Fang, H. 2005. LIDAR signal denoising using least-squares support vector machine. IEEE Signal Process Lett. 2005;12(2),
- Yates R., Brooks D. 2001. Noise Reduction Techniques in Electronic Systems. EMC Test & Design Magazine.
- Zhirong Z., Dengxin H., Yufeng W., Qing Y., Shichun L., Yan L., Hongwei W. 2013. Improvement of the signal to noise ratio of LIDAR echo signal based on wavelet de-noising technique, Optics and Lasers in Engineering, Volume 51, Issue 8, 2013, 961-966
- Zhou, Z., Hua, D., Wang, Y., Yan, Q., Li, S., Li, Y., Wang, H. 2013. Improvement of the signal to noise ratio of LIDAR echo signal based on wavelet de-noising technique. Optics and Lasers in Engineering, Volume 51, Issue 8, 2013, Pages 961-966
- Wang, C., Li, Q. 2015. A comparison of waveform processing algorithms for single-wavelength LIDAR bathymetry. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 101 (2015) 22–35
- Wilson, P. 2016. Design Recipes for FPGAs Using Verilog and VHDL. Elsevier, 4-5. London
- Wu S., Liu Z., Liu B. 2006. Enhancement of LIDAR backscatters signal-to-noise ratio using empirical mode decomposition method. Opt Commun 2006; 267(1):137–44.
- Xiang, D. 2006. Extracting characteristic information of weak signal from strong noise background by wavelet analysis. Dissertation of Master Degree of Wuhan University. Wuhan. 267(1): 137–144.
- Xu, F., Zhang, X., & Zhu, D. 2017. Generalized wavelet thresholding technique for optimal noise reduction of LIDAR echo signals. Proceedings of the 9th International Conference on Signal Processing Systems - ICSPS 2017.