

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK/ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK/ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK
LİSANS PROGRAMI**

**5G İŞARETLERİ KULLANILARAK BİLİŞSEL PASİF RADAR İLE
DRON TESPİTİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN

BARAN AKBIYIK

ANKARA - 2020

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK/ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK/ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK
LİSANS PROGRAMI**

**5G İŞARETLERİ KULLANILARAK BİLİŞSEL PASİF RADAR İLE
DRON TESPİTİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN

BARAN AKBIYIK

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ A. ÇAĞRI YAPICI

ANKARA – 2020

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: ... / ... / 20...

Öğrencinin Adı, Soyadı : Baran AKBIYIK

Öğrencinin Numarası : 21710290

Anabilim Dalı : Elektrik/Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı : Elektrik/Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Dr. Öğr. Üyesi A. Çağrı YAPICI

Tez Başlığı : 5G İşaretleri Kullanılarak Bilişsel Pasif Radar İle Dron Tespiti

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 91 sayfalık kısmına ilişkin, 21/05/2020 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 4'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

Onay

... / ... / 20...

Öğrenci Danışmanı Unvan, Adı, Soyadı,

Bu tezi savunma sanayisinde yıllarını büyük bir fedakârlıkla geçiren ve ülkemizin savunma sektöründe ilerlemesine katkı sağlayan tüm tasarım mühendislerine ithaf ediyorum.

Baran AKBIYIK

Ankara - 2020

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitim hayatım boyunca, bana danışmanlık ederek, yolumu aydınlatan ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Dr. A. Çağrı YAPICI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Araştırmamın yazım aşamasında bana yardımcı olan ve desteklerini esirgemeyen saygıdeğer hocam Dr. Murat ÜÇÜNCÜ'ye teşekkür ederim.

Bu çalışmanın testlerinin gerçekleştirilmesini sağlayan ve bu konuda yardımlarını esirgemeyen Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu, Spark Ölçüm Teknolojileri, Keysight ve değerli çalışanlarına sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresi boyunca ihtiyaç duyduğum her noktada yardımlarını asla esirgemeyen Türkiye Amatör Uydu Teknolojileri Derneği'nin (TAMSAT) saygıdeğer üyelerine teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca engin bilgileriyle bana yol gösteren, tecrübe ve deneyimleri ile beni aydınlatan ve çalışmalarım sırasında yanımda olan Yüksek Elektrik/Elektronik Mühendisi Sayın İlter KARADEDE ve Sayın Eralp GÖĞEN'e teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, hep yanımda olan aileme yürekten sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

BARAN AKBIYIK

5G İŞARETLERİ KULLANILARAK BİLİŞSEL PASİF RADAR İLE DRON TESPİTİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik/Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2020

Bu yüksek lisans tezinde, 5. Nesil Yeni Radyo haberleşme işaretleri kullanılarak geliştirilen Bilişsel Pasif Radar ile dron ve insan hedef tespiti ve sınıflandırması yapılmıştır. Yapılan çalışmada, Destek Vektör Makinesi, En Yakın Komşu ve Ağaç Karar algoritmaları kullanılarak başarımları mukayese edilmiştir.

Ayrıca, V.Chen'e ait insan yürüme simülatörü ve pervane simülatörü incelenmiş ve geliştirilmiştir. İlave olarak, Pasif Radar uygulamalarına yönelik düşük maliyetli ve hafif Bilişsel Yazılım Tabanlı Radyo donanımı hazırlanarak test edilmiştir. Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu'na ait 5G Açık Test Sahası'nda 3.5 GHz ve 35 GHz 5. Nesil Yeni Radyo İşaretleri ile geliştirilen Pasif Radar sistemi farklı dronlar ve insan yürüme örüntüleri için ölçüm ve testler gerçekleştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Pasif Radar, Bilişsel Radar, Mikro Doppler, Yazılım Tabanlı Radar, 5G Yeni Radyo, 5G Baz İstasyonu, Dron Tespiti, İnsan Tespiti.

ABSTRACT

BARAN AKBIYIK

DRONE DETECTION BY COGNITIVE PASSIVE RADAR USING 5G SIGNALS

Başkent University Institute of Science

Department of Electrical and Electronics Engineering

2020

In this thesis, Support Vector Machine, KNN and Decision Tree Algorithms are used to compare the capacity of Cognitive Passive Radar using 5th Generation New Radio Communication signals for drone and human-being detection and classification.

Additionally, the human walking simulator and propeller simulator by V.Chen are examined and modified. Then, a cheap and compact Cognitive Software Defined Radio hardware is developed and tested for Passive Radar applications. Developed Passive Radar system is tested and measured for different types of drones and human walking patterns using 3.5 GHz and 35 GHz 5th Generation New Radio Signals at 5G Open Test Area belonging to Information and Communication Technologies Authority.

KEYWORDS: Passive Radar, Cognitive Radar, Micro Doppler, Software Defined Radar, 5G New Radio, 5G Base Station, Drone Detection, Human Detection.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması	3
2. AKTİF RADAR.....	4
2.1. Monostatik Radar Yapısı	4
2.2. Radar Mimarisi.....	5
2.3. Bistatik Radar Yapısı	6
2.4. Bistatik Radar Denklemi.....	7
2.5. Bistatik Radar Mesafe Çözünürlüğü	8
2.6. Bistatik Radar Hız Çözünürlüğü.....	9
3. MİKRO DOPPLER	11
3.1. Doppler Etkisi	11
3.2. Doppler Çözünürlüğünün Artırılması	11
3.3. Mikro Doppler Etkisi.....	12
3.4. Mikro Doppler Analizi	13
3.4.1. Titreşimden dolayı oluşan Mikro Doppler etkiler	14
3.4.2. Dönme hareketinden dolayı oluşan Mikro Doppler etkiler	15
3.4.3. Helikopter pervanesinden dolayı oluşan Mikro Doppler etkiler	15
3.4.4. İnsan yürümesinden dolayı oluşan Mikro Doppler etkiler.....	17
4. PASİF RADAR.....	20
4.1. Pasif Radar Mimarisi	20
4.2. Pasif Radar Aydınlatıcıları	26

4.2.1.	FM radyo yayını	26
4.2.2.	Mobil haberleşme istasyonu yayını	27
4.2.3.	Küresel konumlandırma uyduları	27
4.2.4.	5G Yeni Radyo haberleşme istasyonu yayını	27
5.	BİLİŞSEL YAZILIM TABANLI RADAR	29
5.1.	Yazılım Tabanlı Radyo Mimarisi	30
5.2.	Makine Öğrenmesi	32
5.2.1.	En yakın komşu algoritması (KNN)	33
5.2.2.	Karar ağacı algoritması	34
5.2.3.	Destek Vektör Makinesi	35
5.2.4.	Karışıklık matrisi	36
5.2.5.	K-Katlama Çapraz Geçerlilik	38
6.	MİKRO DOPPLER BENZETİM MODELİ	39
6.1.	Pervane Benzetim Modeli	40
6.2.	İnsan Yürümesi Benzetim Modeli	43
7.	BENZETİMLER, ÖLÇÜMLER VE TESTLER	48
7.1.	Benzetim Çalışmaları	49
7.1.1.	RF sistem benzetim çalışmaları	49
7.1.2.	Helikopter pallerine ait Mikro Doppler imzası benzetim ve eğitim çalışmaları	51
7.1.3.	İnsan yürümesine ait Mikro Doppler imzası için benzetim ve eğitim çalışmaları	56
7.2.	Bilişsel Yazılım Tabanlı Radar Prototipinin Oluşturulması	59
7.2.1.	Yazılım tabanlı göndermeç sisteminin hazırlanıp test edilmesi	60
7.2.2.	Yazılım tabanlı almaç sisteminin hazırlanıp test edilmesi	62
7.2.3.	Helikopter pervanesine ait Mikro Doppler imzası testi	64
7.3.	Bilişsel FMCW Yazılım Tabanlı Radar Testi	65

7.4. 5G Vadisi İç Mekan Testleri	67
7.4.1. 5G Vadisi iç mekan test düzeneği.....	67
7.4.2. C-Bant 5G Yeni Radyo işareti ile dron tespiti testi	69
7.4.3. C-Bant 5G Yeni Radyo işareti ile insan tespiti testi	71
7.4.4. Ka-Bant 5G Yeni Radyo işareti ile dron tespiti testi.....	73
7.4.5. Ka-Bant 5G Yeni Radyo işareti ile insan tespiti testi.....	75
7.5. 5G Vadisi Dış Mekan Testleri.....	77
7.5.1. C-Bant 5G Yeni Radyo işareti ile dron tespiti testi	78
7.5.2. C-Bant 5G Yeni Radyo işareti ile insan tespiti testi	80
7.6. Literatür Karşılaştırması	82
8. SONUÇ.....	85
KAYNAKLAR.....	88

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1 Farklı FFT Girdi Değerleri İçin Doppler ve Hız Çözünürlüğü Çıktıları.....	12
Tablo 4.1 İstenilen Hedefi Doğru Tespit Etme Olasılığı ve Yanlış Alarm Olasılığı İçin Gerekli Eşik İşaret-Gürültü Oranı Tablosu [16]	25
Tablo 4.2 Aydınlatıcı Özellikleri.....	28
Tablo 5.1 Farklı Çalışma Frekanslarındaki Radar Sistemleri Tablosu.....	30
Tablo 7.1 5G Pasif Radar 3.5 GHz Maksimum Uzaklık Sonuçları.....	50
Tablo 7.2 5G Pasif Radar 35 GHz Maksimum Uzaklık Sonuçları.....	51
Tablo 7.3 Helikoptere Ait Özellikler Tablosu.....	52
Tablo 7.4 Helikopter Veri Seti İçin Makine Öğrenmesi Eğitimi Başarı Tablosu	55
Tablo 7.5 İnsan Yürüme Örüntüsü Veri Seti İçin Makine Öğrenmesi Başarı Tablosu.....	59
Tablo 7.6 FMCW Bilişsel Yazılım Tabanlı Radar Prototipi Ölçüm Sonuçları.....	67
Tablo 7.7 C-Bant YR İşareti İle RQ77 Model Dron İçin Ölçüm Sonucu Çıktıları.....	71
Tablo 7.8 C-Bant 5G YR İşareti İle İnsan Tespiti Ölçüm Sonucu Çıktıları.....	73
Tablo 7.9 Ka-Bant YR İşareti İle RQ77 Model Dron İçin Ölçüm Sonucu Çıktıları.....	75
Tablo 7.10 Ka-Bant 5G YR İşareti ile İnsan Tespiti Ölçüm Sonucu Çıktıları.....	76
Tablo 7.11 Phantom 4 Model Dron İçin Ölçüm Sonucu Çıktıları	80
Tablo 7.12 C-Bant 5G YR İşareti ile İnsan Tespiti Ölçüm Sonucu Çıktıları.....	81
Tablo 7.13 Dron Tespiti Literatür Karşılaştırma Tablosu	82

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Basit Radar Yapısı.....	4
Şekil 2.2 Basit Radar Mimarisi	5
Şekil 2.3 Bistatik Radar Yapısı	6
Şekil 2.4 a) Yüksek b) Düşük Radar Mesafe Çözünürlüğü.....	8
Şekil 2.5 Doppler Frekans Kayması	9
Şekil 3.1 İki Pervaneli Helikoptere Ait Mikro Doppler İmzası.....	13
Şekil 3.2 Altay Tankı.....	14
Şekil 3.3 a) Tek Sayılı b) Çift Sayılı Pervaneye Ait Mikro Doppler İmzası.....	16
Şekil 3.4 Helikopter Pallerinden Yansıyan Radar İşaretleri.....	16
Şekil 3.5 İnsan Yürümesi Modeli	18
Şekil 3.6 İnsan Yürümesine Ait Mikro Doppler İmzası.....	19
Şekil 4.1 Pasif Radar Şeması.....	20
Şekil 4.2 Geliştirilen Pasif Radar Almacı Blok Şeması	21
Şekil 4.3 İşaret İşleme Birimi Blok Şeması.....	22
Şekil 4.4 Uyumlu Süzgeç Çıktısı (Örnek).....	23
Şekil 4.5 Hamming Pencereleme Uygulanmış ve Uygulanmamış Uyumlu Süzgeç Çıktısı (Örnek).....	23
Şekil 4.6 Mobil FM Radyo Pasif Radar Sistemi	26
Şekil 5.1 Bilişsel Yazılım Tabanlı Radar Blok Şeması.....	29
Şekil 5.2 ADALM Pluto Yazılım Tabanlı Radyo Donanımı Blok Şeması.....	31
Şekil 5.3 ADALM-PLUTO Yazılım Tabanlı Radyo Donanımı	32
Şekil 5.4 En Yakın Komşu Algoritması	33
Şekil 5.5 Karar Ağacı Diyagramı (Örnek).....	34
Şekil 5.6 Destek Vektör Makinesi.....	35
Şekil 5.7 Karışıklık Matrisi	36
Şekil 5.8 KKÇ Eğitim Adımları	38
Şekil 6.1 Örnek Helikopter Pervanesi	40
Şekil 6.2 Pervane Benzetim Modeline Ait 3 Boyutlu Görüntüsü.....	41
Şekil 6.3 Pervane Benzetim Modeline Ait Akış Şeması	42
Şekil 6.4 İnsan Yürümesi Mikro Doppler Benzetim Modeli 3 Boyutlu Gösterimi.....	44

Şekil 6.5 İnsan Yürümesi Benzetim Modelinde Kullanılan 17 Parçalı Vücut Modeli	45
Şekil 6.6 İnsan Yürümesi Mikro Doppler Benzetim Modeline Ait Akış Şeması	47
Şekil 7.1 Pasif Radar Donanımı 3.5 GHz İçin Hazırlanan Benzetim Çıktısı	49
Şekil 7.2 5G Yeni Radyo 35 GHz İşareti İçin Hazırlanan Benzetim Çıktısı.....	50
Şekil 7.3 a) Boeing AH-64 b) Eurocopter EC-135 c) Bell 222 d) Eurocopter AS350.....	52
Şekil 7.4 Makine Öğrenmesi Blok Şeması.....	53
Şekil 7.5 a) Tek Sayılı Pale Sahip b) Çift Sayılı Pale Sahip Helikoptere Ait Benzetim Çıktısı Sentetik İşaret	54
Şekil 7.6 Helikopter DVM 3.5 GHz Veri Seti için Karışıklık Matrisi	54
Şekil 7.7 Helikopter DVM 35 GHz Veri Seti için Karışıklık Matrisi	55
Şekil 7.8 İnsan Yürümesine Ait Sentetik Mikro Doppler Benzetim Çıktısı	56
Şekil 7.9 Benzetim Modelinde Kullanılan İnsan Yürüme Örüntüsü.....	57
Şekil 7.10 İnsan Yürümesi Benzetim Modeli Blok Şeması	58
Şekil 7.11 İnsan Yürümesi 3.5 GHz İçin DVM Karışıklık Matrisi.....	58
Şekil 7.12 İnsan Yürümesi 35 GHz DVM Karışıklık Matrisi	58
Şekil 7.13 a) 3.5 GHz Yönlü Anten b) 35 GHz Yönlü Anten Ailesi c) Adalm-Pluto.....	60
Şekil 7.14 QAM Göndermeç Blok Diyagramı	61
Şekil 7.15 Hazırlanan Wi-Fi Göndermeç Birimine Ait a) Blok Şeması b) Spektrum Çıktısı	61
Şekil 7.16 QAM Almaç Blok Diyagramı	62
Şekil 7.17 a) Almaç Test Düzeneği Blok Şeması b) Vektör İşaret Analizörü ile Oluşturulan QAM İşareti ve Özellikleri	62
Şekil 7.18 Almaç Hassasiyet Test Düzeneği a) Blok Şeması b) Düzenek	63
Şekil 7.19 Model Helikopter Mikro Doppler Ölçüm Düzeneği	64
Şekil 7.20 Tek Pervane Testi Blok Diyagramı	64
Şekil 7.21 Hedefe Ait Mikro Doppler İmzası	65
Şekil 7.22 FMCW Yazılım Tabanlı Radar Blok Diyagramı	65
Şekil 7.23 Eurocopter EC-135 Model Helikopter	66
Şekil 7.24 a) FMCW Bilişsel Yazılım Tabanlı Radar Prototipi b) EC-135 Hedef	66
Şekil 7.25 İç Mekân Ölçüm Düzeneği.....	68
Şekil 7.26 Referans İşareti Ölçüm Düzeneği a) Blok Şeması b) Düzenek.....	68
Şekil 7.27 a) C-Bant b) Ka-Bant Ölçüm Düzeneği	69

Şekil 7.28 C-Bant 5G YR İşareti İle Dron Tespiti Ölçümü a) Blok Şeması b) Düzenek....	70
Şekil 7.29 C-Bant 5G YR İşareti İle İnsan Tespiti Ölçümü a) Blok Şeması b) Ölçüm Düzeneği	72
Şekil 7.30 Ka-Bant 5G YR İşareti İle Dron Tespiti a) Blok Şeması b) Ölçüm Düzeneği ..	74
Şekil 7.31 Ka-Bant 5G YR İşareti ile İnsan Tespiti Ölçümü	76
Şekil 7.32 Dış Mekân Ölçüm Düzeneği	77
Şekil 7.33 Yazılım Tabanlı Radar Blok Diyagramı	77
Şekil 7.34 5G Baz İstasyonu a) E2E İç Mekân Birimi b) 64T64R Anten Birimi	78
Şekil 7.35 Ölçümde Kullanılan Phantom 4 Dron.....	78
Şekil 7.36 a) Ölçüm 1 b) Ölçüm 2 c) Ölçüm 3 d) Harita Gösterim.....	79
Şekil 7.37 5G Açık Saha İnsan Tespit Ölçüm Düzeneği.....	81

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

3G	3. Nesil Haberleşme Protokolü
4G	4. Nesil Haberleşme Protokolü
5G	5. Nesil Haberleşme Protokolü
ADC	Analog/Sayısal Çevirici
CFAR	Hücre Ortalamalı Sabit Alarm Oranı
dB	Desi Bell
dBi	dB/izotropik anten
dBm	Desi Bell / mWatt
DGY	Düşük Gürültülü Yükselteç
DJI	Da-Jiang Innovations Bilim ve Teknoloji Şirketi
DVM	Destek Vektör Makinesi
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
FM	Frekans Modülasyonu
FMCW	Frekans ile Modüleli Sürekli Dalga Radarı
FPGA	Alanda Programlanabilir Mantık Dizini
FSK	Frekans Kaydırmalı Anahtarlama
GHz	Giga Hertz
GNSS	Küresel Uydu Seyrüsefer Sistemi
GSM	Mobil İletişim İçin Küresel Sistem
KNN	En Yakın Komşu Algoritması
KKÇ	K-Katlama Çapraz Geçerlilik
MHz	Mega Hertz
MLP	Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağı
OFDM	Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklrama
PC	Kişisel Bilgisayar
PCA	Temel Bileşen Analizi
PR	Pasif Radar
QAM	Dörtlü Genlik Modülasyonu
QPSK	Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama
SVM	Destek Vektör Makinesi
UHF	Ultra Yüksek Frekans
W	Watt
YR	Yeni Radyo
YTR	Yazılım Tabanlı Radyo

1. GİRİŞ

Günümüzde dronlar, özellikle şehir merkezlerinde, havalimanı ve stadyumlar gibi insanların yoğun bulunduğu bölgelerde tehdit unsuru oluşturmaktadır. Bu tehditin giderek artacağı öngörülmektedir. Bu nedenle dron tespiti önemli bir çalışma konusudur [1].

Dronlar her ne kadar Lidar, kamera ve geleneksel radar sistemleri ile tespit edilebilse de bu sistemler gece veya kötü hava koşullarında istenilen performansın çok altında çalışmaktadırlar. Geleneksel radarlar, Lidar veya kameralı sistemlere göre hava ve çevre koşullarından daha az etkilenmesine rağmen dron gibi düşük radar kesit alanına sahip cisimleri kuş veya böcek gibi hedefler olarak algırlar ve eşik seviyesinin altında tutup, ihmal ederler. Geleneksel radarlar istenmeyen hedeflerin yarattığı geriye dönen radar işaretlerini bastırarak bir hedef olarak göstermezler. Ayrıca geleneksel radar yapısı kuş-dron ayrımını yapabilecek yapıya sahip değildir. Kuş, böcek veya dron ayrımının yapılabilmesi için hedeflere ait belirgin özelliklere ihtiyaç duyulur. Her hareketli ana gövde Doppler frekans kaymasına neden olur. Hareketli diğer gövde parçaları ise Mikro Doppler frekansı adı verilen Doppler frekansı etrafında frekans modüleli işaretler oluştururlar. Bu işaretler her hareketli cisim için özeldir [2]. Mikro Doppler etkiler kullanılarak hedef sınıflandırılması ve tanımlanması yapılabilir.

Mikro Doppler etkiler ile tank motorunun yarattığı titreşimler sayesinde tank tespiti [3], insan vücudunun yarattığı periyodik hareketler ile insan tespiti [4], lastiklerin yarattığı titreşimler ile araba tespiti [4], pervanelerin periyodik olarak dönmesi sayesinde dron [5] ve helikopter tespiti [6] mümkün olmaktadır. Ancak bu radarlar aktif radarlardır. Aktif radarlar, hedef tespiti yapabilmek için ortama elektromanyetik işaret yayarlar ve hedeften yansıyan işareti inceleyerek hedef tespitinde bulunurlar. Aktif radarlar çalışma prensibi nedeniyle, şehir merkezi gibi engellerin çok fazla olduğu yerlerde bina, ağaç ve diğer etmenlerden dolayı verimsiz çalışmaktadır [1]. Şehir merkezleri gibi kalabalık ve çok fazla engelin bulunduğu alanlarda, yayın yapmayan sadece havadaki işaretleri dinleyerek hedef tespit edebilen düşük maliyetli sistemler kullanılmaktadır [7]. Bu sistemler; “Pasif Radar, Pasif Koherent Almaç veya Pasif Almaç” olarak adlandırılır. Pasif Radar yapıları, hali hazırda yayın yapan işaretleri kullanmaktadırlar. Bu yapılar, frekans modüleli radyo işaretleri [8], analog televizyon işaretleri [9], dijital televizyon işaretleri [10], küresel uydu seyrüsefer

sistemi (GNSS) işaretleri [11] ve mobil iletişim için küresel sistem (GSM) işaretlerini [12] kullanarak hedef tespiti gerçekleştirmektedirler. Ancak, taşıyıcı frekansları ve bant genişlikleri Mikro Doppler etkileri tespit edebilmek için yeterli değildir [1]. Dronların küçük ve hafif yapılara sahip olması, bu nedenle düşük radar kesit alanı değerleri nedeniyle Pasif Radar ile tespit edilebilmeleri için daha farklı aydınlatıcı işarete ihtiyaç duyulur [13]. 5. Nesil haberleşme protokolü (5G), yüksek taşıyıcı frekansı, yüksek bant genişliği, küçük ve sık hücre yapısı sayesinde Mikro Doppler etkiler ile dron tespitini mümkün kılmaktadır [1].

Bu çalışmada aktif radar yapısı yerine Pasif Radar yapısı geliştirilmiş, Pasif Radar aydınlatıcısı olarak 5G baz istasyonu kullanılmıştır. Ayrıca, Mikro Doppler etkiler kullanılarak hedef sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Ek olarak V. Chen [14] tarafından hazırlanmış insan yürümesi ve helikopter pallerinin hareketlerinden kaynaklı Mikro Doppler benzetim modellerine ait kod dizinleri incelenmiştir. İncelenen kod dizini kullanılarak oluşturulan Mikro Doppler benzetim modeli [15] ile insan yürümesinin ve helikopter pervanelerinin yarattığı Mikro Doppler etkiler gözlenmiştir. Bu çalışma ile benzetim modeline makine öğrenmesi algoritmaları eklenerek hedef sınıflandırma yapılmıştır. Benzetim modeli kullanılarak, farklı özelliklere sahip helikopterler için Mikro Doppler benzetimleri yapılmıştır. Bu benzetimler; pervane boyları, pal dönüş hızı, pal sayısı, radar bakış açısı, radar merkez frekansı, radar bant genişliği ve radar kesit alanı değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, insan yürüme örüntüsü için, yürüme hızına, radar bakış açısına, radar merkez frekansına, radar bant genişliğine ve radar kesit alanına bağlı olarak da benzetimler gerçekleştirilmiştir. Bu benzetim sonuçları vasıtasıyla veri setleri hazırlanmıştır. Hazırlanan veri setleri Ağaç Karar, Destek Vektör Makinesi (DVM) ve En Yakın Komşu (KNN) algoritmaları kullanılarak hedef sınıflandırılması için eğitilmiştir. Eğitilen veriler ile hedef tespiti başarımları ölçülmüştür.

Laboratuvar ortamında Vektör İşaret Üretici ve İşaret Analizörü kullanılarak 5G baz istasyonu aydınlatıcısı için Pasif Radar sistemi gerçekleştirilmiştir. Vektör İşaret Üretici ile C ve Ka bantlarında 5G yeni radyo aydınlatıcısı oluşturulmuştur. İnsan yürüyüşü ve dron tespiti için C ve Ka banttaki bu ölçümler işaret analizörü ile kaydedilmiştir. Ardından, bu veriler işlenerek Pasif Radarın çalışması ve hedef sınıflandırması test edilmiştir. Yapılan testlerde C ve Ka bant başarımı, yüzde başarımları ölçütü olarak alınmıştır. Bir sonraki aşamada uygun maliyetli, kompakt bir Yazılım Tabanlı Radyo (YTR) donanımı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu donanıma, 5G baz istasyonu vasıtasıyla C bantta hedef tespit kabiliyeti

kazandırılmıştır. Ardından, bu sistem ile dron ve insan yürümesi için saha testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerde başarı, yüzde başarı ölçütü olarak alınmıştır.

1.1. Literatür Araştırması

Pasif Radar ile hedef tespiti konusunda daha önce yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalar içerisinde helikopter ve hedef tespiti için aydınlatıcı olarak farklı işaretler kullanılmıştır.

Patel [1] daha önce dron tespiti konusunda yapılan çalışmalarını incelemiştir. Bu çalışmalar içerisinde ilk olarak farklı çalışma frekanslarında çalışan radarları karşılaştırmıştır. Ardından, kullanılmakta olan dronların radar kesit alanını ölçen çalışmaları incelemiştir. Daha sonra dron tespiti gerçekleştirebilen Pasif Radar yapılarını karşılaştırmıştır. Bu çalışmalar içerisinde 3. Nesil haberleşme işareti (3G) aydınlatıcıları kullanılarak Pasif Radar ile dron tespitinin mümkün olduğunu ancak Mikro Doppler etkiler ile 3G aydınlatıcıları kullanılarak hedef sınıflandırma başarı oranının çok düşük seviyede olduğunu belirtmiştir. Daha yüksek başarı ile tespit ve sınıflandırma için daha yüksek frekans değerlerinde çalışılması gerektiğini ve 5. Nesil Haberleşme Jenerasyonu baz istasyonlarının aydınlatıcı olarak denenmesini önermiştir.

Knoedler [12] 1800 MHz GSM işaretlerini aydınlatıcı olarak kullanarak pasif radar prototipi geliştirmiştir. Hazırlanan bu sistem 30 MHz anlık bant genişliğine, 16 anten elemanına ve 8 kanallı alıcıya sahiptir. Bu sayede aynı anda 8 farklı aydınlatıcı ile çalışabilmektedir. Geliştirilen bu prototip ile küçük boyutlu dron tespiti için ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucunda radar dron tespiti gerçekleştirebilmiştir. Ancak, aydınlatıcılar ve radar arasındaki geometrilerden dolayı Doppler etkileri ölçülemez.

Malanowski [16] ultra yüksek frekans (UHF) aralığındaki televizyon işaretlerini aydınlatıcı olarak kullanarak pasif radar geliştirmiştir. Geliştirilen bu sistem üzerinde uyumlu filtrede iyileştirme yapılarak radarın performansı artırılmaya çalışılmıştır. Düşük frekanstan dolayı Mikro Doppler etkiler elde edilememiştir.

Abdullah [17] 2.635 MHz merkez frekansında 4. Nesil Haberleşme Jenerasyonu (4G) aydınlatıcısı kullanarak hareketli nesne tespit ve takibi için Pasif Radar geliştirmiştir. Geliştirilen radar kullanılarak insan, araba ve motosiklet için ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde radar en uzak 140 metre mesafeden araba, 130 metre mesafeden motosiklet ve 60 metre uzaklıktan insan tespiti gerçekleştirmiştir.

2. AKTİF RADAR

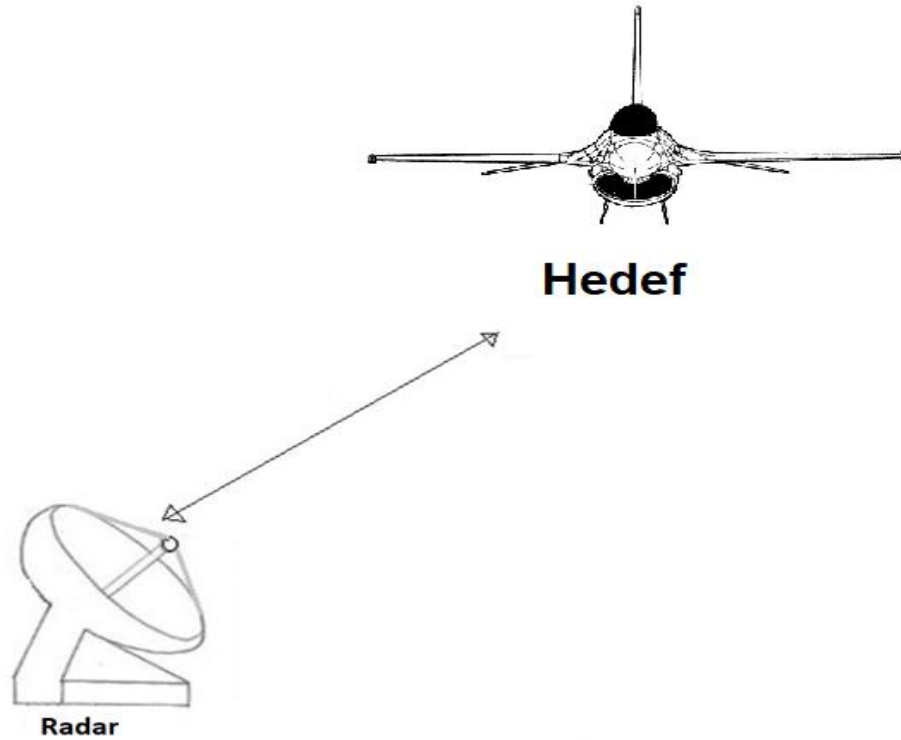
Radar, elektromanyetik işareti ortama yayar. Yayılan elektromanyetik işaret hedeften yansıtılarak alıcı antenine ulaşır. Gönderilen işaret ile yansıyan işaret arasındaki zaman farkından hedef ile radar arasındaki mesafe elde edilir. Hedef ile anten arasındaki mesafe Denklem 2.1 kullanılarak hesaplanır.

$$m = \frac{t c}{2} \quad (2.1)$$

Eşitlikte, m: hedef ile anten arasındaki mesafeyi, t: gönderilen işaret ile yansıyan işaret arasındaki zaman farkını, c: ışık hızını belirtir.

2.1. Monostatik Radar Yapısı

Monostatik Radar yapısı, göndermeç birimi ve almaç birimi ile aynı anteni paylaşan sistemlerdir. Bu sayede alıcı anten ile gönderici anten arasında antenler arası geometriden dolayı faz farkı oluşmaz. Şekil 2.1’de basit bir Mono-Statik Radar yapısı görülmektedir.



Şekil 2.1 Basit Radar Yapısı

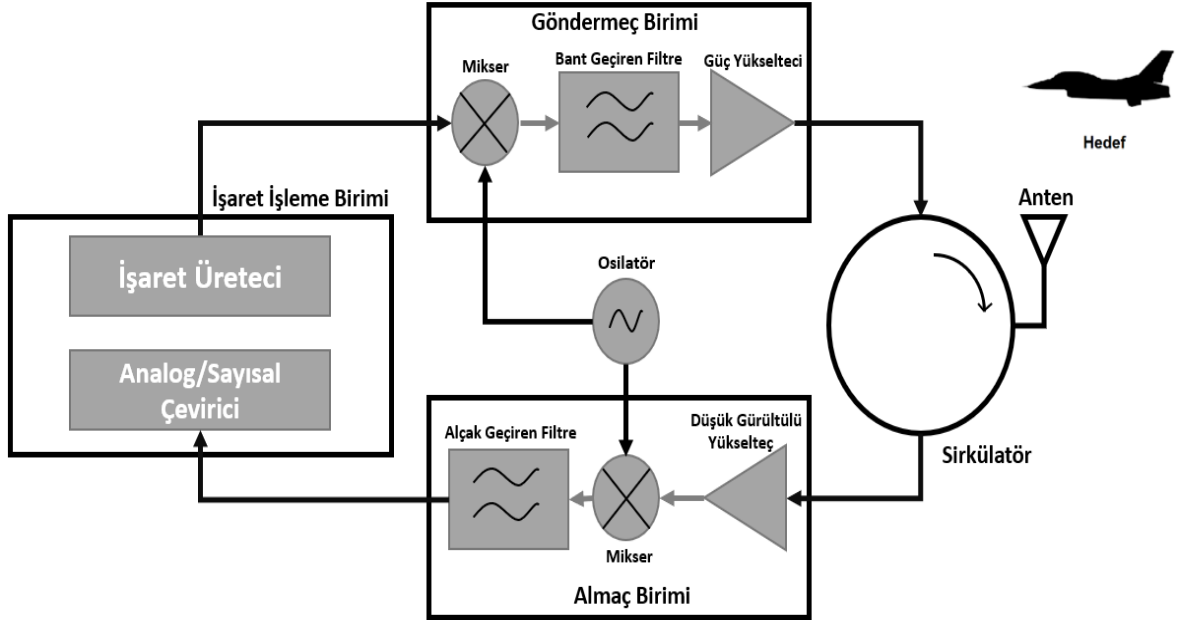
Monostatik Radarın hedefi algılayabileceği en yüksek mesafe Denklem 2.2 ile hesaplanmaktadır.

$$R_{max} = \left[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^2 S_{min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.2)$$

Eşitlikte, R_{max} : algılanabilecek maksimum uzaklığı, P_t : radarın çıkış gücünü, G : anten kazancını, λ : dalga boyunu, σ : radar kesit alanını ve S_{min} : radarın algılayabileceği minimum işaret gücünü ifade etmektedir.

2.2. Radar Mimarisi

Geleneksel basit radar yapısı; göndermeç birimi, almaç birimi, işaret işleme birimi, sirkülâtör ve anten birimlerinden oluşur. Şekil 2.2’de basit bir radar blok diyagramı görülmektedir.



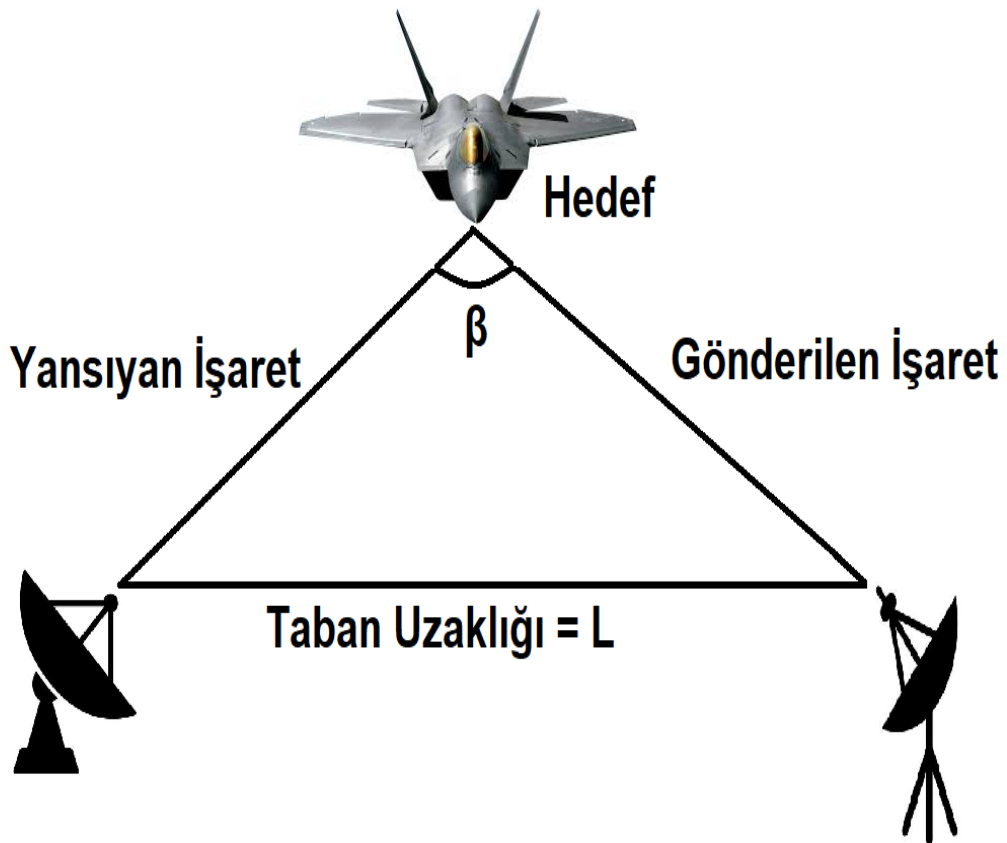
Şekil 2.2 Basit Radar Mimarisi

Göndermeç birimi, işaret işleme birimi tarafından oluşturulan temel bant radar işaretinin frekansını ve gücünü yükseltir. Bu radar işareti, iletim hatları ile antene iletilir. Sirkülâtör birimi antenden gelen işaretleri almaç birimine, göndermeç biriminden gelen işaretleri ise ortama yayılması için anten birimine iletir. Almac birimi, hedeften geri

yansıyan işaretleri anten aracılığıyla algılayarak, gelen analog Radyo Frekansı işaretlerini temel bant işaret seviyesine düşürür. Ardından düşük frekanslı analog işaretler işaret işleme birimine iletilerek, sayısallaştırılır. İşaret işleme biriminde sayısallaştırılmış işaretler üzerinde Fourier Dönüşümü, Uyumlu Süzgeç vb. matematiksel işlemler gerçekleştirilir. Bu işlemler sonucunda hedefe ait hız, uzaklık ve açı gibi özellikler elde edilerek, kullanıcıya iletilir. İşaret işleme birimi, farklı modülasyon tiplerinde temel bant seviyesinde radar işaretleri oluşturabilir. Temel bant seviyesinde oluşturulan radar işaretlerini gönderme birimine iletir. Gönderme birimi, işaret işleme biriminden gelen sayısal temel bant radar işaretini analog Radyo Frekansı işaretine dönüştürerek antene iletir.

2.3. Bistatik Radar Yapısı

Bistatik Radar mimarisinde, alıcı ve verici antenleri birbirlerinden ayrı konumlandırılmıştır. Bu sayede radar karıştırıcılara ve hayalet uçaklara karşı bağımsızlık kazanır [18]. Şekil 2.3'te alma ve gönderme antenleri arasında mesafe farkı bulunan bistatik radar yapısı görülmektedir.



Şekil 2.3 Bistatik Radar Yapısı

Gönderici anten ile alıcı anten arasında mesafe farkından dolayı hedeften yansıyan işaret β : (bistatik) açısı ile yansır. Radarın gönderme anteni ile alma anteni arasındaki bilinen mesafe (L) kullanılarak hedefin yeri tayin edilebilir. Hedef ile radar arasındaki uzaklık Denklem 2.3 ile hesaplanır.

$$Rr = \frac{(R_t + R_r)^2 - L^2}{2(R_t + R_r + L \sin \beta)} \quad (2.3)$$

Eşitlikte, R_r : alma anteni ile hedef arasındaki uzaklığı, R_t : göndermeç ile hedef arasındaki uzaklığı, L : alma anteni ile göndermeç anteni arasındaki uzaklığı ve β : hedeften yansıyan işaretin alma antenine gelme açısını ifade etmektedir.

2.4. Bistatik Radar Denklemi

Radarın algılayabileceği maksimum uzaklık, radar uzaklık denklemi ile hesaplanabilir. Geleneksel Monostatik Radar yapılarında radarın algılayabileceği maksimum uzaklık Denklem 2.2 ile hesaplanır. Ancak bistatik radarlarda, algılanabilecek maksimum radar mesafesi Denklem 2.2 ile hesaplanamaz. Radarın alıcı ve gönderici antenleri ile hedef arasındaki geometrinin de hesaplanması gerekir. Bistatik radar yapılarında algılanabilecek maksimum radar mesafesi Denklem 2.4 kullanılarak hesaplanabilir.

$$(R_t R_r)_{max} = \left[\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma F_r^2 F_t^2}{(4\pi)^3 L_t L_r KTB (S/N)_{min}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.4'te;

P_t : Göndermeç çıkış gücünü,

G_t : Göndermeç anten kazancını,

G_r : Almaç anten kazancını,

λ : Dalga boyunu,

σ : Bistatik radar kesit alanını,

F_t : Hedef ile göndermeç arasındaki yayılım patern faktörünü,

F_r : Hedef ile almaç arasındaki yayılım patern faktörünü,

L_t : Göndermeç sistem kaybını,

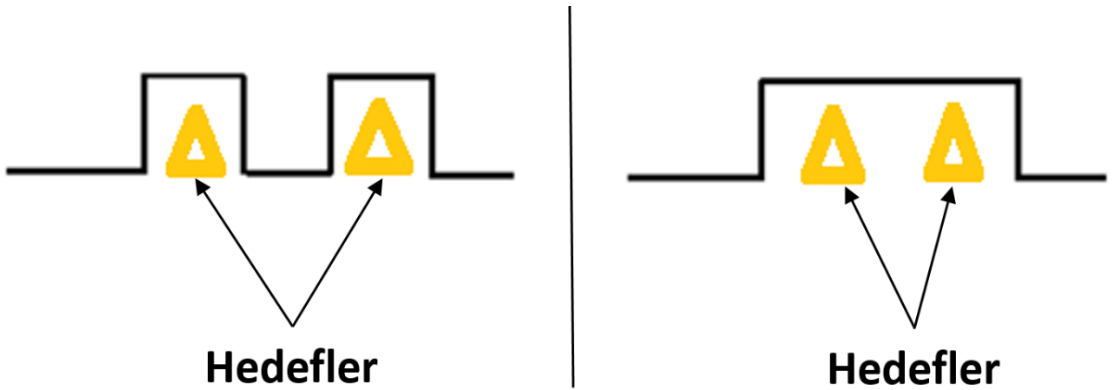
- L_r : Almac sistem kaybını,
 K : Boltzmann sabitini,
 T : Almaca ait gürültü sıcaklığını,
 B : Almaca ait bant genişliğini,
 $(S/N)_{min}$: Minimum işaret/gürültü oranını ifade eder.

2.5. Bistatik Radar Mesafe Çözünürlüğü

Radarin birbirine yakın iki hedefi tek bir hedef olarak görebileceği mesafeye, mesafe çözünürlüğü denir. Geleneksel radarlarda mesafe çözünürlüğü Denklem 2.5 ile hesaplanır.

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (2.5)$$

Burada, ΔR : radar mesafe çözünürlüğünü, B : radar bant genişliğini ve c : ışık hızını ifade etmektedir. Şekil 2.4'te radar mesafe çözünürlüğüne ait radar darbe dalgaları görülmektedir. Şekil 2.4.b'de iki hedef arasındaki mesafe, radar mesafe çözünürlüğü değerinden daha az bir değer olduğu için radar iki hedefi aynı hedef olarak algılayıp buna göre işaret üretir. Şekil 2.4.a'da ise iki hedef arası mesafe radar mesafe çözünürlüğünden fazla olduğu için radar iki hedefi ayırabilir ve bu sayede iki farklı işaret üretir.



Şekil 2.4 a) Yüksek b) Düşük Radar Mesafe Çözünürlüğü

Geleneksel radarların aksine bistatik radar sistemlerinde radar mesafe çözünürlüğüne bistatik açısı β 'da etki eder. Bistatik radar sistemlerinde radar mesafe çözünürlüğü Denklem 2.6 kullanılarak hesaplanır.

$$\Delta R = \frac{c}{2B \frac{\cos \beta}{2}} \quad (2.6)$$

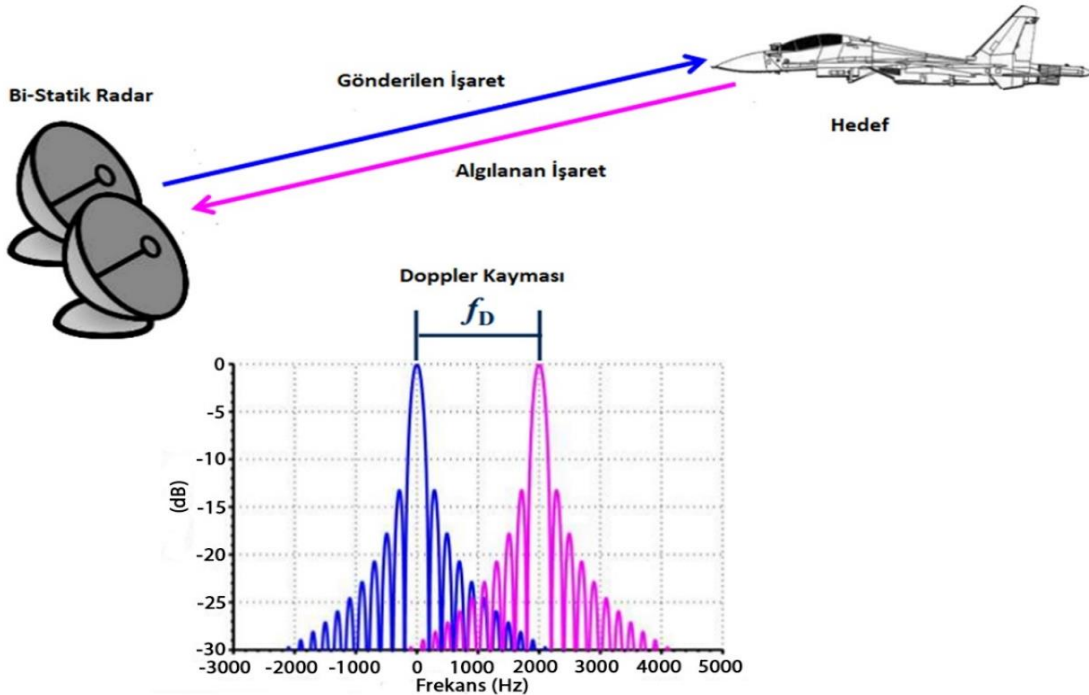
Burada, ΔR : radar mesafe çözünürlüğünü, B: bant genişliğini, c: ışık hızını ve β : bistatik açısını ifade etmektedir.

2.6. Bistatik Radar Hız Çözünürlüğü

Hareketli hedefler, elektromanyetik işaretler üzerinde frekans değişimine neden olurlar. Buna Doppler etkisi denir. Doppler etkisi sayesinde elektromanyetik işaretler üzerindeki frekans değişimleri incelenerek, hedefe ait hız ve hızın yönü tespit edilebilir. Doppler etkisi sayesinde hedefe ait hız Denklem 2.7 ile hesaplanır.

$$V = \frac{\lambda f_d}{2} \quad (2.7)$$

Burada, V: radyal hızı, f_d : doppler frekans kaymasını ve λ : dalga boyunu ifade etmektedir. Şekil 2.5'te Doppler frekans kaymasına ait Güç-Frekans grafiği görülmektedir. Gönderilen işaret ile algılanan işaret arasında f_d kadar frekans farkı olduğu görülmektedir.



Şekil 2.5 Doppler Frekans Kayması

Doppler frekans kayması bistatik radar açısı β 'dan etkilenir. Bistatik radar sisteminde hedefe ait hız Denklem 2.8 kullanılarak hesaplanır.

$$V = \frac{\lambda f_d}{2 \cos \alpha \cos \beta} \quad (2.8)$$

Burada, V : radyal hızı, f_d : Doppler frekans kaymasını, β : bi-statik radar açısını, α : hızın radyal bileşeni ve λ : dalga boyunu ifade etmektedir.

Radarın algılayabildiği minimum Doppler hızına Doppler Çözünürlüğü denir. Radar hedefe ait hızı, hız çözünürlüğü aralığıyla tespit edebilir. Geleneksel monostatik radarlar için radar hız çözünürlüğü Denklem 2.9 ile hesaplanır.

$$V_{res} = \frac{\lambda}{2T_f} \quad (2.9)$$

Burada, V_{res} : hız çözünürlüğünü, λ : dalga boyunu ve T_f : darbe entegrasyon süresini ifade etmektedir.

3. MİKRO DOPPLER

3.1. Doppler Etkisi

Radar, elektromanyetik işareti ortama belirli sürelerde aralıklı olarak yayar. Ortamdaki hedef, radar tarafından gönderilmiş işareti aralarındaki mesafe ile ilintili olarak almaya geri yansır. Eğer hedef hareketli ise işaret üzerinde frekans değişimine neden olur. Bu değişime Doppler frekans kayması denir. Doppler frekansı Denklem 3.1 ile hesaplanır.

$$f_d = \frac{2V_r}{\lambda} \quad (3.1)$$

Burada, f_d : Doppler frekansını, V_r : hedefin hızını ve λ : işaretin dalga boyunu ifade etmektedir. Hedef, radara yaklaşmakta ise frekans değişimi pozitif yönde artar. Eğer hedef, radardan uzaklaşıyorsa frekans değişimi negatif yönde değişir. Bu sayede hedefin hızı ve yönü tespit edilebilir. Hedeften yansıyan Doppler kaymasına uğramış işaret Denklem 3.2 ile hesaplanır.

$$X(t) = A \sin (2\pi f(t + t_d) \pm f_d) \quad (3.2)$$

Burada, A: yansıyan işaretin genliğini, f: işaretin frekansını, t_d : işaretin zaman gecikmesini ve f_d : Doppler frekansını ifade etmektedir. Doppler frekans kayması hedef ile radar arasındaki açısal hıza bağlıdır. Helikopter pervanesi, kuş kanadı, yürüyen insana ait kol ve bacak hareketleri gibi birden fazla değişik hızda hareketli parçalara sahip olan nesnelere birden fazla Doppler kayması oluştururlar. Bu etkiler kullanılarak hareketli nesnelere sınıflandırılabilir.

3.2. Doppler Çözünürlüğünün Artırılması

Radar uygulamalarında, hız verisinin çözünürlüğünün artırılması için yüksek Doppler çözünürlüğüne ihtiyaç duyulmaktadır. Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kullanılan algoritmalarda girilen örnek sayısının artırılması, frekans çözünürlüğünü artırmaktadır. Ayrıca, FFT sonucu genel frekans aralığı aynı kalır ve her bir frekans hücresi daha küçük frekans aralığını kapsar. Bu sayede daha küçük frekans değişimleri tespit edilebilir ve daha

düşük frekans değişimleri algılanabilmektedir. FFT algoritmasına verilen girdi sayısının artırılması hesaplama süresinde artış yaratmaktadır. Doppler frekans çözünürlüğü Denklem 3.3 ile hesaplanır.

$$\Delta f = \frac{PRF}{2N} \quad (3.3)$$

Burada, Δf : frekans çözünürlüğünü, PRF: darbe tekrarlama süresini ve N: FFT girdi sayısını belirtmektedir.

Tablo 3.1 Farklı FFT Girdi Değerleri İçin Doppler ve Hız Çözünürlüğü Çıktıları

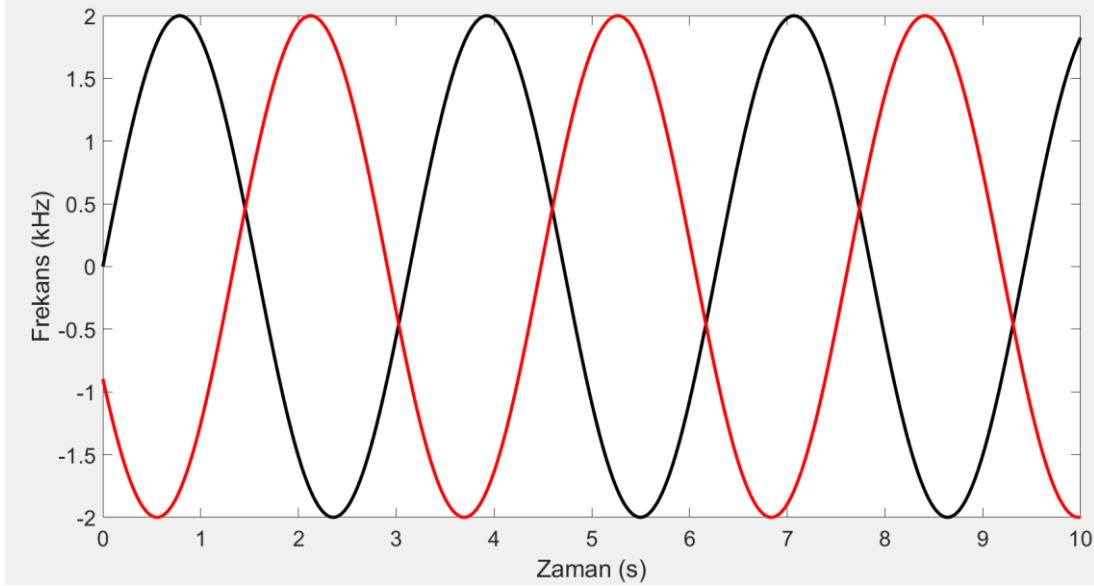
FFT Girdi Sayısı	Doppler Çözünürlüğü (Hz)	Hız Çözünürlüğü (m/sn)
32	31.2	0.46
64	15.6	0.23
128	7.8	0.11
256	3.9	0.05
512	1.9	0.03

Tablo 3.1’de farklı FFT girdi sayıları için Doppler ve hız çözünürlüğü değerleri görülmektedir. FFT girdi sayısı arttıkça, daha düşük hız aralıklarıyla, hız tespiti yapılabilmektedir. Radar ile Mikro Doppler etkilerden insan ve helikopter tespiti yüksek Doppler çözünürlüğüne ve düşük hız tespitine ihtiyaç duymaktadır.

3.3. Mikro Doppler Etkisi

Hedef, ana gövde hareketi dışında periyodik hareketler veya titreşimler oluşturabilir. Bu hareketler, Doppler frekansı etrafında frekans modüleli işaretler oluştururlar. Bu işaretlere Mikro Doppler etkiler denir. Her hedef, kendi türüne ait özel Mikro Doppler etkiler yaratırlar. Bu etkiler ayrıca Mikro Doppler imzası olarak da adlandırılır. Mikro Doppler imzası kullanılarak kuş, dron, uçak, tank ve helikopter gibi hedeflerin türleri belirlenebilir [19]. Hedeflerin Mikro Doppler imzaları kullanılarak, askeri ve sivil uygulamalarda; hedef

takibi, hedef sınıflandırma ve duvar arkası insan tespiti yapılabilir. Örneğin Şekil 3.1’de görülmekte olan iki pervaneli helikoptere ait Mikro Doppler imzası kullanılarak hedef sınıflandırması yapılabilir.



Şekil 3.1 İki Pervaneli Helikoptere Ait Mikro Doppler İmzası

3.4. Mikro Doppler Analizi

Fourier dönüşümü periyodik bir işareti farklı frekanstaki sinüs ve cosinüslerin toplamı olarak ifade eder. Fourier dönüşümü Denklem 3.4 ile tanımlanır.

$$S(w) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp\{-j\omega t\} dt \quad (3.4)$$

Burada, $s(t)$: zaman işaretini, w : açısal frekansı ve t ise zamanı belirtir. Fourier Analizi, işaretin sadece frekans uzayında bulunan dağılımını gösterir. Bu yüzden Fourier dönüşümü içerisinde zamanla frekansı değişen işaretleri gösteremez. Mikro Doppler analizinde, işaretin incelenmesi için işaretin frekans dağılımı zamanın bir fonksiyonu olarak gösterilmelidir. Bu yüzden zaman-frekans analizine ihtiyaç duyulmaktadır. Zaman-frekans analizi enerjinin zaman ve frekans uzayında dağılımını inceler. Mikro Doppler işaretlerinin incelenmesinde genelde Fourier Dönüşümü yerine kısa zamanlı Fourier Dönüşümü (*Short Time Fourier Transform*) kullanılır. Kısa zamanlı Fourier Dönüşümü, Fourier Dönüşümü'nün sürekli

olarak kısa pencereler ile işlenmesidir. Kısa zamanlı Fourier Dönüşümü Denklem 3.5 ile elde edilir.

$$STFT(t, w) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) w(t - \tau) \exp\{-jw\tau\} dt \quad (3.5)$$

Burada, $w(t)$: pencereleme fonksiyonu, t : zaman, τ : yavaş zaman, $s(t)$: zaman işaretini belirtmektedir. Pencere fonksiyonu konusunda belirli bir ister yoktur, basit bir dikdörtgen pencere fonksiyonu kullanılabilir.

3.4.1. Titreşimden dolayı oluşan Mikro Doppler etkiler

Hedef üzerindeki titreşimler mikro hareketler yaratır. Bu hareketler, hedefte küçük yer değiştirmeler yaratır. Radar, bu değişimleri fark edebilir. Küçük yer değiştirme hareketlerini algılayabilmek için kullanılan radar sisteminin merkez frekansının yüksek olması gerekmektedir. Hedef üzerinde birçok farklı sebepten ötürü titreşim oluşabilir. Örneğin araç üzerinde bulunan motorun hareketinden kaynaklı titreşimler oluşabilir. Tank gibi yüksek güçlü dizel motora sahip olan askeri araçlar zırhları üzerinde yarattıkları titreşim ile radar vasıtasıyla tespit edilebilirler. Örneğin Şekil 3.2’de görülmekte olan Altay tankı 1500 beygir gücünde V12 silindirli dizel motora sahiptir. Bu yüksek güçlü motorun gövde üzerinde yarattığı titreşimler tespit edilebilir.



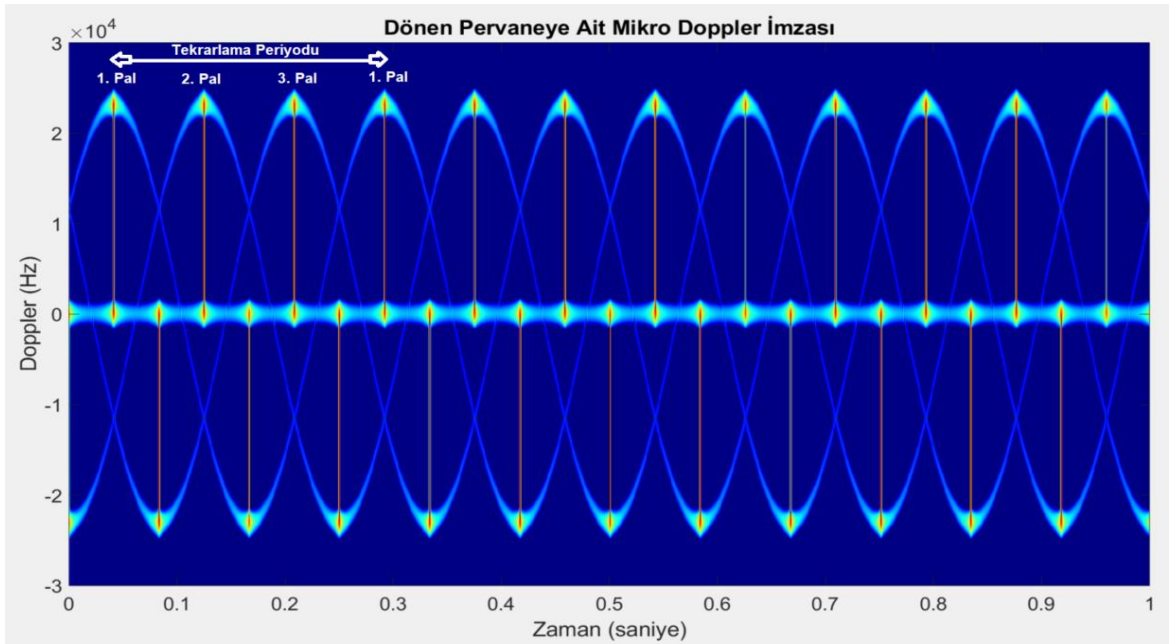
Şekil 3.2 Altay Tankı

3.4.2. Dönme hareketinden dolayı oluşan Mikro Doppler etkiler

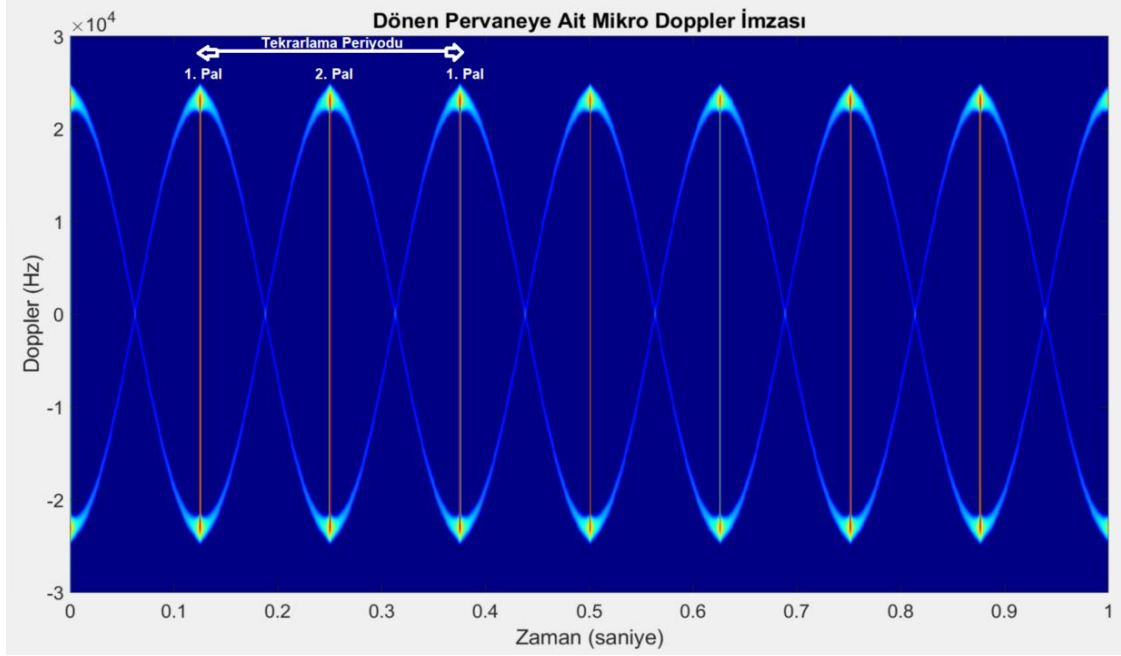
Dönen nesnelere Mikro Doppler etkiler oluşmasına neden olur. Helikopter, dron, insansız hava aracı ve rüzgar gülü üzerinde bulunan pervanelerin dönmesinden kaynaklı mikro hareketler oluşur. Bu mikro hareketler ise Mikro Doppler frekanslarının oluşmasına sebep olur. Dönen objelerin uzunlukları ve hızları, oluşan Doppler frekanslarını etkiler. Yüksek hızla dönen objeler daha yüksek frekanslı Mikro Doppler işaretleri oluştururlar.

3.4.3. Helikopter pervanesinden dolayı oluşan Mikro Doppler etkiler

Helikopterlerde bulunan pervanelerin gerçekleştirdiği periyodik dönme hareketleri, Mikro Doppler frekans bileşenleri oluştururlar. Oluşan bu bileşenler ile ana gövde hareketinden oluşan frekans bileşenleri ayırt edilebilir. Pervane dönme hızının yarattığı hareket, ana gövdenin yarattığı hareketten çok daha hızlı olduğu için ayırt edilebilir. Ayrıca helikopterler sabit kanatlı hava taşıtlarına göre daha yavaş uçmaktadırlar. Bu sayede sınıflandırma işlemi yapılabilir. Helikopter üzerinde bulunan pervane sayısı, Mikro Doppler imzasından elde edilebilir. Şekil 3.3'te tek ve çift sayılı pervaneli helikopterlere ait Mikro Doppler imzaları görülmektedir. Tek sayılı pervaneli helikopterler, çift sayılı pervaneye sahip helikopterlere göre daha sık maksimum Doppler frekansı oluşturmaktadırlar.



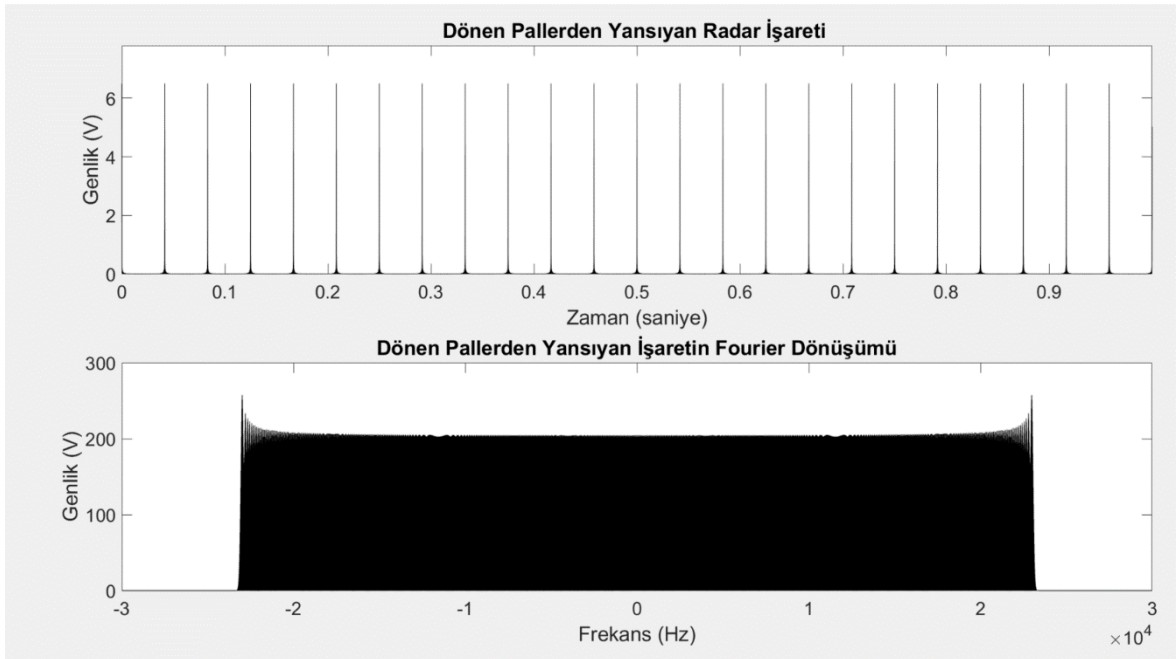
(a)



(b)

Şekil 3.3 a) Tek Sayılı b) Çift Sayılı Pervaneye Ait Mikro Doppler İmzası

Maksimum hız bileşeni, helikopter pervanesinin uç dönme noktası tarafından yaratılır. Pervane radara göre konumunu tekrar ettiği için bu hareket radar ekranında periyodik işaret oluşturur. Şekil 3.4'te pallerden yansıyan radar işaretleri frekans ve zaman bölgesinde görülmektedir.



Şekil 3.4 Helikopter Pallerinden Yansıyan Radar İşaretleri

Sabit hızla periyodik dönme gerçekleştiren helikopter palleri kendi konumlarını tekrarlarlar. Tekrarlama periyodu Denklem 3.6 ile tanımlanır.

$$T = \frac{2\pi}{N\Omega} \quad (3.6)$$

Burada, T: tekrarlama periyodunu, N: pervane sayısını ve Ω : açısal dönme hızını belirtmektedir. Tekrarlama periyodu ayrıca gözlem çevrim süresi ölçülerek de hesaplanabilir. Açısal dönme hızı Denklem 3.7 ile verilir.

$$\Omega = \frac{2\pi}{NT} \quad (3.7)$$

Burada, Ω : açısal dönme hızını, T: tekrarlama periyodunu ve N: pervane sayısını belirtmektedir. Mikro Doppler işaretleri kullanılarak helikopter pervanesinin boyu Denklem 3.8 ile bulunur.

$$U_p = \frac{c f_{dmax}}{f 2\Omega} \quad (3.8)$$

Eşitlikte U_p : pervane uzunluğunu, Ω : açısal dönme hızını, c: ışık hızını, f: frekansı ve f_{dmax} : maksimum Doppler frekansını belirtmektedir.

3.4.4. İnsan yürümesinden dolayı oluşan Mikro Doppler etkiler

İnsan yürümesinde bütün vücut parçaları hareket içerisindedir. Hareket eden bütün parçalar farklı değerlerde hız bileşeni oluşturur. İnsan gövdesi daha az hareket ettiği için düşük frekansta bileşen oluştururken, insan vücuduna ait kol ve bacaklar yüksek değerlerde Mikro Doppler etkiler oluştururlar. Bu etkiler radar tarafından algılanabilir. Şekil 3.5'te insan yürüme örüntüsünde hareket eden parçalar görülmektedir. Görülen parçalar içerisinde, kol ve bacak hareketleri en yüksek açısal hızı ürettiği için maksimum Mikro Doppler frekansı oluşmasına neden olurken gövde ve kalça gibi düşük hareketler yapan vücut bileşenleri minimum değerlerde Mikro Doppler etkisi oluşturur.

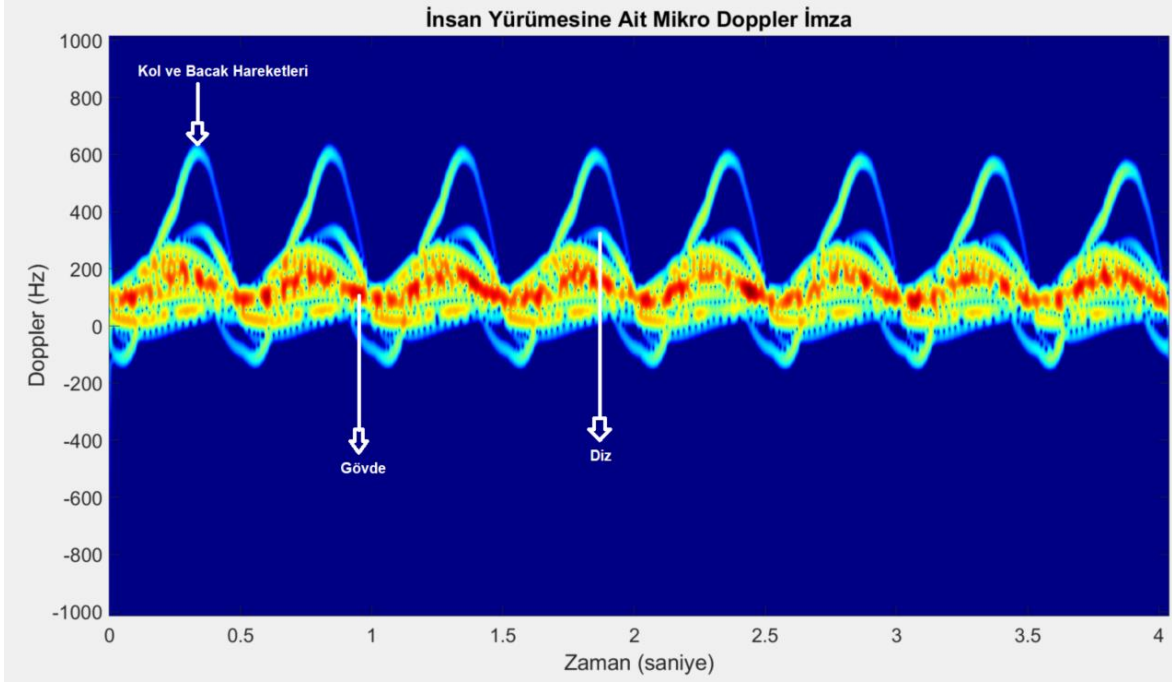


Şekil 3.5 İnsan Yürümesi Modeli

İnsan vücudunun oluşturduğu Mikro Doppler etkisi her insan için özeldir. Bu sayede insan yürümesinin oluşturduğu Mikro Doppler etkilerden yürüyen insanın kimliğini tespit edebilmek mümkündür.

İnsan yürümesine ait Mikro Doppler çıktısı Şekil 3.6'da görülmektedir. Şekil 3.6'da kollar ve bacaklar, ileri ve geri hızlı hareket yaptığı için en yüksek Mikro Doppler frekansları

oluşturduğu görülmektedir. Gövde ve diz gibi en yüksek güce sahip, düşük hareket yapan vücut bileşenleri ise algılanması düşük Mikro Doppler etkiler yaratmıştır. İnsan yürümesi periyodiktir ve birçok farklı frekansta Mikro Doppler etki oluşturur.

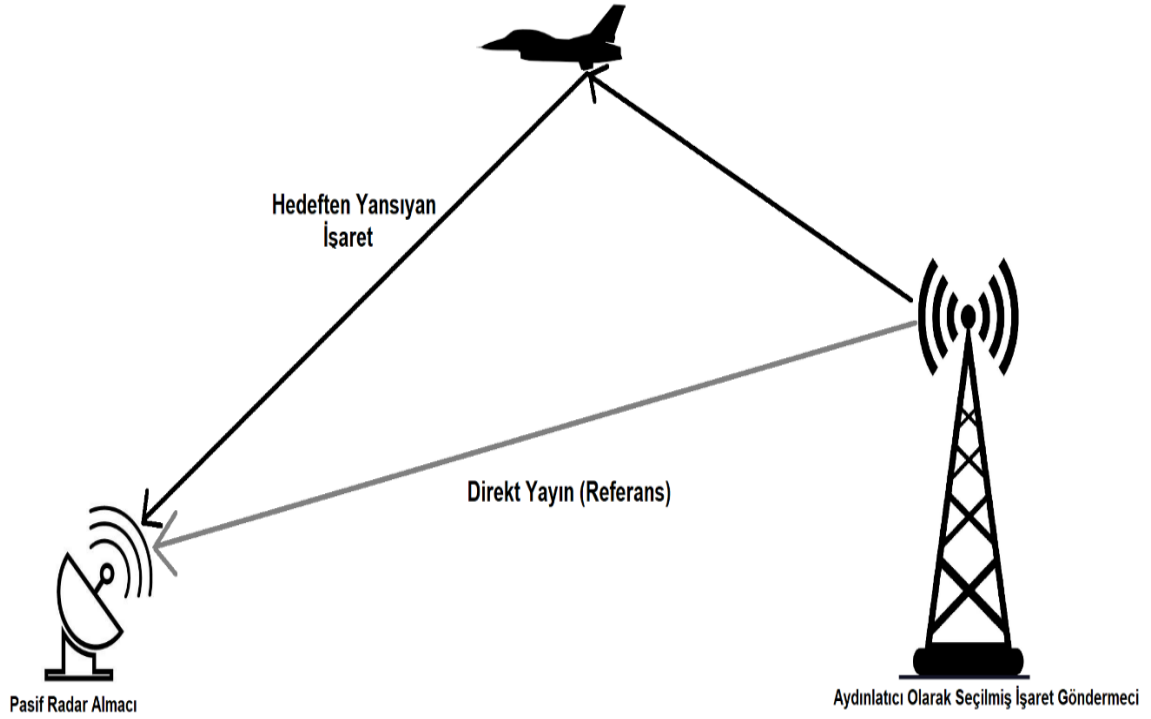


Şekil 3.6 İnsan Yürümesine Ait Mikro Doppler İmzası

İnsan vücudunun oluşturduğu Mikro Doppler etkilerden yürüme hareketi dışında koşma, sürünme ve emekleme [15] gibi başka özellikler de tespit edilebilmektedir.

4. PASİF RADAR

Pasif Radar, geleneksel radarların aksine ortama yayın yapmak yerine ortamdaki var olan aydınlatıcıları kullanarak hedef tespiti ve takibi yapmaktadır. Aydınlatıcının etrafına farklı uzaklık ve açıdan dizilen almaçlar vasıtasıyla hedeften yansıyan işaretleri kullanarak hedef tespiti yapılması sağlanır. Şekil 4.1’de basit bir Pasif Radar yapısı görülmektedir.



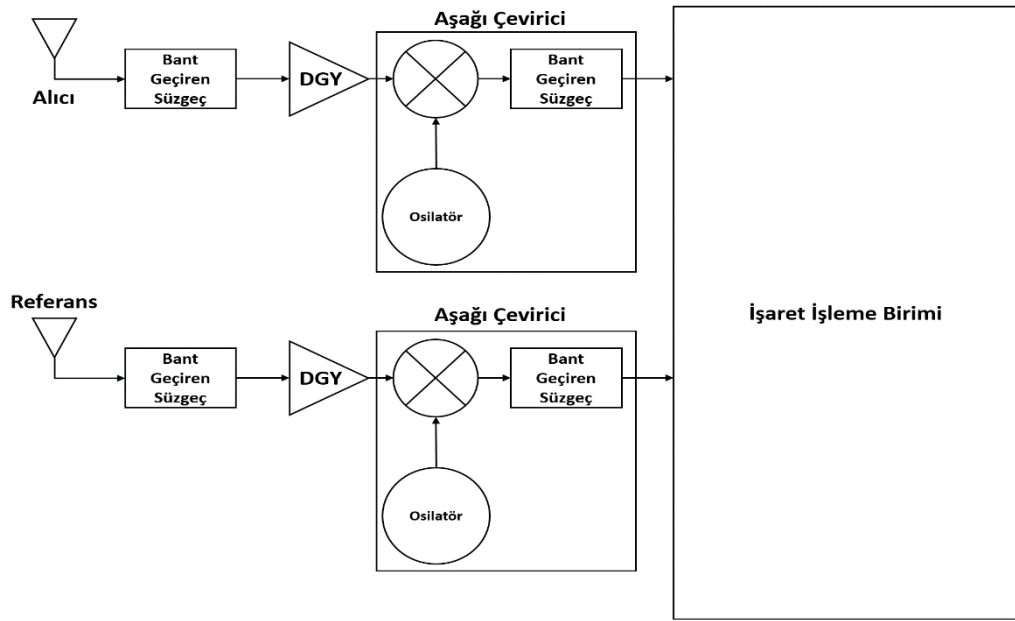
Şekil 4.1 Pasif Radar Şeması

4.1. Pasif Radar Mimarisi

Pasif Radar yapılarında tek bir almaç ve aydınlatıcı kullanılabildiği gibi aynı zamanda çok sayıda almaç ve aydınlatıcı yapısı kullanılarak ağ yapısı oluşturulabilir. Bistatik Pasif Radar, sadece bir adet aydınlatıcı ve birden fazla almaç kullanılmaktadır. Multistatik Radar yapısında ise birden fazla aydınlatıcı ve almaç kullanılarak bir ağ yapısı oluşturulur. Bu sayede radarın algılama alanı genişletilir. Pasif Radar ile aydınlatıcı işaret kullanılarak hedef tespitinin gerçekleştirilebilmesi için referans işaretinin sürekli olarak ölçülmesi gerekir. Referans işareti ile hedeften yansıyan işaret arasında geçen zaman farkından hedefin uzaklığı

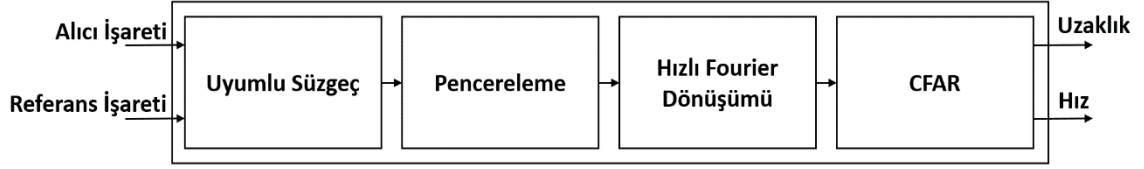
tespit edilir. Referans işareti ile radar alması arasındaki işaretin fazını ve genliğini etkileyecek cisimler bulunması hedef tespitinin zorlaştırılmasına neden olur.

Şekil 4.2’de bu çalışmada gerçekleştirilen Pasif Radar alması blok şeması görülmektedir. Alması, hedeften yansıyan işaretleri anten vasıtasıyla algılar. Algılanan işaret bant geçiren filtreden geçirilerek istenmeyen işaretler engellenir. Düşük Gürültülü Yükselteç (DGY) ile algılanan işaretin gücü yükseltilir. Ardından yüksek frekanslı işaret aşağı çevirici ile temel bant seviyesine indirilir. Temel bant işaret, Analog/Sayısal Çevirici (ADC) ile analog işarettten sayısal işarete çevrilerek işaretleme birimine iletilir.



Şekil 4.2 Geliştirilen Pasif Radar Alması Blok Şeması

Referans alması, aydınlatıcı kaynaktan yayılan işareti anten ile algılar. Algılanan işaret bant geçiren filtreden geçirilir. Ardından DGY ile işaretin gücü yükseltilir. Gücü yükselttilen yüksek frekanslı işaret aşağı çevirici vasıtasıyla temel bant seviyesine indirilir. Ardından bu işaret ADC kullanılarak analog işarettten sayısal işarete çevrilerek işaretleme birimine iletilir. Şekil 4.3’te işaretleme birimine ait blok şema görülmektedir. İşaretleme birimi; Uyumlu Süzgeç, Pencereleme, FFT ve CFAR algoritmalarından oluşur. Alması işareti ile referans işaretleri işlenerek hedefe ait uzaklık ve hız verileri elde edilir.



Şekil 4.3 İşaret İşleme Birimi Blok Şeması

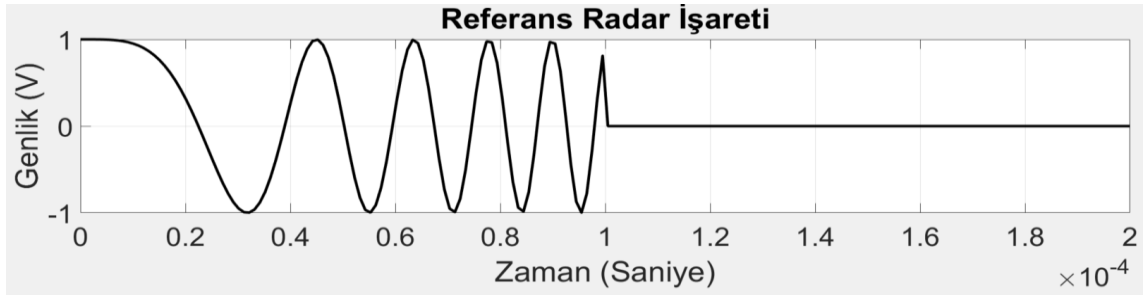
Uyumlu Süzgeç, pasif radar sisteminde algılanan işaret ile referans işaretin çapraz korelasyonu işlemini gerçekleştirir. Çapraz Korelasyon Denklem 4.1 ile hesaplanır.

$$|\varphi(T_R, f_D)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} S_t(t) S_r^*(t + T_R) (j2\pi f_D t) dt \right|^2 \quad (4.1)$$

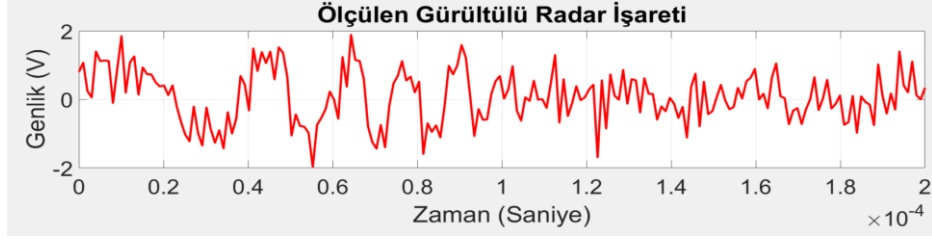
Burada, $S_r(t)$: referans işaretini ve $S_t(t)$: algılanan işaretini belirtmektedir. Çapraz korelasyonda kullanılan referans işaretinin, en düşük seviyede dış kaynaklardan etkilenmiş olması gerekmektedir. Uyumlu Süzgeç işarete uygulandıktan sonra işaret/gürültü oranında artış olur. Bu artış Denklem 4.2 kullanılarak hesaplanır.

$$G = 10 \log T_i B \quad (4.2)$$

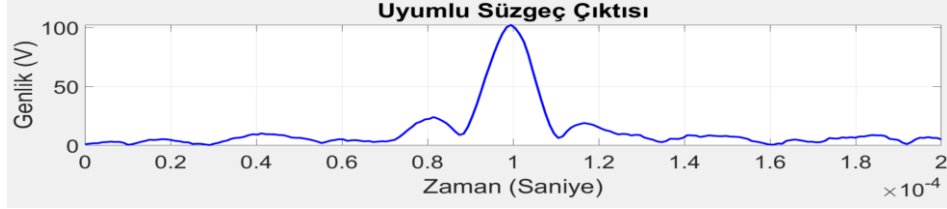
Burada, G : işaret/gürültü oranında artışı, B : bant genişliğini ve T_i : entegrasyon süresini belirtir. Şekil 4.4'te örnek bir gürültülü ortamda ölçülen frekans ile modüle edilmiş radar işareti ve aynı değerlere sahip referans radar işaretine uygulanmış bir uyumlu süzgeç çıktısı görülmektedir. İki işaret 0,0001. saniyede üst üste geldiğinde çapraz korelasyon çıktısının en yüksek değeri aldığı görülmektedir. Ölçülen işaret referans işaret ile çapraz korelasyona sokulduğunda süzgeç çıktısında genlikte yaklaşık 50 katlık bir kazanç elde edildiği görülmüştür.



a) Referans Radar İşareti Çıktısı



b) Ölçülen Gürültü Radar İşareti



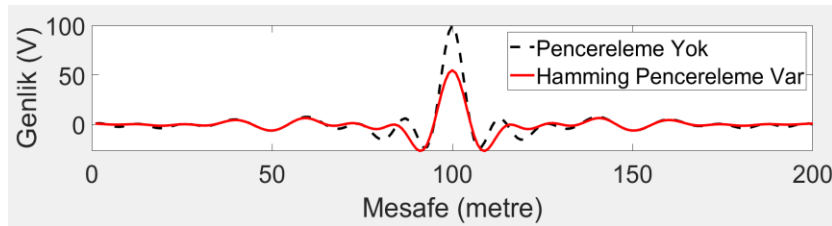
c) Uyumlu Süzgeç Sonucu

Şekil 4.4 Uyumlu Süzgeç Çıktısı (Örnek)

Pencereleme; sürekli bir işaretin belirli parçalar ile işleme tabi tutulması işlemini gerçekleştirir. Pencereleme ile istenilmeyen yan salınımlar ortadan kaldırılır. Basit yapısından ötürü bu çalışmada Hamming Pencereleme yöntemi kullanılmıştır. Hamming Pencereleme Denklem 4.3 ile tanımlanır.

$$W_K = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi k}{N-1}\right) \quad (4.3)$$

Burada W_K : pencereleme fonksiyonunu, N: örnek sayısını belirtmektedir. Şekil 4.5'te örnek olarak Hamming pencereleme fonksiyonu uygulanmış ve uygulanmamış uyumlu süzgeç çıktıları görülmektedir. Uyumlu süzgeç çıktısına pencereleme uygulandığı zaman yan salınımları ortadan kaldırırken, işaretin genliğinde kayıp oluşturduğu görülmektedir. Referans işaret ile ölçülen işaretin örtüştüğü süre Denklem 2.1. ile hesaplanarak hedefin uzaklığı bulunur. Şekil 4.5'te Uyumlu Süzgeç çıktısı hedef uzaklığına göre gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Hamming Pencereleme Uygulanmış ve Uygulanmamış Uyumlu Süzgeç Çıktısı (Örnek)

Radar, algılanan işaretin hedef olup olmadığını belirlemek için eşik değeri belirler. Belirlenen eşik değerinin gürültüden kaynaklı yanlış alarm verilmesi olasılığına, yanlış alarm olasılığı denir. Yanlış alarm olasılığı Denklem 4.4 ile hesaplanır.

$$P_{fa} = \exp\left(\frac{-V_T^2}{2\psi^2}\right) \quad (4.4)$$

Denklemde P_{fa} : yanlış alarm olasılığını, V_T : eşik gerilimini ve ψ : gürültünün ortalama kare değerini belirtir. Gürültüden kaynaklı belirli aralıklarla eşik değeri geçilerek yanlış alarm verilir. Buna yanlış alarm süresi denir. Yanlış alarm süresi Denklem 4.5 ile hesaplanır

$$T_{fa} = \frac{1}{B} \exp\left(\frac{V_T^2}{2\psi^2}\right) \quad (4.5)$$

Denklemde T_{fa} : yanlış alarm süresini, V_T : eşik gerilimini, B : bant genişliğini ve ψ : gürültünün ortalama kare değerini belirtir.

Radar hedefi doğru tespit etme olasılığına doğruluk olasılığı denir. İstenilen doğruluk olasılığı ve yanlış alarm olasılığı için eşik değeri belirlenebilir. Bu sayede radar istenilen performansta çalışabilir. Denklem 4.6 ve Denklem 4.7 kullanılarak istenilen yanlış alarm olasılığı ve doğru tespit etme olasılığı için gerekli eşik değeri belirlenir.

$$\frac{S}{N} = A + 0.12AB + 1.7B \quad (4.6)$$

$$A = \ln\left(\frac{0.62}{P_{fa}}\right) \text{ ve } B = \ln\left(\frac{P_d}{1-P_d}\right) \quad (4.7)$$

Burada:

$\frac{S}{N}$: Eşik işaret-gürültü oranını,

P_{fa} : Yanlış alarm olasılığını,

P_d : Doğru tespit olasılığını belirtir.

Bu çalışmada %90 hedef doğru tespit etme olasılığı ve 0,01 yanlış alarm olasılığı için eşik işaret-gürültü oranı en düşük 11 desibel (dB) olarak hesaplanmıştır. Eğer eşik

değerinin üzerinde ise hedef olarak kabul edilir. Eğer işaret eşik değerinin altında ise hedef olarak kabul edilmez.

Tablo 4.1 İstenilen Hedefi Doğru Tespit Etme Olasılığı ve Yanlış Alarm Olasılığı İçin Gerekli Eşik İşaret-Gürültü Oranı Tablosu [16]

P_D	P_{fa}									
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
.1	4.00	6.19	7.85	8.95	9.94	10.44	11.12	11.62	12.16	12.65
.2	5.57	7.35	8.75	9.81	10.50	11.19	11.87	12.31	12.85	13.25
.3	6.75	8.25	9.50	10.44	11.10	11.75	12.37	12.81	13.25	13.65
.4	7.87	8.85	10.18	10.87	11.56	12.18	12.75	13.25	13.65	14.00
.5	8.44	9.45	10.62	11.25	11.95	12.60	13.11	13.52	14.00	14.35
.6	8.75	9.95	11.00	11.75	12.37	12.88	13.50	13.87	14.25	14.62
.7	9.56	10.50	11.50	12.31	12.75	13.31	13.87	14.20	14.59	14.95
.8	10.18	11.12	12.05	12.62	13.25	13.75	14.25	14.55	14.87	15.25
.9	10.95	11.85	12.65	13.31	13.85	14.25	14.62	15.00	15.45	15.75
.95	11.50	12.40	13.12	13.65	14.25	14.64	15.10	15.45	15.75	16.12
.98	12.18	13.00	13.62	14.25	14.62	15.12	15.47	15.85	16.25	16.50
.99	12.62	13.37	14.05	14.50	15.00	15.38	15.75	16.12	16.47	16.75
.995	12.85	13.65	14.31	14.75	15.25	15.71	16.06	16.37	16.65	17.00
.998	13.31	14.05	14.62	15.06	15.53	16.05	16.37	16.7	16.89	17.25
.999	13.62	14.25	14.88	15.25	15.85	16.13	16.50	16.85	17.12	17.44
.9995	13.84	14.50	15.06	15.55	15.99	16.35	16.70	16.98	17.35	17.55
.9999	14.38	14.94	15.44	16.12	16.50	16.87	17.12	17.35	17.62	17.87

Tablo 4.1’de farklı hedef doğru tespit olasılığı ve yanlış alarm olasılıkları için gerekli eşik işaret-gürültü değerleri dB biriminde görülmektedir.

Sabit Yanlış Alarm Oranı (CFAR); gürültü veya algılanması istenilmeyen işaretlerden kaynaklı tahmin edilebilir sahte hedefleri yok etmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada Hücre Ortalamalı Sabit Yanlış Alarm Oranı yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde her bir hücrenin eşik değeri belirlenir. Hücre Ortalamalı Sabit Yanlış Alarm Oranı ölçülen mesafe matrisine uygulanır. Eşik değeri Denklem 4.8 ile hesaplanır.

$$T = \frac{\alpha}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (4.8)$$

Burada, N: ortalaması alınacak hücre sayısını, T: eşik değerini, α : yanlış alarm oranı katsayısını ve X: hücreyi belirtir.

4.2. Pasif Radar Aydınlatıcıları

Pasif Radar mimarisinde aydınlatıcı olarak farklı frekans ve modülasyon özelliklerine sahip analog veya sayısal aydınlatıcılar kullanılmaktadır. Çıkış gücü, bant genişliği, taşıyıcı frekansı ve modülasyon türü aydınlatıcı seçiminde kritik önem arz etmektedir. FM radyo aydınlatıcıları, dijital televizyon aydınlatıcıları, uydu tabanlı GNSS aydınlatıcıları ve GSM aydınlatıcıları bunlara örnektir. Pasif Radar'lar belirli bir frekansta yayın yapmadıkları için gizli radarlar olarak bilinirler. Pasif Radar'lar, elektronik harp sistemleri tarafından tespit edilmesi zor sistemlerdir. Pasif Radar'lar geleneksel radarlara göre maliyet olarak daha ucuzdur. Dijital haberleşme modülasyonlarının gelişmesiyle frekans spektrumun aynı anda farklı amaçlar için kullanılması olanağını sağlamaktadır.

4.2.1. FM radyo yayını

FM radyo aydınlatıcıları, 88 ile 108 MHz frekansları aralığında analog frekans modülasyonu kullanarak 50 KHz bant genişliğinde yayın yapmaktadır. FM radyo aydınlatıcıları 250 kWatt çıkış gücüne sahiptir. Aydınlatıcılar, şehir merkezlerini ve kırsal yerleşim bölgelerini aydınlatmaktadırlar. Şekil 4.6'da FM radyo aydınlatıcılarını kullanan örnek bir mobil Pasif Radar sistemi görülmektedir.



Şekil 4.6 Mobil FM Radyo Pasif Radar Sistemi

4.2.2. Mobil haberleşme istasyonu yayını

Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü tarafından geliştirilmiş olan Küresel Mobil Haberleşme ağları dünya genelinde kullanılmaktadır. 900 MHz, 1.8 GHz ve 1.9 GHz taşıyıcı frekanslarında 25 MHz bant genişliğinde farklı sayısal modülasyonlar haberleşme amacıyla kullanılmaktadır.

4.2.3. Küresel konumlandırma uyduları

Küresel konumlandırma uyduları farklı yörünge ve yüksekliklerde dünya yüzeyine yayın yapmaktadırlar. Yörüngede farklı ülkelere ait küresel konumlandırma uyduları bulunur. Amerika Birleşik Devletleri'ne ait GPS uyduları, Rusya Federasyonu'na ait GLONASS, Avrupa Birliğine ait GALILEO, Hindistan'a ait NAVIC ve Çin Halk Cumhuriyeti'ne ait BeiDou bu sistemlere örnektir. Küresel Konumlandırma Uydu Sistemleri ilk olarak askeri uygulamalar için hazırlanmıştır. Ardından, daha düşük çözünürlük değerine sahip sivil uygulamalara yönelik sivil kodlar ile sivil kullanıma açılmıştır. Küresel konumlandırma aydınlatıcıları L bant frekans aralığında ve 10 MHz bant genişliğinde yayın yapmaktadır. Küresel konumlandırma aydınlatıcılarında Aldatıcı-Rastgele Gürültü (*PRN*) kodları ile modüle edilmiş sayısal modülasyon metotları kullanılır. Sistemler farklı yüksekliklerde buldukları için konuma ve zamana göre -165 dBm ile -135 dBm güç değerleri aralığında yeryüzünde algılanmaktadırlar [20].

4.2.4. 5G Yeni Radyo haberleşme istasyonu yayını

Nesnelerin İnterneti, Yapay Zeka, Sanal Gerçeklik ve benzeri yeni teknolojiler çok sayıda cihazın ağ yapısı üzerinden düşük gecikmeli olarak veri iletilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Bu sebepten dolayı 5. Nesil Haberleşme Jenerasyonu ile ultra yüksek hızlı veri iletimi (1 Gbps), düşük tepkime süresi (1 milisaniyeden düşük) ve kayıpsız veri iletimi amaçlanmaktadır. 5G Yeni Radyo frekans bantları, 6 GHz altı bant (C-bant) ve milimetre dalga bandı (Ka-bant) olarak ikiye ayrılmıştır. 6 GHz altı 5G Yeni Radyo frekans bandı 4. Nesil Haberleşme yapısı ve eski standartlara uygun çalışabilmesi için kullanılması planlanırken milimetre dalga frekans bölgesinde ise yüksek bant genişliği ile yüksek boyutta veri iletimi amacıyla kullanılmaktadır.

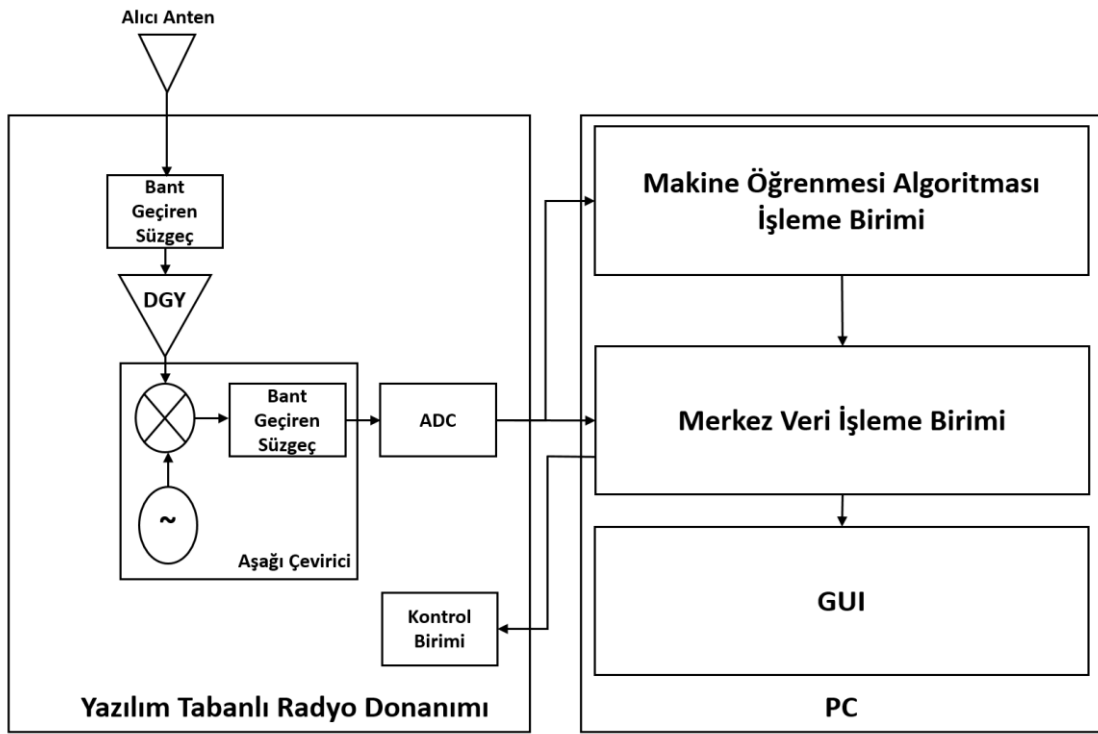
Tablo 4.2 Aydınlatıcı Özellikleri

Aydınlatıcı Tipi	İşaret Türü	Frekans	Çıkış Gücü	Bant Genişliği	Mesafe Çözünürlüğü
FM Radyo Yayını	Analog	VHF	250 kW	200 kHz	750 metre
Analog TV Yayını	Analog	UHF	1 MW	5.5 MHz	27,27 metre
Mobil Haberleşme İstasyonu	Sayısal	L bant	100 Watt	5 MHz	30 metre
GNSS Uyduları	Sayısal	L bant	200 Watt	10 MHz	15 metre
C Bant 5G YR	Sayısal	C bant	200 Watt	200 MHz	0,75 metre
Ka Bant 5G YR	Sayısal	Ka Bant	-	400 MHz	0,375 metre

Tablo 4.2’de kullanılabilecek aydınlatıcılara ait özellikler görülmektedir. Uzak mesafeden, düşük çözünürlükle Pasif Radar ile hedef tayini yapılmak istenildiği zaman atmosferik etkilerden en düşük şekilde etkilenen ve yüksek çıkış gücüne sahip FM Radyo yayını veya Analog TV yayını seçilir. Kısa mesafeden, yüksek çözünürlük ve doğruluk ile hedef tayini yapılmak istenildiği zaman ise yüksek frekans, sayısal modülasyon ve yüksek bant genişliğine sahip mobil haberleşme istasyonları seçilir. Pasif Radar yapıları Yazılım Tabanlı Radyo donanımı ile tasarlanarak birden fazla ve farklı türde aydınlatıcı kullanarak hedef tespit edebilmektedir. Bu çalışmada düşük hızlı hareketlerin yarattığı Doppler etkilerin tespit edilebilmesi için yüksek taşıyıcı frekansına ve yüksek bant genişliğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeplerden dolayı bu çalışmada 5G C ve Ka bant işaretleri aydınlatıcı işaretler olarak seçilerek, ölçümler gerçekleştirilmiştir.

5. BİLİŞSEL YAZILIM TABANLI RADAR

Bilişsel sistemler; bulunduğu çevreyi algılayabilen, elde ettiği bilgilerden öğrenen ve mevcut bilgiyi ileride yapılacak çalışmaların başarısını yükseltmek için kullanan sistemlerdir. Bilişsel Radar sisteminde radar elde ettiği bilgileri kullanarak hedefe veya ortama ait bilgileri kestirmek için kullanır. Bilişsel Yazılım Tabanlı Radar; Yazılım Tabanlı Radyo mimarisi ile Makine Öğrenimi algoritmalarının birlikte koşturulması ile oluşturulur. Şekil 5.1’de Bilişsel Yazılım Tabanlı Radar blok şeması görülmektedir.



Şekil 5.1 Bilişsel Yazılım Tabanlı Radar Blok Şeması

Yazılım Tabanlı Radyo donanımı, hedeften yansıyan analog işaretlerini sayısal veri biçimine çevirir. Ardından, bu sayısal veriler Makine Öğrenmesi Algoritması İşleme Birimine ve Merkez Veri İşleme Birimine iletilir. Makine Öğrenmesi Algoritması İşleme Birimi; daha önce sentetik veriler ile eğitimi gerçekleştirilen veriler ile ölçülen verileri karşılaştırarak, çıktılar üretir. Bu çıktılar sonucunda verinin hangi sınıfa ait olduğunu tespit eder. Merkez Veri İşleme Birimi ise hedefin uzaklığını, hızını ve türünü tespit eder. Elde edilen veriler GUI birimine iletilerek ekranda hedefe ait tür, hız ve mesafe gibi bilgiler gösterilir.

Tablo 5.1 Farklı Çalışma Frekanslarındaki Radar Sistemleri Tablosu

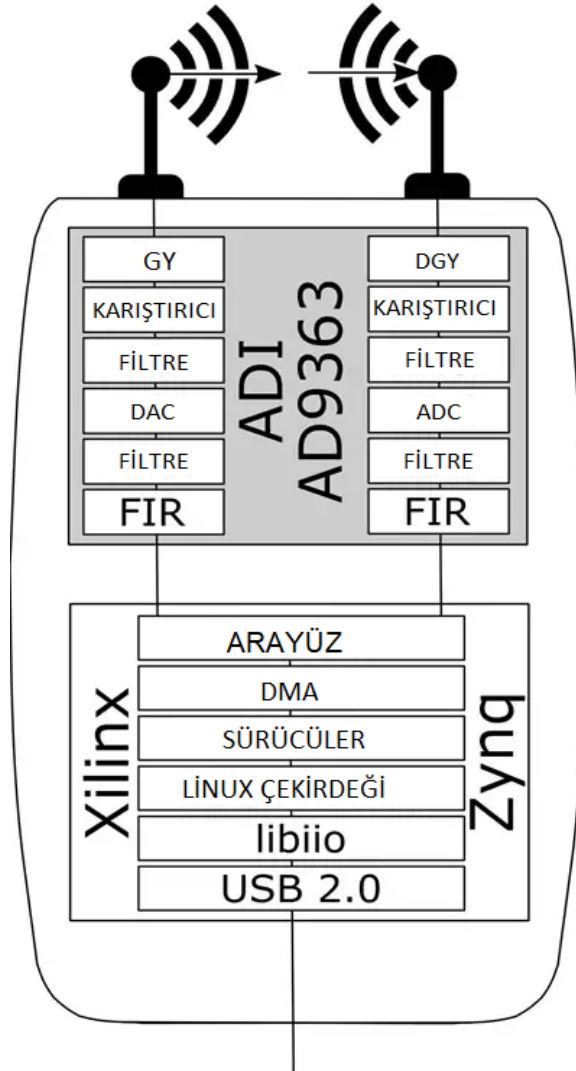
Ad	Çalışma Frekansı	Özelliği
METEKSAN RETİNAR PTR [21]	35 GHz	Dron Tespit Radarı
ASELSAN ACAR [22]	16 GHz	İnsan Tespit Radarı
ASELSAN KALKAN [23]	8-12 GHz	Hava Savunma Radarı
ASELSAN EİRS [24]	2- 4 GHz	Erken İhbar Radarı
BMEWS [25]	1 MHz ile 50 MHz	Kıtalararası Balistik Füze Tespit Radarı
AN/FPS-118 [26]	5 MHz ile 28 MHz	Ufuk Ötesi Radarı

Radar sistemleri uygulamalara göre farklı frekanslarda çalışmaktadır. Hava Savunma Radarları, Erken İhbar Radarları, Dron Tespit Radarları ve İnsan Tespit Radarları [18] 1 GHz ve üzeri merkez frekansına sahip iken Kıtalararası Balistik Füze Tespit Radarı veya Ufuk Ötesi Radar gibi sistemler 1 GHz ve altı merkez frekans değerinde çalışırlar [27]. Tablo 5.1’de farklı çalışma frekanslarına sahip radar sistemleri tablosu görülmektedir. Radarlar amaçlarına ve görevlerine göre farklı frekans ve modülasyon değerlerinde çalışma ihtiyacı duyarlar. Bu nedenle Yazılım Tabanlı Radyo’ya ihtiyaç duyulmaktadır. Pasif Radar gibi aydınlatıcı işaretin ve tanımlanması gereken hedefe ait verilerin insan tarafından takibi zor olan sistemler söz konusu olduğunda Bilişsel Yazılım Tabanlı Radar yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır.

5.1. Yazılım Tabanlı Radyo Mimarisi

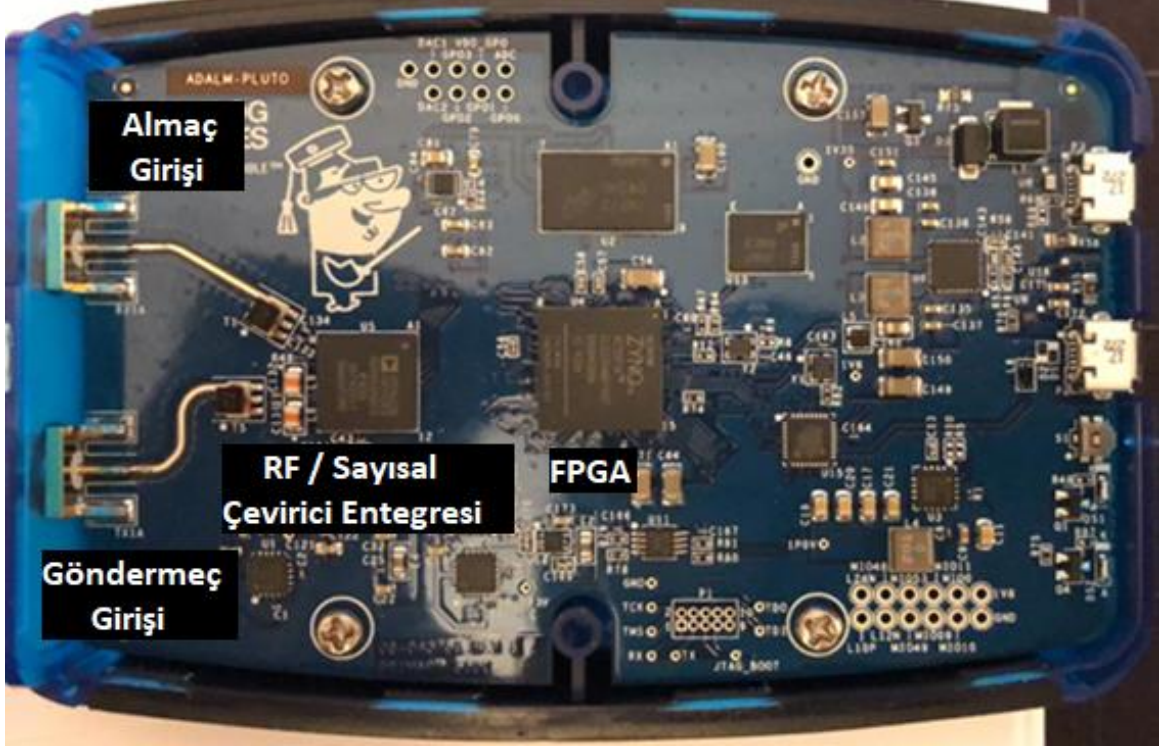
Yazılım Tabanlı Radyo; İşaret İşleme Birimi, Almaç ve Göndermeç birimlerinden oluşur. Yazılım Tabanlı Radyo Almaç biriminde yüksek frekanslı RF işaretleri düşük frekanslı analog işaretlere çevrilir. Düşük frekansa çevrilen analog işaretler analog/sayısal çevirici ile örneklenerek I ve Q formatında sayısal olarak kayıt edilir. Ardından, İşaret İşleme

Birimine iletilir. Yazılım Tabanlı Radyo Gönderme biriminde, İşaret İşleme Biriminden iletilen sayısal I ve Q işaretler sayısalan analoğa dönüştürücü ile analog işaret biçimine çevrilirler. Analog işaretler, frekansları yükseltilerek RF işaretler olarak güç yükseltici ile gücü yükseltilerek, antene iletilir. Şekil 5.2’de bu çalışma kapsamında kullanılmış olan Analog Devices firmasına ait ADALM-Pluto Yazılım Tabanlı Radyo donanımına ait blok şeması görülmektedir. Sistem üzerinde gerekli işlevleri sağlamak için AD9363 RF Almaç/Gönderme entegresi ve ZYNQ 7010 FPGA entegresi bulundurulur. RF Ön uç görev yükünün tamamını AD9363 entegresi sağlamaktadır. AD9363 entegresi 70 MHz ile 6 GHz frekans aralığında çalışabilmektedir. Üzerinde bulunan FPGA entegresi ile donanım üzerinde hazırlanan modülasyon ve demodülasyon işlemleri MATLAB, Simulink ve GNU Radio gibi ortamlar ile hızlıca gerçekleştirilebilmektedir [28].



Şekil 5.2 ADALM Pluto Yazılım Tabanlı Radyo Donanımı Blok Şeması

Şekil 5.3'te Adalm Pluto Yazılım Tabanlı Radyo donanımına ait devre şeması kartı görülmektedir. Bu çalışmada düşük maliyetli ve hafif yapısından dolayı ADALM-PLUTO kullanılmıştır.



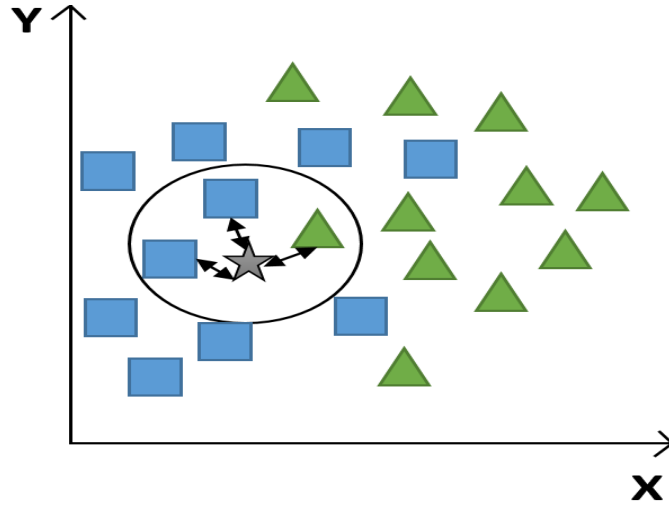
Şekil 5.3 ADALM-PLUTO Yazılım Tabanlı Radyo Donanımı

5.2. Makine Öğrenmesi

Yazılım tabanlı Radyo donanımı kullanılarak Mikro Doppler etkiler ile hedef tespiti ve sınıflandırması için makine öğrenimi algoritmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Yazılım Tabanlı Radyo donanımından hedef ile ilgili elde edilen bilgiler özellik çıkarımı olmadan önceden benzetim çıktıları ile hazırlanan makine öğrenmesi modellerine iletilerek, hedef sınıflandırılması gerçekleştirilir. Bu çalışmada En Yakın Komşu Algoritması, Destek Vektör Makinesi ve Karar Ağacı Algoritmaları hedef sınıflandırması için kullanılmıştır. Sınıflandırma algoritmaları arasında kıyaslama gerçekleştirilebilmesi için Karışıklık Matrisi ile doğruluk, duyarlılık ve kesinlik başarı ölçütleri incelenmiştir. Sınıflandırma modelleri eğitimi ve testleri sırasında kullanılacak olan veri kümeleri limitlidir. Bu sebepten dolayı K-Katlama Çapraz Geçerlilik algoritması ile sınıflandırıcı algoritmalarının eğitimi ve testleri sırasında farklı veri kümeleri ile doğruluğunun onaylanması sağlanmıştır.

5.2.1. En yakın komşu algoritması (KNN)

En yakın komşu makine öğrenme algoritmasında sınıflandırılma gerçekleştirilebilmesi için etiket değerlerine sahip eğitim verilerine ihtiyaç duyulur. Sınıflandırılması istenilen veri, en yakın komşularının buldukları sınıflara göre sınıflandırılır. Sınıfı bilinmeyen veri için en yakın K adet komşularına olan uzaklık hesaplanır. K adet komşudan olasılığı en yüksek sınıf değeri atanarak, veri sınıflandırılır. Örneğin Şekil 5.4'te En Yakın Komşu Algoritmasının görselleştirilmiş hali görülmektedir. Kare ve üçgen olarak iki farklı sınıf bulunmaktadır. Sınıfı bilinmeyen yıldız verisi en yakın 3 komşunun (K=3) sahip olduğu en fazla sınıf değeri hangisi ise sınıfı bilinmeyen veriye atanır. Bu örnekte sınıfı bilinmeyen yıldız, 3 komşusundan 2 tanesinin kare olmasından dolayı kare olarak sınıflandırılır.



Şekil 5.4 En Yakın Komşu Algoritması

En Yakın Komşu algoritmasında uzaklık, Öklid, Ki-Kare veya Minkowsky gibi farklı uzaklık fonksiyonları ile hesaplanabilir. Bu çalışmada basit yapısından dolayı Öklid uzaklığı kullanılmıştır. N boyutlu a ve b vektörleri için Öklid uzaklığı Denklem 5.1 kullanılarak hesaplanır.

$$U(\vec{a}, \vec{b}) = \sqrt{(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2 + \dots + (a_n - b_n)^2} \quad (5.1)$$

Burada, U: Öklid uzaklığı, a ve b ise noktaları belirtir. En Yakın Komşu Algoritması gürültüden diğer algoritmalara göre daha az etkilenir. Ancak, yüksek boyutlu veri kümelerinde her bir noktanın uzaklığının hesaplanması gerekmektedir. Bu sebeple verileri sınıflandırma süresi yavaşlar [29].

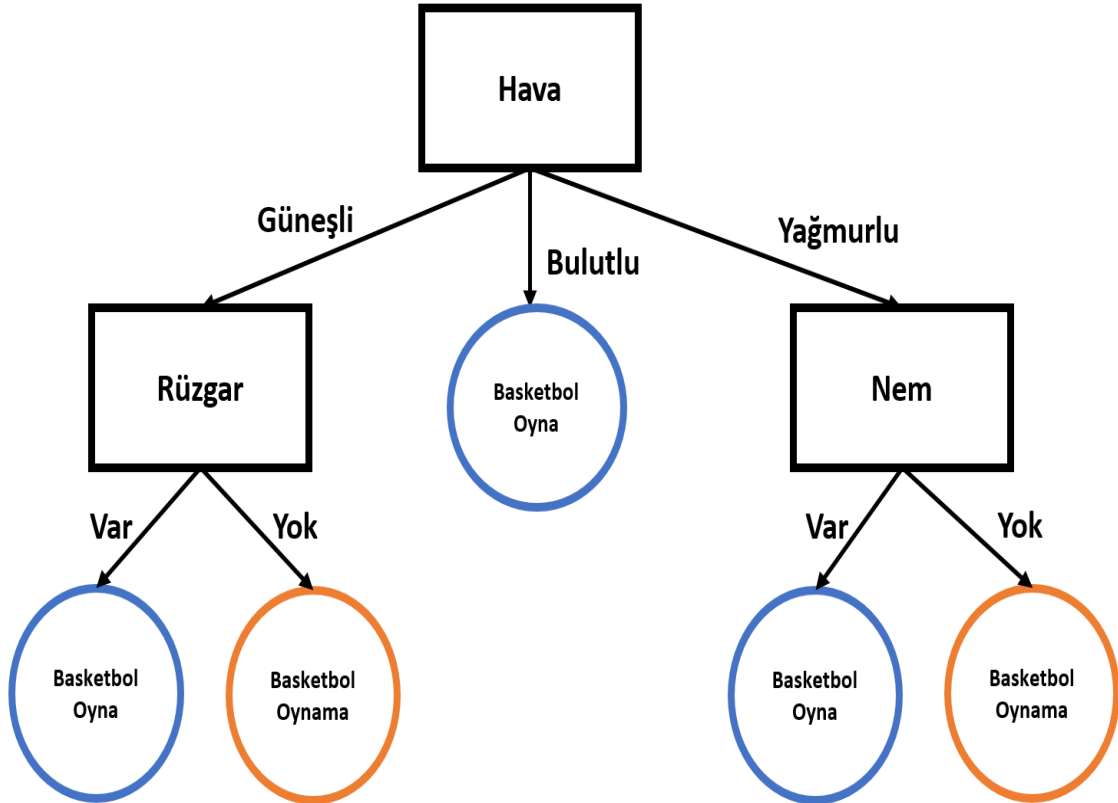
5.2.2. Karar ağacı algoritması

Karar ağacı algoritması, ağaç akış diyagramı biçimindedir. Algoritma; kök, dallar, yapraklar ve birleşim noktalarından oluşur. Veri seti üzerindeki değerler, az sayıda gruplara bölünerek sınıflandırma işlemi gerçekleştirilir. Gruplar, en ayırt edici niteliklere göre belirlenir. En ayırt edici niteliği belirlemek için entropi hesaplanır. En yüksek entropi değerine sahip nitelik alt dal olarak atanır. Entropi Denklem 5.2 kullanılarak hesaplanır.

$$E = \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2\left(\frac{1}{p(x_i)}\right) - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2(p(x_i)) \quad (5.2)$$

Burada, E: entropiyi, $p(x_i)$: olasılık ağırlık fonksiyonunu belirtir.

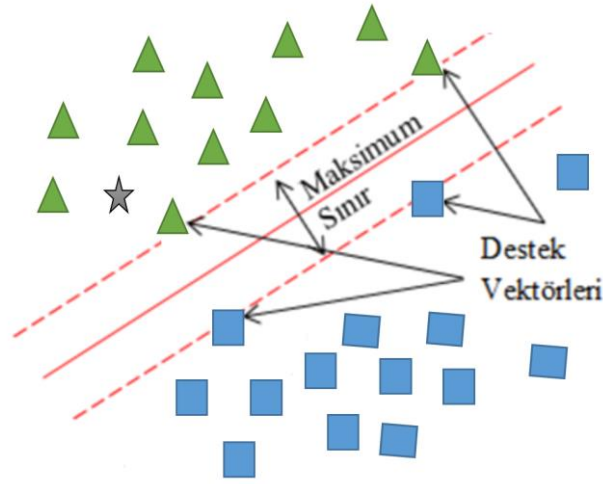
Karar Ağacı Algoritması gürültüye karşı dayanıklıdır. Şekil 5.5'te basketbol maçının oynanıp, oynanmamasına ait basit bir karar ağacı algoritması sınıflandırması örneği görülmektedir. Veri kümesi içerisindeki ayırt edici nitelik hava olarak belirlenip, ağaç kökü olarak atanmıştır. Ardından, rüzgar ve nem değerleri alt düğüm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.5 Karar Ağacı Diyagramı (Örnek)

5.2.3. Destek Vektör Makinesi

Destek Vektör Makinesi Öğrenme Algoritması, veri setinde bulunan sınıfların aralarındaki mesafe farkının maksimum olacak şekilde verileri ayırmak için kullanılır. İki sınıf, eğitim verileri kullanılarak optimum hiper düzlem ile birbirinden ayrılır. Eğitim süresince en ideal hiper düzlem belirlenir. Şekil 5.6'da Destek Vektör Makinesi'ne ait iki sınıfın birbirinden bir hiper düzlem ile ayrılması görülmektedir. Destek Vektör Makinesi, önce her iki sınıfa ait uçlarda bulunan verileri destek vektörleri olarak atar. Atanan bu destek vektörlerine göre iki sınıf arasındaki mesafe maksimum uzaklıkta olacak şekilde bir hiper düzlem belirlenir. Sınıfları bilinmeyen yeni veriler eklendiğinde bu veriler hiper düzleme göre sınıflandırılır. Şekil 5.6'da görülen sınıfı bilinmeyen yıldız, yeşil üçgen olarak sınıflandırılır.



Şekil 5.6 Destek Vektör Makinesi

Doğrusal olarak ayrılamayan veriler, bir üst boyuta taşınarak doğrusal bir hiper düzlem ile ayrılır. Bütün veri noktaları, yüksek boyuttaki uzaya çekirdek fonksiyonu ile haritalandırılır. Çekirdek fonksiyonu, yüksek boyuta taşınmış özelliklerin iç çarpımına denk gelir. Bu sayede daha düşük hesaplama gücü harcanır. Kullanılan çekirdek fonksiyonu makine öğrenmesinin başarısını etkiler. Bu çalışmada kolay uygulanabilirliğinden dolayı Lineer çekirdek fonksiyonu kullanılmıştır. Lineer çekirdek fonksiyonu Denklem 5.3 ile hesaplanır.

$$K(\vec{x}_i, \vec{x}_j) = \vec{x}_i \cdot \vec{x}_j \quad (5.3)$$

Denklemde K: çekirdek fonksiyonu, X ise verileri belirtmektedir.

5.2.4. Karışıklık matrisi

Karışıklık matrisi, makine öğrenme algoritmalarında sınıflandırma modelinin performansının ölçülmesi için kullanılır. Sınıflandırma modellerinde, başarı kriteri olarak sadece doğruluk oranına bakılmaması gerekir. Doğruluk oranının yanı sıra duyarlılık ve keskinlik değerleri de sınıflandırma için önemli başarı kriterleridir. Doğruluk, sınırlı veri kümesi kullanılarak eğitilen model ile sınıfı bilinmeyen verinin doğru sınıfa atanmasıdır. Doğruluk yüzde olarak Denklem 5.4 ile hesaplanır.

$$d = \frac{e}{v} 100 \% \quad (5.4)$$

Burada, d: yüzde olarak doğruluğu, e: doğru sınıflandırılmış veri sayısını ve v: toplam veri kümesini belirtir. Sınıflar arası verilerin dağılımının yakın olmadığı veri kümelerine Dengesiz Veri Kümeleri denir. Dengesiz veri kümelerinde, doğruluk yeterli bir başarı ölçütü değildir. Örneğin 1000 kişi içerisinde ölümcül hastalığa sahip 3 kişinin olduğu durumda doğruluk oranı %99,7 olarak hesaplanır. Ancak, burada gerçekte hasta olan bir bireyin “hasta değil” olarak sınıflandırılması daha büyük bir yanılgıdır. Bu yanılgı doğruluk başarı ölçütü kullanılarak tespit edilemez. Bu tarz durumlarda ek olarak duyarlılık ve kesinlik başarı ölçütleri de kullanılarak hesaplama yapılır.

Karışıklık matrisi, sınıflandırma modelinin tahmin ettiği veriler ile gerçek değerleri görselleştiren matristir. Bu sayede modelin tahmin ederken yaptığı hatalar incelenebilir. Şekil 5.7’de basit bir Karışıklık Matrisi görülmektedir. Şekilde, gerçek değerlerine karşılık olarak tahmin edilen değerler görülmektedir.

		Gerçek Değer	
		Pozitif	Negatif
Tahmin Edilen Değer	Pozitif	Doğru Pozitif (DP)	Yanlış Pozitif (YP)
	Negatif	Yanlış Negatif (YN)	Doğru Negatif (DN)

Şekil 5.7 Karışıklık Matrisi

Karışıklık Matrisinde, matris verileri;

Doğru Pozitif (DP): gerçekte pozitif ve pozitif olarak tahmin edilmiş,

Yanlış Pozitif (YP): gerçekte negatif ve pozitif olarak tahmin edilmiş,

Yanlış Negatif (YN): gerçekte pozitif ve negatif olarak tahmin edilmiş,
Doğru Negatif (DN): gerçekte negatif ve negatif olarak tahmin edilmiş
değerleri ifade eder. Karmaşıklık Matrisi verileri kullanılarak, sınıflandırma modeline ait performans değerleri ölçülebilir ve diğer sınıflandırma metotları ile karşılaştırılabilir.

Bazı uygulamalarda, tahmin değerlerinin doğru yapılabilmesi, yanlış alarm üretmekten daha önemlidir. Bu sebepten dolayı sınıflandırma algoritmasının duyarlılığı ölçülür. Duyarlılık, sınıflandırma modeli tarafından elde edilen doğru pozitif tahminlerin toplam pozitif örneklere oranıdır. Duyarlılık Denklem 5.5 ile hesaplanır.

$$D = \frac{DP}{DP+YN} \quad (5.5)$$

Denklemde D: duyarlılığı belirtir. Duyarlılık, 1 değerine yaklaştığı zaman YP değeri çok yükselerek, yanlış alarm oranı maksimum değere ulaşır.

Kesinlik, sınıflandırma modeli tarafından tahmin edilen doğru pozitif verilerin toplam pozitif verilere oranıdır. Kesinlik Denklem 5.6 ile hesaplanır.

$$K = \frac{DP}{DP+YP} \quad (5.6)$$

Denklemde K: kesinlik değerini belirtir. Kesinlik, tahmin edilen pozitif veriler içerisinde gerçekte ne kadarının pozitif olduğunu belirtir.

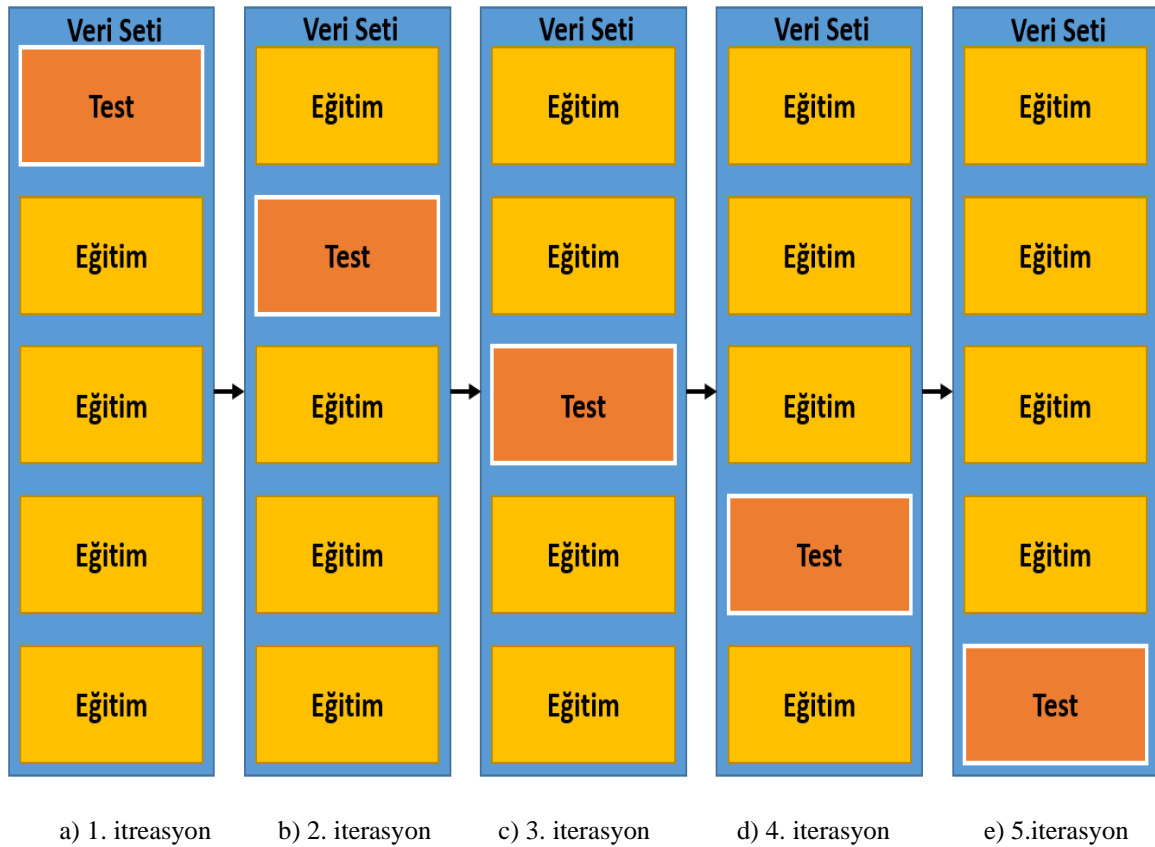
Duyarlılık ile kesinlik arasında ödünleşme ilişkisi bulunur. Duyarlılık maksimize edildiği zaman kesinlik minimize edilmiş olur. Aynı ilişki tam tersi için de geçerlidir. İki ölçütün de maksimize edilmesi beklenir. Bu işlem F-Ölçütü maksimize edilerek yapılır. F-Ölçütü Denklem 5.7 kullanılarak hesaplanır.

$$F = \frac{2KD}{D+K} \quad (5.7)$$

Denklemde F: F-Ölçütünü, K: kesinliği ve D: duyarlılığı belirtir.

5.2.5. K-Katlama Çapraz Geçerlilik

Uygulanan sınıflandırma algoritmalarının başarısının sınanması gerekmektedir. Veri seti kullanılarak sınıflandırma algoritmasının başarısı test edilebilir. Veri seti eğitim kümesi ve test kümesi olarak ikiye ayrılarak bu işlem gerçekleştirilir. Eğitim aşamasında kullanılan veri seti çeşitli ve çok örnekten oluşuyorsa başarı oranı artmaktadır. Eğer veri seti çeşitli verilerden oluşmuyor veya az sayıda örneğe sahip ise model veri setini ezberleyerek, hatalı sınıflandırma yapabilir. K-Katlama Çapraz Geçerlilik (KKÇ) ile bu problemin üstesinden gelinir. KKÇ’ de limitli veri seti K parçaya ayrılır. Her seferinde eğitim ve test için kullanılan parça değiştirilerek, test edilir. Bu sayede aynı veri seti kullanılarak modelin eğitimi ve modelin testi sırasında modelin farklı veriler görmesi sağlanır. Örneğin, Şekil 5.8’de KKÇ algoritmasına ait K=5 için eğitim adımları görülmektedir. Veri seti 5 adet parçaya ayrılmıştır. Birinci iterasyonda ilk parça test için ve geri kalan 4 parça eğitim için kullanılmıştır. Ardından, diğer iterasyonlarda test ve eğitim veri seti parçaları değiştirilmiştir. Bu sayede model her bir adımda farklı eğitim ve test verileri kullanarak, eğitim süresince görmediği veriler ile başarı oranını test etmiştir.



Şekil 5.8 KKÇ Eğitim Adımları

6. MİKRO DOPPLER BENZETİM MODELİ

Yazılım Tabanlı Radar'a bilişsellik özelliğinin kazandırılabilmesi için makine öğrenme algoritmalarının radar çıktılarına uygulanması gerekmektedir. Makine öğrenme algoritmalarının en yüksek performans ile koşabilmesi için ölçülmüş gerçek veriler veya sentetik veriler ile eğitilmelidir. Eğitim verilerinin yüksek adetli ve yüksek çeşitliliğe sahip olması, makine öğrenme algoritmalarının başarımlarını artırmaktadır.

Bu çalışmada insan tespiti ve dron tespiti ölçümlerinde yüksek başarı ile hedef sınıflandırması amaçlanmaktadır. Bu yüzden makine öğrenmesi algoritmaları eğitimlerinde yüksek sayıda ve çeşitliliği yüksek, insan yürümesinden ve drondan yansıyan radar işaretlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Eğitim için farklı frekans, çıkış gücü, modülasyon ve hedefe göre konumu olan radarlar ile yüksek sayıda ölçüme ihtiyaç vardır. Bu çalışma kapsamında bu veriler V.Chen [2] tarafından hazırlanan kod dizinleri kullanılarak Mikro Doppler benzetim modeli hazırlanmıştır. Bu model ile Mikro Doppler çıktıları sentetik olarak üretilip, üretilen sentetik veriler ile makine öğrenmesi eğitimleri gerçekleştirilmiştir.

Bir nesne, katı gövdeye veya esnek gövdeye sahip olabilir. Bu yüzden V.Chen [2] gövde hareketlerini: katı model hareketi ve esnek model hareketi olarak ikiye ayırarak modeller ve buna göre Mikro Doppler çıktıları oluşturur.

Katı model, hareket sırasında model şeklinde bozulma gerçekleşmeyen modeldir. Katı model hareketleri, matematiksel olarak tanımlanması kolay ve 3 boyutlu düzlemde hareketleri matematiksel olarak hesaplanabilmektedir. Katı model hareketlerine ait pozisyon, hız ve ivme değerleri harekete neden olan güçten bağımsız olarak hesaplanabilmektedir. Bu sayede dikdörtgen katı modelden oluşan helikopter ve dron pervanelerine ait mikro hareketler ve bu hareketlerin yarattığı Mikro Doppler çıktılar hesaplanabilmektedir.

Esnek model, hareket sırasında model şeklinde bozulmalar gerçekleşen modeldir. Gövdeyi harekete geçiren güç, modelin şeklinin bozulmasına neden olur. Model üzerinde oluşan bozulmalar Sonlu Elemanlar Metodu kullanılarak elde edilebilir. Ancak, hazırlanan benzetim modelinde esnek gövde hareketleri, katı model hareketlerinin birleşimi olarak modellenmiştir. Örneğin: robot kolu hareketi, mekatronikte iki katı nesnenin birleşimi olarak ifade edilmektedir. Mekatronikte buna çoklu gövde sistemi denir. Bu benzetim modelinde insan yürümesi hareketi, kuş kanat hareketi ve 4 bacaklı hayvan yürüme hareketi katı model

hareketlerinin birleşimleri olarak modellenmiştir. Bu doğrultuda Mikro Doppler verileri elde edilmiştir. Hazırlanan benzetim modeli gürültü bileşenlerini hesaplamamaktadır.

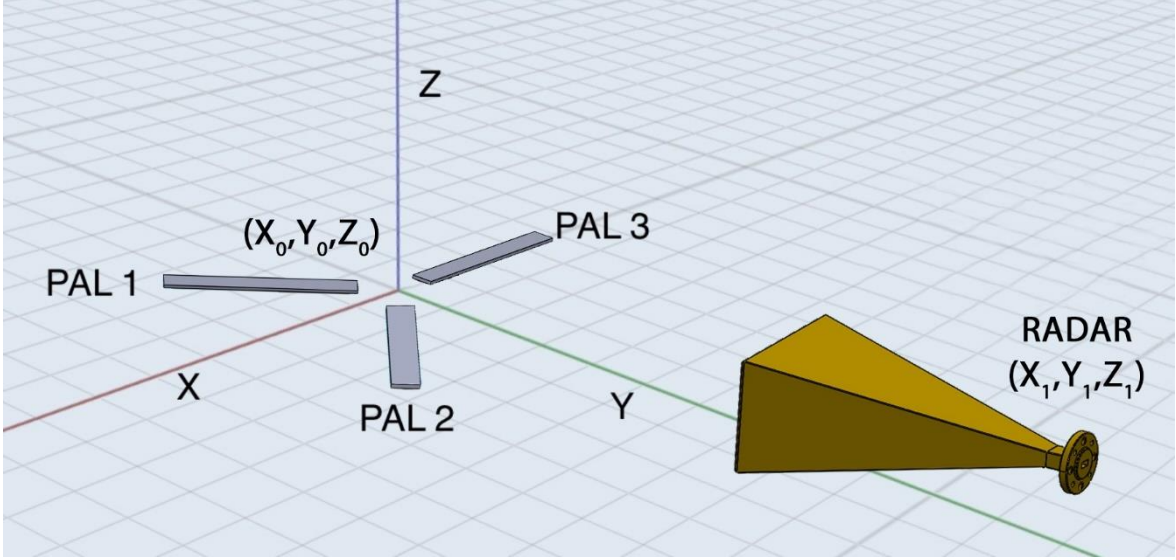
6.1. Pervane Benzetim Modeli

Helikopter ve dronlarda kullanılan pervaneler farklı boyut ve şekillere sahiptir. Pervaneler farklı büküm, eğim, şekil ve pah kırma değerlerinde olabilir. Bu benzetim modelinde pervaneler bu değerler hesaba katılmadan düz bir dikdörtgen olarak modellenmiştir. Şekil 6.1’de örnek bir eğim, büküm ve pah kırma değerlerine sahip helikopter pervanesi görülmektedir.



Şekil 6.1 Örnek Helikopter Pervanesi

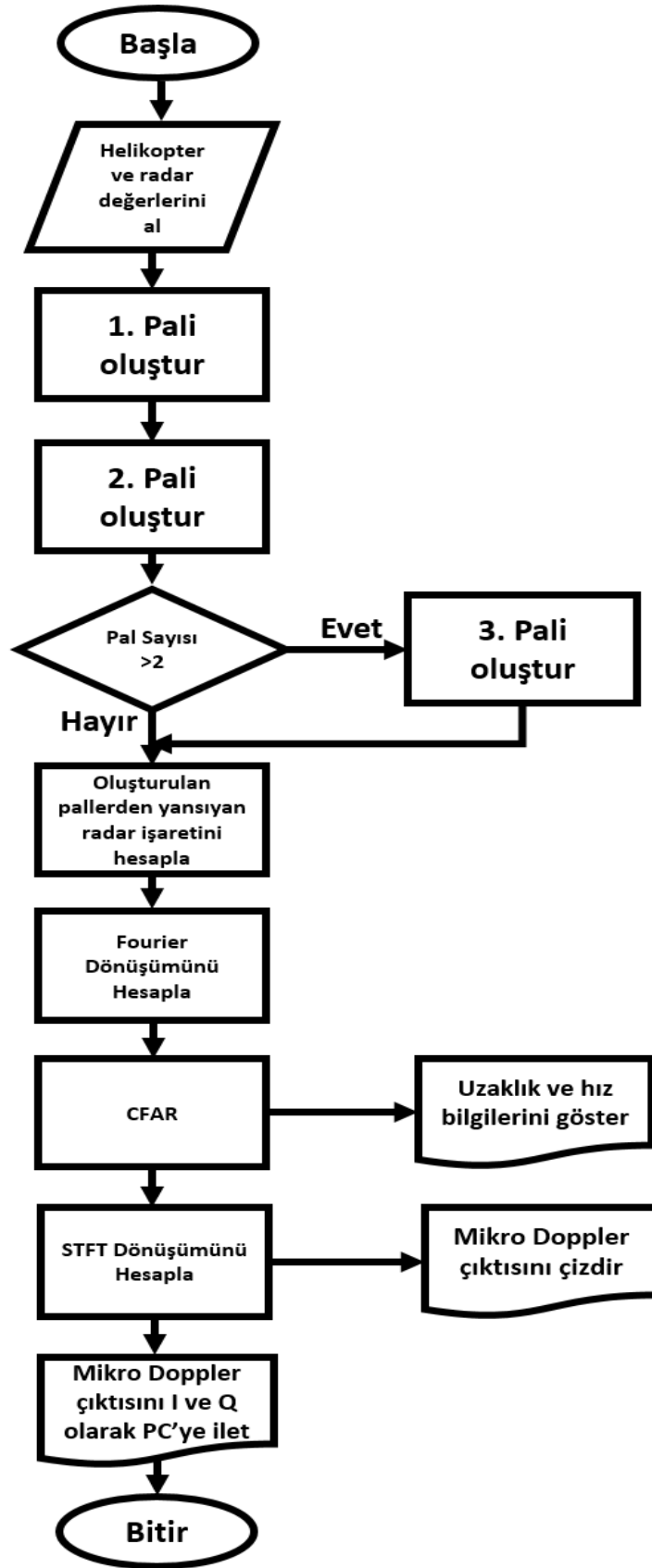
Pal hareketlerinden kaynaklı oluşan Mikro Doppler çıktılarını üreten hazırlanmış benzetim modelinin 3 boyutlu gösterimi Şekil 6.2’de görülmektedir. Benzetim modelinde pallere ait sayı, uzunluk, genişlik, dönüş hızı ve merkez koordinatları (x, y ve z düzleminde) ile radara ait frekans, bant genişliği, gözlem süresi, mesafe çözünürlüğü, darbe sayısı, radar merkez koordinatları (x, y ve z düzleminde) değiştirilebilmektedir.



Şekil 6.2 Pervane Benzetim Modeline Ait 3 Boyutlu Görüntüsü

Gerçek ölçümlere eşdeğer benzetim çıktılarının elde edilebilmesi için ek olarak helikopter veya drona ait ana gövde hızı, rotor merkez koordinatları (x, y ve z düzleminde), ve rotor ile pervane arasındaki sapma uzaklık değerleri de değiştirilebilmektedir.

Şekil 6.3'te pervane benzetim modeline ait akış şeması görülmektedir. Benzetim modelinde ilk olarak kullanıcı tarafından girilen helikopter veya drona ait özellikler ve kullanılması planlanan radar özellikleri girilir. Bu doğrultuda benzetim modeli girilen pal değerlerine göre birinci ve ikinci palleri oluşturur. Eğer üçüncü pal var ise üçüncü pal değeri de oluşturulur. Helikopter veya drona ait paller oluşturulduktan sonra girilen radar özelliklerine göre bu pallerden yansıtacak olan radar işareti hesaplanır. Hesaplanan yansıyan radar işaretine Fourier dönüşümü uygulanır. Sonrasında CFAR uygulanarak, uzaklık ve hız bilgileri elde edilir. Elde edilen bu bilgiler bilgisayara iletilir. Pallerden kaynaklı Mikro Doppler işaretlerinin çıkarımı için CFAR uygulanmış işaretin STFT dönüşümü hesaplanarak, hedefin Mikro Doppler verileri elde edilir. Bu veriler kullanılarak Hedefin Mikro Doppler imzası çizdirilir. I ve Q biçiminde bilgisayara makine öğrenme algoritmalarında kullanılması için iletilir.



Şekil 6.3 Pervane Benzetim Modeline Ait Akış Şeması

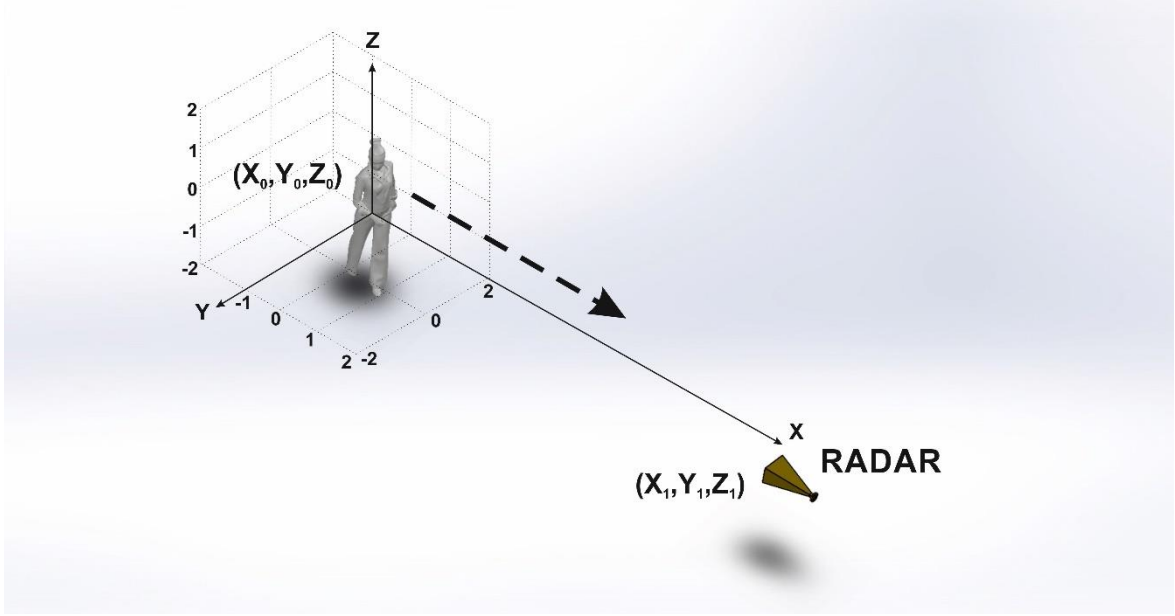
6.2. İnsan Yürümesi Benzetim Modeli

İnsan yürümesi uzun bir süredir biyomedikal mühendisliği, fizik tedavi, rehabilitasyon ve tıp tarafından araştırılmaktadır [2]. İnsan yürümesi analizinde görsel gözlem, Lidar ile gözlem, biyometrik gözlem ve radar ile gözlem gibi farklı gözlem yöntemleri kullanılarak gövde ve diğer vücut bileşenlerinin nasıl davrandığı ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. İnsan yürümesi analizinde en çok kullanılmakta olan yöntem kameraya dayalı gözlemdir. Ancak bu yöntem ışık, mesafe ve vücut özelliklerinden etkilenerek istenmeyen sonuçlar üretmektedir.

İnsan yürümesi periyodik bir harekettir. Bu yüzden yürüme hareketi Mikro Doppler çıktılar oluşmasına neden olur. Yürüme esnasında salınan kollar, bacaklar ve gövde gibi hareketli vücut parçaları ayrı ayrı Mikro Doppler çıktılar yaratmaktadır. İnsan yürümesi kişiye özgü ve kişinin duygularından kaynaklı değişiklikler gösterse de modellenenmektedir. İnsan yürümesinin doğru olarak modellenebilmesi için vücut parçalarının 3 boyutlu Kartezyen düzleminde pozisyon, hız ve ivme değerlerinin hesaplanması gerekmektedir.

Boulic [30] deneysel ölçümlere dayalı olarak insan yürümesine ait kinematik değerleri matematiksel forma dönüştürerek genel yürüme modeli oluşturmuştur. Hazırlanan bu model deneysel ölçümler gerçekleştirildiği takdirde koşma, sürüklenme, emekleme, kanat çırpması ve 4 ayaklı hayvan yürümesi gibi farklı hareketleri modellemek için de kullanılabilir. Hazırlanan deneysel ölçümlere dayalı bu model 3 boyutlu Kartezyen koordinat düzleminde yürüme hareketi gerçekleştiren vücuda ait parçaların pozisyonunu ve yönünü zamana göre hesaplayabilmektedir.

V. Chen [2] Boulic'in deneysel ölçümlere dayalı insan yürümesi modelini kullanarak kod dizini oluşturmuştur. Bu kod dizini kullanıcıdan yürümenin başlanacağı lokasyon (x,y ve z koordinatları), insan boyu, yürüme hızı, yürüme yönü, gözlem süresi, radar frekansı, radar mesafe çözünürlüğü ve radar lokasyonu (x, y ve z koordinatları) verilerini almaktadır. Bu veriler doğrultusunda insan modeli, yürüyüş düzlemi, yürüyüş boyunca vücut parçalarının salınım, esneme ve ivmelenme değerlerini oluşturur. Bu veriler doğrultusunda bilgileri girilmiş radardan yansıyacak işaretler, hesaplanarak oluşturulur. Şekil 6.4'te hazırlanan benzetim modelinin 3 boyutlu gösterimi görülmektedir.



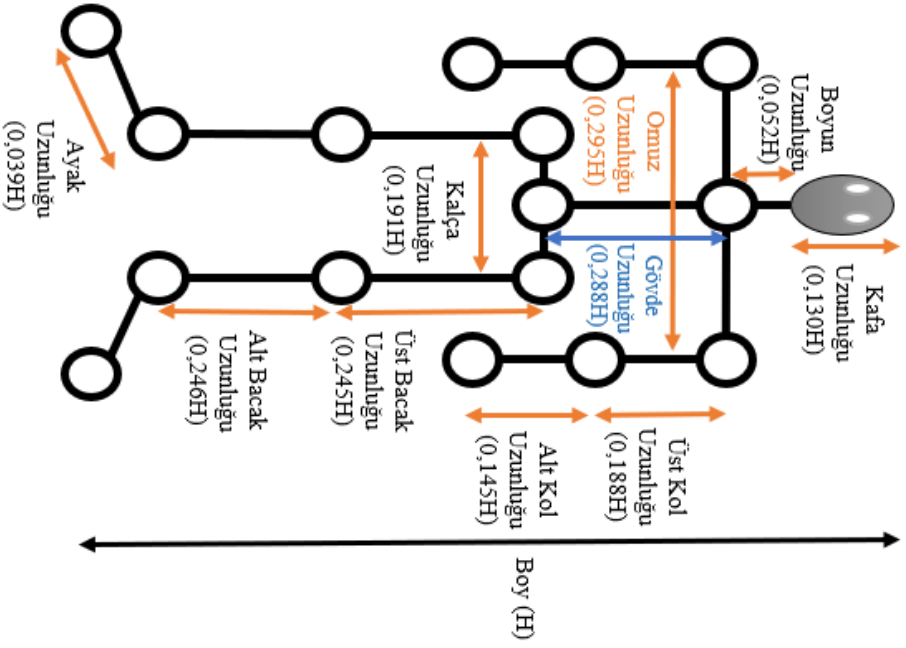
Şekil 6.4 İnsan Yürümesi Mikro Doppler Benzetim Modeli 3 Boyutlu Gösterimi

İnsan vücudu, pervaneler gibi katı gövdeye sahip değildir. Bu yüzden esnek gövde hareketini gerçekleştirirler bu nedenle insan yürümesi esnek model hareketi olarak tanımlanır. Esnek model hareketleri katı model hareketleri gibi matematiksel olarak ifade edilmesi kolay değildir. Ancak, esnek model hareketi katı model parçalarına ayrılarak katı model hareketlerin toplamı olarak ifade edilebilir. Boulic [30] yürüme hareketini katı modellerin 17 referans noktası ile birleşimi olarak tanımlamıştır.

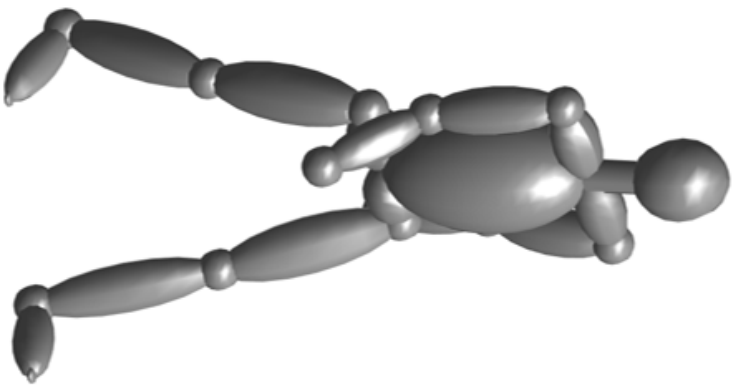
Şekil 6.5'te insan yürümesi benzetim modelinde temel alınan 17 referans noktasına ayrılmış vücut modeli görülmektedir. Şekil 6.5.a'da 3 boyutlu 17 referans parçaya ayrılmış insan vücut modeli görülmektedir. Bu modelde 17 referans eklemleri arasında kalan parçalar katı modeller olarak tanımlanır ve bu katı model hareketlerinin toplamı ile insan yürümesi hesaplanır. Şekil 6.5.b'de referans eklemleri arasında bulunduğu için katı parçalar olarak tanımlanmış vücut bölümleri görülmektedir. Ayrıca, benzetim modeli tarafından girilen insan boyuna oranla bu vücut bölümlerine atanan uzunluk katsayıları görülmektedir. Örneğin, 1,8 metre boyunda bir insan için üst kol uzunluğu boy değeri 0,188 ile çarpılarak 33,84 santimetre olarak hesaplanır. Daha sonra 33,84 santimetre boyunda üst kol katı model olarak oluşturulup, bu doğrultuda benzetim gerçekleştirilir. Şekil 6.5.c'de 1,8 metre boy uzunluğunda bir insan için hazırlanan benzetim modeli tarafından 3 boyutlu olarak oluşturulan ve hesaplamaları yapılan katı parçaların birleşiminden oluşan örnek bir model görülmektedir.



a) 3 Boyutlu 17 parçalı insan vücut modeli



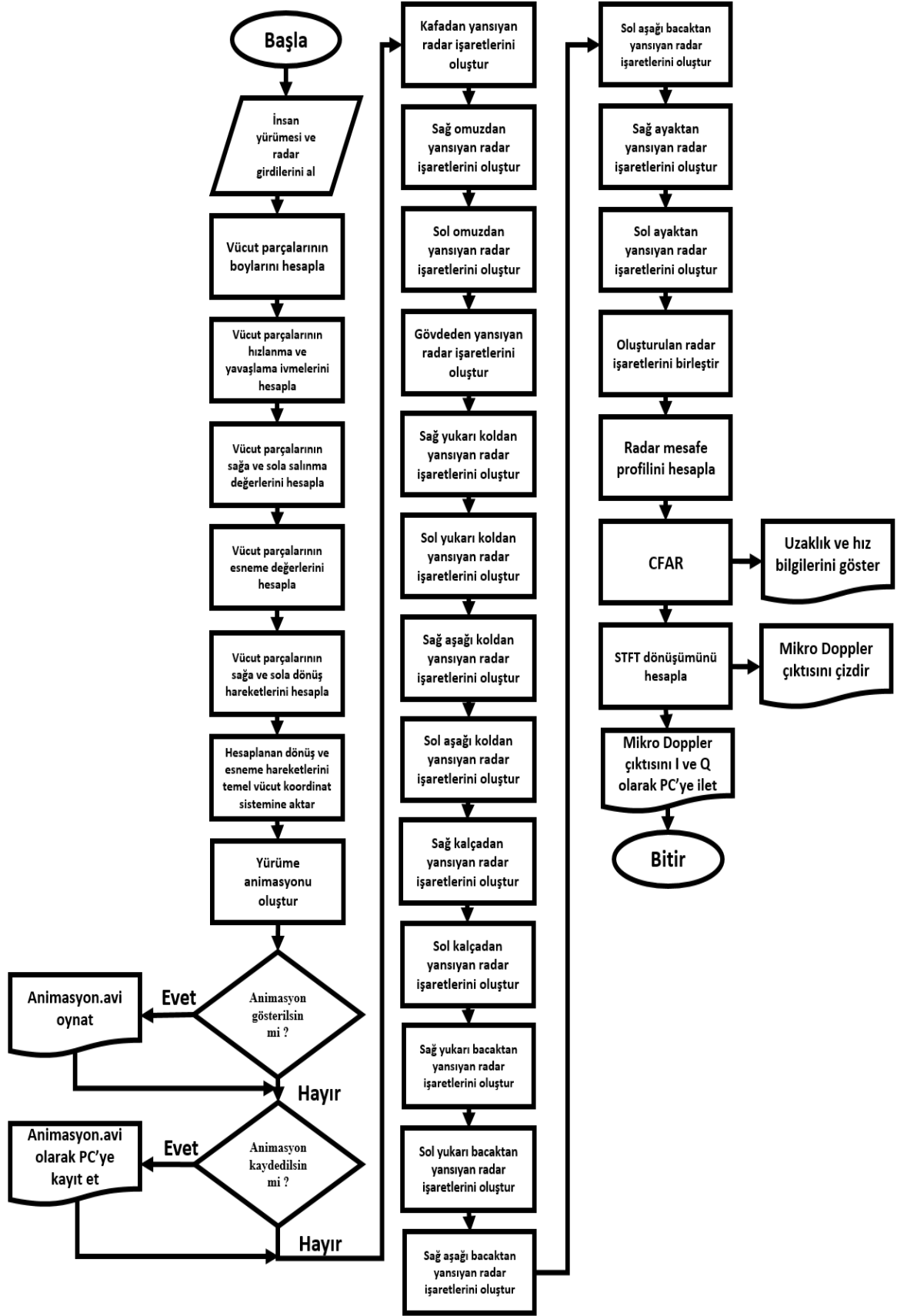
b) Referans noktalarına ayrılmış vücut



c) Benzetim modeli tarafından oluşturulan insan modeli

Şekil 6.5 İnsan Yürütmesi Benzetim Modelinde Kullanılan 17 Parçalı Vücut Modeli

Şekil 6.6'da V.Chen [2] tarafından geliştirilen insan yürümesi benzetim modeline ait akış şeması görülmektedir. Benzetim modeline girilen yürümenin başlanacağı lokasyon (x,y ve z koordinatları), insan boyu, yürüme hızı, yürüme yönü, gözlem süresi, radar frekansı, radar mesafe çözünürlüğü ve radar lokasyonu (x, y ve z koordinatları) değerleri kayıt altına alınır. Girilen bu değerler doğrultusunda vücut parçalarının boyları hesaplanır. Ardından boyları hesaplanan vücut parçalarının yürüyüş sırasında gerçekleştireceği hareketler esnasındaki hızlanma ve yavaşlama ivmeleri hesaplanır. Daha sonra sırasıyla bu vücut parçalarının sağa ve sola yapacakları salınma, esneme ve dönüş hareketleri 3 boyutlu Kartezyen koordinatlarında konum olarak hesaplanır. Benzetim süresince hareket gösterecek bütün bilgiler birleştirilerek tek bir vücut ile insan yürümesi oluşturulur. İstenilirse oluşturulan yürüme hareketi 3 boyutlu olarak animasyon halinde oynatılıp kaydedilebilir. Ardından girilen radar verileri doğrultusunda oluşturulan vücut parçaları için sırasıyla kafadan, sağ omuzdan, sol omuzdan, gövdeden, sağ yukarı koldan, sol yukarı koldan, sağ aşağı koldan, sol aşağı koldan, sağ kalçadan, sol kalçadan, sağ yukarı bacadan, sol yukarı bacadan, sağ aşağı bacadan, sol aşağı bacadan, sağ ayaktan ve sol ayaktan tek tek yansıyan radar işaretleri hesaplanır. Hesaplanan bu işaretler birleştirilerek hedeften yansıması beklenen radar işareti elde edilir. Daha sonra bu işarete Fourier dönüşümü uygulanarak radar mesafe profili elde edilir. Radar mesafe profiline CFAR uygulanarak uzaklık ve hız bilgileri hesaplanıp, gösterilir. Ardından CFAR uygulanmış işaretin Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (STFT) hesaplanarak yürümeden beklenen Mikro Doppler çıktısı I ve Q formatlarında elde edilir, frekans-zaman çıktısı çizdirilir.



Şekil 6.6 İnsan Yürümesi Mikro Doppler Benzetim Modeline Ait Akış Şeması

7. BENZETİMLER, ÖLÇÜMLER VE TESTLER

Bu çalışmada Mikro Doppler etkiler kullanılarak Yazılım Tabanlı Pasif Radar ile dron ve insan tespiti ve sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Pasif Radar aydınlatıcısı olarak 3.5 GHz ve 35 GHz 5G Yeni Radyo işaretleri kullanılmıştır. Yapılan çalışma Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTK) tarafından desteklenerek Hacettepe Üniversitesi Kampüsü Yerleşkesinde “5G Vadisi Açık Test Sahası’nda” ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Bu tez kapsamında, başlangıç olarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu sayede Bilişsel Radar için gerekli makine öğrenme modelleri oluşturulmuştur.

Benzetim çalışmalarında;

- Radara ait RF sistem benzetimi,
- Helikopter palleri için Mikro Doppler benzetimi ve makine öğrenmesi,
- İnsan yürüme modeli için Mikro Doppler benzetimi ve makine öğrenmesi

çalışmaları 3.5 GHz ve 35 GHz 5G Yeni Radyo aydınlatıcısı için gerçekleştirilmiştir. Bu sayede donanım ile çalışması planlanan sınıflandırma modelleri hazırlanıp test edilmiştir.

Ardından, Bilişsel Yazılım Tabanlı Radar Prototipi çalışmaları yapılmıştır.

Bu kapsamda;

- Adalm Pluto ile 5G almacı geliştirilip test edilmiştir,
- Adalm Pluto ile 5G aydınlatıcısı oluşturulup test edilmiştir,
- Adalm Pluto Almaç hassasiyet testi gerçekleştirilmiştir,
- Benzetim çalışmaları bölümünde oluşturulan makine öğrenmesi modelleri Adalm Pluto üzerinde koşturularak, model helikopter ile çalışması test edilmiştir,
- Son olarak geliştirilen sistem Bilişsel Aktif Radar olarak test edilip, Pasif Radar’a uyarlanmaya hazır hale getirilmiştir.

Son aşamada, makine öğrenmesi modelleri ile YTR donanımı hazırlanmış ve bilişsel aktif radar olarak test edilmiş, sistem Bilişsel Yazılım Tabanlı Pasif Radar Prototipi haline getirilmiştir. İç ve dış mekân ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Bu kapsamda;

- İç mekânda laboratuvar ortamında Bilişsel YTR Pasif Radar oluşturulmuştur,
- Oluşturulan radar ile 3.5 GHz ve 35 GHz frekanslarında insan ve dron sınıflandırması testleri yapılmıştır,

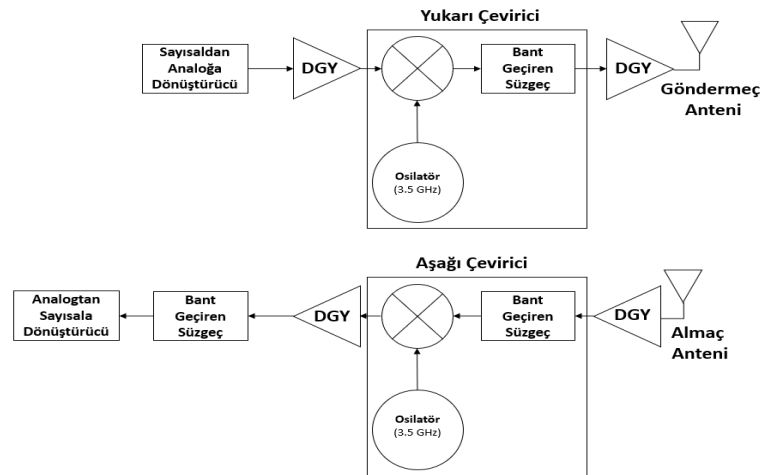
- Dış mekânda dünyanın ilk 3.5 GHz 5G YR baz istasyonu aydınlatıcısı kullanılarak oluşturulan radar insan ve dron sınıflandırması için test edilmiştir.

7.1. Benzetim Çalışmaları

Kurulacak olan bilişsel yazılım tabanlı radar sistemine ait RF performans değerleri, pasif radar özellikleri, tespit edilmesi planlanan helikoptere ait veriler ve insan yürümesine ait veriler simüle edilmiştir. Simüle edilen veriler kullanılarak makine öğrenimi algoritmaları eğitilerek, başarıları test edilmiştir.

7.1.1. RF sistem benzetim çalışmaları

Yazılım Tabanlı Radar sistemi, antenden gelen işareti düşük frekansa indirerek Analogtan Sayısala Dönüştürücü (ADC) vasıtasıyla sayısallaştırır. Sayısal işaret, yüksek işaret işleme gücüne sahip işleme birimi vasıtasıyla işlenerek, istenilen çıktılar elde edilir. 3.5 GHz ve 35 GHz 5G Yeni Radyo işaretleri kullanılarak, pasif radar ile 0,01 m² Radar Kesit Alanına sahip DJI marka Phantom 4 model dron ile ve 1 m² Radar Kesit Alanına sahip insan yürümesini tespit edebilmek için maksimum uzaklık değerleri, farklı çıkış güçleri için simüle edilmiştir. Şekil 7.1'de 3.5 GHz temel frekansında çalışan 40 MHz bant genişliğine ve 3 dBi almaç ve göndermeç anten kazancına sahip yazılım tabanlı radar için hazırlanan benzetim modeli görülmektedir. Hazırlanan Pasif Radar donanımı benzetim modeli için radarın algılayabileceği en düşük işaret gücü hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonucunda, radarın en düşük -80 dBm gücündeki işareti algılayabildiği görülmüştür.



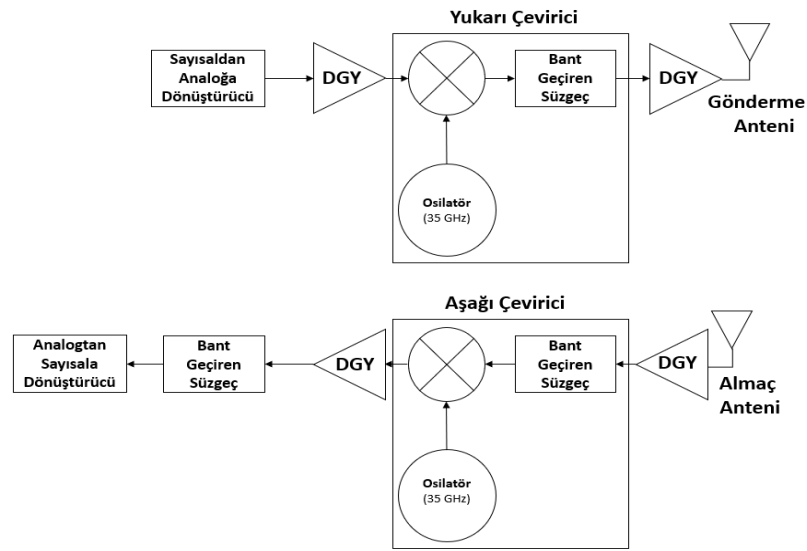
Şekil 7.1 Pasif Radar Donanımı 3.5 GHz İçin Hazırlanan Benzetim Çıktısı

Tablo 7.1 5G Pasif Radar 3.5 GHz Maksimum Uzaklık Sonuçları

Çıkış Gücü	Dron (0,01 m ²)	İnsan (1 m ²)
10 dBm	4,43 metre	17,95 metre
30 dBm	19,87 metre	52,06 metre
46 dBm	32,60 metre	103,05 metre
53 dBm	48,77 metre	154,2 metre

Radarin algılayabileceği en düşük işaret gücü belirlendikten sonra Denklem 2.4 kullanılarak, 3.5 GHz temel frekansında çalışan yazılım tabanlı radar için dron ve insan yürümesine ait algılanabilecek maksimum uzaklık değerleri farklı aydınlatıcı çıkış güçleri için hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 7.1’de görülmektedir. Çıkış gücü artırıldığında, insan ve drondan yansıyan işaretler daha yüksek güçte yansıdığı için elde edilen mesafe değeri artmaktadır.

Şekil 7.2’de 35 GHz temel frekansında çalışan 40 MHz bant genişliğine ve 3 dBi almaç ve göndermeç anten kazancına sahip yazılım tabanlı radar için hazırlanan benzetim modeli görülmektedir. Benzetim sonucunda radarın en düşük -82 dBm gücündeki işaretleri algılayabildiği görülmüştür.



Şekil 7.2 5G Yeni Radyo 35 GHz İşareti İçin Hazırlanan Benzetim Çıktısı

Tablo 7.2 5G Pasif Radar 35 GHz Maksimum Uzaklık Sonuçları

Çıkış Gücü	Dron (0,01 m²)	İnsan (1 m²)
10 dBm	1,25 metre	4,11 metre
30 dBm	4,66 metre	12,97 metre
46 dBm	10,31 metre	90,55 metre
53 dBm	30,84 metre	135,45 metre

Radarin algılayabildiği en düşük güçlü işaret belirlendikten sonra Denklem 2.3 kullanılarak, 35 GHz temel frekansında çalışan radar için dron ve insan hedeflerine ait maksimum uzaklık değerleri farklı çıkış güçleri için hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 7.2’de görülmektedir. 35 GHz frekansındaki işaretler atmosferik sönmülemelerden daha çok etkilenmektedir. Bu sebepten dolayı farklı çıkış güçleri için elde edilen maksimum mesafe değerleri 3.5 GHz YR işaretine göre daha düşüktür.

7.1.2. Helikopter pallerine ait Mikro Doppler imzası benzetim ve eğitim çalışmaları

Makine Öğrenmesi Algoritmalarının tespit edilen hedefi sınıflandırabilmeleri için eğitilmesi gerekmektedir. Geliştirilen Mikro Doppler benzetim modeli kullanılarak farklı pervane sayısı, pervane uzunluğu, pervane genişliği, pervane dönme hızı, ana gövde hızı, radar kesit alanı ve radar bakış açısı için sentetik Mikro Doppler işaretleri oluşturulmuştur. Oluşturulan işaretler I ve Q veri biçimi şeklinde kayıt edilmişlerdir. Şekil 7.3’te sınıflandırma için kullanılan helikopterler ve bu helikopterlere ait özellikler Tablo 7.3’te görülmektedir.



(a)



(b)



(c)



(d)

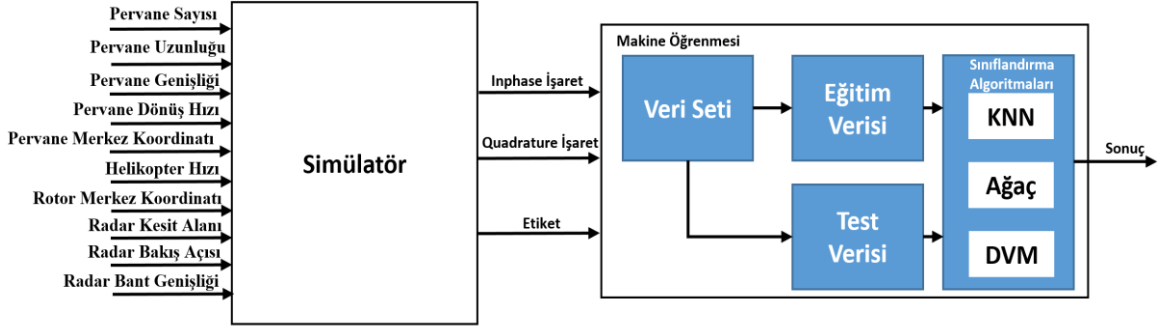
Şekil 7.3 a) Boeing AH-64 b) Eurocopter EC-135 c) Bell 222 d) Eurocopter AS350

Tablo 7.3 Helikopterlere Ait Özellikler Tablosu

	AH-64	EC-135	222	AS350
Ana Gövde Hızı	293 km/h	254 km/h	240 km/h	287 km/h
Pervane Sayısı	4	5	2	3
Pervane Uzunluğu	14,63 metre	10,2 metre	12,12 metre	10,89 metre

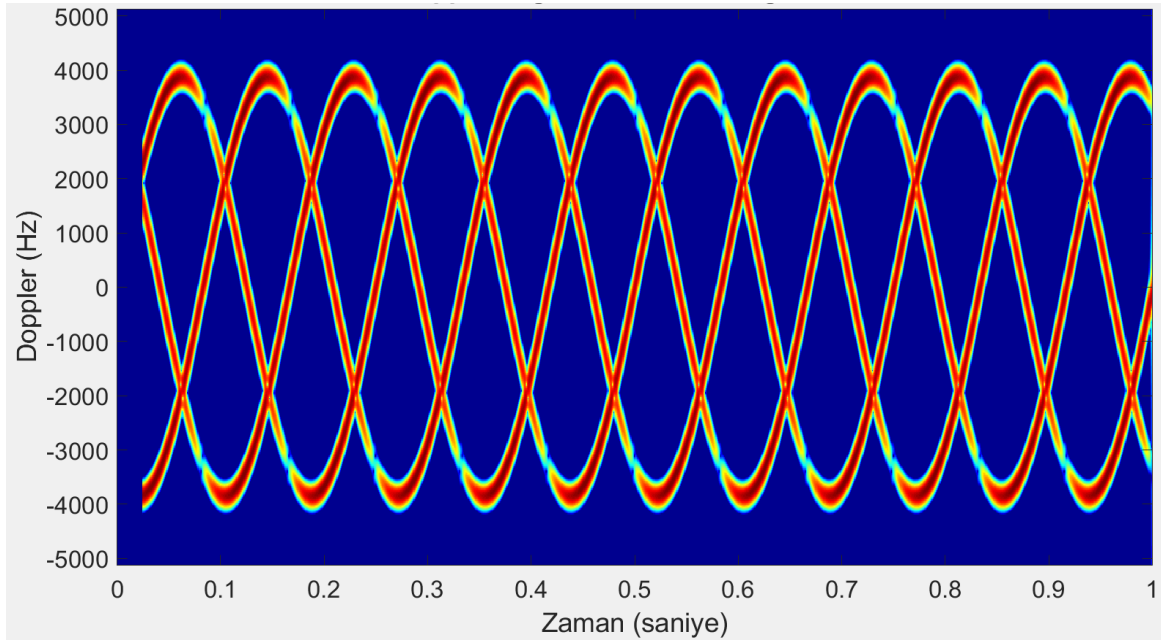
Farklı özelliklere sahip helikopterlere ait benzetim çalışmaları gerçekleştirildikten sonra makine öğrenmesi algoritmaları eğitimi için veri setleri oluşturulmuştur. Tablo 7.3'te belirtilen helikopterleri temel alan model helikopterler, Phantom 4 ve RQ77 model dron için 3.5 GHz ve 35 GHz temel frekanslarında 2 farklı veri seti hazırlanmıştır. Hazırlanan veri seti

3 farklı özellik bulundurmaktadır. Inphase (I) verisi, Quadrature (Q) verisi ve etiket verisinden oluşmaktadır. Şekil 7.4'te hazırlanan modele ait blok şeması görülmektedir.

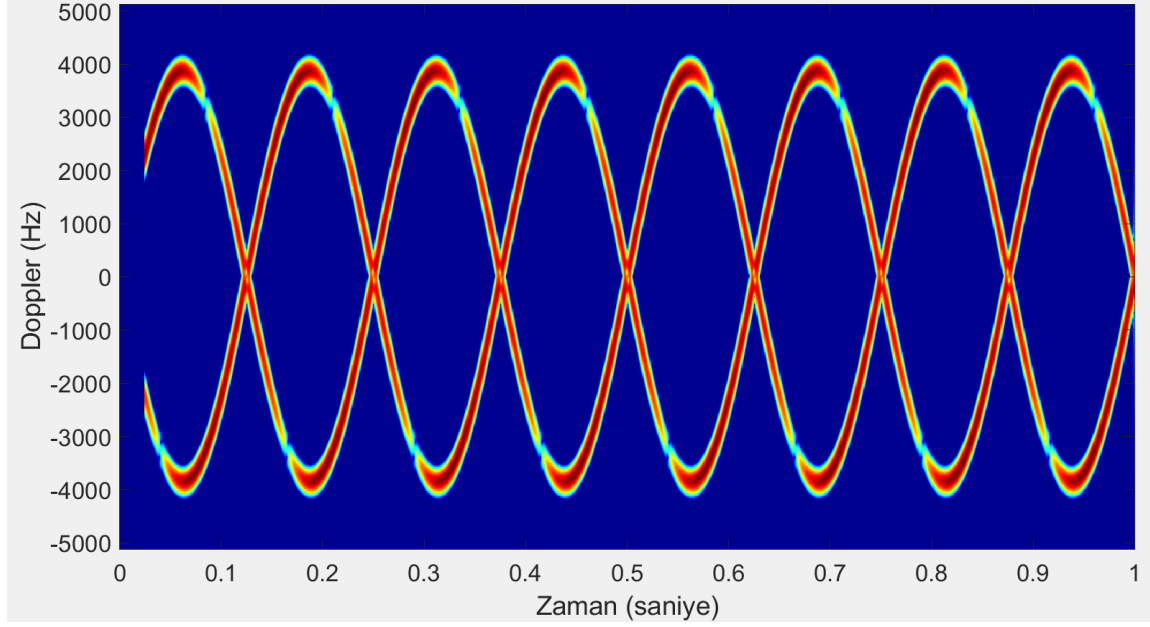


Şekil 7.4 Makine Öğrenmesi Blok Şeması

Her bir veri setinde toplamda 250 adet veri bulunmaktadır. Veri setinde kullanılan işaretlerin hepsi sentetik verilerdir ve gürültü bileşeni içermemektedir. Şekil 7.5'te tek ve çift sayılı pervaneye sahip helikoptere ait benzetim çıktılarına ait grafikler görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 7.5 a) Tek Sayılı Pale Sahip b) Çift Sayılı Pale Sahip Helikoptere Ait Benzetim Çıktısı Sentetik İşaret

Hazırlanan veri seti Ağaç Algoritması, Destek Vektör Makinesi ve KNN Algoritması kullanılarak eğitilmiştir. $K=5$ Çapraz Geçerlilik uygulanarak doğrulama gerçekleştirilmiştir. Eğitim, veri seti %80 ile %20 olarak ayrılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede veri seti sadece eğitim amacıyla değil aynı zamanda başarı testi için de kullanılmıştır. Veri setinden öz nitelik çıkartılmadan tamamen ham veri ile eğitim gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.6'da 3.5 GHz YR işareti için oluşturulan veri seti ile eğitilen ve en yüksek başarı gösteren DVM algoritmasına ait Karışıklık Matrisi görülmektedir. Bu modele ait F-ölçütü %86,82 olarak hesaplanmıştır.

		Gerçek Değer	
		Pozitif	Negatif
Tahmin Edilen Değer	Pozitif	%89	%11
	Negatif	%16	%84

Şekil 7.6 Helikopter DVM 3.5 GHz Veri Seti için Karışıklık Matrisi

Şekil 7.7'de 3.5 GHz YR işareti için oluşturulan veri seti ile eğitilen ve en yüksek başarı gösteren DVM algoritmasına ait Karışıklık Matrisi görülmektedir. Bu modele ait F ölçütü %92,742 olarak hesaplanmıştır.

		Gerçek Değer	
		Pozitif	Negatif
Tahmin Edilen Değer	Pozitif	%95	%5
	Negatif	%10	%90

Şekil 7.7 Helikopter DVM 35 GHz Veri Seti için Karışıklık Matrisi

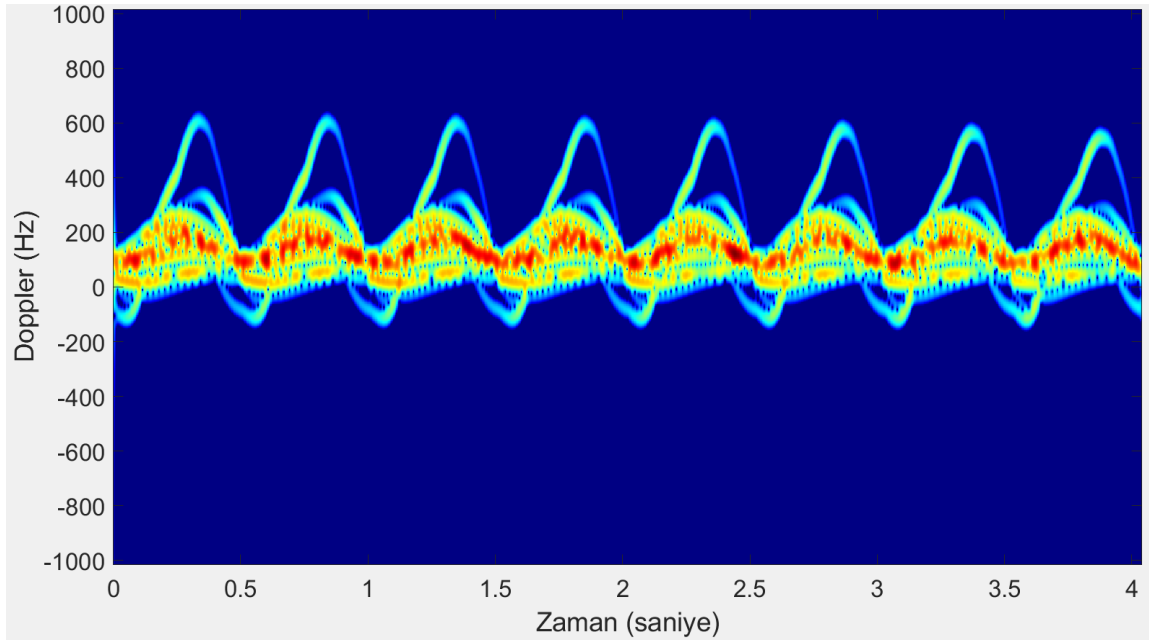
Tablo 7.4 Helikopter Veri Seti İçin Makine Öğrenmesi Eğitimi Başarı Tablosu

	3.5 GHz için	35 GHz için
Ağaç Algoritması	%82,4 Başarı	%88,1 Başarı
Destek Vektör Makinesi	%87,6 Başarı	%93,2 Başarı
KNN Algoritması	%80,8 Başarı	%86,6 Başarı

Tablo 7.4'te 3.5 GHz ve 35 GHz için hazırlanan eğitim modellerine ait başarı oranları görülmektedir. En yüksek başarı oranı Destek Vektör Makinesi Algoritması ile sağlanmıştır. 35 GHz'de pallerin yarattığı maksimum Doppler frekansı daha yüksek olduğu için 35 GHz'deki başarı oranı 3.5 GHz YR işaretine göre daha yüksek olmaktadır.

7.1.3. İnsan yürümesine ait Mikro Doppler imzası için benzetim ve eğitim çalışmaları

Her insanın yürüme karakteristiği kendisine özeldir ve Mikro Doppler imzası ile ayırt edilebilir. Geliştirilen Mikro Doppler benzetim modeli ile insan yürümesine ait Mikro Doppler işaretler üretmiştir. İnsan yürümesine ait Mikro Doppler etkiler farklı yürüme hızı, boy, kol uzunluğu, bacak uzunluğu, radar kesit alanı ve radar bakış açısı için sentetik olarak oluşturulmuştur. Şekil 7.8’de insan yürümesine ait sentetik Mikro Doppler benzetim çıktısı görülmektedir.



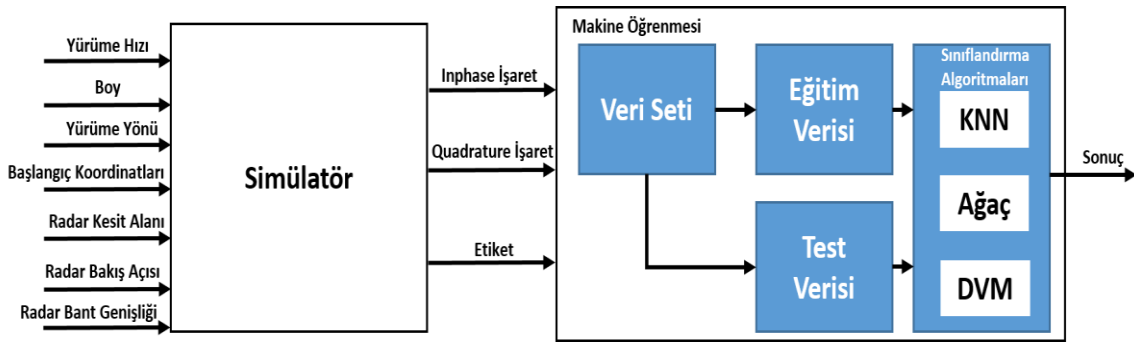
Şekil 7.8 İnsan Yürümesine Ait Sentetik Mikro Doppler Benzetim Çıktısı

Oluşturulan veriler ile 3.5 GHz ve 35 GHz temel frekansı için 2 farklı veri seti hazırlanmıştır. Hazırlanan veri seti Inphase (I) verisi, Quadrature (Q) verisi ve etiket verisi olmak üzere 3 farklı özellikten oluşmaktadır. Veri setinde toplamda 250 adet veri bulunmaktadır. Veri setinde kullanılan işaretlerin hepsi sentetik verilerdir ve içerlerinde gürültü bileşeni bulunmamaktadır. Geliştirilen benzetim modeli çıktısı Şekil 7.9’da görülmektedir. Modelde farklı radar bakışı açısı, radar kesit alanı, kol uzunluğu, bacak uzunluğu, yürüme hızı ve boy değiştirilip, bu doğrultuda çıktılar elde edilebilmektedir.



Şekil 7.9 Benzetim Modelinde Kullanılan İnsan Yürüme Örüntüsü

Hazırlanan veri seti, Ağaç Algoritması, Destek Vektör Makinesi ve KNN Algoritması kullanılarak eğitilmiştir. K=5 Çapraz Geçerlilik uygulanarak doğrulama gerçekleştirilmiştir. Eğitim, veri seti %80 ile %20 şeklinde, gerçekleştirilmiştir. Bu sayede veri seti sadece eğitim amacıyla değil aynı zamanda başarı testi için de kullanılmıştır. Bu sayede oluşturulan makine öğrenmesi algoritmaları test edilmiştir. Veri setinden öz nitelik çıkartılmadan tamamen ham veri ile eğitim gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.10'da hazırlanan modele ait blok şeması görülmektedir.



Şekil 7.10 İnsan Yürümesi Benzetim Modeli Blok Şeması

Hazırlanan çıktılar bilgisayar vasıtasıyla kayıt altına alınmıştır. Şekil 7.11'de 3.5 GHz YR işareti için oluşturulan veri seti ile eğitilen ve en yüksek başarı gösteren DVM algoritmasına ait Karışıklık Matrisi görülmektedir.

		Gerçek Değer	
		Pozitif	Negatif
Tahmin Edilen Değer	Pozitif	%85	%15
	Negatif	%8	%92

Şekil 7.11 İnsan Yürümesi 3.5 GHz İçin DVM Karışıklık Matrisi

Şekil 7.12'de 35 GHz YR işareti için oluşturulan veri seti ile eğitilen ve en yüksek başarı gösteren DVM algoritmasına ait Karışıklık Matrisi görülmektedir.

		Gerçek Değer	
		Pozitif	Negatif
Tahmin Edilen Değer	Pozitif	%95	%5
	Negatif	%8	%92

Şekil 7.12 İnsan Yürümesi 35 GHz DVM Karışıklık Matrisi

Tablo 7.5 İnsan Yürüme Örüntüsü Veri Seti İçin Makine Öğrenmesi Başarı Tablosu

	3.5 GHz için	35 GHz için
Ağaç Algoritması	%83,5 Başarı	%89,9 Başarı
Destek Vektör Makinesi	%88,1 Başarı	%93 Başarı
KNN Algoritması	%79,7 Başarı	%84,5 Başarı

Tablo 7.5'te 3.5 GHz ve 35 GHz için hazırlanan eğitim modellerine ait başarı oranları görülmektedir. En yüksek başarı oranı Destek Vektör Makinesi Algoritması ile sağlanmıştır. Yüksek frekansta Mikro Doppler etkiler baskın olduğu için 35 GHz'deki başarının 3.5 GHz'deki başarıya göre daha yüksek olduğu görülmektedir. İnsan ve helikopter için gerekli benzetim ve makine öğrenmesi modelleri oluşturularak saha testlerine hazır hale getirilmiştir. Bu algoritmalar içerisinde en yüksek başarının elde edildiği DVM algoritmasında 3.5 GHz için F-ölçütü %88,08 ve 35 GHz için F-ölçütü % 93,62 olarak hesaplanmıştır.

7.2. Bilişsel Yazılım Tabanlı Radar Prototipinin Oluşturulması

70 MHz ile 6 GHz frekans aralığında 56 MHz bant genişliğine, 10 dBm çıkış gücü ve -90 dBm almaç hassasiyetine sahip Analog Devices firması tarafından üretilen AD9364 entegresi ve Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (*FPGA*) kullanılarak bilişsel yazılım tabanlı radar prototipi oluşturulmuştur. Şekil 7.13'te Adalm Pluto modülü ve kullanılan antenler görülmektedir. Hafif ve uygun maliyetli olması nedeniyle bu çalışmada Yazılım Tabanlı Radar donanımı olarak Adalm Pluto kullanılmıştır.



(a)



(b)



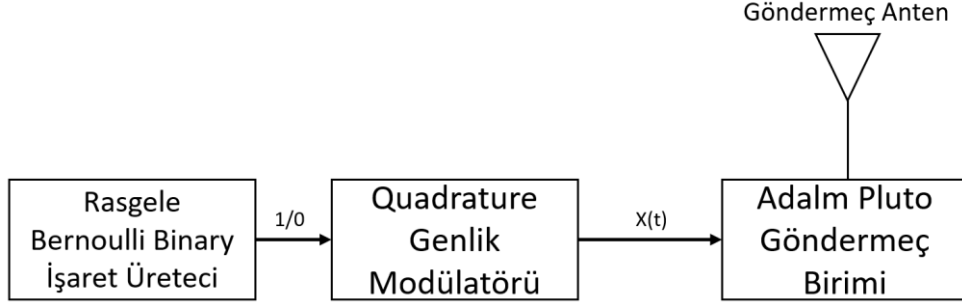
(c)

Şekil 7.13 a) 3.5 GHz Yönlü Anten b) 35 GHz Yönlü Anten Ailesi c) Adalm-Pluto

3.5 GHz 5G Yeni Radyo işaretinin aydınlatıcı olarak kullanıldığı pasif radar uygulamalarında Şekil 7.13.a'da görülmekte olan 3.5 GHz aralığında 3 dBi kazanca sahip yönlü Log Periyodik Anten kullanılmıştır. 35 GHz 5G Yeni Radyo işaretinin aydınlatıcı olarak kullanıldığı pasif radar uygulamalarında Şekil 7.13.b'de görülmekte olan yönlü ve yüksek kazançlara sahip Yama Anten ailesi kullanılmıştır.

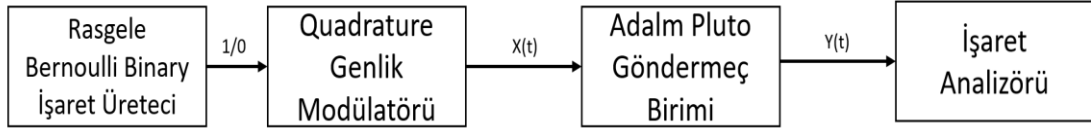
7.2.1. Yazılım tabanlı göndermeç sisteminin hazırlanıp test edilmesi

İlk aşamada Adalm Pluto modülü kullanılarak bilgisayar ortamında QAM göndermeçi tasarlanmıştır. Bu sayede 3.5 GHz frekans bandında istenildiği takdirde Adalm Pluto 5G YR aydınlatıcısı olarak da kullanılabilir. İşlemci vasıtasıyla, ilk olarak rasgele 1 veya 0 işaretleri üretilir. Bu işaretler Quadrature Genlik Modülasyonuna uğratarak, I ve Q işaretler oluşturulur. Oluşturulan veriler Evrensel Seri Veriyolu (USB) kullanılarak Adalm Pluto üzerinde bulunan FPGA birimine iletilir. FPGA birimi Sayısalan Analoga Döndürücü (-ing DAC) entegrasyonu kullanarak sayısal işaretleri analog işaretlere çevirerek 3.5 GHz temel frekansı etrafında 40 MHz bant genişliğinde istenilen işaret oluşturulur. Geliştirilen göndermeç blok şeması Şekil 7.14'te gösterilmektedir. Blok şema MATLAB ile oluşturulmuştur.

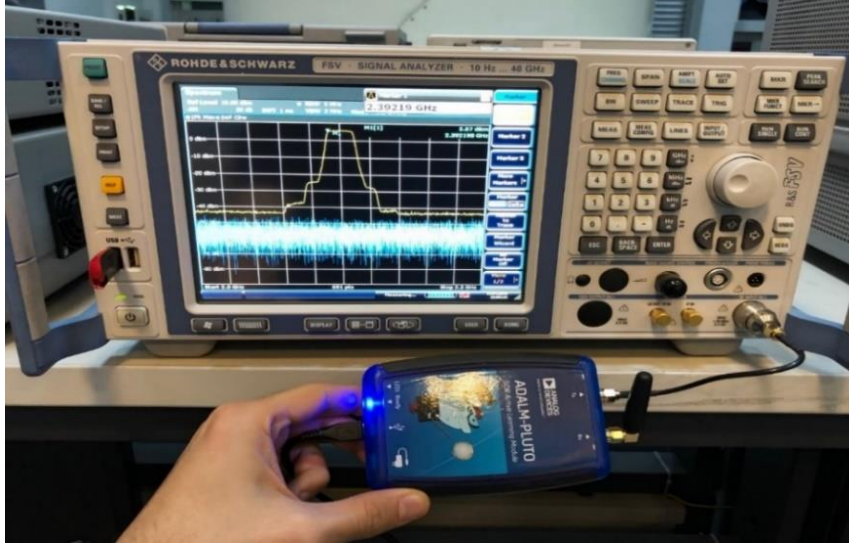


Şekil 7.14 QAM Göndermeç Blok Diyagramı

QAM işaretleri dışında, sistemin aynı zamanda çok aydınlatıcılı Pasif Radar yapısı üzerinde aydınlatıcı olarak kullanılabilmesi amacıyla FM, QPSK, FSK ve OFDM gibi işaretler farklı bant genişlikleri ve frekanslar için oluşturulmuş, spektrum analizör ile bu işaretler kontrol edilmiştir. 2.4 GHz frekans üzerinde oluşturulan Wi-Fi işaretine ait spektrum analizör çıktısı Şekil 7.15.b’de görülmektedir.



a)

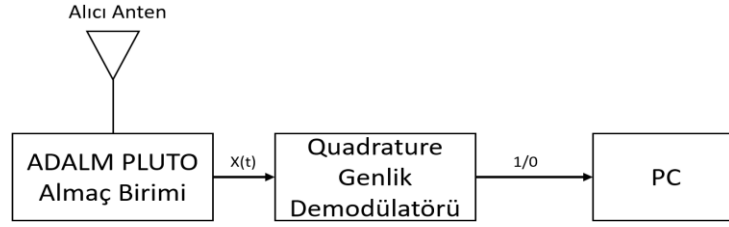


b)

Şekil 7.15 Hazırlanan Wi-Fi Göndermeç Birimine Ait a) Blok Şeması b) Spektrum Çıktısı

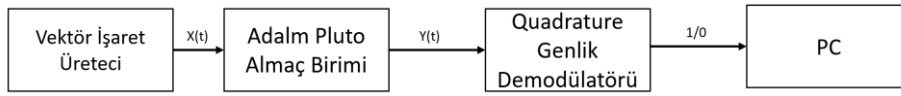
7.2.2. Yazılım tabanlı almaç sisteminin hazırlanıp test edilmesi

Hazırlanan yazılım tabanlı radar sisteminin, Pasif Radar mimarisinde almaç olarak kullanılabilmesi için bilgisayar ortamında Şekil 7.16’da görülmekte olan QAM almaç demodülatörü tasarlanmıştır. Hazırlanan Almaç birimi antenine gelen işareti temel bant işarete çevirerek FPGA birimine iletmektedir. FPGA birimi sayısal işaretleri USB arayüzü ile bilgisayara ileterek, bu işaretlerin bilgisayar üzerinde demodüle edilmesini sağlamaktadır.

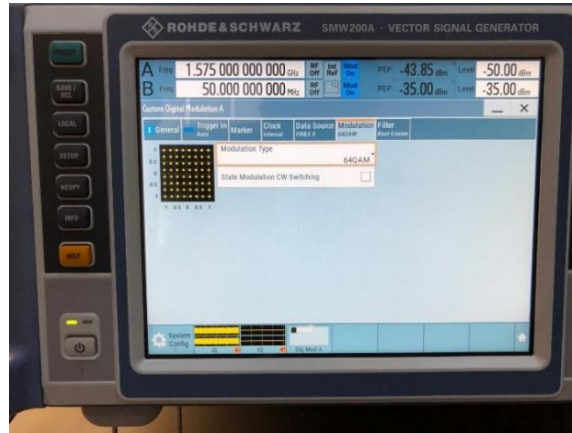


Şekil 7.16 QAM Almaç Blok Diyagramı

Hazırlanan almaç biriminin test edilebilmesi için Şekil 7.17’de görülmekte olan Vektör İşaret Üretici ile QAM işareti oluşturularak bu işaret almaç birimine iletilmiştir. Almaç birimi QAM demodülasyon işlemini gerçekleştirerek yazılım tabanlı radar sistemine ait hazırlanan almaç kontrol edilmiştir.



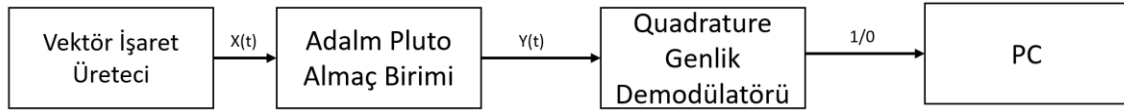
a)



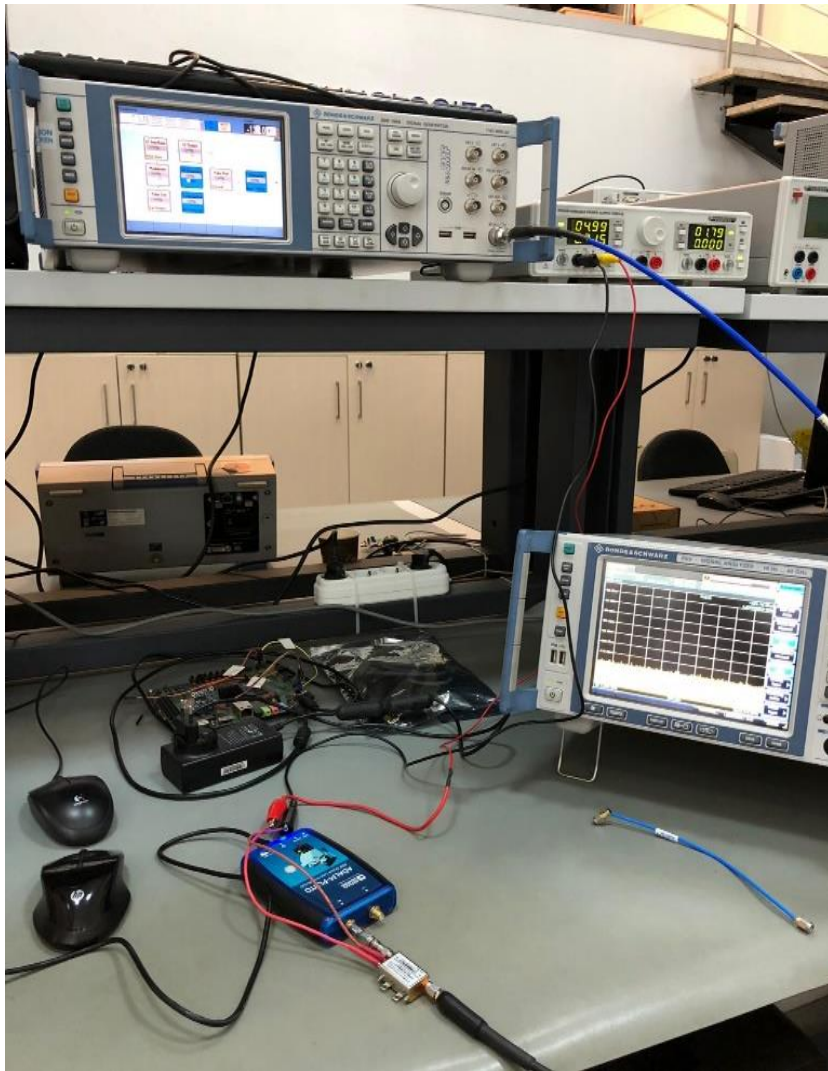
b)

Şekil 7.17 a) Almaç Test Düzeneği Blok Şeması b) Vektör İşaret Analizörü ile Oluşturulan QAM İşareti ve Özellikleri

Hazırlanan almaç sistemi, duyarlılık testine tabi tutularak 3.5 GHz temel frekansta 40 MHz anlık bant genişliği ve 2.0 dB Gürültü Katsayısı için Şekil 7.18’de görülen test düzeneği kurulmuştur. Vektör İşaret Üretileri ile QAM işareti oluşturulmuştur. Oluşturulan bu işaretin gücü sürekli azaltılarak, almanın veriyi çözemediği noktaya kadar test devam ettirilmiştir. Almanın en düşük değer olarak -80 dBm gücünde işareti algılayabildiği görülmüştür.



a)



b)

Şekil 7.18 Almaç Hassasiyet Test Düzeneği a) Blok Şeması b) Düzenek

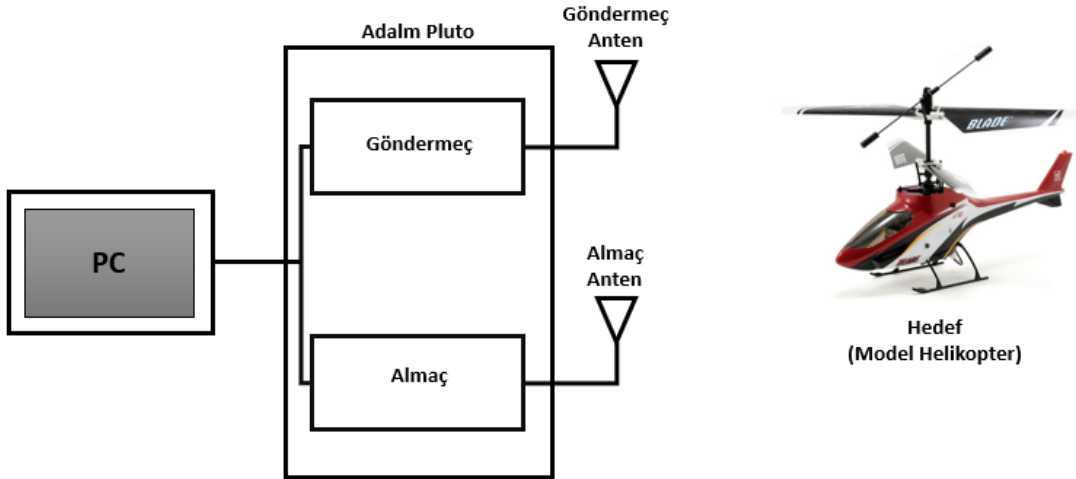
7.2.3. Helikopter pervanesine ait Mikro Doppler imzası testi

Bölüm 6.1.'de hazırlanan helikopter pallerine ait Mikro Doppler benzetim modeli kullanılarak 23,88 cm uzunluğundaki pervaneler için hazırlanan simülatörden Mikro Doppler çıktısı oluşturulmuştur. Bu kapsamda kullanılan ölçüm düzeneği Şekil 7.19'da gösterilmektedir.



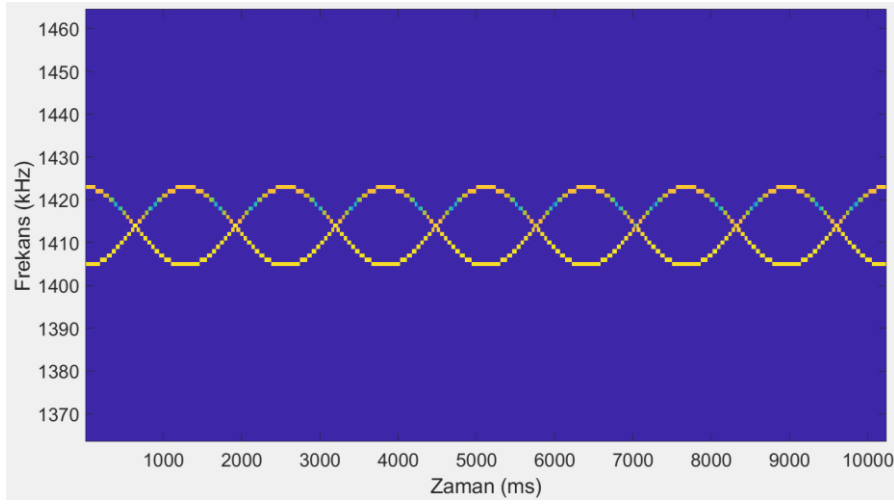
Şekil 7.19 Model Helikopter Mikro Doppler Ölçüm Düzeneği

Adalm Pluto tabanlı Yazılım Tabanlı Radar kullanılarak Şekil 7.20'de görülmekte olan 3.5 GHz temel frekansına sahip sürekli dalga radarı oluşturularak, helikopterden yansıyan işaretler Yazılım Tabanlı Radar ile kayıt altına alınmıştır.



Şekil 7.20 Tek Pervane Testi Blok Diyagramı

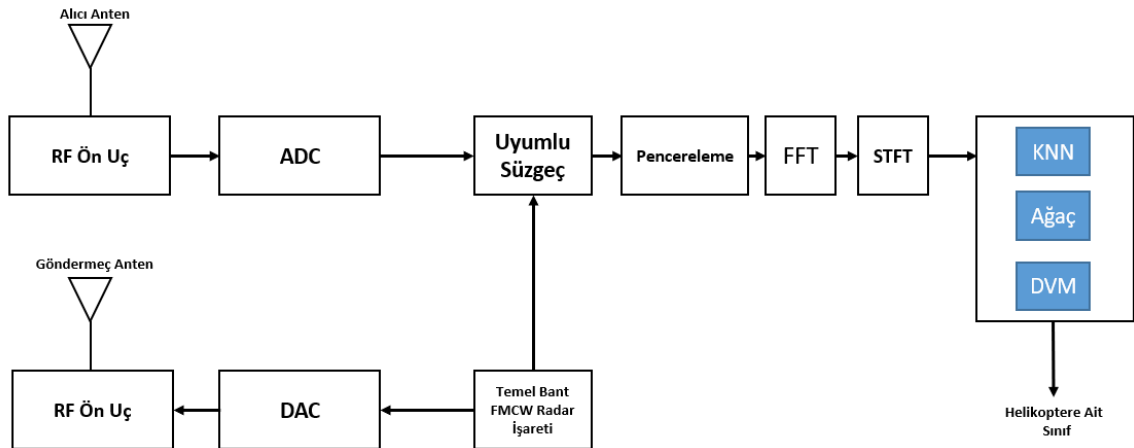
Kayıt altına alınan hedeften yansıyan işaretlere ait Mikro Doppler imzası Şekil 7.21’de görüldüğü gibidir. Hazırlanan simülatör çıktısı ile hedeften yansıyan işaretlerden elde edilen Mikro Doppler frekans değerlerinin, simülatör çıktıları ile %82 oranında örtüştüğü hesaplanmıştır. Bu sayede geliştirilen donanım ve benzetim modeli ile saha testlerinin yapılabileceği anlaşılmıştır.



Şekil 7.21 Hedefe Ait Mikro Doppler İmzası

7.3. Bilişsel FMCW Yazılım Tabanlı Radar Testi

Hazırlanan Mikro Doppler simülatörünün ölçüm verileri ile %82 oranında örtüştüğü tespit edilmiştir. Bu nedenle Pasif Radar testlerinden önce Frekans Modüleli Sürekli Dalga Radar, yazılım tabanlı radyo donanımı üzerinde koşturularak testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.22).



Şekil 7.22 FMCW Yazılım Tabanlı Radar Blok Diyagramı

Hazırlanan simülâtör kullanılarak Şekil 7.23'te görülmekte olan model helikopter için 3.5 GHz temel frekansı ve 50 MHz bant genişliğine sahip radar test edilmiştir.

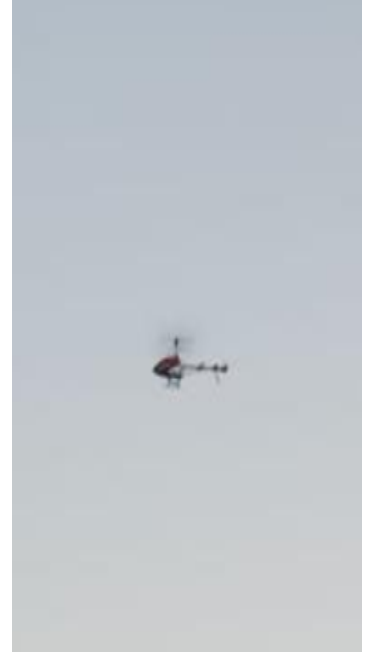


Şekil 7.23 Eurocopter EC-135 Model Helikopter

Şekil 7.24'te görülmekte olan FMCW Bilişsel Yazılım Tabanlı Radar Prototipi oluşturularak, model helikopter ile farklı açılarda ve uzaklıklar için ölçümler gerçekleştirilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 7.24 a) FMCW Bilişsel Yazılım Tabanlı Radar Prototipi b) EC-135 Hedef

Tablo 7.6 FMCW Bilişsel Yazılım Tabanlı Radar Prototipi Ölçüm Sonuçları

	Başarı
Destek Vektör Makinesi	%64
Ağaç Algoritması	%47
KNN	%38

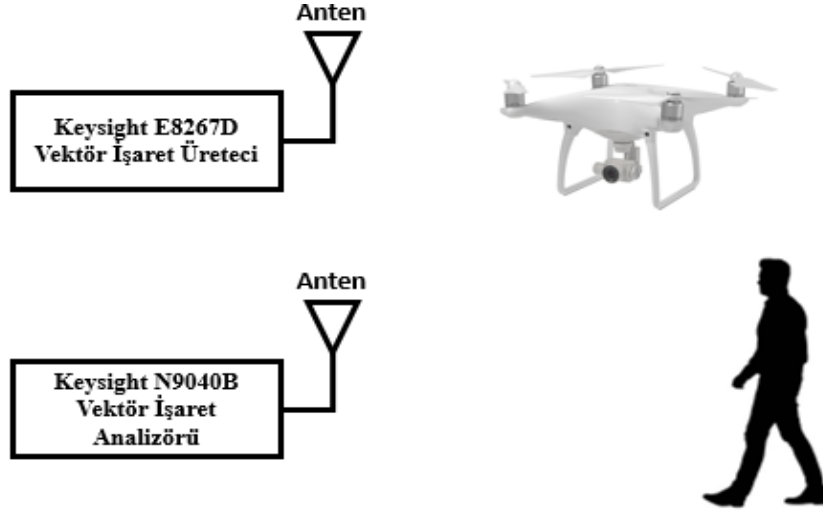
Yapılan ölçümlere ait sonuçlar Tablo 7.6’da görülmektedir. En yüksek başarı oranı Destek Vektör Makinesi algoritması ile elde edilirken, en düşük başarı KNN algoritması ile elde edilmiştir. Hazırlanan bilişsel radar prototipi ile %50’nin üzerinde başarı oranı ile hazırlanan sentetik verilerden oluşturulmuş veri seti ile eğitilen modelin ölçüm sonuçlarının örtüştüğü görülmüştür.

7.4. 5G Vadisi İç Mekan Testleri

Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu Başkanlığı tarafından desteklenerek kurulan “5G Vadisi Test Sahası” bölgesinde test ve ölçümler yapılmıştır. Bu kapsamda Spark Ölçüm Teknolojilerine ait Keysight marka RF haberleşme ve ölçüm cihazlarına erişim ve kullanım izni verilmiştir. Bu cihazlar, yazılım tabanlı radar donanımı olarak kullanılmış, C ve Ka bandları için pasif radar sistemi hazırlanmıştır. 5G yeni radyo işaretleri ile dron ve insan tespiti testleri gerçekleştirilmiştir.

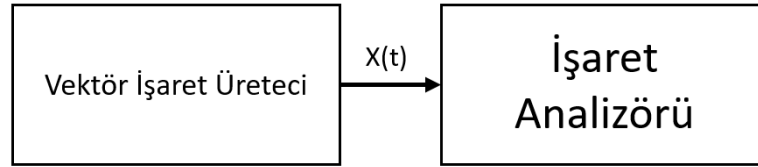
7.4.1. 5G Vadisi iç mekan test düzeneği

Keysight E8267D 44 GHz maksimum frekans değerine sahip vektör işaret üretici ve N9040B 50 GHz maksimum frekans değerine sahip vektör işaret analizörü kullanılarak gerçekleştirilen iç mekan düzeneği Şekil 7.25’te görülmektedir.



Şekil 7.25 İç Mekân Ölçüm Düzenegi

Kurulan düzenek ile C (3.5 GHz) ve Ka (35 GHz) bantlarında üretilen 300 ms aralıklı işaret kayıt edilmiştir. Bu sayede, referans ölçümü yapılarak ikinci almaç ihtiyacı ve referans işarettaki bozulmaların önüne geçilmiştir. Şekil 7.26'da kurulan referans ölçüm düzenegi görülmektedir.



a)



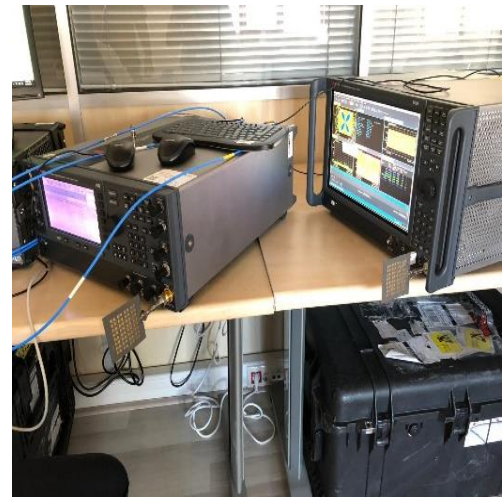
b)

Şekil 7.26 Referans İşareti Ölçüm Düzenegi a) Blok Şeması b) Düzenek

Şekil 7.27’de C-bant ve Ka-Bant için kullanılan ölçüm düzeneği ve anten bağlantıları görülmektedir.



(a)



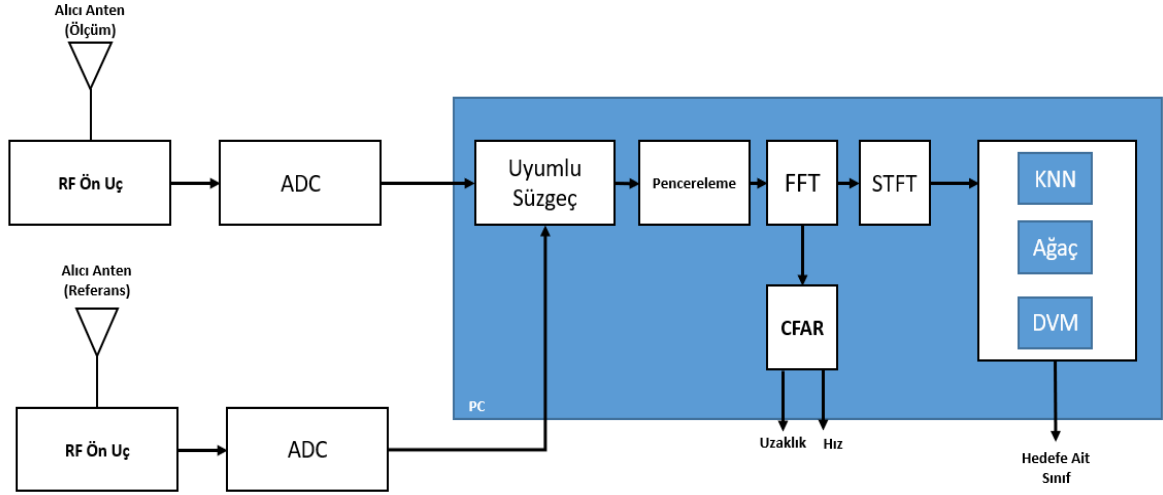
(b)

Şekil 7.27 a) C-Bant b) Ka-Bant Ölçüm Düzeneği

7.4.2. C-Bant 5G Yeni Radyo İşareti ile Dron Tespiti Testi

C-Bant (3.5 GHz) temel frekans bandında ve 40 MHz bant genişliğinde 5G Yeni Radyo İşareti, vektör İşaret Analizörü ile oluşturularak iç mekanda kurulan vektör İşaret Analizörü tabanlı bilişsel yazılım tabanlı radar donanımı ile testler gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen benzetim modeli kullanılarak, RQ77 model dron üzerinde bulunan 13,6 cm uzunluğunda ve 45,15 m/sn pervane dönüş hızına sahip dron ile test edilmiştir.

Elde edilen benzetim çıktıları ile makine öğrenimi algoritmaları eğitilmiştir. $K=5$ Çapraz Geçerlilik kullanılarak, algoritmaların başarılarının doğruluğu onaylanmıştır. Şekil 7.28’de hazırlanan test düzeneği ve RQ77 model dron ile yapılan ölçüm görülmektedir. Yapılan ölçüm sonuçları vektör İşaret Analizörü ile kayıt altına alındıktan sonra eğitilen model ile başarı sonuçları ve tahmin süresi hesaplanmıştır.



a)



b)

Şekil 7.28 C-Bant 5G YR İşareti İle Dron Tespiti Ölçümü a) Blok Şeması b) Düzenek

Toplamda 9 farklı ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde farklı hız ve radar bakış açıları kullanılmış, elde edilen sonuçlar kayıt altına alınmıştır.

Tablo 7.7 C-Bant YR İşareti İle RQ77 Model Dron İçin Ölçüm Sonucu Çıktıları

	Benzetim Başarı (%)	Ölçülen Başarı (%)	Tahmin Süresi (gözlem/saniye)
Destek Vektör Makinesi	87,6	41,2	8000
Ağaç Algoritması	82,4	35,4	9200
KNN	80,8	31,8	4800

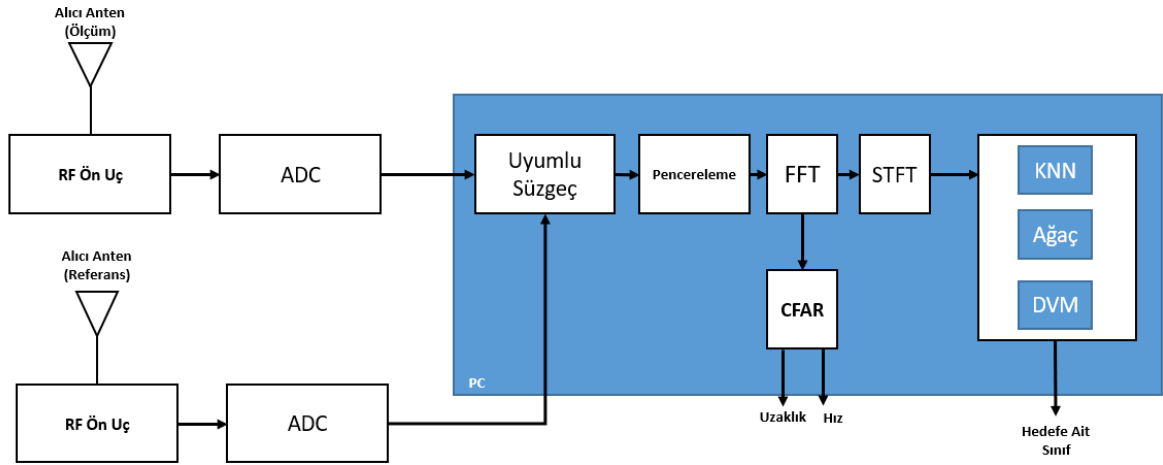
Tablo 7.7’de ölçüm sonuçları görülmektedir. Sentetik verilerden elde edilen başarı oranları ile ölçülen başarı oranları arasında %40’dan fazla fark olduğu görülmektedir. Bu farkın başlıca sebepleri hazırlanan sentetik verilerin gürültü ve oda içerisinde oluşan istenilmeyen yansımaları içermemesidir. RQ77 model dron üzerinde bulunan plastik 13,6 cm uzunluğundaki kısa pervanelerin ve düşük pal uç hızından dolayı oluşan Mikro Doppler etkilerin C-bant frekans bandında ana gövde hızından ayrılıp, algılanmasının düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sebepten dolayı başarı maksimum %41,2 olarak ölçülmüştür. En yüksek gözlem/saniye değeri Destek Vektör Makinesi algoritması ile saniyede 8000 tahmin olarak elde edilirken, en düşük gözlem/saniye değeri ise KNN algoritması ile elde edilmiştir. En yüksek başarı ise Destek Vektör Makinesi algoritması ile elde edilmiştir.

7.4.3. C-Bant 5G Yeni Radyo İşareti ile İnsan Tespiti Testi

C-Bant (3.5 GHz) temel frekans bandında ve 40 MHz bant genişliğinde 5G Yeni Radyo İşareti, vektör işaret analizörü aydınlatıcı olarak hazırlanmıştır. İç mekanda kurulan vektör işaret analizörü tabanlı bilişsel YTR donanımı ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bölüm 6.2’de oluşturulan benzetim modeli geliştirilerek elde edilen 1 m² radar kesit alanına sahip insan yürüme modeli için kullanılarak Bölüm 7.2.3.’de veri seti oluşturulmuştur. Bölüm 7.2.3’de oluşturulan veri seti kullanılarak, ölçüm verileri sınıflandırılmıştır.

Şekil 7.29’da ölçüm düzeneği görülmektedir. Gerçekleştirilen testlerde kullanılan model kollar ve bacakların yarattığı etkilerin gözlemlenebilmesi için benzetim modeline uygun olarak yüksek kol açıklığı ve bacak açıklığına dikkat edilerek, normal yürüme hızında

ölçümler gerçekleştirilmiştir. Radar sistemine yaklaşarak ve radar sisteminden uzaklaşarak farklı senaryolar için 12 farklı ölçüm gerçekleştirilmiştir.



a)



b)

Şekil 7.29 C-Bant 5G YR İşareti İle İnsan Tespiti Ölçümü a) Blok Şeması b) Ölçüm Düzeneği

Yapılan ölçüm sonuçları vektör işaret analizörü ile kayıt altına alınmıştır. Eğitilen model kullanılarak, başarı sonuçları ve tahmin süresi hesaplanmıştır.

Tablo 7.8 C-Bant 5G YR İşareti İle İnsan Tespiti Ölçüm Sonucu Çıktıları

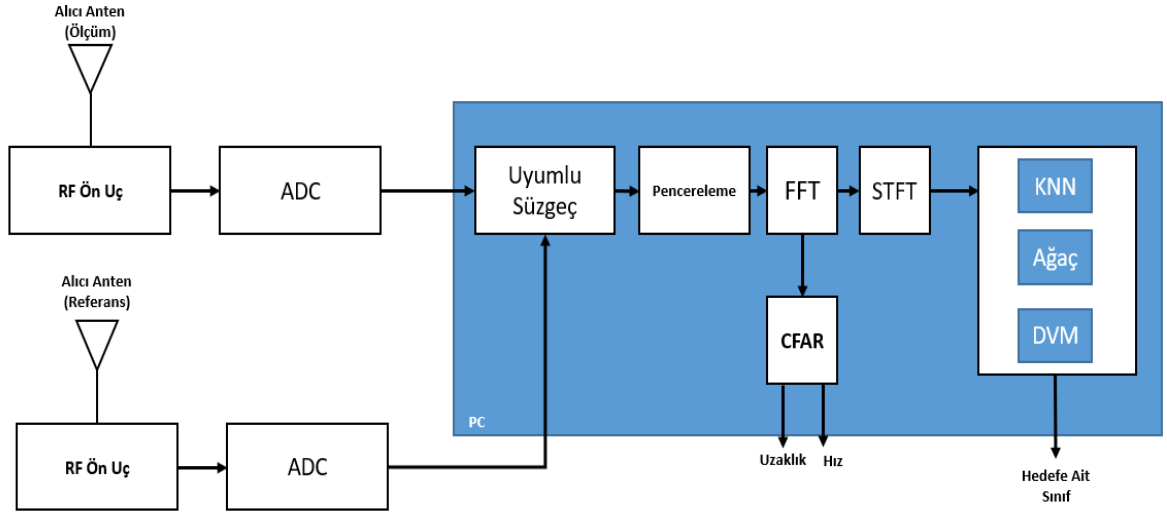
	Benzetim Başarı (%)	Ölçülen Başarı (%)	Tahmin Süresi (gözlem/saniye)
Destek Vektör Makinesi	88,1	34,5	14000
Ağaç Algoritması	83,5	27,8	19000
KNN	79,7	21,2	9800

Tablo 7.8’de ölçüm sonuçları görülmektedir. İnsan vücudunun yarattığı hareketler 3.5 GHz frekansında çok düşük Mikro Doppler frekans bileşenleri içermektedir. Özellikle gürültülü ortamlarda bu etkilerin algılanabilmesi zorlaşmaktadır. Bu sebepten dolayı gürültü bileşenleri içermeyen sentetik eğitim modeli gerçek ölçümler ile örtüşmediği için başarı oranı en yüksek %34,5 olarak ölçülmüştür.

7.4.4. Ka-Bant 5G Yeni Radyo işareti ile dron tespiti testi

Ka-Bant (35 GHz) temel frekans bandında ve 40 MHz bant genişliğinde 5G Yeni Radyo işareti, vektör işaret analizörü ile oluşturulmuştur. İç mekanda kurulan vektör işaret analizörü tabanlı bilişsel yazılım tabanlı radar donanımı ile testler gerçekleştirilmiştir. RQ77 model dron üzerinde bulunan 13,6 cm uzunluğunda ve 45,15 m/sn pervane ucu dönme hızına sahip pervaneler için 35 GHz frekansında benzetim çıktıları bölüm 7.1.2.’de üretilmiştir. En yüksek başarı Destek Vektör Makinesi ile elde edilmiştir. K=5 Çapraz Geçerlilik modeli kullanılmıştır. Bu sayede eğitim süresince elde edilen modelin başarı doğruluğu test edilmiştir.

Şekil 7.30’da hazırlanan test düzeneği blok şeması ve RQ77 model dron ile yapılan ölçüm düzeneği görülmektedir. Toplamda 12 farklı ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçları vektör işaret analizörü ile kayıt altına alınmıştır. Ardından, eğitilen model kullanılarak başarı sonuçları ve tahmin süresi hesaplanmıştır.



a)



b)

Şekil 7.30 Ka-Bant 5G YR İşareti İle Dron Tespiti a) Blok Şeması b) Ölçüm Düzenegi

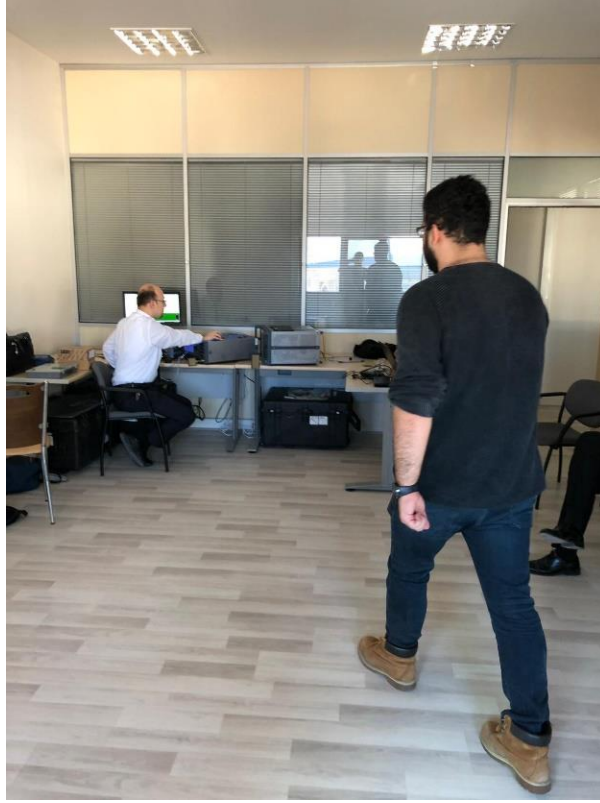
Tablo 7.9 Ka-Bant YR İşareti İle RQ77 Model Dron İçin Ölçüm Sonucu Çıktıları

	Benzetim Başarı (%)	Ölçülen Başarı (%)	Tahmin Süresi (gözlem/saniye)
Destek Vektör Makinesi	93,2	46,5	8000
Ağaç Algoritması	88,1	38,6	9200
KNN	80,8	35,4	4800

Tablo 7.9’da elde edilen ölçüm sonuçları neticesinde başarı ve tahmin değerleri görülmektedir. 35 GHz’de yapılan ölçümlerde 3.5 GHz’deki ölçümlere göre daha yüksek oranda başarı elde edilmiştir. Bunun nedeni ise 35 GHz’de paller tarafından oluşturulan Doppler frekansı bileşenlerinin daha yüksek frekanslı olmasıdır. Bu sayede bu etkiler daha kolay bir şekilde tespit edilebilmektedirler. Benzetim ile ölçülen başarılar arasında yaklaşık olarak %50 oranında fark olduğu görülmektedir. Benzetim modelinde hazırlanan sentetik veriler, yansıyan işaretleri ve iç ortamdan dolayı yansıyan işaretleri kapsamamaktadır. Bu sebepten dolayı benzetim ile ölçülen başarı arasında fark bulunmaktadır.

7.4.5. Ka-Bant 5G Yeni Radyo İşareti ile İnsan Tespiti Testi

Ka-Bant (35 GHz) temel frekans bandında ve 40 MHz bant genişliğinde 5G Yeni Radyo İşareti, vektör işaret analizörü ile oluşturularak iç mekanda kurulan vektör işaret analizörü tabanlı bilişsel yazılım tabanlı radar donanımı ile testler gerçekleştirilmiştir. Bölüm 7.1.3’de oluşturulan benzetim modeli kullanılarak elde edilen 1 m² radar kesit alanına sahip insan modeli için farklı yürüme hızlarında benzetim çıktıları kullanılarak eğitilmiş yapay zeka modeli kullanılmıştır. Şekil 7.31’de Ka-Bant 5G YR İşareti ile İnsan Tespiti Ölçüm Düzenineği görülmektedir. Ölçüme ait blok şeması Şekil 7.30.a’da görülmektedir.



Şekil 7.31 Ka-Bant 5G YR İşareti ile İnsan Tespiti Ölçümü

Yapılan ölçüm sonuçları vektör işaret analizörü ile kayıt altına alındıktan sonra eğitilen model ile başarı sonuçları ve tahmin süresi hesaplanmıştır

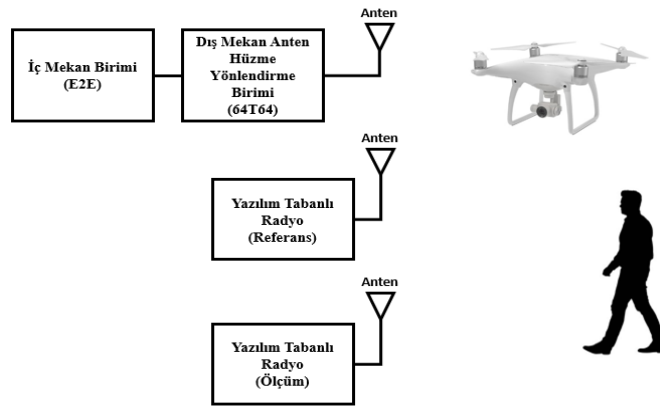
Tablo 7.10 Ka-Bant 5G YR İşareti ile İnsan Tespiti Ölçüm Sonucu Çıktıları

	Benzetim Başarı (%)	Ölçülen Başarı (%)	Tahmin Süresi (gözlem/saniye)
Destek Vektör Makinesi	93	62,1	14000
Ağaç Algoritması	89,9	56,6	19000
KNN	84,5	51,9	9800

Tablo 7.10’da ölçüm sonuçları görülmektedir. İnsan yürümesinden kaynaklı Mikro Doppler etkiler, 35 GHz taşıyıcı frekansında daha yüksek değişimler yarattığı için başarı oranı 3.5 GHz’e göre artmıştır.

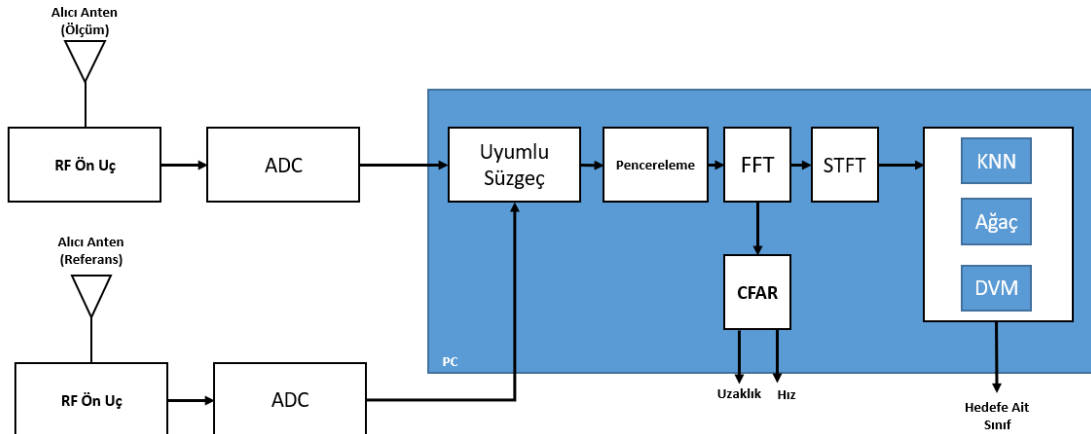
7.5. 5G Vadisi Dış Mekan Testleri

C-Bant 5G baz istasyonu sistemi olan E2E iç mekan birimi ve 64T64R hüzmeye yönlendirme sistemi aydınlatıcı olarak ve Adalm-Pluto birimi yazılım tabanlı radar olarak kullanılarak dış mekan ölçüm düzeneği kurulmuştur (Şekil 7.32).



Şekil 7.32 Dış Mekân Ölçüm Düzeneği

Kurulan düzenekte 3.5 GHz’de 200 MHz bant genişliğinde ve 200 Watt çıkış gücünde yayım yapılabilmektedir. Bu sayede, daha yüksek mesafeden hedeflerin algılanma olasılığı artırılmıştır. Geliştirilen Yazılım Tabanlı Bilişsel Pasif Radar blok diyagramı Şekil 7.33’te görülmektedir.

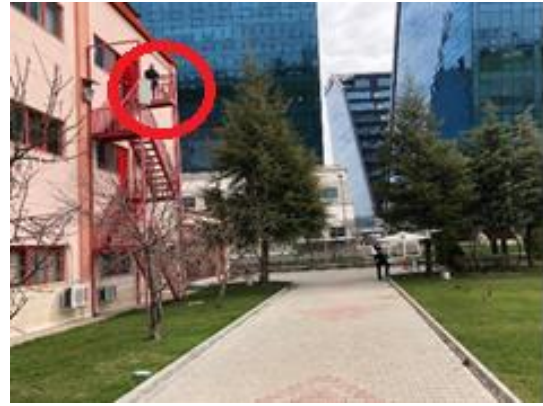


Şekil 7.33 Yazılım Tabanlı Radar Blok Diyagramı

C-bant 5G baz istasyonuna ait iç mekan ve dış mekan birimleri Şekil 7.34’te görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 7.34 5G Baz İstasyonu a) E2E İç Mekân Birimi b) 64T64R Anten Birimi

7.5.1. C-Bant 5G Yeni Radyo İşareti ile Dron Tespiti Testi

C-Bant (3.5 GHz) temel frekans bandında, 200 Watt çıkış gücüne ve 200 MHz bant genişliğinde 5G Yeni Radyo İşareti, 5G baz istasyonu ile oluşturularak dış mekanda kurulan ve bilişsel yazılım tabanlı radar donanımı ile testler gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan veri setinde, Şekil 7.35’te görülen DJI marka Phantom 4 model dron üzerinde bulunan 23,88 cm uzunluğunda ve 152 m/sn pervane ucu dönme hızına sahip pervaneler için benzetim çıktıları üretilmiştir.

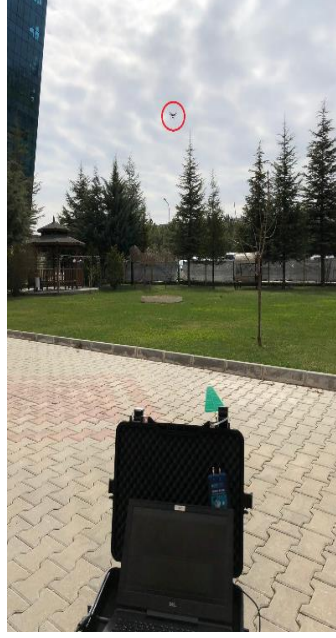


Şekil 7.35 Ölçümde Kullanılan Phantom 4 Dron

Phantom 4 model dron daha yüksek pervane dönme hızına ve daha yüksek ana gövde hızına sahiptir. Şekil 7.36'da aydınlatıcı olarak kullanılan C-bant 5G YR baz istasyonu ile yapılan ölçümler görülmektedir. Toplamda 14 farklı ölçüm yapılmıştır.



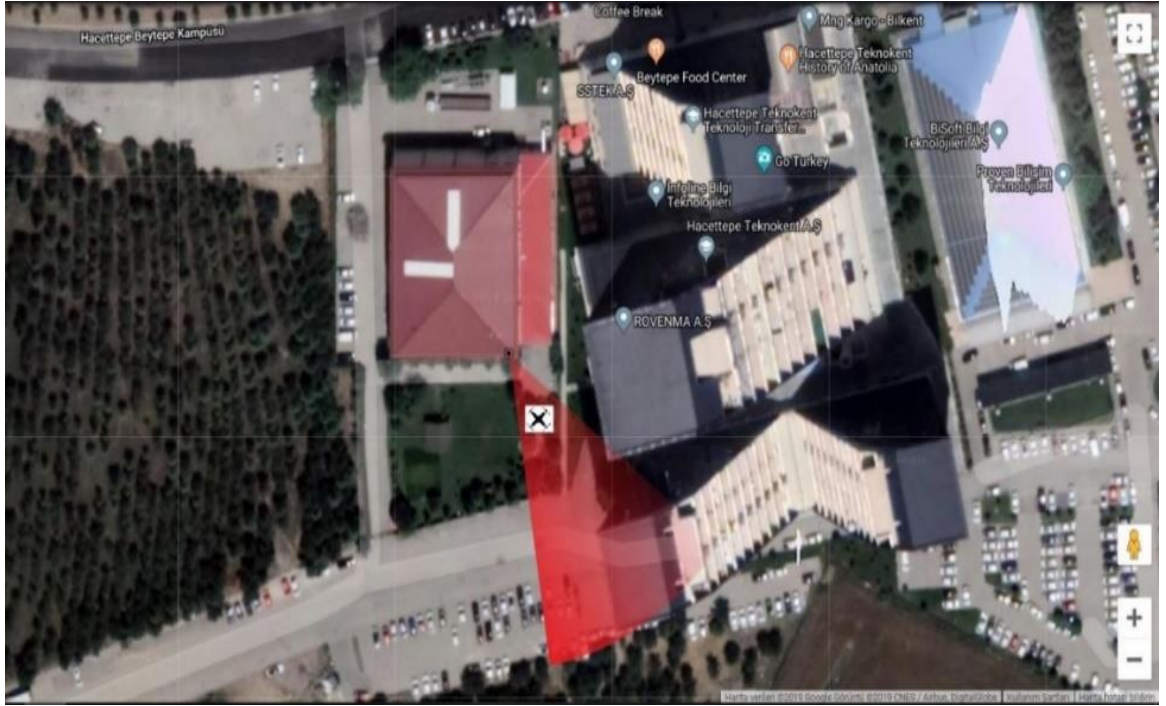
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 7.36 a) Ölçüm 1 b) Ölçüm 2 c) Ölçüm 3 d) Harita Gösterim

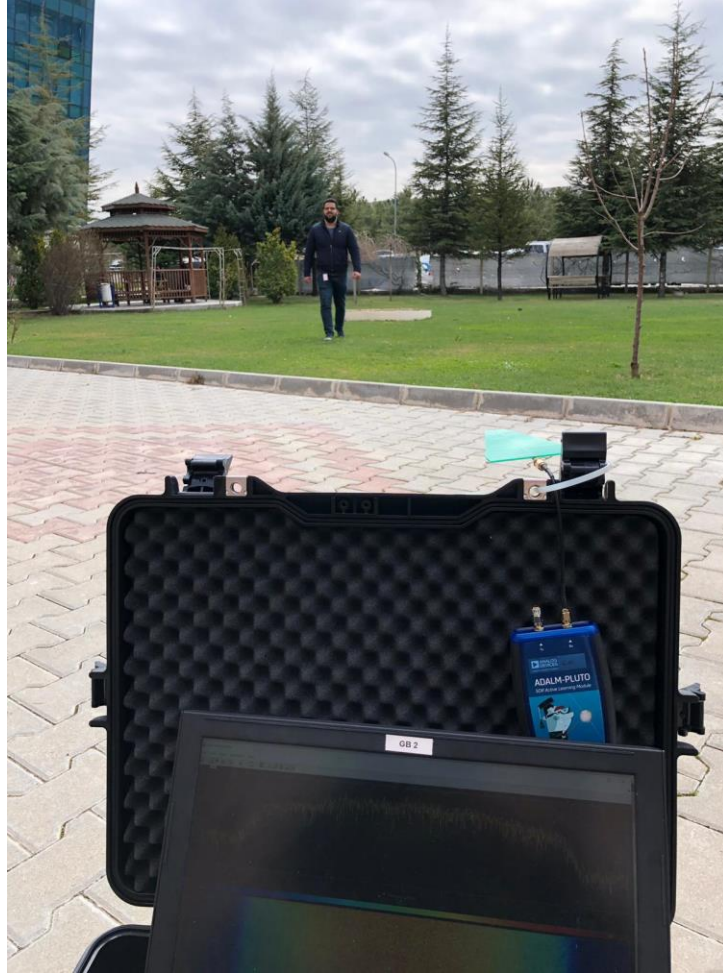
Tablo 7.11 Phantom 4 Model Dron İçin Ölçüm Sonucu Çıktıları

	Benzetim Başarı (%)	Ölçülen Başarı (%)	Tahmin Süresi (gözlem/saniye)
Destek Vektör Makinesi	87,6	53,4	8000
Ağaç Algoritması	82,4	48,2	9200
KNN	80,8	44,0	4800

Tablo 7.11’de Phantom 4 model dron için 5G baz istasyonu ile gerçekleştirilen sonuçlar görülmektedir. Benzetim modeli sonuçları ile ölçülen gerçek sonuçlar arasında yaklaşık olarak %30’a yakın bir fark olduğu görülmektedir. Ölçülen başarı, benzetim modelinde hesaplanan başarıdan daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi benzetim modelinin gürültü ve çoklu yansıma bileşenlerini içermemesidir. Yine de RQ77 model drona göre başarı çok daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedenleri ise; ölçümlerin açık sahada gerçekleştirilmesi, aydınlatıcı çıkış gücünün çok daha yüksek güçte olması ve Phantom 4’ün pervane dönme hızının çok daha yüksek olmasından kaynaklı oluşan Mikro Doppler frekans bileşenlerinin daha kolay ayırt edilebilir olmasıdır.

7.5.2. C-Bant 5G Yeni Radyo İşareti ile İnsan Tespiti Testi

C-Bant (3.5 GHz) temel frekans bandında, 200 Watt çıkış gücüne ve 200 MHz bant genişliğinde 5G Yeni Radyo İşareti, 5G baz istasyonu ile oluşturularak dış mekanda kurulan ve bilişsel yazılım tabanlı radar donanımı ile testler gerçekleştirilmiştir. Bölüm 7.1.3’de oluşturulan benzetim modeli geliştirilerek elde edilen 1 m² radar kesit alanına sahip insan için hazırlanan model kullanılmıştır. Şekil 7.37’de hazırlanan ölçüm düzeneği görülmektedir.



Şekil 7.37 5G Açık Saha İnsan Tespit Ölçüm Düzenegi

Yapılan Ölçüm sonuçları yazılım tabanlı radar modülü tarafından bilgisayara USB arayüzü ile iletilip, daha önce eğitilen model ile başarı sonuçları ve tahmin süresi hesaplanmıştır.

Tablo 7.12 C-Bant 5G YR İşareti ile İnsan Tespiti Ölçüm Sonucu Çıktıları

	Benzetim Başarı (%)	Ölçülen Başarı (%)	Tahmin Süresi (gözlem/saniye)
Destek Vektör Makinesi	88,1	26,3	14000
Ağaç Algoritması	83,5	21,7	19000
KNN	79,7	19,1	9800

Tablo 7.12’de ölçüm sonuçları görülmektedir. İnsan yürümesi hareketinde en yüksek frekanslı bileşenler kol ve bacak hareketleri tarafından oluşturulur. 3.5 GHz taşıyıcı frekansında oluşan Mikro Doppler bileşenlere ait frekanslar çok düşük olduğu için radar alıcısı tarafından tespit edilebilmesi zordur. Özellikle benzetim modeli içerisinde gürültü ve çoklu yol yansıma bileşenlerini içermediği için başarı oranı benzetim modeline göre çok daha düşük çıkmıştır.

7.6. Literatür Karşılaştırması

Bu çalışma ile önceden gerçekleştirilen 4 farklı çalışma karşılaştırılmıştır.

Tablo 7.13 Dron Tespiti Literatür Karşılaştırma Tablosu

Çalışma	Radar Tipi	Frekans Aralığı	İşaret Tipi	Bant Genişliği	Hedef Sınıflandırma Başarı Oranı (%)
Guo [31]	Aktif Radar	24 GHz	Sürekli Dalga	50 kHz (Temel bant)	%99,95
Habermann [32]	Aktif Radar	-	-	-	%99,3
Zhang [33]	Aktif Radar	9.8 GHz ve 24 GHz	Sürekli Dalga	8 kHz (Temel bant)	%89,14 %97,30
Chadwick [34]	Pasif Radar	2.150 GHz	3G	60 MHz	%0
Bu Çalışma	Pasif Radar	3.5 GHz ve 35 GHz	5G	200 MHz	%53,4 %46,5

Tablo 7.13’te önceden gerçekleştirilmiş literatürde bulunan 4 farklı çalışma ve bu çalışmalar süresince oluşturulan radar özellikleri ve bu radarlar ile gerçekleştirilen testler sonucu elde edilen doğru hedef sınıflandırma başarı oranları görülmektedir.

Guo [31] şehir merkezi gibi dronların tehlike yarattığı bölgelerde radar görüş hattının bozulmasından en düşük seviyede etkilenecek hedef tespiti ve sınıflandırması üzerine çalışmıştır. Bu doğrultuda uygun fiyatlı 24 GHz merkez frekansında rafta hazır sürekli dalga radar prototipini kullanarak farklı bölgelerde ölçümler gerçekleştirmiştir. Elde edilen ölçüm verileri üzerinde özellik çıkarım yöntemleri kullanarak %99,95 doğruluk ile dron tespiti ve sınıflandırması gerçekleştirmiştir.

Habermann [32] daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak dron ve helikopter sınıflandırmasında pal sayısı, pal boyu ve pal dönüş hızı gibi dönen radar işaretlerinden elde edilen veriler yerine pallerden yansıyan radar işaretlerinin oluşturduğu I ve Q işaretlerinin oluşturduğu noktalar bulutunu kullanarak sınıflandırma gerçekleştirmiştir. Bu sayede radar frekansından bağımsız olarak hedef sınıflandırmayı amaçlamıştır. Bu doğrultuda benzetim modeli hazırlayarak farklı Yapay Sinir Ağı modelleri eğitip, test etmiştir. Bu testler sonucunda radar frekansından bağımsız olarak en düşük %99,3 doğruluk ile dron ve en düşük %88,7 doğruluk ile helikopter sınıflandırması gerçekleştirmiştir.

Zhang [33] dron ve helikopter hedef sınıflandırmasında doğruluk oranını artırmak amacıyla 9.8 GHz ve 24 GHz çift merkez frekansında yayın yapan sürekli dalga radarı geliştirmiştir. Eş zamanlı olarak iki farklı frekansta yayın yapan aralarında 1 metre mesafe bulunan radarlardan elde edilen çıktılar DVM makine öğrenme algoritmasına tabi tutulmuştur. Radarların birbirlerinden ayrı olarak yapıldığı ölçümlerde 9.8 GHz merkez frekansına sahip radar hedefi %89,14 doğruluk ile sınıflandırırken, 24 GHz merkez frekansına sahip radar hedefi %97,30 doğruluk ile sınıflandırmıştır. Eş zamanlı olarak iki radarın verileri kullanılarak dron sınıflandırması gerçekleştirildiğinde %98,31 doğruluk ile dron sınıflandırılmıştır. Bu sayede hedef sınıflandırma doğruluk oranı artırılmıştır.

Chadwick [34] Yazılım Tabanlı Radyo donanımı kullanarak Pasif Radar sistemi geliştirmiştir. Geliştirilen bu sistem 2150 MHz taşıyıcı frekansında 3G GSM işaretlerini aydınlatıcı olarak kullanmıştır. Küçük boyutlu dronlar kullanılarak yapılan ölçümler sonucunda hedef tespiti gerçekleştirilmiştir. Ancak, dron sınıflandırması için gerekli olan Mikro Doppler etkileri çıkartılabilmemesine rağmen, sınıflandırma için yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır.

Gerçekleştirilen bu çalışmada Guo [31], Habermann [32] ve Zhang'dan [33] farklı olarak pasif radar yapısı kullanılmıştır. Bu çalışma sonucu elde edilen doğru hedef sınıflandırma başarı oranı diğer çalışmalara göre yaklaşık %40 daha az olsa da

gerçekleştirilen bu çalışma diğler 3 çalışmanın etkilendiği şehir merkezleri gibi radar görüş alanının binalar gibi engeller yüzünden kesilmesi ve bu sebepten dolayı hedef tespit edememe/kaçırma problemini yaşamamaktadır. Chadwick'den [34] farklı olarak bu çalışmada 3.5 GHz ve 35 GHz merkez frekansında 5G haberleşme aydınlatıcıları kullanılmıştır. Bundan dolayı hedeften yansıyan Mikro Doppler çıktıları daha yüksek frekans değerine sahiptir. Bu sayede sınıflandırma için kullanılan Mikro Doppler çıktıları yansıyan radar işareti içerisinde daha kolay ayırt edilerek, Pasif Radar ile hedef sınıflandırması gerçekleştirilebilmiştir.

8. SONUÇ

Şehir içi ve kalabalık ortamlarda, dron ve insansız hava aracı tespiti şehir güvenliği için önem arz etmektedir. Kalabalık ve yüksek binaların bulunduğu ortamlarda, geleneksel radarlar ile dron tespiti mümkün olamamaktadır. Bundan dolayı şehir merkezlerinde, yüksek ve sık binaların bulunduğu ortamlarda, maliyet ve sistem performansı için Pasif Radar sistemleri kullanılması amaçlanmaktadır. Bu tez kapsamında literatür çalışmaları incelenmiştir. Yüksek çalışma frekansı, yüksek bant genişliği ve şehir içlerinde yüksek sayıda aydınlatıcı olarak kullanılabilirliğinden dolayı 5G baz istasyonu işaretleri Pasif Radar mimarisinde aydınlatıcı olarak seçilmiştir.

Pasif Radar'larda yapısı gereği farklı frekans aralıklarında çalışabilen düşük maliyetli ve çok sayıda kullanılması amaçlanan almalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez kapsamında yazılım tabanlı radar prototipi geliştirilmiştir. 5G aydınlatıcıları yüksek frekans ve geniş bant genişliğine sahip oldukları için Mikro Doppler ile hedef tipinin ve özelliklerinin çıkartılmasına olanak sağlarlar. Bu bağlamda V.Chen [14] tarafından sunulan Mikro Doppler benzetim modeli kod dizinleri geliştirilip, makine öğrenme algoritmalarının eğitimi için içerisinde gürültü bileşeni bulunmayan sentetik işaretler üretilmiştir. Geliştirilen insan yürüme benzetim modeli ile farklı boy, kilo, yürüme hızı, radar kesit alanı ve radar bakışı için çıktılar üretilmiştir. Ayrıca, farklı ana gövde dönüş hızı, radar kesit alanı, radar bakış açısı, radar frekansı, pervane uzunluğu, pervane genişliği, pervane dönüş hızı ve uzaklık değerleri değiştirilerek dronlar için veri seti oluşturulmuştur. İnsan yürümesi ve dron uçuşu için ayrı ayrı veri setleri hazırlanmıştır. Hazırlanan etiketli veri setleri Destek Vektör Makinesi, Ağaç Algoritması ve En Yakın Komşu (KNN) Algoritması kullanılarak makine öğrenmesi modelleri eğitilmiştir. Bu eğitimler sırasında öz nitelik değerleri çıkartılmamış, eğitimler ham veriler ile gerçekleştirilmiştir.

Hazırlanan veri setlerinin doğruluğunun kontrol edilmesi amacıyla laboratuvar ortamında 3.5 GHz temel frekansında çalışan basit bir yazılım tabanlı sürekli dalga radarı prototipi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu prototip ile model helikopter pervaneleri tarafından oluşan Mikro Doppler etkiler incelenmiştir. Geliştirilen eğitim modelleri ile başarı oranları ölçülmüştür. Geliştirilen makine öğrenmesi modellerinin, K Çapraz Geçerlilik metodu ile doğrulukları test edilmiştir. Benzetim sonucu elde edilen veriler ile ölçülen verilerin %82 oranında eşleştiği görülmüştür. Bu sonuçlar neticesinde, sentetik veri setinin

kullanılabileceği kanısına varılmıştır. Sentetik verilerden elde edilen veri seti ile Bilişsel Frekans ile Modüleli Sürekli Dalga Yazılım Tabanlı Radar prototipi geliştirilerek, test edilmiştir. Testler sonucunda %64 başarı oranı ile Destek Vektör Makinesi makine öğrenme algoritmasıyla en yüksek başarı oranı elde edilmiştir. Elde edilen başarı oranı, benzetim başarı oranından daha düşüktür. Bunun nedenleri ise, benzetim modelinin içerisinde gürültüsüz veri barındırması, geliştirilen radar prototipinin çıkış gücünün düşük olması ve öz nitelik çıkarımı gibi işlemlerin gerçekleştirilmemiş olmasıdır. Elde edilen sistem %60 başarı oranı üzerinde hedef sınıflandırmasını gerçekleştirebilmiştir.

Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu Başkanlığı tarafından kullanımına izin verilen, 5G Vadisi kampüsü bünyesinde iç mekân ve dış mekân testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler kapsamında Vektör İşaret Üretici ve Vektör İşaret Analizörü kullanılarak C-Bant ve Ka-Bant frekans aralıklarında 5G Yeni Radyo işaretleri oluşturulmuştur. Bilişsel pasif yazılım tabanlı radar prototipi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen bu prototipler ile iç mekân ve dış mekân ölçümleri yapılmıştır.

İç mekân dron tespiti testinde, 13,6 cm pervane uzunluğu ve 45,15 m/s motor dönüş hızına sahip RQ77 model dron kullanılmıştır. 3.5 GHz 5G YR işareti için benzetim çalışmaları gerçekleştirildiğinde en yüksek başarı %66 ile Destek Vektör Makinesi algoritması ile elde edilmiştir. En düşük başarı ise %52 ile KNN algoritmasıdır. Gerçek zamanlı uygulamalar için önemli bir kriter olan hesaplama süresi ise KNN algoritması için 4800 gözlem/sn, DVM algoritması için 8000 gözlem/sn ve Ağaç algoritması için 9200 gözlem/sn olarak hesaplanmıştır. Gözlem süreleri eğitim modelleri değiştirilmediği için diğer modellerde de aynı olarak ölçülmüştür. 3.5 GHz 5G YR işareti ile yapılan ölçüm sonuçları içerisinde en yüksek başarı %41,2 olarak DVM algoritması ile elde edilmiştir. 35 GHz 5G YR işareti ile yapılan ölçümlerde ise en yüksek başarı artmış ve oran %46,5 olarak ölçülmüştür. Mikro Doppler verileri, pervane hızından elde edildiği için küçük boyutlu, düşük hızlı ve radar kesit alanı düşük pervaneli dronlar için hedef tespit başarı oranı düşük olmaktadır. Bu sebepten dolayı düşük İşaret/Gürültü oranı elde edilmektedir. Bu da ölçümlerde başarının düşük olmasına neden olmaktadır. Daha yüksek başarı oranları için çıkış gücü veya temel frekans değerinin yükseltilmesi gerekmektedir.

C bant frekans aralığında, iç mekân ve dış mekân insan tespit ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerde elde edilen en yüksek başarı oranlarının %35'in altında olduğu görülmüştür. C bant frekans aralığı; gürültülü ortamlarda, insan yürümesi esnasında hareket eden kol ve

bacak hareketlerini tespit edebilmek için yeterli değildir. Başarı oranının artırılabilmesi için yüksek frekans aralıklarında ölçümler gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ka bant 5G YR işaretleri insan tespiti için kullanılabilir. Bu kapsamda Ka bant 5G YR işaretleri ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde en yüksek başarı DVM algoritması ile %62,1 olarak hesaplanmıştır.

Dış mekân dron tespit ölçümünde, pervane uzunluğu 23,88 cm, motor dönüş hızı 11592 rpm ve pervane uç hızı 152 m/s olan Phantom 4 model dron kullanılmıştır. Yapılan testlerde maksimum başarı DVM algoritması ile %53,4 olarak ölçülmüştür.

Gerçekleştirilen çalışmada makine öğrenmesi algoritmalarında en yüksek yüzde doğruluk değeri DVM algoritmasıyla elde edilmiştir. Ancak yüzde doğruluk ölçütü makine öğrenmesi algoritmalarının performanslarını belirtmek için yeterli bir ölçüt değildir. Toplam sistem performansını belirlemek için doğruluk, duyarlılık ve kesinlik değerleri kullanılarak hesaplanan F-ölçütü değeri incelenmelidir. Çalışma süresince oluşturulan helikopter ve insan yürümesi veri setlerini kullanarak hazırlanan modellerde en yüksek F-ölçütü değerleri doğruluk ölçütü ile benzer şekilde DVM algoritmasıyla elde edilmiştir. DVM algoritmasının F-ölçütü değeri helikopter veri seti için 3.5 GHz'de %86,82 ve 35 GHz'de %92,74 olarak ve insan yürümesi veri seti için 3.5 GHz'de %88,08 ve 35 GHz'de %93,62 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda hedefe ait Mikro Doppler çıktılar kullanılarak DVM algoritmasıyla 3.5GHz ve 35 GHz'de Pasif Radar ile dron tespiti ve sınıflandırması 5G aydınlatıcıları kullanılarak yapılabilmektedir. Ancak 3.5 GHz 5G YR aydınlatıcıları insan sınıflandırması için yeterli değildir.

İlerleyen çalışmalarda ham verilerden öz nitelik değerleri çıkartılarak başarı oranları artırılabilir. Ayrıca, iç ve dış mekân ölçümlerinde tek aydınlatıcı kullanılmıştır. İlerleyen çalışmalarda aydınlatıcı ve almaç sayısı artırılarak multistatik ağ yapısı ile başarı oranlarında artış sağlanacağı düşünülmektedir. Gerçek zamanlı uygulamalar için Temel Bileşen Analizi (PCA) kullanılarak tahmin süresi azaltılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] J. S. Patel, F. Fioranelli, and D. Anderson, “Review of radar classification and RCS characterisation techniques for small UAVs or drones,” *IET Radar, Sonar and Navigation*. 2018.
- [2] V. C. Chen, *The micro-doppler effect in radar*. 2011.
- [3] B. Erol and S. Z. Gurbuz, “A kinect-based human micro-doppler simulator,” *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, 2015.
- [4] O. H. Y. Lam, R. Kulke, M. Hagelen, and G. Mollenbeck, “Classification of moving targets using mirco - Doppler radar,” in *Proceedings International Radar Symposium*, 2016.
- [5] A. Schröder *et al.*, “Numerical RCS and micro-Doppler investigations of a consumer UAV,” in *Target and Background Signatures II*, 2016.
- [6] V. C. Chen, D. Tahmoush, and W. J. Miceli, *Radar micro-doppler signatures: Processing and applications*. 2014.
- [7] H. Griffiths and C. Baker, “Passive bistatic radar,” in *Principles of Modern Radar: Vol. III: Radar Applications*, 2014.
- [8] K. Kulpa, M. Malanowski, P. Samczynski, and B. Dawidowicz, “The concept of airborne passive radar,” in *2011 Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, MRRS-2011 - Proceedings*, 2011, pp. 267–270.
- [9] K. Kulpa, M. Malanowski, J. Misiurewicz, and P. Samczynski, “Passive radar for strategic object protection,” in *2011 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems, COMCAS 2011*, 2011.

- [10] J. E. Palmer, H. Andrew Harms, S. J. Searle, and L. M. Davis, "DVB-T passive radar signal processing," *IEEE Trans. Signal Process.*, 2013.
- [11] C. Clemente and J. J. Soraghan, "Passive Bistatic Radar for helicopters classification: A feasibility study," in *IEEE National Radar Conference - Proceedings*, 2012.
- [12] B. Knoedler, R. Zemmari, and W. Koch, "On the detection of small UAV using a GSM passive coherent location system," in *Proceedings International Radar Symposium*, 2016, vol. 2016-June.
- [13] G. Fang, J. Yi, X. Wan, Y. Liu, and H. Ke, "Experimental Research of Multistatic Passive Radar with a Single Antenna for Drone Detection," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 33542–33551, Jun. 2018.
- [14] V. C. Chen, F. Li, S. S. Ho, and H. Wechsler, "Analysis of micro-Doppler signatures," in *IEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation*, 2003, vol. 150, no. 4, pp. 271–276.
- [15] Ö. T. Alemdaroğlu, Ç. Candan, and S. Koç, "İnsan hareketlerinden mikro-doppler özelliklerin çıkarılması," in *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2014 - Proceedings*, 2014, pp. 726–729.
- [16] M. Malanowski and K. Kulpa, "Analysis of integration gain in passive radar," in *Proceedings of the 2008 International Conference on Radar, Radar 2008*, 2008, pp. 323–328.
- [17] F. H. and A. A. Raja Abdullah, Asem A. Salah, A. Ismail, "Ground Moving Targer Detection Using LTE-Based Passive Radar," in *2015 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics and Telecommunications*, 2015, vol. 1, no. 1, p. 70.

- [18] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*. 2008.
- [19] Ö. T. Alemdaroğlu, Ç. Candan, and S. Koç, “The radar application of micro Doppler features from human motions,” in *IEEE National Radar Conference - Proceedings*, 2015.
- [20] K. Gronowski, P. Samczynski, K. Stasiak, and K. Kulpa, “First results of air target detection using single channel passive radar utilizing GPS illumination,” in *2019 IEEE Radar Conference, RadarConf 2019*, 2019.
- [21] “Meteksan Retinar.” [Online]. Available: http://www.meteksan.com/media/file/retinar-ptr-katalog_1532520602.pdf.
- [22] “Aselsan ACAR.” [Online]. Available: https://www.aselsan.com.tr/ACARK_Gozetleme_Radari_Serisi_2437.pdf.
- [23] “Aselsan Kalkan.” [Online]. Available: https://www.aselsan.com.tr/KALKANII_Orta_Irtifa_3B_Mobil_Hava_Savunma_Erken_Ikaz_Radari_4874.pdf.
- [24] “ASelsan EİRS.” [Online]. Available: https://www.aselsan.com.tr/EIRS_Erken_Ihbar_Radar_Sistemleri_3161.pdf.
- [25] “BMEWS.” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Ballistic_Missile_Early_Warning_System.
- [26] “AN/FPS-118.” [Online]. Available: <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/01.oth/karte009.tr.html>.
- [27] B. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. 2000.
- [28] “Adalm Pluto.” [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/news->

marketing-collateral/product-highlight/ADALM-PLUTO-Product-Highlight.pdf.

- [29] B. W. Dilsaver, “Experiments with GMTI Radar Using Micro-Doppler,” no. June, p. 107, 2013.
- [30] R. Boulic, N. M. Thalmann, and D. Thalmann, “A global human walking model with real-time kinematic personification,” *Vis. Comput.*, 1990.
- [31] X. Guo, C. S. Ng, E. De Jong, and A. B. Smits, “Micro-doppler based mini-UAV detection with low-cost distributed radar in dense urban environment,” *EuRAD 2019 - 2019 16th Eur. Radar Conf.*, pp. 189–192, 2019.
- [32] D. Habermann, E. Dranka, Y. Caceres, and J. B. R. Do Val, “Drones and helicopters classification using point clouds features from radar,” *2018 IEEE Radar Conf. RadarConf 2018*, pp. 246–251, 2018.
- [33] P. Zhang, L. Yang, G. Chen, and G. Li, “Classification of drones based on micro-doppler signatures with dual-band radar sensors,” in *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, 2017.
- [34] A. D. Chadwick, “Micro-drone detection using software-defined 3G passive radar,” in *IET Conference Publications*, 2017.