

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RADAR İLE İHA TESPİTİ

GÖKHAN GÜLLÜOĞLU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RADAR İLE İHA TESPİTİ

GÖKHAN GÜLLÜOĞLU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. İLYAS KANDEMİR

GEBZE
2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED
SCIENCES

DETECTION UAV WITH RADAR

GÖKHAN GÜLLÜOĞLU

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. İLYAS KANDEMİR

GEBZE

2023



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 13/07/2023 tarih ve 2023/39 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 29/09/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Gökhan GÜLLÜOĞLU'un tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : PROF.DR.İLYAS KANDEMİR

ÜYE

: DOÇ.DR.MEHMET FATİH HOCAOĞLU

ÜYE

: DR.ÖĞR.ÜYESİ İBRAHİM FATİH GENÇ

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Belirli bir bölge üzerinde İnsansız Hava Araçları (İHA)'nın tespit ve konumlandırma yöntemlerinin ve özelde radar ile konumlandırmanın nasıl elde edildiğinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Literatürde yer alan İHA ve radar tipleri ile konumlandırma yöntemleri incelenmiştir. İki adet MMW radar, Monostatik ve Multistatik konumlandırılarak kullanılmış ve 4 kanatlı bir quadrocopter İHA'nın konumlandırılması karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

Bu çalışmada, İHA sınıflandırması ve tespit yöntemlerinin literatürdeki yeri incelenmiştir. Radarın temel çalışma prensibi ile konumlandırma yöntemleri üzerinde durulmuştur. Son olarak da kalman filtresi kullanılarak eldeki radar ile İHA'nın tespiti sağlanmıştır. Monostatik radar ile basit multistatik radar uygulamalarının, konumlandırma hassasiyetlerine etkisi incelenmiş ve multisatetik radarların daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Konumlandırma, Radar, Multistatik, Monostatik.

SUMMARY

It is aimed to examine the detection and positioning methods of Anmened Air Vehicles (UAV) over a certain region and how positioning is obtained with radar in particular. UAV and radar types and positioning methods in the literature were examined. Two mmWave radars were used with monostatic and multistatic positioning and the positioning of a 4-wing quadrocopter UAV was comparatively analyzed.

In this work, the place of UAV classification and detection methods in the literature is examined. The basic working principle of radar and positioning methods are emphasized. Finally, the kalman filter is used to detect the UAV with the available radar. The effects of Monostatic radar and simple multistatic radar applications on positioning accuracy are analyzed and it is concluded that multistatic radar is more effective.

Key Words: Positioning, Radar, Multistatic, Monostatic.

TEŞEKKÜR

Akademik hayatımda yol gösterici olan ve yüksek lisans çalışmamda desteğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. İlyas KANDEMİR'a, çalışmalarımnda bana her zaman yardımcı olan ve tecrübelerini paylaşan değerli arkadaşım Ali İhsan GÜLLÜ'ye ve göstermiş olduğu desteklerinden dolayı sevgili eşim Aslıhan Can GÜLLÜOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLOLAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
2. İHA ÇEŞİTLERİ VE TESPİT YÖNTEMLERİ	3
2.1. İHA Çeşitleri ve Kullanım Alanları	3
2.2. İHA Tespit Yöntemleri	9
2.2.1. Optik Tespit	10
2.2.2. Akustik Tespit	11
2.2.3. Pasif Radar ile Tespit	13
2.2.4. Radar ile Tespit	14
3. RADAR İLE İHA TESPİT YÖNTEMİ	15
3.1. Radarın Tarihçesi	17
3.2. Radar Uygulamaları ve Mimari Örnekleri	19
3.2.1. Taktik Radarlar	19
3.2.2. ISR(Intelligence, Surveillance and Reconnaissance) Radarlar	25
3.2.3. Özelleştirilmiş Radarlar	27
3.2.4. Monostatik, Bistatik ve Multistatik Radar Mimarileri	31
3.3. Multistatik ve Monostatik Konumlandırılmış MMW(Milimeterwave) Radar ile İHA'nın Kalman Filtresi Tespiti	32
3.3.1. MMW Radarın Özellikleri	32
3.3.2. Kalman Filtresi	34

3.3.3. Multistatik ve Monostatik Konumlandırılmış Radar ile Simülasyon Uygulamasında Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılmalı Sonuçları	37
3.3.4. Multistatik ve Monostatik Konumlandırılmış Radar ile Deneysel Uygulamada Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılmalı Sonuçları	40
4. SONUÇLAR ve YORUMLAR	48
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	50
EKLER	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar Kısaltmalar

∇	: Nabla operatörü
γ	: Yayılım sabiti
E	: Elektrik alan vektörü
ε	: Dielektrik sabiti
Hz	: Hertz
F	: Kuvvet
km	: Kilometre
H	: Manyetik alan vektörü
sn	: Saniye
İHA	: İnsansız Hava Aracı
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi
UAV	: Unmanned Aerial Vehicle
MMW	: Milimetre Dalga
NATO	: Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü (North Atlantic Treaty Organization)
NNAG	
JCGUAV	: NATO Naval Armaments Group, Joint Capabilities Group for UAVs
JUAS	
COE	: The Joint Unmanned Aircraft Systems Center of Excellence

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: İHA sistemi askeri görev alanları.	9
2.2: Açık gökyüzünde, 200 m mesafedeki İHA'nın kamera ile tespiti (LWIR uzun dalga kızılötesi, 20 mm odak mesafesi).	10
2.3: Bulutlu bir havada, 50 m mesafedeki İHA'nın kamera ile tespiti (LWIR uzun dalga kızılötesi, 20 mm odak mesafesi).	10
3.1: Hareket eden bir nesneyi algılamak için doppler kaymasını kullanan bir CW radarı gösterimi.	20
3.2: Doğrusal bir FMCW radar sisteminde frekans ve zaman arasındaki ilişki.	21
3.3: Tek frekanslı bir CW radar sinyalinin bir parçası.	22
3.4: Üst sinyalin sıfır derecelik bir faz ve alt sinyalin 45 derecelik bir faz sergilemekte olduğunu gösterir (üst sinyale göre).	23
3.5: Gönderilen ve alınan frekansın, zamanın ile atım frekansının bir fonksiyonun olarak gösterimi.	23
3.6: Üç gönderme-alma çifti kullanarak üçgenleme (hedef üç elipsin kesiştiği noktada bulunur. tx bir verici konumudur ve rx bir alıcı konumudur.)	29
3.7: Monostatik ve bistatik radar mimarisi gösterimi.	31
3.8: Multistatik radar mimarisi gösterimi.	31
3.9: Kalman filtresine ait program kodlarının gösterimi.	36
3.10: Simülasyon uygulamasında elde edilen verilerin gösterimi.	38
3.11: Simülasyon uygulamasında elde edilen tahminlere ait hata oranları.	39
3.12: Radar 1'e ait SNR filtresiz tespitler (senaryo1).	40
3.13: Radar 1'e ait SNR filtresiz k-means gruplandırma uygulaması (senaryo1).	41
3.14: Radar 1'e ait izlere SNR 250 dBm filtre uygulaması (senaryo1).	41
3.15: Radar 2'e ait SNR filtresiz tespitler (senaryo1).	42
3.16: Radar 2'e ait SNR filtresiz k-means gruplandırma uygulaması (senaryo1).	42
3.17: Radar 2'e ait izlere SNR 250 dBm filtre uygulaması (senaryo1).	43
3.18: Radar 1'e ait SNR filtresiz tespitler (senaryo2).	44

3.19:	Radar 1'e ait izlere SNR 250 dBm filtre uygulaması (senaryo2).	44
3.20:	Radar 1'e ait izlere SNR 250dBm ve kalman filtresi uygulaması (senaryo2).	45
3.21:	Radar 2'e ait SNR filtresiz tespitler (senaryo2).	45
3.22:	Radar 2'e ait izlere SNR 250 dBm filtre uygulaması (senaryo2).	46
3.23:	Radar 2'e ait izlere SNR 250dBm ve kalman filtresi uygulaması (senaryo2).	46
3.24:	Radar 1 ve Radar 2'ye ait izlere MMSE uygulaması (senaryo2).	47



TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Kapsamlı İHA sınıflandırması.	5
2.2: NNAG JCGUAV İHA sınıflandırması.	6
2.3: Avrupa sivil İHA yol haritası sınıflandırması.	6
2.4: ABD JUAS İHA sınıflandırması.	7
2.5: UVS uluslararası İHA sınıflandırması.	7
3.1: Simülasyon uygulamasında elde edilen Radar1'e ait veriler.	39
3.2: Simülasyon uygulamasında elde edilen Radar2'e ait veriler.	39
3.3: Simülasyon uygulamasında elde edilen tahminlere ait veriler.	39

1. GİRİŞ

İHA'lar günümüzde çok yaygın olarak kullanılmaya başlanmış olup, kullanım alanının giderek genişleyeceği açıktır. Maliyetinin düşük olması, kullanımının kolay olması İHA'ları hızlı bir endüstri malzemesi haline getirmiş olup, çeşitli tiplerde üretiminin ve kullanımının hızlı bir şekilde yayılmasına sebep olmuştur.

İHA'ların bu denli hızlı yaygınlaşması ve ortaya koyduğu düşük maliyetli saldırılarla yüksek maliyetli hasar verme kabiliyeti, bu hava araçlarının terörizm faaliyetlerinde kullanımını yaygınlaştırmıştır. Ayrıca ortaya koyduğu bu asimetric etki ve anlık istihbarat sağlamadaki başarısı sebebiyle de düzenli ordularda etkin olarak kullanılmaktadır.

Bu tip hava araçları ile yapılacak saldırıları önlemek, kritik tesislerin korunması adına hayati öneme sahiptir. Bu saldırıları önlemek için ortaya konan tahrip yöntemlerinin etkin bir şekilde uygulanması için bu küçük hava araçlarının yüksek doğruluk oranı ile konumunun tespiti en önemli unsurdur.

Bu tez ile temelde belirli bir bölge üzerinde İHA'ların tespit ve konumlandırma yöntemlerinin incelenmesi, uygun tespit yönteminin belirlenmesi ve bu yöntemin teorik ve deneysel olarak tecrübe edilmesi üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Özelde ise bu çalışmada, İHA tespit yöntemleri arasında, radar ile tespitinin en uygun yöntem olduğu kabulü ile farklı mimarideki radar uygulamalarının etkinlikleri kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Monostatik radar ile basit multistatik radar uygulamalarının, konumlandırma hassasiyetlerine etkisi incelenmiş ve multisatetik radarların daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Tezde temeldeki açık amaç; belirli bir bölge üzerinde İHA'nın radar ile tespitinin sağlanması, monostatik ve multistatik radar mimarilerine ait modelleme ve deneysel uygulamaları sonuçlarının doğruluklarını kestirim algoritmaları ile iyileştirilerek ve kıyaslanarak incelenmesidir. Elde edilen sonuçlar ile ilgili konu başlıkları altında sunulmuştur.

Ayrıca çalışmada, literatürde yer alan radar uygulamaları, mimari örnekleri ile tez çalışmasındaki deneylerde kullanılan ekipmanlara ait özellikler ile kestirim algoritmalarının üzerinde durulmuştur.

Tez çalışmasında üretimi yaygın radar ve İHA kullanılmıştır. Multistatik radar mimarisine ait uygulamalarının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Gerekli altyapının (senkronizasyon, yazılım, ortak zamanlama v.b.) oluşturulması durumunda, bu tip yaygın radarların, tak kullan multistatik radar sistemleri biçiminde, İHA tespit yöntemi olarak kullanılmasına yönelik çalışmalara öncü açabileceği öngörülmektedir. Ayrıca teoride, farklı radarlardan elde edilmiş verilerin işlenerek, kara araçlarını ve canlılarını da ayırt edici sistemlere evrilmesine yönelik çalışmalara zemin hazırlamaktadır.

2. İHA ÇEŞİTLERİ VE TESPİT YÖNTEMLERİ

Günümüzde İHA'lar ile gerçekleşen saldırılar tahrip/maliyet açısından asimetrik bir etkiye sebep olabilmektedir. Bu saldırıları önleyen halihazırdaki Anti-İHA sistemleri; tespiti sağlanan İHA'yı, yönlendirilmiş veya yönlendirilmemiş karıştırma sistemleri ile uzaklaştırmayı hedeflediği gibi konvensiyonel silah sistemleri ile donatılarak tahribini de sağlayabilmektedir. Buradaki tahrip ve uzaklaştırmada en kritik fonksiyon, İHA'nın tespitidir.

2.1. İHA Çeşitleri ve Kullanım Alanları

Literatür incelendiğinde çok farklı yöntemlerle İHA'ların sınıflandırıldığı görülmektedir. Halihazırda tek bir sınıflandırmanın olmadığı görülmektedir. Yapılan incelemede farklı parametrelere dayalı ve buna bağlı farklı sınıflandırmalara rastlanmaktadır. Bunlar da referans alınan 16 başlığa göre incelenmektedir (Korchenko ve Illyash, 2013).

- 1) Hava aracının kullanım alanına göre;
- 2) Kullanılan kontrol sisteminin çeşidine göre;
- 3) Uçuş kurallarına göre;
- 4) Havada kullanılan alanın durumuna göre;
- 5) Hava aracının tipine göre;
- 6) Kanat tipine göre;
- 7) Kalkışta ve inişteki kaldırma kuvvetinin yönüne göre;
- 8) Kalkış-iniş tipine göre;
- 9) Hava aracının motor tipine göre;
- 10) Yakıt sistemine göre;
- 11) Yakıt tankı tipine göre;

- 12) Yakıt sisteminden istifade sayısına göre;
- 13) Genel kategori (İHA maksimum kalkış ağırlığı, menzil, havada kalma süresi, çıkabileceği maksimum irtifa değerlerine göre);
- 14) Gerçekleştirilebilecek mesafe yarıçapına göre;
- 15) Uçuş irtifasına göre;
- 16) Fonksiyon ve uygulama alanlarına göre. (Korchenko vd., 2013).

Buradaki sınıflandırma ihtiyaç ve hassasiyet duyulan alan göre seçilebilmektedir. Kullanım alanı belirleyicidir. Literatürde en yaygın kullanılan sınıflandırma yöntemi 13.ncü maddede yer alan Genel kategoriye göre sınıflandırmadır. Bu kabul paralelinde, Avrupa Hava Sistemleri Kurumu (EUROUVS)'nun farklı parametreleri de içine alan yaptığı sınıflandırma da Tablo 1.de verilmiştir (Bento, 2008).

Tablo 2.1: Kapsamlı İHA sınıflandırması.

	Kategori (Sınıf)	Maksimum Kalkış Ağırlığı (kg)	Maksimum Uçuş İrtifası (m)	Havada Kalma (Seyir) Süresi (saat)	Veri Bağlantı Mesafesi (km)	Örnek	
						Görevler	Sistemler
Mikro/Mini İHA'lar	Mikro	10	250	1	<10	Keşif, Görüntüleme, Bina Gözetimi	Black Widow, Microstar, Microbat, FanCopter, QuattroCopter, Mosquito, Hornet, Mite
	Mini	<30	150-300	<2	<10	Film ve Yayın Endüstrisi, Tarımsal faaliyetler, Çevre Kirliliği Ölçümleri, Bina Gözetimi, Muhabere İrtibatı (İletişim bağlantısı) ve Elektronik Harp	Mikado, Aladin, Tracker, DragonEye, Raven, Pointer II, Carolo C40 / P50, Skorpio, R-Max and R 50, Robo Copter, YH 300SL
Taktiksel İHA'lar	Yakın Mesafe	150	3000	2-4	10-30	Arama Kurtarma, Keşif Gözetleme Hedef Tespiti, Elektronik Harp, Mayın Tarama	Observer I, Phantom, Copter 4, Mikado, RoboCopter 300, Pointer, Camcopter, Aerial and Agricultural
	Kısa Mesafe	200	3000	3-6	30-70	Bomba Hasar Değerlendirmesi, Keşif Gözetleme Hedef Tespiti, Elektronik Harp, Mayın Tarama	Scorpi 6/30, Luna, SilverFox, EyeView, Firebird, R Max Agri/Photo, Hornet, Raven, Phantom, GoldenEye 100, Flyrt, Neptune
	Orta Mesafe	150-500	3000-5000	3-10	70-200	Bomba Hasar Değerlendirmesi, Keşif Gözetleme Hedef Tespiti, Elektronik Harp, Mayın Tarama	Hunter B, Mücke, Aerostar, Sniper, Falco, Armor X7, Smart UAV, UCAR, Eagle Eye +, Alice, Extender, Shadow 200/400
	Uzun Mesafe	-	5000	6-13	200-500	Bomba Hasar Değerlendirmesi, Keşif Gözetleme	Hedef Tespiti, Muhabere İrtibatı (İletişim Bağlantısı) Hunter, Vigilante 502
	Seyir Süreli	500-1.500	5.000-8.000	12-24	>500	Bomba Hasar Değerlendirmesi, Keşif Gözetleme	Hedef Tespiti, Elektronik Harp, Muhabere İrtibatı (İletişim Bağlantısı) Aerosonde, Vulture II Exp, Shadow 600, Searcher II, Hermes 450S/450T/700
	Orta İrtifa, Uzun Seyir	1.000-1.500	5.000-8.000	24-48	>500	Bomba Hasar Değerlendirmesi, Keşif Gözetleme Hedef Tespiti, Elektronik Harp, Silah Teslimi, Muhabere İrtibatı (İletişim Bağlantısı)	Skyforce, Hermes 1500, Heron TP, MQ 1 Predator, Predator-IT, Eagle-1/2, Darkstar, E Hunter, Dominator
Stratejik İHA'lar	Yüksek İrtifa, Uzun Seyir	2.500-12.500	15.000-20.000	24-48	>2.000	Bomba Hasar Değerlendirmesi, Keşif Gözetleme Hedef Tespiti, Elektronik Harp, Muhabere İrtibatı (İletişim Bağlantısı), Bust Safhasındaki Görevi, Havaalanı Güvenliği	Global Hawk, Raptor, Condor, Theseus, Helios, Predator B/C, Libellule, EuroHawk, Mercator, SensorCraft, Global Observer, Pathfinder Plus
Özel Görev İHA'ları	Öldürücü	250	3.000-4.000	3-4	300	Anti-radar, Anti gemi, Anti-hava aracı, Anti altyapı	MALI, Harpy, Lark, Marula
	Tuzağa Düşüren	250	50-5.000	<4	0-500	Hava - Denizde Tuzağ Faaliyetleri	Flyrt, MALD, Nulka, ITALD, Chukar
	Stratosferik (Çok Büyük)	Sınıflandırma Devam Ediyor	20.000-30.000	>48	>2.000	-	Pegasus
	Egzo - Stratosferik (Çok Daha Büyük)	Sınıflandırma Devam Ediyor	>30.000	Sınıflandırma Devam Ediyor	Sınıflandırma Devam Ediyor	-	MarsFlyer, MAC-1

NNAG JCGUAV grubunca kullanılan ağırlık, irtifa ve menzil tabanlı sınıflandırma aşağıdaki Tablo 2’de verilmiştir (SSM, 2011).

Tablo 2.2: NNAG JCGUAV İHA sınıflandırması.

Sınıf	Kategori	Uçuş İrtifası (ft)	Görev Menzili (km)	Örnek Platform
Sınıf I (< 150 kg)	Mikro <2 kg	< 2000AGL	5 km (LOS)	Black Widow
	Mini 2-20kg	< 3000AGL	25 km (LOS)	Aladin,OH3, DRAC, Eagle,Raven, Scan, Skylark,T-Hawk
	Küçük >20kg	< 5000AGL	50 km (LOS)	Hermes 90, Luna
Sınıf II (150 kg - 600 kg)	Taktik	<1000 AGL	200km (LOS)	Aerostar, Hermes, 450,Ranger, Sperwer
Sınıf III (> 600 kg)	MALE	<45000MSL	Limitsiz (BLOS)	Predator AtB, Heron/TP, Hermes 900
	HALE	<65000MSL	Limitsiz (BLOS)	Global Hawk
	Saldırı/Savaş	<65000MSL	Limitsiz (BLOS)	

Avrupa sivil insansız hava araçları yol haritasında kullanılan, ağırlık ve uçuş irtifasını temel alan sınıflandırma aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 2.3: Avrupa sivil İHA yol haritası sınıflandırması.

Sınıf	Kalkış Ağırlığı (kg)	Uçuş İrtifası (ft)
Mikro	<7	<400
Mini	8-400	300-4000
Döner Kanat		
MALE	400-4000	15000-45000
HALE		>45000

Amerika Birleşik Devletleri'nde yıllar içerisinde çeşitli kuvvetler ve organizasyonlar tarafından farklı sınıflandırmalar kullanılmış olup hâlihazırda kullanılan ve JUAS COE tarafından oluşturulan ağırlık, uçuş irtifası ve hız tabanlı sınıflandırma aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 2.4: ABD JUAS İHA sınıflandırması.

Sınıf	Maks. Kalkış Ağırlığı (lb)	Uçuş İrtifası (ft)	Seyir Hızı (kts)	Örnek Platform
Grup 1	<20	< 1200 AGL	< 100	WASP III, BATCAM, Pointer, Aqua/Terra Puma
Grup 2	21-55	< 3500 AGL	< 250	ScanEagle, Silver Fox, Aerosonde
Grup 3	< 1320	< 18000 MSL	< 250	RQ-7B, RQ-15
Grup 4	> 1320	< 18000 MSL	Her hız	MQ-5B, MO-SB, MQ-1AIB/C
Grup 5	> 1320	> 18000 MSL	Her hız	MQ-9A, RQ-4, RQ-4N, Global, Observer

İnsansız araçlara yönelik çok sayıda üniversite ve sanayi kuruluşunun üye olduğu uluslararası bir organizasyon olan “UVS International” tarafından yayınlarında kullanılan menzil, ağırlık, uçuş irtifası ve hız tabanlı sınıflandırma aşağıdaki tabloda verilmiştir (Darwin, 2014).

Tablo 2.5: UVS uluslararası İHA sınıflandırması.

Kategori	Ağırlık(kg)	Menzil(km)	Uçuş İrtifası(m)	Uçuş süresi(saat)
Mikro	<5	<10	<250	1
Mini	<25/30/150	<10	150/250/300	<2
Yakın Menzil	25-150	10-30	3000	2-4
Orta Menzil	50-250	30-70	3000	3-6
Yüksek İrtifa Uzun uçuş	<250	<70	<3000	<6

İHA’ların en yaygın kullanım alanı istihbarat, gözetleme ve keşif faaliyetlerini yürütmektir. Anlık istihbaratın fark edilmeden ve insan hayatının tehlikeye atılmadan sağlanması, İHA’ların bu alanda kullanımını arttırmaktadır. İHA Sistemleri görevleri temel olarak Keşif/ Gözetleme Desteği, Taarruz, Elektronik Harp, Hedef Benzetimi ve Özel/Spesifik Görevler olmak üzere 5 alanda değerlendirilebilir. Alt başlıkları ile askeri kullanım alanları aşağıda verilmiştir (Yiğit vd., 2018).

1) Keşif/Gözetleme Desteği

1.1) Taktik Saha Keşif/Gözetleme (TKG)

1.2) Stratejik Keşif/Gözetleme (SKG)

2) Taarruz

2.1) İç Güvenlik (Homeland Security/Counter Insurgency) (İG)

2.2) Yakın Hava Desteği (Close Air Support) (YHD)

2.3) Hava Savunma Sistemlerinin İmhası (SEADHard Kill/DEAD) (HSİ)

2.4) Hava Sahası Savunma (Air Defense) (HSS)

3) Hedef Benzetimi (Target Simulation)

3.1) Hedef Uçak (Target Drone) (HU)

3.2) Sahte Uçak (Decoy) (SU)

4) Elektronik Harp

4.1) Sinyal İstihbaratı (SI)

4.2) Radar Elektronik Harp (REH)

4.3) Muhabere Elektronik Harp (MEH)

4.4) Önleyici Elektronik Harp (ÖEH)

5) Özel/Spesifik Görevler

5.1) Haberleşme Desteği (HD)

5.2) Mayın/Patlayıcı Tespit (MPT)

5.3) Kimyasal, Biyolojik, Radyoaktif, Nükleer Tespit (KBRNT)

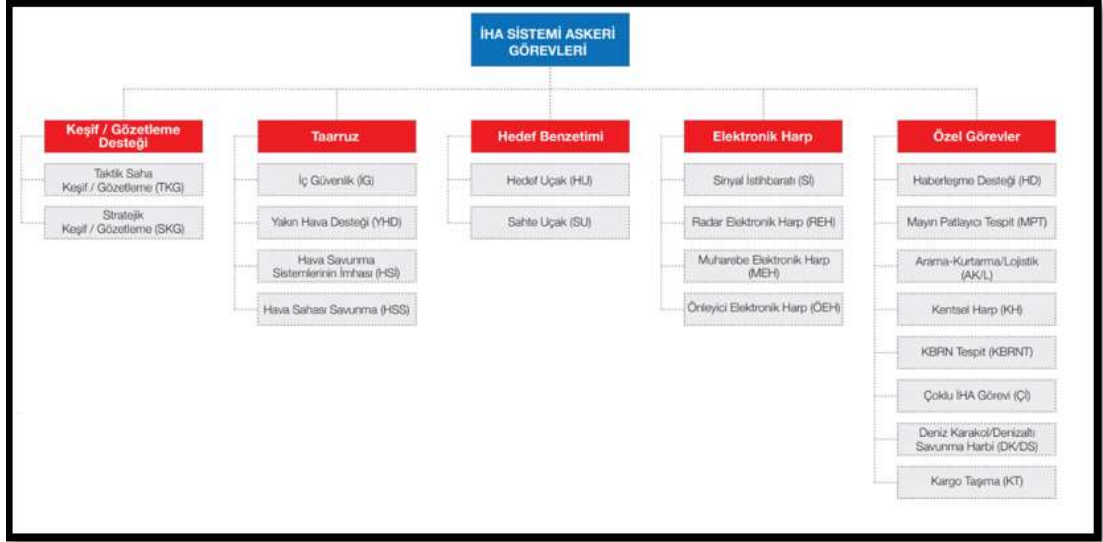
5.4) Kentsel Harp (Urban Warfare) (KH)

5.5) Çoklu İHA Görevi - Kol uçuşu ya da geniş alan gözetlemesi (Çİ)

5.6) Deniz Karakol/Denizaltı Savunma Harbi (DK/DS)

5.7) Kargo Taşıma (KT)

5.8) Arama-Kurtarma/Lojistik (AK/L)



Şekil 2.1: İHA sistemi askeri görev alanları.

Askeri alana kıyasla sivil alanda İHA'ların kullanımlarının pratik hayata pek fonksiyonel kullanıldığı söylenemez. Yeterli sertifikasyonun ve ilgili havacılık mevzuatındaki eksiklikler buna sebep olabilir. Tasnif edilmiş bir düzenleme olmasa da önceden izin almak kaydıyla belirli şartlar altında, İHA platformlarının kullanımına izin verilmektedir.

İHA'ların sivil alanda kullanım amacı genelde görüntü toplama, izleme üzerine kuruludur. Bunlar acil durumların tespiti (orman yangını, gemilerin denizi kirletmesi, sel felaketi vb.), zamanında ve etkili müdahalenin sağlanmasında kullanılabilir. Ayrıca anlık haberleşmenin sağlanması amacıyla haberleşme sistemlerinde röle olarak görev yapabilmektedir.

İleriki yıllarda Avrupa'da sivil ve alandaki İHA Sistemleri pazarının büyük kısmının (%45) devlete ait olacağı öngörülmektedir. Kolluk güçlerinin korumakla görevli oldukları alanların kontrolü, kritik ve hassas bölgelerin korunması ve sınır güvenliği gibi birçok konuda % 25'lik bir paya sahiptir. Ayrıca ormancılık ve yangın söndürme faaliyetleri ile acil kurtarma faaliyetleri ikinci sırada yer almaktadır. Tarımda İHA'nın kullanımı yaklaşık %13'tür. (SSM, 2011).

2.2. İHA Tespit Yöntemleri

Optik, akustik, pasif radar ve radar ile tespit İHA'ların tespitinde konvensiyonel olarak kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarını şöyle sıralayabiliriz.

2.2.1. Optik Tespit



Şekil 2.2: Açık gökyüzünde, 200 m mesafedeki İHA'nın kamera ile tespiti (LWIR uzun dalga kızılötesi, 20 mm odak mesafesi).



Şekil 2.3: Bulutlu bir havada, 50 m mesafedeki İHA'nın kamera ile tespiti (LWIR uzun dalga kızılötesi, 20 mm odak mesafesi).

Optik tespit ile kızılötesinden görülür ışığa kadar geniş bir spektrumda kullanılabilir. Ancak optik tespit için çok iyi hava koşullarına ihtiyaç duyulmaktadır. İHA'ların optik tespiti, İHA'ları görsel özelliklerine göre tespit etmek ve izlemek için kameralar veya özel görüntüleme sistemleri gibi görsel sensörlerin kullanılmasını içerir. Bu yöntem, İHA'ları tanımlamak ve arka plan ortamından ayırt etmek için İHA'ların şekli, boyutu, hareket düzeni veya görünümü gibi görsel ipuçlarına dayanır(Laucys vd., 2019).

İHA'ların optik olarak tespit edilmesine yönelik çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır:

Görsel Gözetim (Visual Surveillance): Statik veya pan-tilt-zoom kameralar, bir alanı görsel olarak izlemek için stratejik konumlara yerleştirilir. Yazılım algoritmaları, video akışını gerçek zamanlı olarak analiz etmek için kullanılabilir ve boyut, şekil veya hareket modelleri gibi önceden tanımlanmış kriterlere dayalı olarak İHA benzeri nesneleri arar.

Bilgisayarla Görme: Nesne algılama, izleme ve sınıflandırma algoritmaları dahil olmak üzere gelişmiş bilgisayarla görme teknikleri, kameralar tarafından yakalanan görüntülere veya video karelerine uygulanabilir. Bu algoritmalar, eğitim verilerine dayanarak İHA'ları tanımayı öğrenebilir ve onları gerçek zamanlı olarak tanımlayabilir.

Drone Tespit Sistemleri: Dron tespiti için özel olarak tasarlanmış sistemler, İHA'ları tespit etmek ve izlemek için optik kameralar da dahil olmak üzere birden fazla sensör kullanır. Bu sistemler, tespitin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak için genellikle optik sensörleri radar, akustik sensörler veya RF analizi ile birleştirir.

2.2.2. Akustik Tespit

İHA'ların optik tespiti, havaalanı güvenliği, kritik altyapı koruması ve kamu güvenliği gibi alanlarda giderek daha önemli hale gelmiştir. Bununla birlikte, olumsuz hava koşullarında veya İHA'lar gelişmiş kamuflaj teknikleri kullandığında optik algılamanın sınırlamaları olabileceğini belirtmek gerekir. Bu nedenle, birden fazla tespit yönteminin entegre edilmesi daha sağlam bir İHA tespit sistemi sağlayabilir. (Laucys vd., 2019).

İHA'ların akustik tespiti, benzersiz akustik imzalarına dayalı olarak İHA'ları tespit etmek ve sınıflandırmak için ses sensörlerinin kullanılmasını içerir. İHA'lar çalışmaları sırasında pervaneler, motorlar veya elektrik motorları tarafından üretilen gürültü gibi farklı sesler üretir. Akustik tespit sistemleri temel çalışma prensibi olarak bu sesleri yakalar ve İHA'ların varlığını tespit etmek için analiz eder.

Akustik algılama sistemlerdeki sensörler ilgilenilen bir alana stratejik olarak yerleştirilmiş bir dizi mikrofondan oluşur. Mikrofonlar ses sinyallerini yakalar ve

analiz için gerekli verileri sağlar. Yakalanan ses verileri, ilgili özellikleri çıkarmak ve sesleri sınıflandırmak için sinyal işleme algoritmalarından geçer. Bu algoritmalar, İHA seslerini arka plan gürültüsünden ayırt ederek İHA'ların tanımlanmasına ve izlenmesine yardımcı olur.

İHA seslerini sınıflandırmak için çeşitli makine öğrenimi ve sinyal işleme teknikleri uygulanabilir. Bu teknikler arasında örüntü tanıma, spektral analiz, zaman-frekans analizi veya İHA ses veri kümeleri üzerinde eğitilmiş derin öğrenme algoritmaları yer alabilir.

Akustik sistemlerin algılama menzili, mikrofon hassasiyeti, çevresel koşullar ve İHA'nın boyutu ve tahrik mekanizması gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Akustik algılamanın, İHA seslerini ayırt etmenin daha zor hale geldiği kalabalık veya gürültülü ortamlarda sınırlamaları olabileceğini göz önünde bulundurmak önemlidir.

İHA'ların akustik tespiti, güvenlik ve gözetim, kritik altyapı koruması, sınır kontrolü ve olay izleme dahil olmak üzere çeşitli alanlarda uygulama alanı bulmaktadır.

İHA'ların akustik tespiti, aktif bir araştırma alanı olduğunu ve devam eden çalışmaların bu sistemlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini sürekli olarak geliştirdiğini belirtmek gerekir.

Akustik tespitin görsel bit tespite dayanamaması ve hava hedefinin akustik imzasına dayalı olduğu için yanlış alarm verme oranı çok düşüktür. Ayrıca diğer tespit yöntemlerine göre maliyetli bir altyapıya sahip değildir. Ancak etkili menzilin kısa olması, tanımlama için bir sınıflandırılmış verilere ihtiyaç duyması ve çevresel etkilere çok açık olması akustik tespitin olumsuz yanları olarak sıralanabilir. Ayrıca akustik tespit sistemlerini diğer tespit teknolojileriyle entegre etmek ve kapsamlı bir İHA tespit ağı kurmak karmaşık bir işlemdir.

2.2.3. Pasif Radar ile Tespit

İHA'lar genelde belirli bir frekans aralığında iletişim için güçlü RF yayarlar. Aynı zamanda etraftaki güçlü RF yayıcılarından yayılan ve İHA'lar çarpıp dönen ekolar mevcut olabilir. Bu yayılan RF, sadece alıcıdan oluşan pasif radar kullanılarak İHA'ların konumlarının tespitine imkân sağlamaktadır(Laucys vd., 2019).

Bir pasif radar sistemi temel çalışma prensibi olarak belirli bir alana yerleştirilmiş çok sayıda alıcı anten veya sensörden oluşur. Bu antenler, bilinen vericiler tarafından iletilen RF sinyallerinin yanı sıra İHA'lar tarafından yansıtılan veya saçılan sinyalleri de yakalar. Alınan sinyaller daha sonra İHA tespiti için gerekli bilgileri çıkarmak üzere için sinyal işleme ve analizden geçirilir. İHA yankılarını diğer dağınıklık ve parazit kaynaklarından ayırmak için çeşitli algoritmalar ve teknikler kullanılır. Doppler kayma analizi, zaman gecikmesi tahmini ve korelasyon tabanlı teknikler genellikle İHA'ların varlığını ve konumunu belirlemek için kullanılır.

Pasif radar sistemleri, alınan sinyallerdeki zaman içindeki değişiklikleri analiz ederek tespit edilen İHA'ların konumunu, hızını ve yörüngesini tahmin edebilir. Çoklu anten konfigürasyonları ve gelişmiş sinyal işleme algoritmaları, yerleştirme ve izleme doğruluğunu artırmak için kullanılır.

Pasif radarın herhangi bir sinyal göndermeden çalışması, İHA operatörlerinin pasif radarın varlığını tespit etmesini veya karşı koymasını zorlaştırır. Mevcut altyapı ve sinyallerden yararlanmak, özel radar sistemlerinin konuşlandırılması ve bakımı ile ilgili maliyetleri azaltır. Ancak Pasif radar sistemleri, aktif radar sistemlerine kıyasla daha kısa algılama menziline ve daha düşük hassasiyete sahiptir. Çok yönlü yayılım, dağınıklık, atmosferik koşullar ve sinyal kalitesi pasif radar sistemlerinin performansını etkileyebilir. Hareketli İHA'ların sürekli güncellenmesi ve hassas takibi, iletilen sinyaller üzerindeki kontrol eksikliği nedeniyle pasif radar sistemleri ile zor olabilmektedir. Ayrıca güçlü RF kaynakların olmayışı ve iletişim sistemlerinin kapalı olması pasif radar ile tespiti imkansızlaştırmaktadır.

2.2.4. Radar ile Tespit

Hava cisimlerinin belirlenmesinde en yaygın kullanılan sistem radardır. Radarın çalışma prensibi karmaşık olmasına rağmen temelde oldukça basit bir teoriye dayanır. Bir elektromanyetik dalganın bir kaynaktan kontrollü bir şekilde yayılır, tespit edilmek istenen hava aracından bir yankı elde edilir. Bu yankıdan elde edilen yankıdaki; zaman, frekans ve genlik değişkenleri incelenerek konum kestirilir. Elektromanyetik dalganın sabit hızla yayılıyor olması, menzilin uzun olması, hava şartlarından etkilenmemesi radarı en etkili tespit yöntemi yapmaktadır.



3. RADAR İLE İHA TESPİT YÖNTEMİ

Radar ‘Radio Detection and Ranging’ ifadesinin kısaltılması ile oluşturulmuş olup, kısaca çevredeki nesneleri tespit etmek, konumlandırmak ve izlemek için elektromanyetik dalgaların kullanılmasını olarak tanımlanabilir(Melvin, 2014).

Radarın temel işleyişindeki izlenen yol ve temel ilkeleri aşağıdaki gibi özetlenebilir (Emileen, vd. 2019):

İletim: Bir radar sistemi, temel olarak radyo dalgaları veya mikrodalgalar şeklinde elektromanyetik dalgalar yayan bir vericiden oluşur. Bu dalgalar bir anten tarafından üretilir ve uzaya ya da atmosfere gönderilir.

Yayıma: Yayılan elektromanyetik dalgalar havada ya da diğer ortamlarda ilerleyerek radar göndericisinden uzaklaşırlar. Yollarına çıkan bir nesne ile karşılaşana kadar yayılmaya devam ederler. **Yansıma:** Elektromanyetik dalgalar bir uçak, araç ya da başka bir katı yüzey gibi bir nesne ile karşılaştığında, enerjinin bir kısmı radar sistemine doğru geri yansır.

Toplama: Radar sistemi yansıyan dalgaları yakalayan bir alıcı antene sahiptir. Anten elektromanyetik enerjiyi toplar ve daha ileri işlemler için bir alıcıya gönderir.

Sinyal İşleme: Alınan sinyaller, ilgili bilgileri çıkarmak için çeşitli sinyal işleme tekniklerinden geçer. Bu teknikler arasında amplifikasyon, filtreleme, sayısallaştırma ve alınan sinyallerin analizi yer alır.

Tespit ve Analiz: İşlenen sinyaller, dalgaları yansıtan nesnelerin varlığını, konumunu, hızını ve diğer özelliklerini belirlemek için analiz edilir. Bu analiz, dalgaların nesneye gidip gelmesi için geçen sürenin (uçuş süresi) yanı sıra nesnenin hareketinden kaynaklanan frekans değişikliklerinin (Doppler kayması) ölçülmesini içerir.

Görüntüleme: Analizden elde edilen bilgiler genellikle bir radar ekranında ya da bir bilgisayar arayüzünde gösterilir. Ekranda algılanan nesneler, konumları, hızları ve hatta bazen şekilleri gibi ek bilgilerle birlikte hedef olarak gösterilir.

Radar sistemleri geniş alanları kapsayabilir, bu da onları uzun menzilli gözetim ve izleme yapabilirler. Görsel veya optik algılama yöntemlerine kıyasla yağmur, sis veya karanlık gibi hava koşullarından daha az etkilenir. İHA'ları uzun menzillerde tespit ve takip edebilir, erken uyarı ve daha uzun tepki süresi sağlar. Diğer tespit yöntemlerinin sınırlı olabileceği ormanlar veya kentsel alanlar gibi karmaşık ortamlara nüfuz edebilir.

Ancak radar, İHA'ların konumları, hızları ve boyutlarının dışındaki ayrıntılı tanımlama ve sınıflandırma için ek sensörler veya sistemler ile sınıflandırılmış verilere ihtiyaç duyabilir. Ayrıntılı tanımlama ve sınıflama yapabilen yüksek performanslı bir radar sistemi maliyetlidir ve kurulum, bakım ve işletme için uzman personele ihtiyaç vardır. Ayrıca radar sinyalleri, binalar veya doğal özellikler gibi çevresel karmaşadan etkilenebilir ve bu da potansiyel yanlış alarmlara veya yanlış tespitlere yol açabilir. İHA operatörleri, radar kesitlerini azaltmak için düşük gözlemlenebilir tasarımlar kullanmak veya radar sinyallerini karıştırmak gibi teknikler kullanabilir, bu da tespiti daha zor hale getirebilir.

Radar ile İHA tespitinin belirli ayrıntılarının radar sisteminin türüne, yeteneklerine ve amaçlanan uygulamaya bağlı olarak değişebilmektedir. Birincil gözetim radarı (PSR), ikincil gözetim radarı (SSR) veya aktif elektronik taramalı dizi (AESA) radarı gibi gelişmiş radar sistemleri gibi farklı radar teknolojileri, İHA tespiti için farklı özelliklere ve performans özelliklerine sahiptir.

Ek olarak, radarın optik sistemler veya akustik sensörler gibi diğer sensör teknolojileriyle entegrasyonu, genel İHA tespit yeteneklerini geliştirebilir ve daha kapsamlı bir gözetim çözümü sağlayabilir. Bu hibrit yaklaşım ileriki akademik ve bilimsel çalışmalara açık alanlardır.

3.1. Radarın Tarihçesi

Radarla ilgili ilk gelişmelerin birçok ülkede birbirinden bağımsız olarak gerçekleştiği görülmektedir. İkinci Dünya Savaşı radarın gelişimini hızlandırmıştır. Askeri uygulamaların, radar teknolojisinin geliştirilmesinde ana motivasyon olarak hizmet etmesi, çeşitli gizlilik gereksinimleri nedeniyle tarihçesinin açıklanmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum, radar geliştiricileri arasında önemli yeniliklerin kimin öncülüğünde olduğu ve övgüyü hak ettiği konusu tartışmalıdır.

Radarın tarihi 20. yüzyılın başlarına kadar uzanır. Kökleri radyo ve elektromanyetik teoremin gelişimine dayanır. Radar tarihindeki önemli gelişmeler göz önüne alındığında şöyle bir sınıflama yapabiliriz:

Erken Gelişmeler (1887-1935): Yansıyan elektromanyetik dalgalara dayalı olarak nesneleri tespit eden bir sistem olasılığı 19. yüzyıla ve Heinrich Hertz'in radyo dalgalarının varlığı ortaya koyan çalışmalarına dayanmaktadır. James Clerk Maxwell 1900'li yılların başında radyo dalgalarını kullanarak nesnelerin algılanmasını deneyen elektromanyetizma çalışmaları ile bunun olasılığını ortaya koymuştur.

1935'te Sir Robert Watson-Watt ve Birleşik Krallık'taki ekibi, radyo dalgalarını kullanarak uçakları tespit etmenin pratikte nasıl uygulanabileceğini gösterdi ve "radar" (Radio Detection And Ranging'in kısaltması) terimini ortaya attı(Melvin, 2014).

İkinci Dünya Savaşı Dönemi (1939-1945): İkinci Dünya Savaşı sırasında radar teknolojisi askeri operasyonlarda, özellikle de hava savunması ve deniz savaşlarında çok önemli bir rol oynamıştır. Radar sistemleri, gelen düşman uçaklarının erken uyarılması, uçak pozisyonlarının izlenmesi, uçaksavar silahlarının yönlendirilmesi ve navigasyona yardımcı olmak için kullanıldı. Bu dönemde radar teknolojisinde, mikrodalga radar sinyalleri üretmek için magnetronların geliştirilmesi de dahil olmak üzere önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Magnetron, radar sistemlerinin çok daha yüksek frekanslarda çalışmasına izin vererek daha iyi çözünürlük, doğruluk ve hedef tespit yetenekleri sağladı.

İkinci Dünya Savaşı sırasında uzun menzilli gözetleme ve gelen düşman uçaklarını veya füzelerini tespit etmek için Mikrodalga Erken Uyarı (MEW) radarları, düşman uçaklarının önlenmesi için yer tabanlı yönlendirme ve kontrol sağlamak için kullanılan GCI radar sistemleri geliştirilmiş ve kullanılmıştır.

Savaş Sonrası Gelişmeler (1945-1960'lar): İkinci Dünya Savaşından sonra radar teknolojisi gelişmeye ve çeşitli uygulamalara yayılmaya devam etti. Sürekli dalga radarı, darbe radarı ve Doppler radar teknikleri geliştirildi ve bu sayede hedeflerin tespiti, izlenmesi ve hava durumunun izlenmesi mümkün oldu. Ayrıca hava trafik kontrolü ve gözetleme amaçları için yer tabanlı radar sistemleri geliştirildi. Radar, hava tahmini, navigasyon ve bilimsel araştırma gibi sivil uygulamalar için de kullanılmaya başlandı.

Modern Radar Sistemleri (1970'ler-Günümüz): 1970'lerden bu yana radar teknolojisi, sayısal işaret işleme ve katı hal(solid-state) elektroniğinin ortaya çıkmasıyla önemli ölçüde gelişmiştir. Elektronik olarak yönlendirilebilen antenler kullanan Faz Dizi Radar sistemleri daha yaygın hale geldi ve hızlı tarama, gelişmiş hedef izleme ve gelişmiş performans sundu. (Jianchao vd., 2021).

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) sistemleri geliştirilmiş; askeri, sivil ve bilimsel amaçlar için Dünya yüzeyinin yüksek çözünürlükte görüntülenmesi sağlanmıştır. Radar teknolojisi, havacılık, hava durumu izleme, deniz gözetimi, uzaktan algılama ve otomotiv güvenlik sistemleri (çarpışmadan kaçınma gibi) dahil olmak üzere çeşitli alanlara entegre edilmiştir.

Modern radar sistemleri arasında giderek ağ mimarilerine entegre edilmektedir. Ağa Bağlı Radar Sistemleri bu ağ mimarilerinin son örneklerinden. Birden fazla radar sensörü birbirine bağlanabilir, bu da işbirlikçi ve dağıtılmış radar operasyonlarına izin verir. Ağa bağlı radar sistemleri, bilgi paylaşımı ve birden fazla kaynaktan gelen verilerin birleştirilmesi yoluyla gelişmiş kapsama alanı, hedef izleme ve durumsal farkındalık sağlar.

Yeniden yapılandırılabilir donanım ve yazılım kullanan yazılım tanımlı radar (SDR) platformları esneklik ve uyarlanabilirlik sağlayan modern radar sistemlerinin

diğer örneklerindendir. SDR, radar dalga formlarının, sinyal işleme algoritmalarının ve sistem davranışının değişen operasyonel gereksinimleri karşılamak için hızlı bir şekilde değiştirilmesine olanak tanır.

Çok İşlevli Radar Sistemleri aynı anda birden fazla işlevi yerine getirmek üzere tasarlanmış modern radar sistemlerinin diğer örneğidir. Bu çok işlevli radar sistemleri gözetleme, izleme ve silah yönlendirme yeteneklerini tek bir platformda birleştirebilir ve her işlev için ayrı radar sistemlerine olan ihtiyacı azaltır.

Modern radar sistemlerine ait örneklerle ve uygulamalara bakıldığında daha esnek, çoklu görev yapabilen hibrit bir sisteme doğru evrildiği görülmektedir.

3.2. Radar Uygulamaları ve Mimari Örnekleri

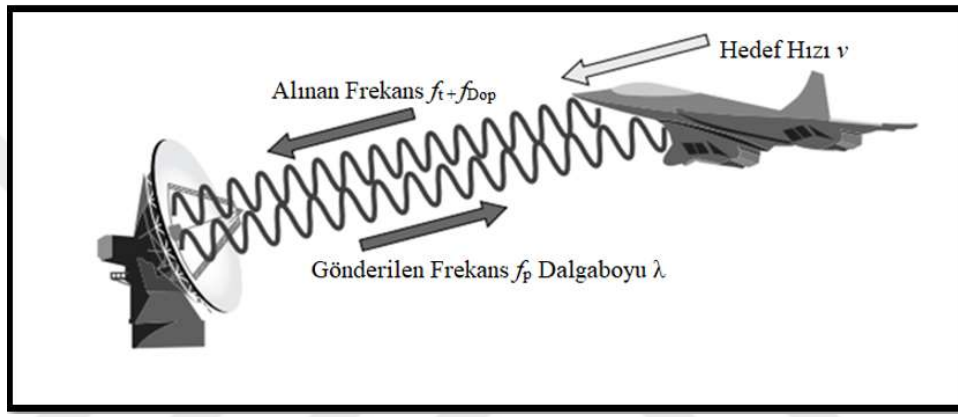
Radar uygulamaları temelde üç başlık altında inceleyebiliriz. Bunlar Taktik radarlar, ISR(intelligence, surveillance, and reconnaissance) radarlar ve Özelleştirilmiş radarlar olarak sıralayabiliriz(Melvin, 2014).

3.2.1. Taktik Radarlar

Taktik radar sistemleri, gelecekteki faaliyetleri dolaylı olarak destekleyen bilgi toplamının aksine, sınırlı bir zaman dilimi içinde bir eylemi gerçekleştirmek için kullanılır. Askeri alanda bir örnek verecek olursak, taktik radar gelen bir füzeyi takip etmek ve angaje etmek için kullanılır. Polis radarı, izin verilen sınırlara göre bireysel araçların hızlarını değerlendirmek için kullanılır ve bir sivil güvenlik örneğidir. Seviye göstergesi ölçümü olarak bilinen endüstriyel depolama tanklarındaki sıvı seviyelerinin belirlenmesi ticari bir örnektir.

Sürekli dalga (CW) radar sistemleri düşük maliyetli, düşük karmaşıklıkta dırlar. Taktik radar uygulamaları oldukça yaygındır. Bu radar sistemleri genellikle kısa menzilde çalışır ve uygulamaları arasında füze arayıcıları, altimetreler, gelen roketlere kinetik bir öldürme tepkisi yönlendirmek için kullanılan aktif koruma sistemleri, polis radarı ve otomotiv güvenliği yer alır.

Sürekli dalga (CW) radar sistemleri sürekli olarak bir aydınlatma sinyali ve aynı anda nesnelerden saçılan yankı yansımalarını sürekli olarak alır. Aydınlatılan bir nesne sabitse, yankı sinyalinin frekansı iletilenden farklı olmaz. Ancak, bir nesne hareket ediyorsa, yankı sinyalinin frekansı Doppler etkisi nedeniyle değişir. Bu Doppler frekansı tespit edilerek nesnenin hareketi belirlenebilir. Nesne belirli bir yönde ne kadar hızlı hareket ederse, Doppler frekansı o kadar büyük olur. Bir CW radar sisteminin çalışması Şekil 3’de şematik olarak gösterilmiştir(Web 1, 2023).



Şekil 3.1: Hareket eden bir nesneyi algılamak için doppler kaymasını kullanan bir CW radarı gösterimi.

Basit CW radarının dayandığı Doppler etkisi, göreceli hareketten kaynaklanır. Şekil 3’deki sinyali göz önüne alırsak, radara geri dönen yankılar hareket eden nesnenin etkisiyle etkin bir şekilde sıkıştırılır (ya da nesne radardan uzaklaşıyorsa genişletilir). Bu sıkıştırma, alıcıda yansıyan sinyallerin dalga boyunu azaltacak şekilde etki eder, böylece gözlenen frekans artar. Nesnenin hızı ne kadar yüksekse, dalga boyu sıkışması o kadar büyük olur ve bu nedenle Doppler frekans kaymasında bir artış gözlenir.

Bir nesnenin radara göre radyal yöndeki hızı, Doppler frekans kayması, f_{Dop} ile şu şekilde ilişkilidir:

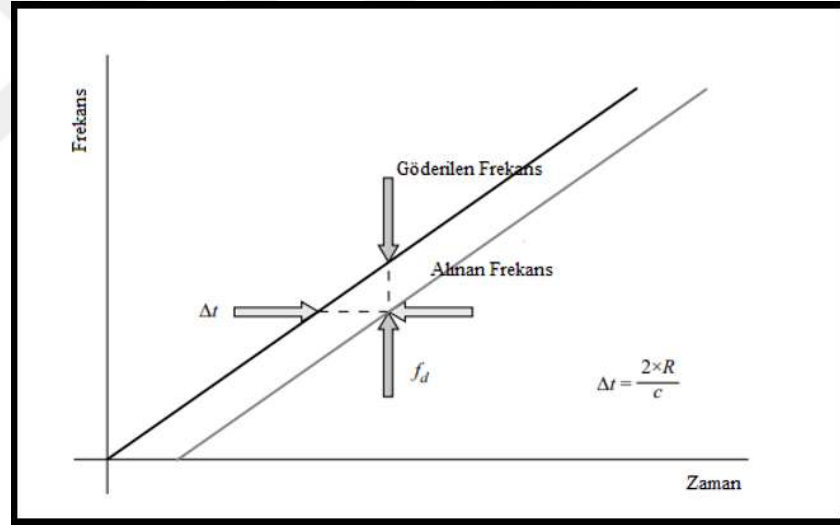
$$V = \frac{\lambda f_{Dop}}{2} \quad (3.1)$$

3.1'deki denklemde; V = nesnenin radyal hızı (m s^{-1}), λ = CW sinyalin dalgaboyu (m), f_{Dop} = doppler frekansını tanımlamaktadır.

İletim frekansı ile yankı sinyalinin frekansı arasındaki zaman gecikmesi, Δt , zamanın herhangi bir anında, bir nesneye olan mesafe ile orantılıdır. Bir yankının alınması için geçen süre şu şekilde verilir

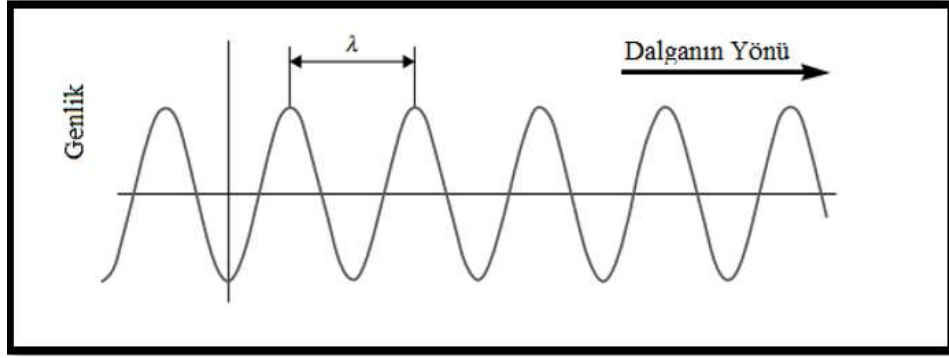
$$\Delta t = \frac{2R}{c} \quad (3.2)$$

3.2'deki denklemde; R = Radar ile hedef arasındaki mesafe(m), c = ışık hızı (ms^{-1})'nı tanımlamaktadır.



Şekil 3.2: Doğrusal bir FMCW radar sisteminde frekans ve zaman arasındaki ilişki.

Şekil 4'ten, iletilen sinyalin değişiminin doğrusal oranının ve iletilen ve alınan sinyaller arasındaki fark frekansının (f_{Dop}) bilinmesinin, bir yankının alınması için gereken zamanın (Δt) hesaplanmasına ve dolayısıyla tespit edilen bir nesneye olan menzilin (R) belirlenmesine olanak tanıdığını görebiliriz.



Şekil 3.3: Tek frekanslı bir CW radar sinyalinin bir parçası.

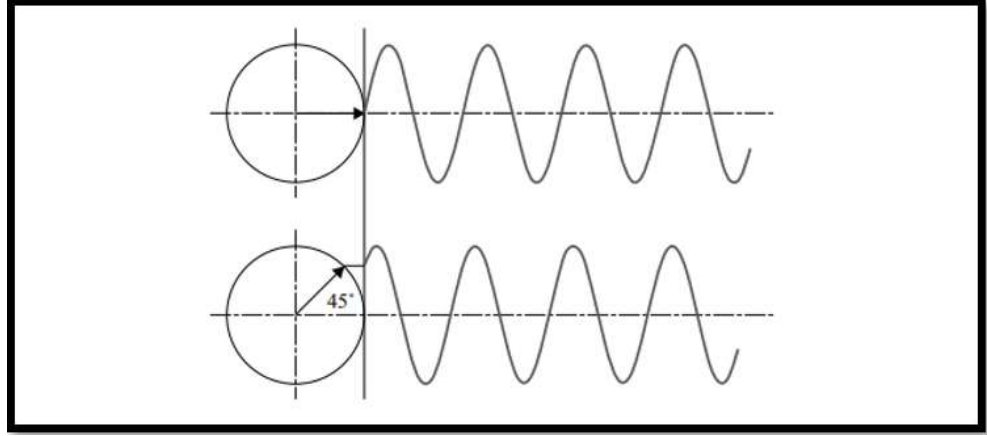
Şekil 5’de tek frekanslı bir CW sinyalinin gösterimi yer almaktadır. Genlik, dalga tarafından kat edilen mesafenin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Benzer bir çizim yatay ölçekte zaman ile yapılsaydı, tepeden tepeye uzunluk sinyalin periyodu ve bunun tersi de sinyal frekansı olurdu.

Frekans, f (Hz) ve dalga boyu, λ (m) arasındaki ilişki şu şekildedir:

$$f = \frac{\lambda}{c} \quad (3.3)$$

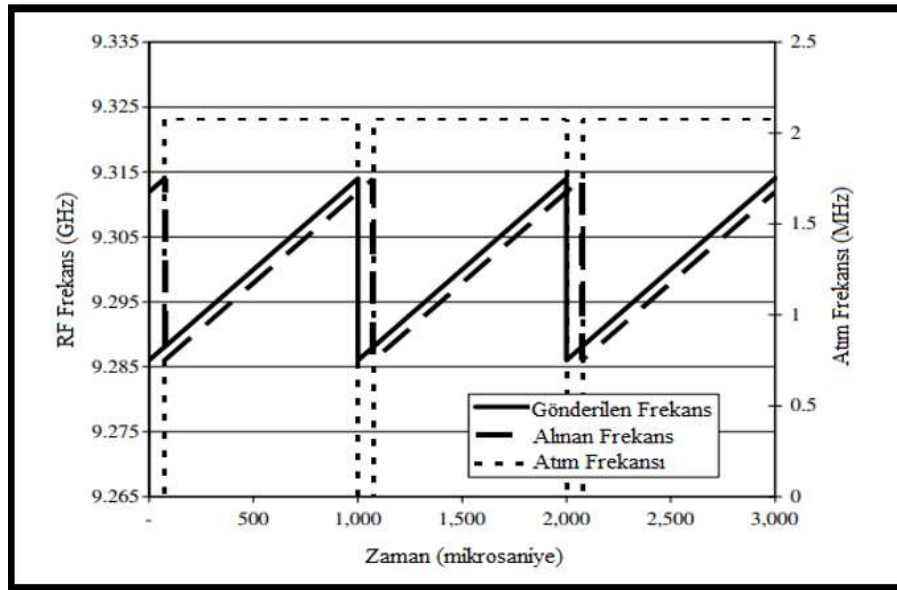
3.d’deki denklemden; f = sinyalin frekansı, λ = CW sinyalin dalgaboyu (m), c = Işık hızı (ms^{-1})’nı tanımlamaktadır.

CW radarının çalışmasını anlamak için kritik olan faz kavramıdır. Faz, bir sinyalin bir çevrimi içindeki konumunu temsil eder. Faz, sinyalin genliğinin sıfır olduğu zaman noktalarına atıfta bulunmak yaygındır; derece ya da radyan cinsinden ölçülür. Bir sinyalin tek bir döngüsü 360 derece veya 2π radyan fazı eşler. Bu, 360 derece boyunca dönen sinyalin genliğine eşit uzunlukta bir vektöre eşdeğerdir, yani bir dairenin tam bir turu yapar. Giden iletim sinyalinin fazı ile gelen alım sinyalini karşılaştırarak hassas hareket tahmini yapmak mümkündür. Şekil 6’da faz ve bağıl faz kavramlarını göstermektedir.



Şekil 3.4: Üst sinyalin sıfır derecelik bir faz ve alt sinyalin 45 derecelik bir faz sergilemekte olduğunu gösterir (üst sinyale göre).

Modüle edilmemiş CW radar sistemlerinin Doppler frekans kayması yoluyla hedefin hızını ve yönlü bir antenle hedefin yönünü nasıl ölçebildiklerini gösterdik. Ancak bu yöntemle menzili ölçülemeyeceği açıktır. Menzil ölçümü için gönderim dalga biçimi üzerinde belirlenmiş bir zamanlama referansı gerekir. CW sistemlerinde bu, gönderilecek işaretin frekansını ya da fazını modüle ederek yapılır. Her ne kadar sinüzoidal ve doğrusal olmayan FM gibi başka frekans modülasyonu biçimleri de olsa da temel ilkelerin tanıtılmasına olanak tanıdığı ve günümüzde CW radar sistemlerinde kullanılan en yaygın modülasyon biçimi olduğu için doğrusal duruma odaklanıyoruz.



Şekil 3.5: Gönderilen ve alınan frekansın, zamanın ile atım frekansının bir fonksiyonun olarak gösterimi.

Şekil 7 bir FMCW radar dalga biçiminin gönderim ve alım frekansını zamanın bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Resimde görülen dalga biçimi bir testere dişi doğrusal FMCW dalga biçimidir. Alıcı işareti, göndericiden R uzaklığında bulunan bir hedefin yankısından gelir. Ortaya çıkan atım frekansı, (beat frequency) f_b , gönderme ve alma dalga formları arasındaki anlık frekans farkıdır. Atım frekansının ölçülmesi, hedefe olan menzili belirlememizi sağlar; çünkü hedefin gecikmesiyle doğrudan ilişkilidir. Doğrusal modülasyonun süresi, gözlemlenecek en uzak hedef için gidiş-dönüş geçiş süresinden daha uzun sürecek şekilde ayarlanır, böylece belirsizlikler önlenir (Drozdowicz vd., 2016).

Şekil 7'de toplam tepeden tepeye frekans sapması ΔF 'dir ve modülasyon bant genişliği olarak adlandırılır. Modülasyon periyodu, T_m , testere dişi dalga formunun tekrarları arasındaki süredir. Bu iki büyüklük birlikte (tekrarlarıyla birlikte) atım frekansı f_b ve geçiş süresi gecikmesi, t_d (gönderme ve alma dalga biçimleri arasındaki zaman farkı) tarafından oluşturulana benzer ancak kaymış bir üçgen oluşturur. Böylece modülasyon bant genişliği, modülasyon periyodu, vuruş frekansı ve geçiş süresi arasında bir hedefe olan menzilin belirlenmesini sağlayan bir ilişki oluşturulabilir:

$$\frac{f_b}{t_d} = \frac{\Delta F}{T_m} \quad (3.4)$$

3.4'deki denklemde; f_b = atım frekansı, t_d = gönderme ve alma dalga biçimleri arasındaki zaman farkını, ΔF = modülasyon band genişliğini, T_m = modülasyon periyodunu tanımlamaktadır.

Gönderme ve alma dalga biçimleri arasındaki zaman farkı t_d , menzil ile orantılıdır ve şu şekilde verilir;

$$t_d = \frac{2R}{c} \quad (3.5)$$

3.5'deki denklemde; R = hedefe olan uzaklığı, c = yayılım hızı (3.0×10^8 m/s)'ni tanımlanmıştır. Denklem 3.5'deki t_d , denklem 3.4'deki yerine konur ve terimler yeniden düzenlenirse sonuç FMCW denklemi olarak bilinen ve atım frekansı ile menzili ilişkilendiren aşağıdaki ifade elde edilir;

$$fb = \frac{\Delta F}{T_m} \frac{2R}{c} \quad (3.6)$$

Atım frekansı, frekans tarama eğimi (yani toplam frekans kaymasının modülasyon süresine bölünmesi) ile geçiş süresinin çarpımıdır. Buradaki parametreleri kullanarak rahatlıkla menzil (R) bulunabilir. Bu sayede taktik radar uygulamaları yaygın olan CW tabanlı radarda, hedefe ait temel parametrelerin (radyal hızı yönü ve menzil) temel olarak nasıl bulunduğu açıklamış olduk.

Milimetre Dalga (MMW) radarları da yaygın olarak taktik radar uygulamalarında yer almaktadır. MMW rejimi teknik olarak 30 GHz ila 300 GHz arasında değişmektedir. Daha kısa dalga boyu, bir füzede, insansız hava aracında (İHA) veya kişisel bir taşıtta olduğu gibi kompakt radar uygulamaları için caziptir. Yüksek frekansın önemli bir avantajı, sabit bir açıklık boyutu için daha dar bir demet genişliğine (beamwidth) ihtiyaç duymasıdır. Bu durum, hedef angajmanı ve dağınıklığın sınırlı olduğu ortamlarda çalışma için önemli bir husustur. Bir MMW radar hem CW hem de darbeli dalga biçimleriyle çalışabilir; güncel uygulamalar, CW'yi tercih etme eğilimindedir. Diğer mmw radar uygulamaları arasında gizli silah görüntüleme, otomotiv radarı ve otonom iniş sistemleri sayılabilir. Gizli silah görüntüleme ve otonom iniş için daha yüksek çözünürlük, etkili otomotiv radarını desteklemek için daha ince açısal çözünürlük ve gelişmiş elektromanyetik uyumluluk sağlayan uygun dar demet genişliği ile kompakt sistem tasarımı vb. uygulamaların her birinde, kısa dalga boyu sistem uygulamasına fayda sağlar:

İleri hava kontrolü, ateş kontrol ve balistik füze savunma sistemleri gibi angajman sürecinin bir parçası olarak hedefleri tespit etmeye, izlemeye ve tanımaya çalışan, yaygın olarak kullanılan daha birçok taktik radar uygulamaların da mevcuttur.

3.2.2. ISR(Intelligence, Surveillance and Reconnaissance) Radarlar

ISR Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance, ‘İstihbarat, Gözetim ve Keşif’ anlamına gelir. ISR radarları özellikle istihbarat toplama, gözetleme ve keşif amaçlı kullanılan radar sistemlerini ifade eder. Bu radar sistemleri çevre hakkında değerli bilgiler sağlamak, ilgili hedefleri tespit etmek, izlemek ve çeşitli operasyonel

senaryolarda durumsal farkındalığı desteklemek için tasarlanmıştır. ISR radar sistemleri genellikle istihbarat ve gözetleme görevleri için özel yeteneklere ve özelliklere sahiptir. Kullanım alanlarına göre yaygın ISR radarlarına şöyle örnek verebiliriz;

İleri Hava Kontrol: Taktik radar ileri hava kontrolörleri tarafından yakın hava desteği görevlerini yönlendirmek için kullanılır. Dost kuvvetlerin, düşman mevzilerinin ve potansiyel hedeflerin belirlenmesine yardımcı olarak yer ve hava birimleri arasında etkili bir koordinasyon sağlar. Özellikle sınırlı hava radar görüşüne sahip olana dost hava araçlarının, düşmanın konumlarına göre yönlendirilmesinde etkili olur.

Yer Hareketli Hedef Göstergesi (GMTI): GMTI yeteneği ile donatılmış radar sistemleri, zorlu arazi ve koşullarda bile yerdeki araçları, birlikleri ve diğer hareketli hedefleri algılayabilir ve izleyebilir. Bu bilgi, düşman faaliyetlerinin izlenmesine ve kara operasyonlarının desteklenmesine yardımcı olur.

Karşı Batarya Ateşi: Radar sistemleri düşman topçu ateşini tespit ve takip edebilir, ateşleme pozisyonlarının hızlı bir şekilde belirlenmesini sağlar. Bu bilgi, dost kuvvetlerin tehdidi etkisiz hale getirmek için karşı batarya ateşiyle hızla karşılık vermesini sağlar. Bu özellikle seri topçu atışlarını engellemekten öte, atışın kaynağının tespitine odaklı sistemlerdir.

Keşif ve İstihbarat Toplama: Radar sistemleri, düşman faaliyetleri hakkında istihbarat toplamak, sınır bölgelerini izlemek ve arazi ve altyapı hakkında bilgi toplamak için keşif görevlerinde kullanılabilir.

Veri Füzyonu ve Entegrasyonu: ISR radar sistemleri genellikle elektro-optik/kızılötesi (EO/IR) kameralar, sinyal istihbarat (SIGINT) sistemleri ya da diğer istihbarat kaynakları gibi diğer algılayıcılarla bütünleşir. Birden fazla sensörden gelen bilgileri birleştirmek için veri füzyon teknikleri kullanılır ve operasyonel alanın kapsamlı bir resmini sağlar.

Yapay Açıklıklı Radar (SAR): SAR, Dünya yüzeyinin yüksek çözünürlüklü görüntülerini sağlayan bir radar çalışma modudur. ISR radar sistemleri ayrıntılı keşif yapmak, araziye haritalamak ve ilgilenilen belirli özellikleri tanımlamak için SAR yeteneklerini kullanabilir.

Radarın Dünya yörüngesindeki uydularda konuşlandırılması, bu tür platformların sağladığı erişim nedeniyle caziptir. Son yıllarda, uydu tabanlı sentetik açıklıklı radarların geliştirilmesi ve kullanılmasına yönelik uluslararası ilgi artmıştır. Uzay kaynaklı SAR, doğal kaynakların uzaktan algılanması, okyanusların ve körfezlerin izlenmesi, acil durum yönetimi ve antlaşmaların izlenmesi gibi çok sayıda uygulamaya sahiptir.

3.2.3. Özelleştirilmiş Radarlar

Radar teknolojisindeki yenilikler devam ediyor. RF elektroniği ve anten alanındaki gelişmeler teknolojinin yanı sıra yüksek performanslı hesaplama alanındaki kayda değer gelişmeler, çok sayıda yeni radar yeteneğinin tasarlanmasını ve kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

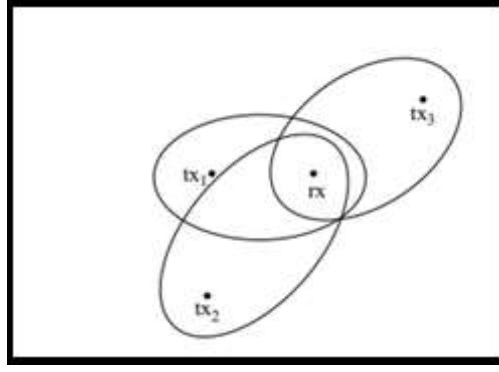
Pasif bistatik radar sistemleri, hareketli hedefleri algılamak ve yerlerini belirlemek için yayın istasyonları ve iletişim kulelerinden gelenler gibi ortam sinyallerinden yararlanır. Radar potansiyeli ile ilgili ilk gözlemler, bir alıcı bölgede görüntülenen işbiriksiz işaretler üzerindeki hedef kaynaklı modülasyonun bir sonucuydu; ilk radar sistemleri, gönderme ve alma işlevini izole etme gereksinimi nedeniyle bistatiktir ve genel olarak radarın tarihi ile bistatik topolojinin tarihi birbirinden ayrılmaz. Düşük maliyetli elektronik bileşenlerin ve hesaplama aygıtlarının kullanılabilirliği, pasif bistatik radarların tasarımında ve konuşlandırılmasında önemli bir etkidir ve bu alandaki uluslararası ilgi artışının başlıca nedenidir.

Dijital sinyal işleme (DSP) Pasif bistatik radar için kritik öneme sahip olan bu özellik, alıcı sahanın çoklu gözetim alıcı demetleri oluşturarak dağınık gönderim enerjisini geniş ölçüde yakalamasını sağlar; darbe sıkıştırma için gerekli olan çoğaltma işaretinin doğrudan yolla alınmasını ve oluşturulmasını sağlar; çoğaltma işaretinin

ölçeklendirilmiş, zaman gecikmeli sürümlerini filtrelemek için farklı Doppler hipotezleri ile darbe sıkıştırma uygulamasına izin verir; ve gözetim kanallarına müdahale eden güçlü, doğrudan yol işaretinin etkisini azaltmak için bir mekanizma sağlar.

Pasif bistatik radarın bazı belirgin özellikleri vardır. Tüm bistatik radarlarda olduğu gibi, alıcı pasiftir ve bu nedenle potansiyel olarak algılanamaz. Bu, radarın anti-radyasyon füzelerinin (ARM) saldırısına karşı bağışık olduğu anlamına gelir ve düşman radar alıcının yerini bilmediğinden, herhangi bir karıştırmanın yönsüz olması gerekir ki bu da radarın etkinliğini azaltır. Bistatik sistemler gizliliğe karşı bir avantaj sağlayabilir, çünkü bir hedefin monostatik radar tesir kesitini (RCS) azaltmak için hedef şekillendirme bistatik geometrilerde etkili olmayabilir. Bistatik radarlar ayrıca, ileri saçılmada meydana gelen hedef RCS'sindeki önemli artıştan da yararlanabilir. PBR sistemleri genellikle, hedef boyutları genellikle radar dalga boyu ile aynı mertebede olacağından, normalde radar kullanımı için uygun olmayan ve RCS azaltma tekniklerinin mikrodalga frekanslarına göre daha az etkili olabileceği VHF veya UHF frekanslarını kullanır. Kullanılabilecek pek çok aydınlatma kaynağı vardır, bunların çoğu yüksek güçte ve uygun konumdadır ve neredeyse tüm radar uygulamaları için bir sorun teşkil eden elektromanyetik spektrumun giderek daha fazla tıkanması altında PBR için bir avantajdır. Son olarak, alıcı sistemleri genellikle oldukça basit ve düşük maliyetli olabilir ve verici için herhangi bir lisansa gerek yoktur.

Muhtemelen PBR alıcılarından alınan ölçümleri birleştirmenin en basit yolu diferansiyel menzil ölçümlerini kullanmaktır. Tek bir verici-alıcı çifti için, diferansiyel menzil ölçümü hedefi $(R_t + R_r) = \text{sabit}$ ile tanımlanan bir elips üzerinde konumlandırır. Yankının geliş yönü ölçülebiliyorsa, hedefin elips üzerindeki konumu kesin olarak bulunabilir; değilse, ikinci bir alıcı (veya ikinci bir verici) varsa, bu tür iki elips olacaktır ve hedefin konumu elipslerin kesiştiği noktalardan birinde olmalıdır (Şekil 8). Üç veya daha fazla verici-alıcı çifti ve dolayısıyla üç veya daha fazla elips varsa, hepsinin kesiştiği tek bir nokta olacaktır ve bu nedenle doğru hedef konumu belirlenebilir, ancak yanlış konumları belirleme ve çıkarma süreci karmaşık olabilir.



Şekil 3.6: Üç gönderme-alma çifti kullanarak üçgenleme (hedef üç elipsin kesiştiği noktada bulunur. tx bir verici konumudur ve rx bir alıcı konumudur.)

Özetlemek gerekirse, pasif bistatik radarın 1980'lerin başındaki ilk deneylerden bu yana - ve kesinlikle bundan 50 yıldan daha uzun bir süre önce yayın sinyalleri kullanılarak yapılan ilk radar deneylerinden bu yana - uzun bir yol kat ettiği sonucuna varabiliriz. Potansiyel olarak, basit ve düşük maliyetli ekipmanlarla, gönderim lisansına ihtiyaç duymadan gizli çalışma ve elektromanyetik spektrumun normalde radar kullanımı için uygun olmayan bölümlerini kullanma olanağı sunar. Çok çeşitli yayın, iletişim ve radyonavigasyon kaynakları ve bunların mükemmel uzaysal kapsamı PBR için büyük bir kapsam sağlar. Tüm bistatik radarlarla ortak olarak, hedeflerin radar izini arttıran ileri saçılma gibi mekanizmalardan yararlanılabilir. PBR sistemlerinin basit ve düşük maliyetli olması, üniversite grupları tarafından yapılan araştırmalar için çok uygun olduğu anlamına geliyordu ve bu konuda çok sayıda yayın yapıldı.

Bu nedenle PBR sistemlerinin kullanılabileceği uygulamaların dikkatle değerlendirilmesi gerekir. Geleneksel radar yaklaşımları kadar "neredeyse iyi" olduğunu iddia etmek iyi değildir. İstenen uygulama (gözetleme, uzaktan algılama, vb.) ve bunu takip eden gereksinimler ile kullanılabilecek aydınlatıcı kaynağın özellikleri arasındaki ilişkiyi çok iyi anlamak önemlidir; örneğin, kapsama alanı (uzaysal ve zamansal), bant genişliği (çözünürlük), entegrasyon süresi (sahne durağanlığı), vb.

Umut vaat eden uygulamalar şunlardır; uzun entegrasyon sürelerinin kullanılabileceği bilimsel ölçümler (uzaktan algılama), sınır veya çevre gözetleme (belki de ileri dağılımdan yararlanarak) veya kritik varlıkların korunması veya her ikisi ve geleneksel sensörlerin çalışmasının eksik olduğu alanlarda boşluk doldurma.

Son olarak, PBR aydınlatıcılarının belirsizlik fonksiyonları temelde geometriye bağılı olduğundan, bistatik bir sensörün performansının tehlikeye girdiği bölgelerin her zaman olacağı yorumunu da yapabiliriz. Bu nedenle, tamamen bistatik yerine multistatik terimlerle düşünmek mantıklıdır.

Hava trafik kontrol (ATC) radarı, havaalanları çevresinde ve kontrollü hava sahası içinde hava trafiğini yönetmek ve kontrol etmek için kullanılan özelleştirilmiş başkaca bir radar sistemidir. Radar sistemi tarafından kapsanan hava sahasındaki uçakların konumu, irtifası, hızı ve yönü hakkında gerçek zamanlı bilgi sağlar.

Hem ticari hem de askeri ATC, iki önemli ilkeye dayanan bir sisteme dayanır. Birincisi, hava trafik kontrolörünün belirli bir hava sahası hacminde faaliyet gösteren tüm uçuşlar (uçaklar, helikopterler, balonlar, vb.) hakkında gerçek zamanlı bilgiye sahip olması, ikincisi ise pilotlar ve hava trafik kontrolörleri arasında talimatların iletildiği bir sistemin hava sahasını kullanan herkes tarafından karşılıklı olarak anlaşılmasıdır. Hava trafik kontrolörü, pilotlara hava sahası kullanım talimatları sağlayarak belirli bir hava sahası hacminde güvenli ve verimli uçuşu koordine etmek gibi hayati bir göreve sahiptir. ATC'den pilotlara verilen bu talimatlar, kalkıştan hava sahasındaki seyrüsefer ara noktalarının kullanımına, yaklaşma ve iniş dahil olmak üzere her bir uçağın hem yatay hem de dikey olarak ayrılmasını sağlar talimatların yanı sıra güvenlikle ilgili diğer iletişimler.

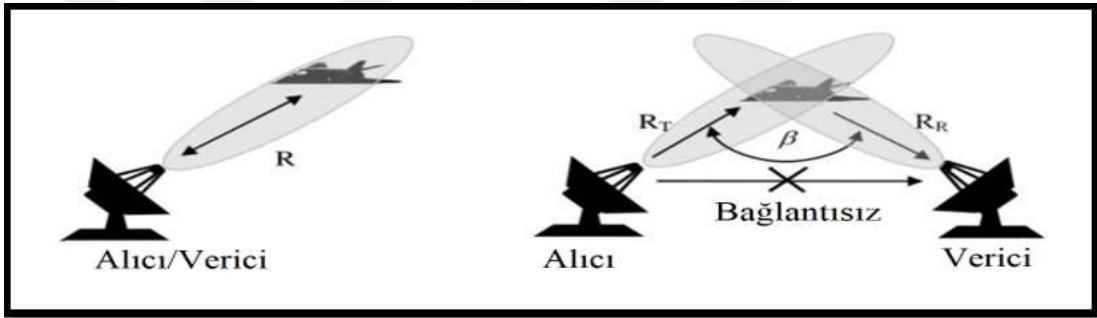
ATC radarı, kontrolör tarafından hava sahasını kontrol etmek ve güvenli ve verimli hava yolculuğu sağlamak için kullanılan bir araçtır. Şu anda iki ATC radar sınıfı bulunmaktadır: ASR'ler ve ARSR'ler. S-bandı ASR'ler ve L-bandı ARSR'ler sırasıyla terminal ve rota ortamında hava sahasını gerçek zamanlı olarak izlemek için optimize edilmiştir. ATC radarında hem PSR (skin track) hem de SSR (aircraft transponder) kullanılır.

Bu bölümde ATC radarı ile ilgili bazı konulara kısa bir bakış sağlanmıştır. Atmosferik yayılım gibi diğer ATC radar tasarım sorunları da mevcuttur ve bir sonraki bölümde listelenen referanslar daha derinlemesine araştırmak için ek malzeme sağlar. ATC radarı konusu, rota ATC için uzun menzilli ARSR, terminal ATC için daha kısa menzilli ASR ve SSR'nin geliştirilmesi ve uygulanmasını içerir. ATC radarı için hava

durumu algılama ve işleme de ATC için büyük önem taşır. Bu teknolojilerin her biri, şu anda NAS içinde konuşlandırılan operasyonel sistemlerle ilişkili tarihsel gelişimin yanı sıra belirli teknik sorunlara sahiptir.

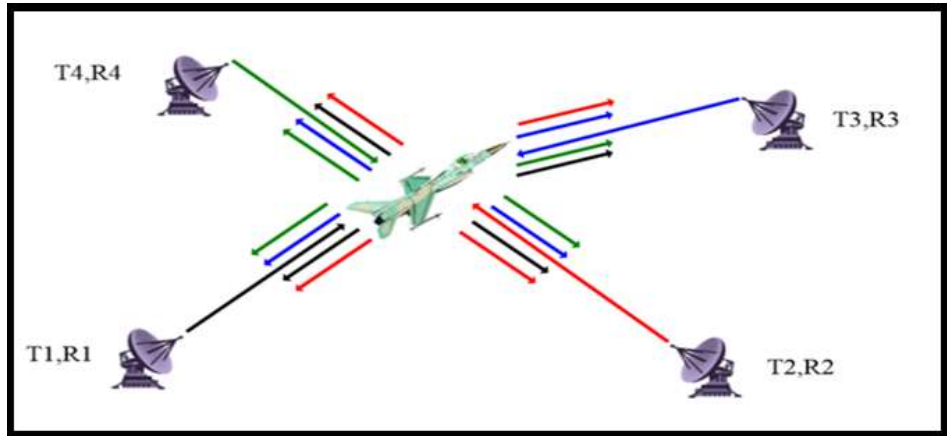
3.2.4. Monostatik, Bistatik ve Multistatik Radar Mimarileri

Radarları mimari olarak monostatik, bistatik ve multistatik olarak sınıflandırabiliriz. Monostatik radar yapısı tüm alıcı ve vericiye bağlı ışınma elemanları tek bir yerde kurulmuştur. Bu hesaplamayı ve modellemeyi çok kolaylaştırmaktadır. Bistatik radarlarda, alıcı kademesi, vericiden ayrı bir yerde konuşludur. Hedefi farklı bir açıdan görür. Her bir alıcı anteni farklı açılardan gördüğü için tespit olasılığı artırılabilir ancak karmaşık kestirim algoritmalarına ihtiyaç duyar.



Şekil 3.7: Monostatik ve bistatik radar mimarisi gösterimi.

Multistatik radar mimarisinde ise birden fazla alıcı ve vericilerle kestirim yapılmaktadır. Birden fazla radarın kullanılmasıyla tek bir alıcıdan kaynaklanan hatalar minimize edilmektedir.



Şekil 3.8: Multistatik radar mimarisi gösterimi.

Radar ölçümleri ile ilgili olarak, monostatik, bistatik ve multistatik sistemler arasındaki farka dikkat çekmek gerekir. Monostatik radarlarda gönderici ve alıcı aynı yerde bulunur. Bistatik konfigürasyonda ise gönderme ve alma yerleri kayda değer bir mesafe ile birbirinden ayrılmıştır; bu mesafe tam olarak tanımlanmamıştır, ancak bistatik konfigürasyonun hedef ve hedef dışı saçılma fenomenolojisinin monostatik durumdan farklı olduğu ve dolayısıyla farklı bilgi içeriğine sahip olduğu bir konfigürasyon olarak düşünülmesi öğreticidir. İşbirlikçi bir bistatik sistem kendi aydınlatma kaynağını kontrol ederken, işbirlikçi olmayan bir bistatik sistem fırsat aydınlatıcıları kullanır. Multistatik radar birden fazla bistatik düğümden gelen verileri birleştirir ve çeşitli hedef ölçümlerinin birleşiminden kaynaklanan önemli ölçüde geliştirilmiş coğrafi konum belirleme performansı sağlayabilir.

3.3. Multistatik ve Monostatik Konumlandırılmış MMW(Milimeterwave) Radar ile İHA'nın Kalman Filtresi Tespiti

Bu tez çalışmasında monostatik ve multistatik konumlandırılmış MMW Radar ile Mini İHA'nın tespitinde multistatik radarın daha etkili olduğunu tezi üzerinde durulmuştur.

Daha önce açıklandığı üzere monostatik bir radarda, tüm alıcı ve vericiye bağlı ışıma elemanları tek bir yerde kurulmuştur. Multistatik radar mimarisinde ise birden fazla alıcı ve vericilerle kestirim yapılmaktadır.

3.3.1. MMW Radarın Özellikleri

Çalışmamızda AWR1642, Texas Instruments (TI) tarafından geliştirilen bir radar sensörü kullanılmıştır. MMW sensör portföyünün bir parçasıdır ve otomotiv, endüstriyel ve robotik gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. AWR1642 radar sensörünün bazı temel özellikleri aşağıda verilmiştir(AWR1642 User Manual 2021):

Frekans Aralığı: AWR1642 milimetre dalga frekans aralığında, özellikle 76-81 GHz'de çalışır. Bu frekans bandı, yüksek çözünürlüklü radar algılamasına olanak tanır ve nesnelerin doğru şekilde algılanmasını ve izlenmesini sağlar.

Tek Çipli Çözüm: AWR1642 tek çipli bir radar sensörüdür; bu da verici, alıcı ve sinyal işleme bileşenlerinin tek bir pakete entegre edildiği anlamına gelir. Bu kompakt tasarım, sistem entegrasyonunu basitleştirir ve radar sisteminin toplam ayak izini azaltır.

Çok Modlu Çalışma: AWR1642, çeşitli uygulamalara uyacak şekilde farklı çalışma modlarını destekler. Menzil ve hız ölçümleri için frekans modülasyonlu sürekli dalga (FMCW) modunda veya daha yüksek çözünürlüklü görüntüleme uygulamaları için chirp sequence modülasyon (CSM) modunda çalışabilir.

Anten Dizisi: AWR1642, birden fazla verici ve alıcıya sahip entegre bir anten dizisine sahiptir. Bu anten dizisi, radarın algılama yeteneklerini belirli yönlere odaklamasına ve hedef tespit ve takibini iyileştirmesine olanak tanıyan hüzmeye biçimlendirme ve hüzmeye yönlendirme sağlar.

Yüksek Çözünürlüklü Görüntüleme: AWR1642 yüksek çözünürlüklü görüntüleme yetenekleri sayesinde çevredeki ortamın ayrıntılı radar görüntülerini oluşturabilir. Bu özellik nesne tanıma, sınıflandırma ve izleme gibi uygulamalar için kullanışlıdır.

Dijital Sinyal İşleme: AWR1642, gerçek zamanlı sinyal işleme görevlerini yerine getirmek için güçlü bir sayısal sinyal işlemcisi (DSP) içerir. Bu DSP, hedef tespiti, menzil ölçümü, hız tahmini ve varış açısı hesaplamaları için gelişmiş algoritmalar sağlar.

Düşük Güç Tüketimi: AWR1642 güç tasarruflu olacak şekilde tasarlanmıştır, bu da onu güç tüketiminin önemli olduğu uygulamalar için uygun hale getirir. Performanstan ödün vermeden enerji kullanımını optimize etmek için düşük güç tekniklerini ve özelliklerini kullanır.

Otomotiv Sınıfı: AWR1642, otomotiv endüstrisinin katı gereksinimlerini karşılamak üzere tasarlanmıştır. Otomotiv uygulamaları için nitelikli olup sıcaklık, elektromanyetik uyumluluk ve güvenilirlik özellikleri dahil olmak üzere ilgili otomotiv standartlarına uygundur.

Geliştirme Araçları ve Yazılım: TI, AWR1642 radar sensörünü kullanan uygulamaların geliştirilmesini ve değerlendirilmesini desteklemek için kapsamlı bir yazılım geliştirme kiti (SDK) ve değerlendirme modülleri (EVM'ler) sağlar. Bu araçlar, geliştiricilerin radar sensörünü sistemlerine entegre etmelerine ve yeteneklerini etkin bir şekilde kullanmalarına yardımcı olur.

Texas Instruments AWR1642, çok çeşitli uygulamalar için uygun gelişmiş özelliklere sahip çok yönlü bir radar sensörüdür. Yüksek çözünürlüklü görüntüleme, çok modlu çalışma ve entegrasyon yetenekleri, onu otomotiv ve endüstriyel radar uygulamaları için popüler bir seçim haline getirmektedir.

3.3.2. Kalman Filtresi

Kalman filtresi, bir dizi gürültülü ölçüme dayalı olarak dinamik bir sistemin durumunu tahmin etmek için kullanılan bir algoritmadır. Kontrol sistemleri, navigasyon, sinyal işleme ve robotik dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kalman filtresi, yeni ölçümlere ve sistem dinamiklerine dayalı olarak tahminini özyinelemeli olarak güncelleyerek sistemin durumunun en uygun tahminini sağlar.

Kalman filtresi iki ana adımdan oluşur: tahmin adımı ve güncelleme adımı.

Tahmin Adımı:

Durum Tahmini: Önceki durum tahminine dayanarak, kalman filtresi sistem dinamiği modelini kullanarak sistemin mevcut durumunu tahmin eder. Bu tahmin, önceki durum tahmininin sistemin geçiş matrisi ile çarpılmasıyla elde edilir.

Hata Kovaryans Tahmini: Kalman filtresi ayrıca durum tahminindeki belirsizliği veya güveni temsil eden hata kovaryansını da tahmin eder. Hata kovaryansı, sistemin kovaryans matrisi ve geçiş matrisi kullanılarak güncellenir.

Güncelleme Adımı:

Ölçüm Artığı: Güncelleme adımı, kalman filtresi tahmin edilen durumu gerçek ölçümle karşılaştırır. Durum tahminine dayalı olarak ölçülen değer ile tahmin edilen ölçüm arasındaki farkı hesaplar.

Kalman Kazancı: Kalman kazancı, durum tahmininin güncellenmesinde ölçüme verilen ağırlığı belirler. Hata kovaryansına, ölçüm gürültüsü kovaryansına ve sistemin ölçüm matrisine dayalı olarak hesaplanır.

Durum Güncellemesi: Kalman kazancı ve ölçüm kalıntısını kullanan kalman filtresi, durum tahminini ölçülen değere göre ayarlayarak günceller. Bu güncelleme, tahmin edilen durum ve ölçüm kalıntısının ağırlıklı bir kombinasyonudur.

Hata Kovaryans Güncellemesi: Kalman filtresi ayrıca kalman kazancına bağlı olarak hata kovaryansını da günceller. Bu güncelleme, ölçüm bilgilerinin dahil edilmesi nedeniyle belirsizlikteki azalmayı yansıtır.

Kalman filtresi özyinelemeli bir şekilde çalışır ve yeni ölçümler elde edildikçe durum tahminini ve hata kovaryansını sürekli olarak günceller. Ölçümler ve sistem dinamikleri ile ilgili belirsizlikleri dikkate alarak, gerçek durum ile tahmini durum arasındaki ortalama kare hatasını en aza indirerek optimal bir tahmin sağlar.

Kalman filtresinin etkinliği, gürültülü ölçümlerle başa çıkma ve doğru durum tahminleri sağlama yeteneğinde yatmaktadır. Özellikle dinamik davranışa ve belirsiz ölçümlere sahip sistemlerle uğraşırken kullanışlıdır. Filtrenin özyinelemeli yapısı ve istatistiksel modellere dayanması, onu çeşitli uygulamalarda durum tahmini için güçlü bir araç haline getirir.

```

import numpy as np

def kalman_filter(measurements):
    # Initialize variables
    dt = 1.0 # Time step
    A = np.array([1]) # State transition matrix
    H = np.array([1]) # Measurement matrix
    Q = np.array([0.01]) # Process noise covariance
    R = np.array([1]) # Measurement noise covariance
    x = np.array([0]) # Initial state estimate
    P = np.array([1]) # Initial error covariance estimate

    filtered_states = []

    for measurement in measurements:
        # Prediction step
        x = A.dot(x)
        P = A.dot(P).dot(A.T) + Q

        # Update step
        y = measurement - H.dot(x)
        S = H.dot(P).dot(H.T) + R
        K = P.dot(H.T).dot(np.linalg.inv(S))
        x = x + K.dot(y)
        P = (np.eye(len(x)) - K.dot(H)).dot(P)

        filtered_states.append(x[0])

    return filtered_states

# Example usage
measurements = [1.2, 2.0, 3.5, 4.8, 5.9] # Example measurements
filtered_states = kalman_filter(measurements)

print("Filtered States:", filtered_states)

```

Şekil 3.9: Kalman filtresine ait program kodlarının gösterimi.

Bu örnekte, kalman_filter fonksiyonu girdi olarak bir ölçüm listesi alır ve filtrelenmiş durum tahminlerinin bir listesini döndürür. Fonksiyon, tahmin ve güncelleme adımları dahil olmak üzere kalman filtre algoritmasını adım adım uygular.

Durum geçiş matrisi, ölçüm matrisi ve gürültü kovaryans matrisleri tanımlanır ve ilk durum tahmini ve hata kovaryans tahmini ayarlanır.

Kod, durum tahminini iyileştirmek için tahmin ve güncelleme adımlarını gerçekleştirerek her ölçüm boyunca yineler. Filtrelenmiş durum tahminleri filtered_states listesinde saklanır ve sonunda yazdırılır.

Lütfen bunun 1 boyutlu bir durum için kalman filtresinin temel bir uygulaması içindir. Daha karmaşık senaryolar veya daha yüksek boyutlu sistemler için, kodu buna göre uyarlamanız veya kalman filtresi işlevselliği sunan özel kütüphaneleri kullanmak gerekir.

3.3.3. Multistatik ve Monostatik Konumlandırılmış Radar ile Simülasyon Uygulamasında Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılmalı Sonuçları

Monostatik ve multistatik konumlandırılmış MMW Radar ile Mini İHA'nın tespitinde multistatik radarın daha etkili olduğunu tezi üzerinde durulmuştur. Bu durum simülasyon ortamında denenmiş olup ve bu simülasyondaki senaryoya uygun uygulama çalışmaları yürütülmüştür. Her iki çalışmada monostatik ve multistatik radar uygulamaları kıyaslanarak ele alınmıştır.

Öncelikle İHA belli bir paternde sabit bir hızla hareket ettirilerek elde edilen iki radardan ayrı ayrı konum bilgileri, belli bir hata oranında elde edilmiştir.

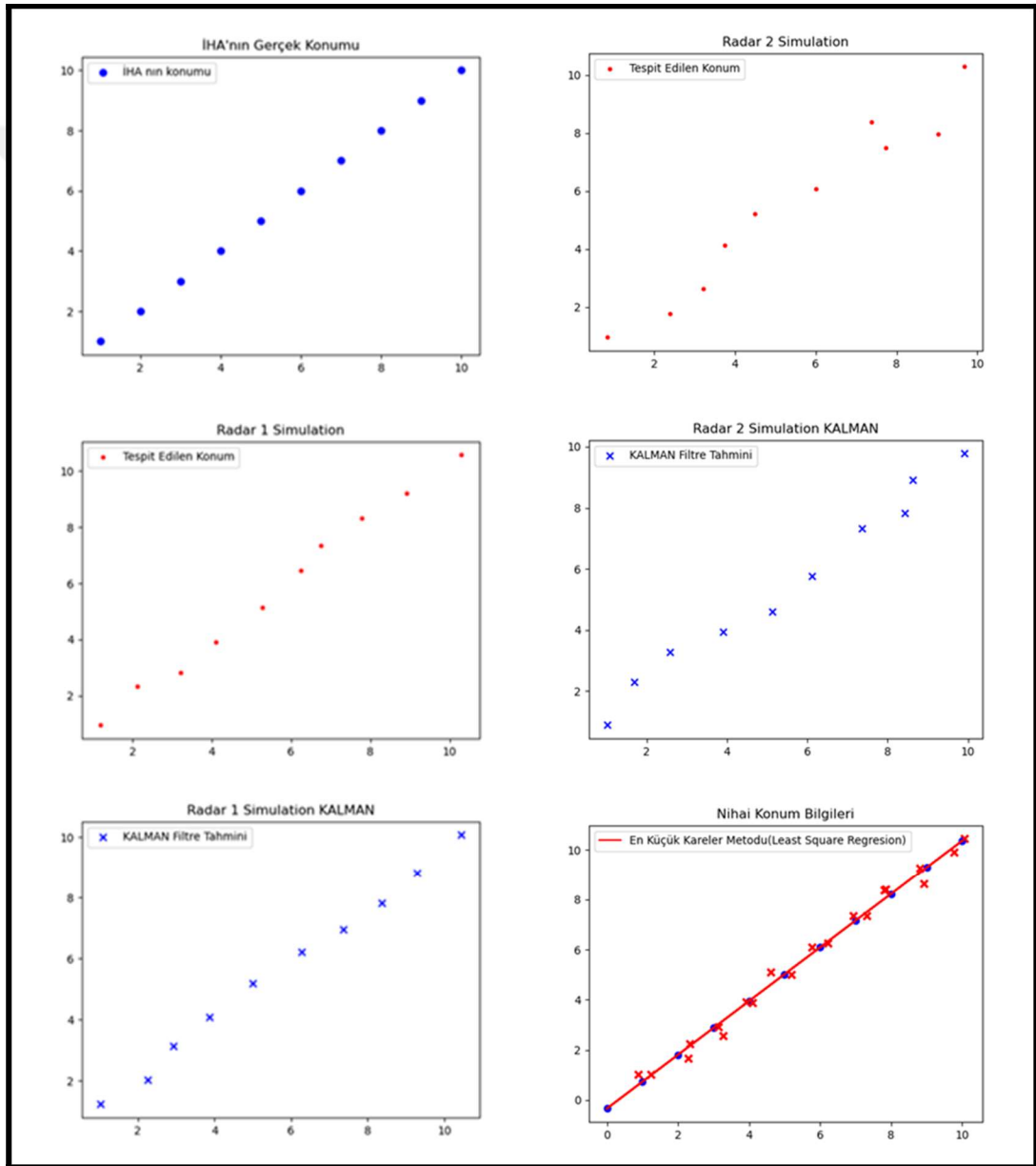
Daha sonra belli bir hata oranıyla elde edilmiş bu iki konum bilgisine kalman filtresi izleme algoritması kullanılarak yeni tahminler oluşturulmuş ve bu derlenmiş iki konum bilgisi, kestirim algoritmaları kullanılarak bir araya getirilmiş, nihai konum bilgileri elde edilmiştir. Sonuç olarak da bu işlemler neticesinde tek radardan elde edilen bilgiler ile iki radardan elde edilmiş bilgilerin hata oranları kıyaslanmıştır.

Öncelikle belli bir paternde sabit bir hızla hareket ettirilen hedefe ait konum bilgileri belirli bir aralıktaki hata oranları ile elde edilmiştir. Elde edilen konum bilgilerine kalman filtresi izleme algoritması uygulanmış ve konum bilgilerinin doğruluğunun arttığı, hata oranlarının düştüğü görülmüştür.

İki monostatik radardan elde edilen bilgiler En Küçük Kareler Metodu (Mean Square Regression MMSE) kullanılarak yeni konum bilgileri elde edilmiştir. Kestirim algoritması kullanılarak elde edilmiş nihai konum bilgilerinin, monostatik radarlardan elde edilen bilgilere göre hata oranlarının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda örnekleme sayısının artmasıyla hem monostatik radar verilerine ait hata oranlarında, hem de nihai konum bilgilerindeki verilere ait hata oranlarında düşüş görülmüştür. Artan örnekleme sayısı ile hata oranının düşmesi, hedefin sabit bir hızla düz paternde hareket ettirilmesinin ve kestirim algoritmalarının özellikle bu gibi daha stabil durumlarda daha iyi tahminler ortaya koymasından kaynaklanmaktadır.

Devam eden uygulama çalışmasında, simülasyon çalışmalarında ulaşılan sonuçlara paralel sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışma ile bir İHA tespit yöntemleri, Temel Radar Mimarileri ve buna dayanan uygulamalar üzerinde durulmuş ve ortaya konan hipoteze uygun sonuçlar elde edilmiştir. Devam eden uygulama çalışmamızın bu sonuçları desteklediği görülmüştür.



Şekil 3.10: Simülasyon uygulamasında elde edilen verilerin gösterimi.

Tablo 3.1: Simülasyon uygulamasında elde edilen Radar1'e ait veriler.

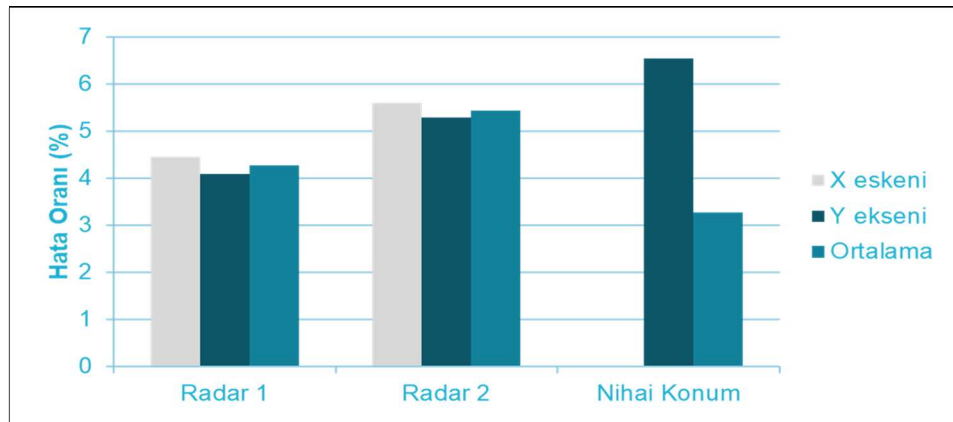
RADAR 1 KONUM VERİLERİ											
GERÇEK KONUM	X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Y	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
KONUM TAHMİNİ	X	1.23	2.34	3.13	4.09	5.19	6.22	6.94	7.81	8.82	10.07
	Y	1.01	2.24	2.92	3.87	4.99	6.27	7.35	8.36	9.29	10.45
HATA ORANI(%)	X	23	1.7	4.33	2.25	3.8	3.66	0.85	2.37	2	0.7
	Y	1	12	2.66	3.25	0.2	4.5	5	4.5	3.22	4.5

Tablo 3.2: Simülasyon uygulamasında elde edilen Radar2'e ait veriler.

RADAR 2 KONUM VERİLER											
GERÇEK KONUM	X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Y	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
KONUM TAHMİNİ	X	0.88	2.28	3.27	3.92	4.61	5.77	7.31	7.84	8.91	9.77
	Y	1.01	1.68	2.57	3.91	5.11	6.11	7.35	8.42	8.62	9.91
HATA ORANI(%)	X	12	14	9	2	5.5	3.83	4.42	2	1	2.3
	Y	1	16	14.3	2.25	2.2	1.83	5	5.25	4.22	0.8

Tablo 3.3: Simülasyon uygulamasında elde edilen tahminlere ait veriler.

NİHAİ KONUM TAHMİNLERİ											
GERÇEK KONUM	X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Y	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
KONUM TAHMİNİ	X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Y	0.73	1.80	2.87	3.94	5.01	6.08	7.15	8.22	9.29	10.36
HATA ORANI(%)	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Y	27	10	13	2	0.2	1.33	2.14	2.75	3.22	3.8

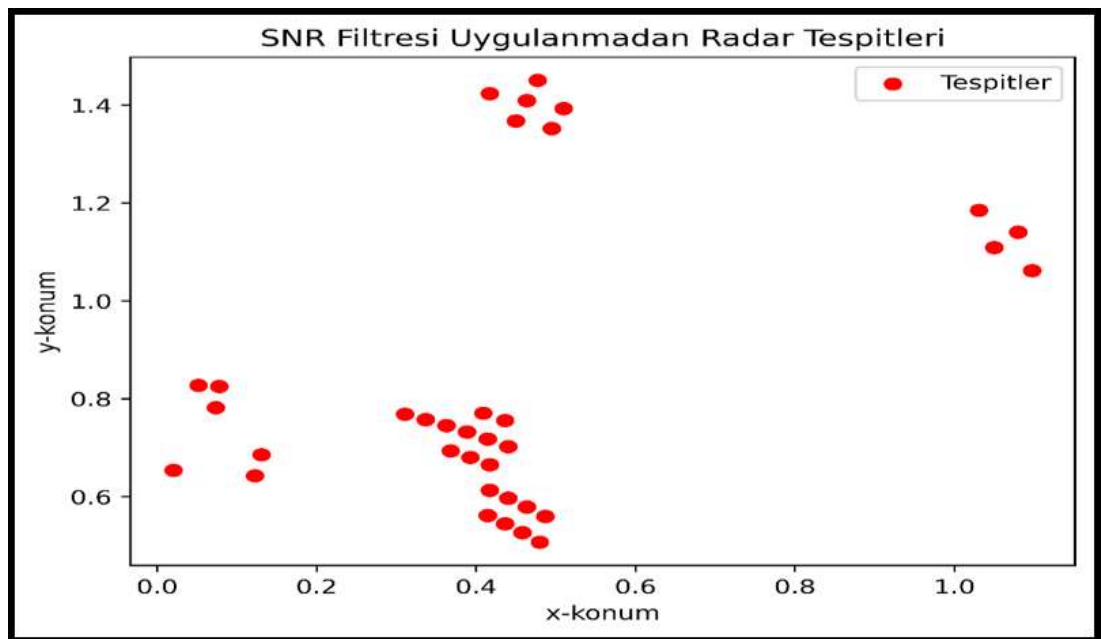


Şekil 3.11: Simülasyon uygulamasında elde edilen tahminlere ait hata oranları.

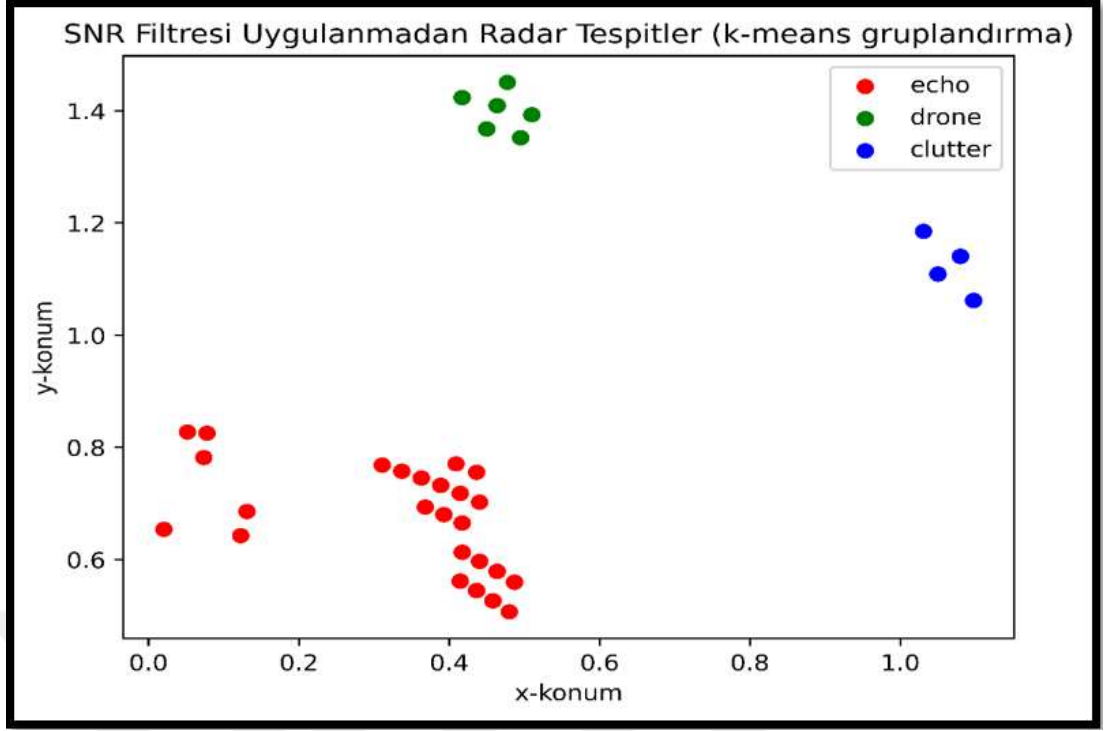
3.3.4. Multistatik ve Monostatik Konumlandırılmış Radar ile Deneysel Uygulamada Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılması Sonuçları

Deneysel uygulamada sabit iki MMW Radar ile Mini İHA'nın tespiti üzerinde durulmuştur. İki radar birbirine 300 cm uzaklıkta konumlandırılmıştır. İki senaryo üzerinde çalışılmıştır. İHA bu iki radarın tam ortasında aynı hat üzerine konumlandırılmıştır. İlk senaryoda havada sabit duran hava aracının tespiti incelenmiş, k-means gruplama algoritmaları kullanılarak ve SNR filtresi uygulanarak İHA'nın konumu yüksek doğrulukta tespit edilmiştir. İkinci senaryoda sabit bir hızla dikine hareket ettirilen İHA'nın 5 saniyelik hareketi iki radar tarafından izlenmiştir. Eldeki işaretlere SNR filtresi ve kalman filtresi uygulanarak paterne ait konumlar elde edilmiştir. Bu monostatik konum bilgileri En Küçük Kareler Metodu (Mean Square Regression MMSE) algoritması kullanılarak harmanlanmış ve bu multistatik uygulama ile yeni paterne ait bilgiler elde edilmiştir.

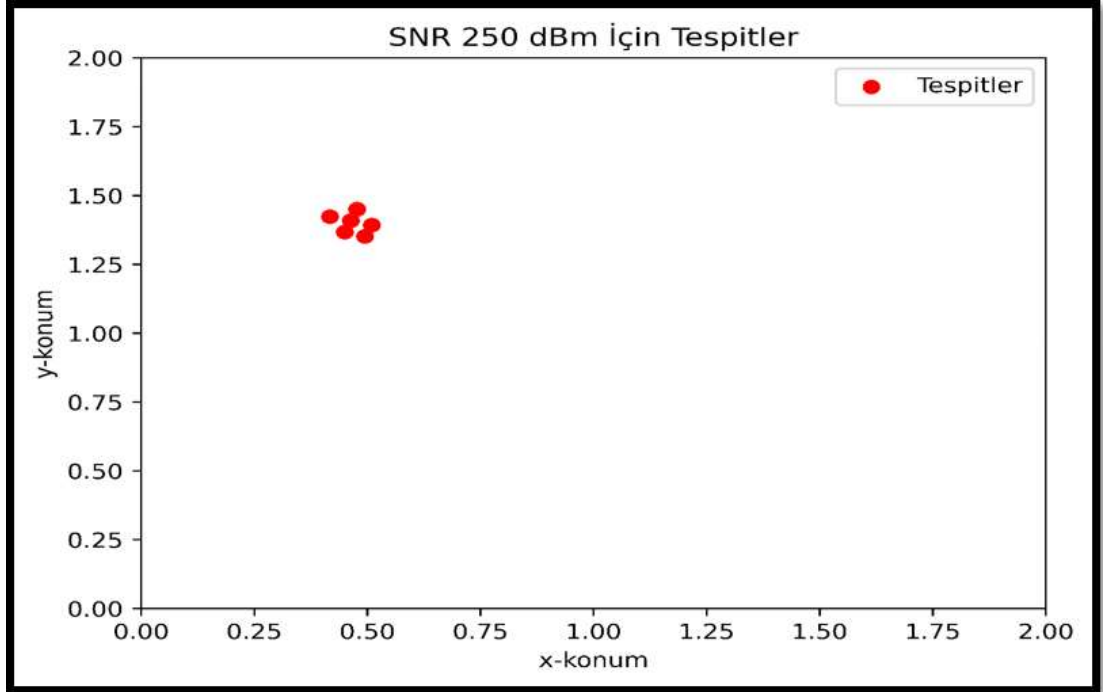
İlk senaryo için yapılan çalışmada; Bir numaralı radar için elde edilen gürültülü veriler ile bu verilerin k-means gruplandırılmış halleri ve SRN filtre uygulamaları aşağıdaki tabloda verilmiştir.



Şekil 3.12: Radar 1'e ait SNR filtresiz tespitler (senaryo1).

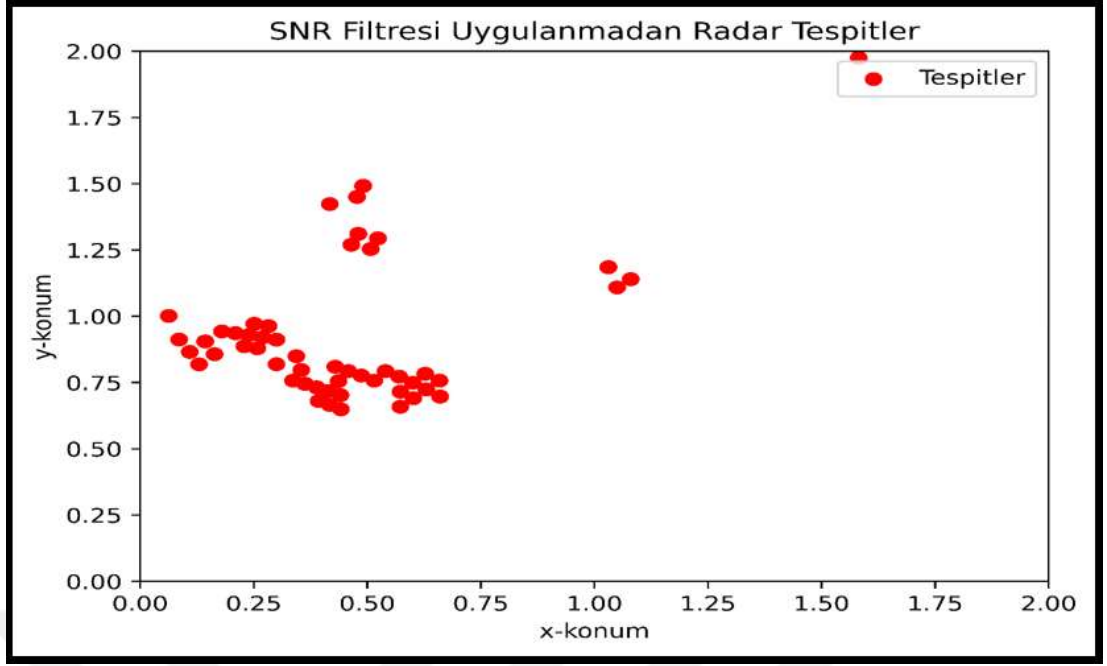


Şekil 3.13: Radar 1'e ait SNR filtresiz k-means gruplandırma uygulaması (senaryo1).

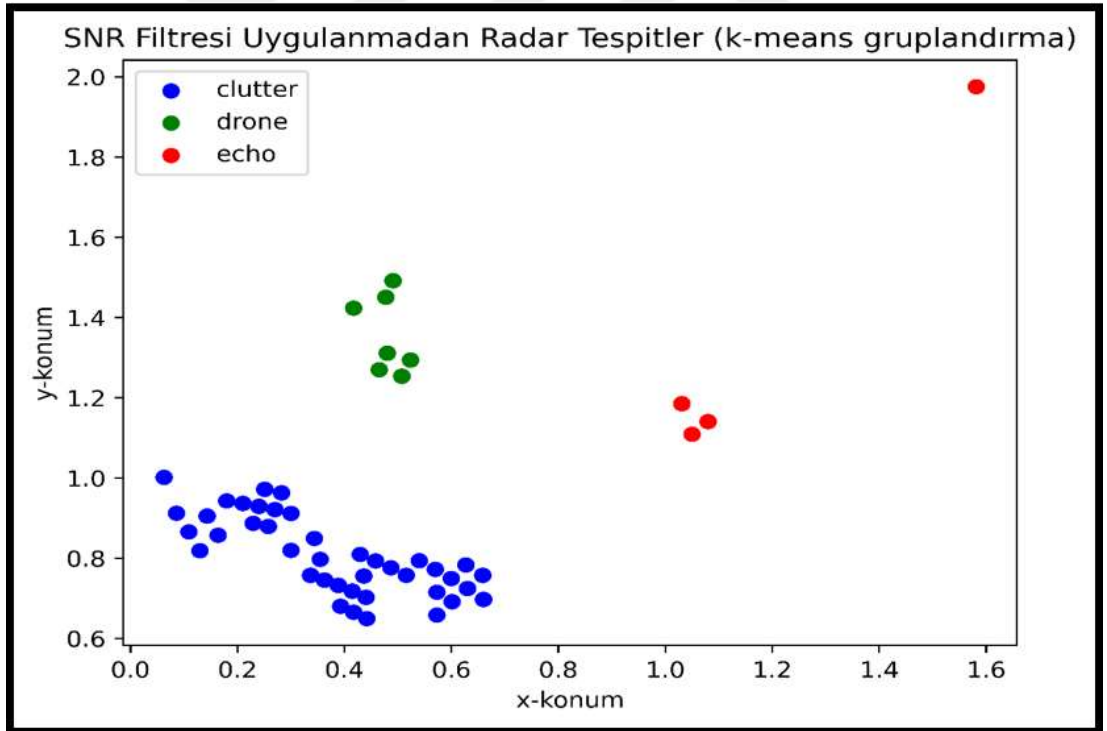


Şekil 3.14: Radar 1'e ait izlere SNR 250 dBm filtre uygulaması (senaryo1).

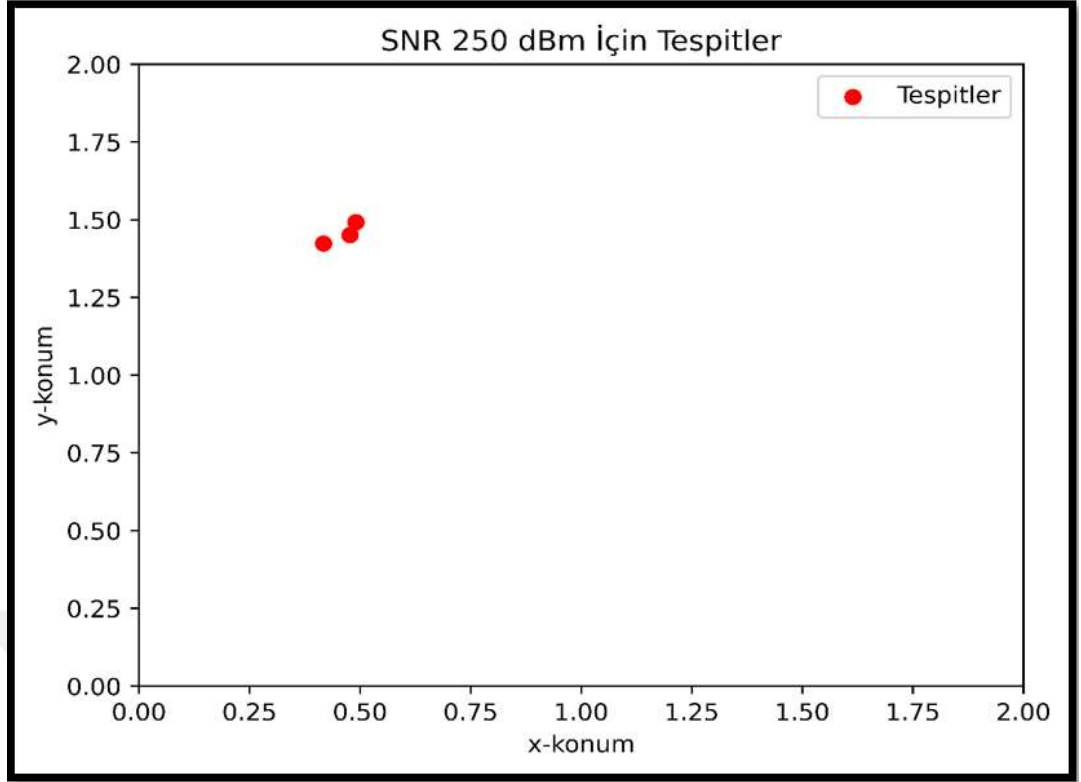
İki numaralı radar için elde edilen gürültülü verilerin k-means gruplandırılmış halleri ve SRN filtre uygulanmaları aşağıdaki tabloda verilmiştir.



Şekil 3.15: Radar 2'e ait SNR filtresiz tespitler (senaryo1).



Şekil 3.16: Radar 2'e ait SNR filtresiz k-means gruplandırma uygulaması (senaryo1).

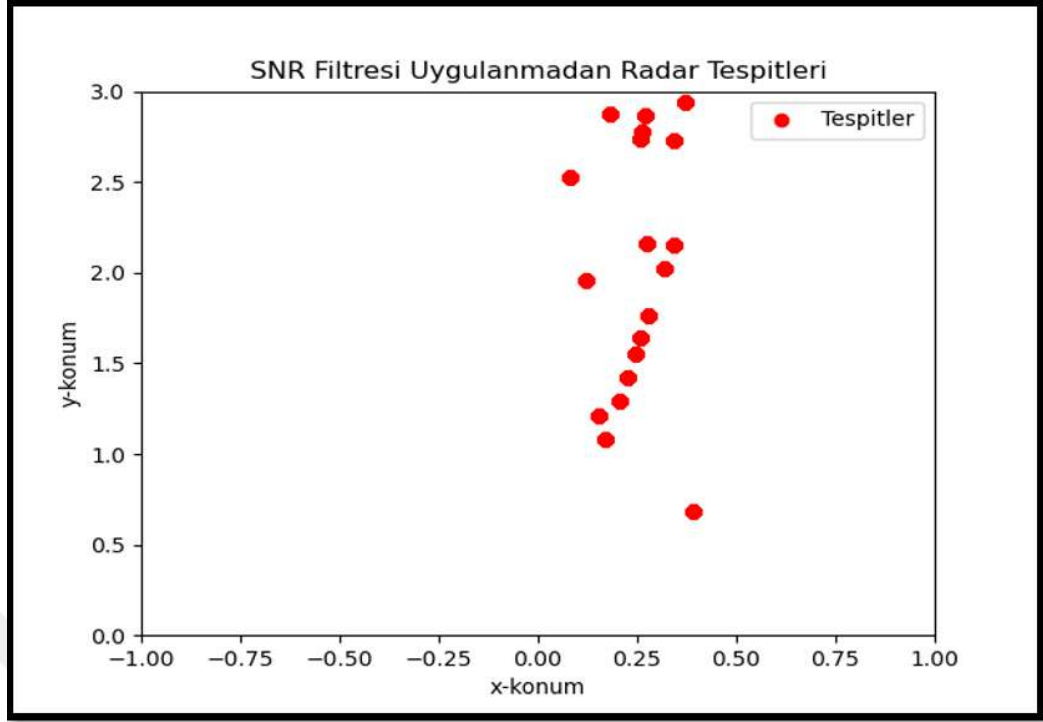


Şekil 3.17: Radar 2'e ait izlere SNR 250 dBm filtre uygulaması (senaryo1).

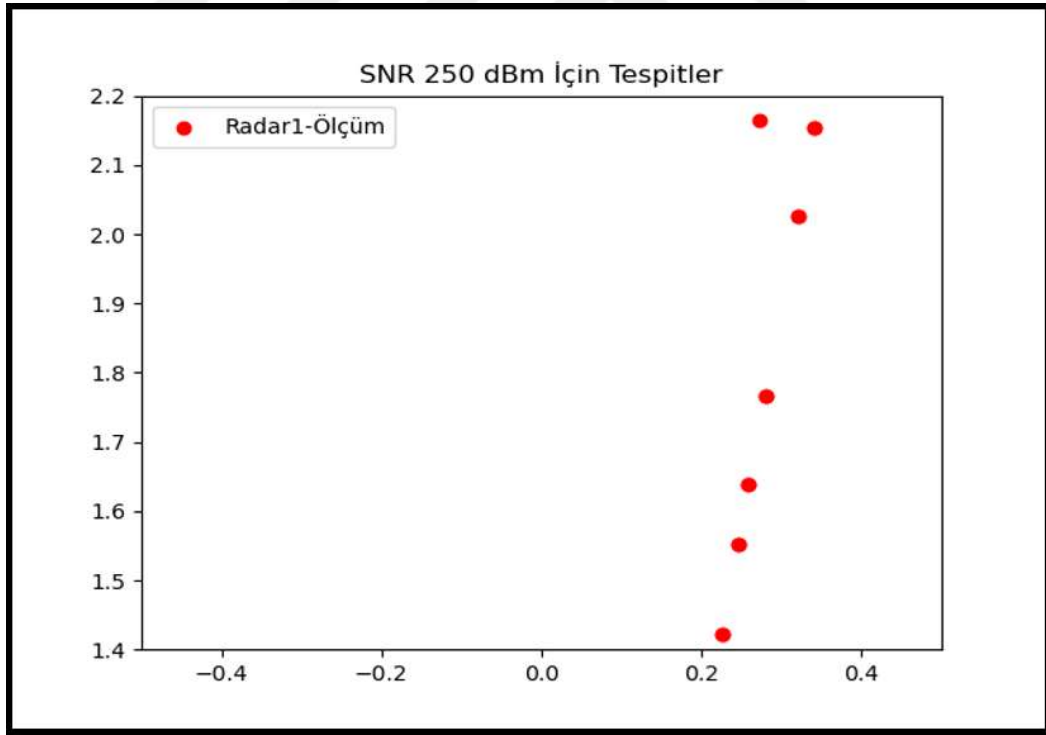
Mini İHA'nın havada sabit duruşu incelendiğinde, konumlandırmada k-means gruplandırması ve SNR filtresi ile yüksek doğruluklu konumlandırma sağlanmış oldu. Burada hava araçlarının sabit oldukları anlarda multistatik radar uygulamalarına gerek kalmadan monostatik uygulamalarla hassas sonuçlar alındığı ve monostatik radar uygulamalarının birbiriyle örtüştüğü görülmüştür.

İkinci senaryo için; Hareketli Mini İHA'nın konumlandırılması, monostatik ve multistatik radar uygulamaları denenmiş ve kıyaslanarak ele alınmıştır. İHA yerden sabit hızla dikine hareket ettirilmiş ve iki radardan ayrı ayrı bu harekete ait veriler elde edilmiştir. İHA'nın yerden yükselişinin 5 saniyelik kısmı incelenmiştir. Grafiklerde yer alan y eksenini yüksekliği, x eksenini İHA'nın radara uzaklığını göstermektedir. x ekseninin sıfır noktası ise İHA'nın kalkış noktasını belirtir şekilde normalleştirilmiştir.

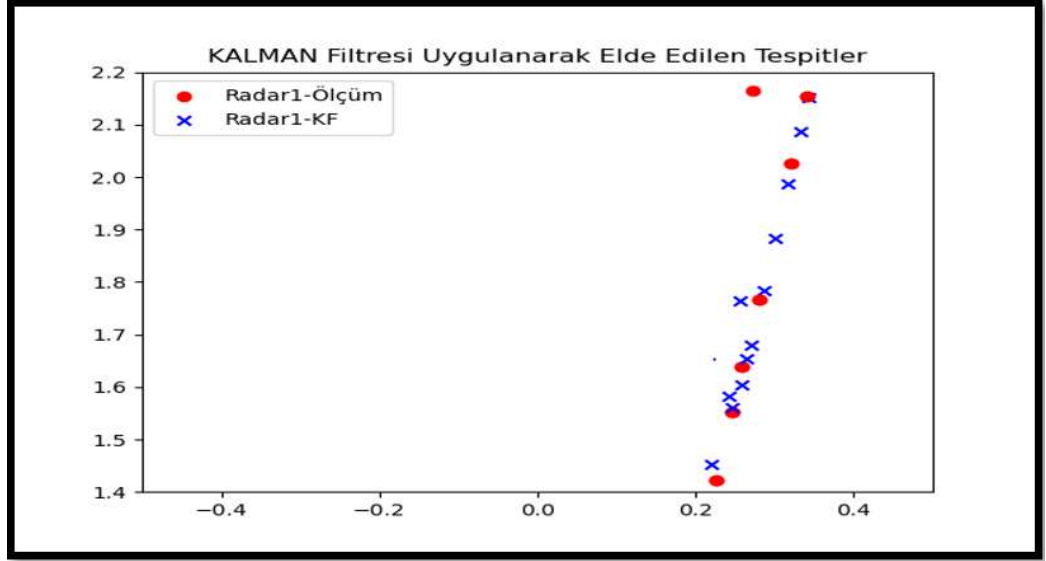
Öncelikle radar 1'den elde edilmiş filitresiz veriler, SNR filtresi uygulanmış veriler ile kalman filtresi uygulanmış verilere ait tablolar aşağıda sunulmuştur.



Şekil 3.18: Radar 1'e ait SNR filtresiz tespitler (senaryo2).

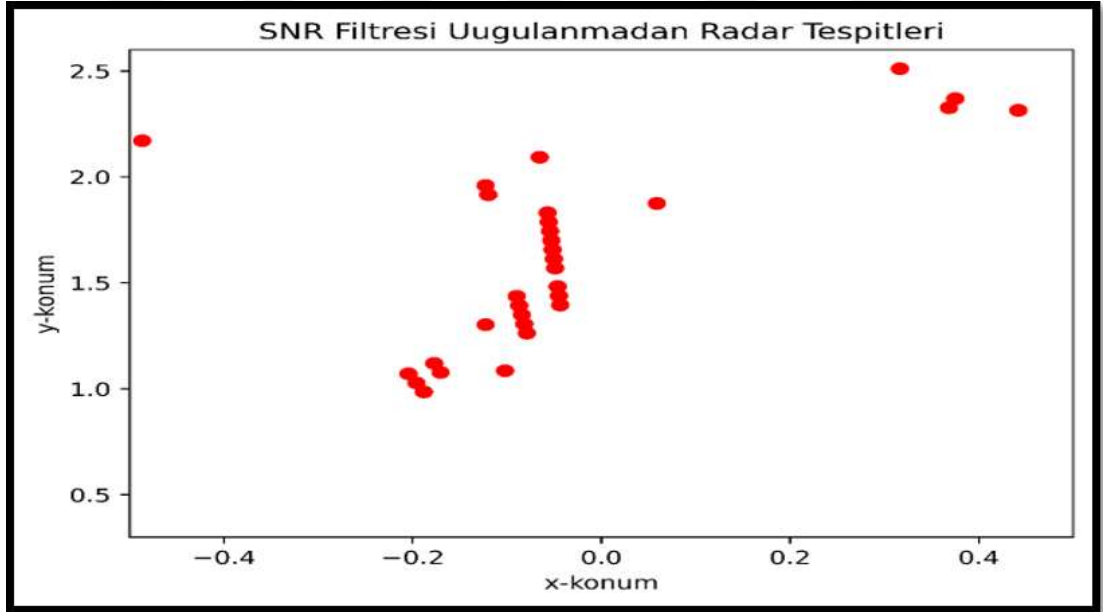


Şekil 3.19: Radar 1'e ait izlere SNR 250 dBm filtre uygulaması (senaryo2).

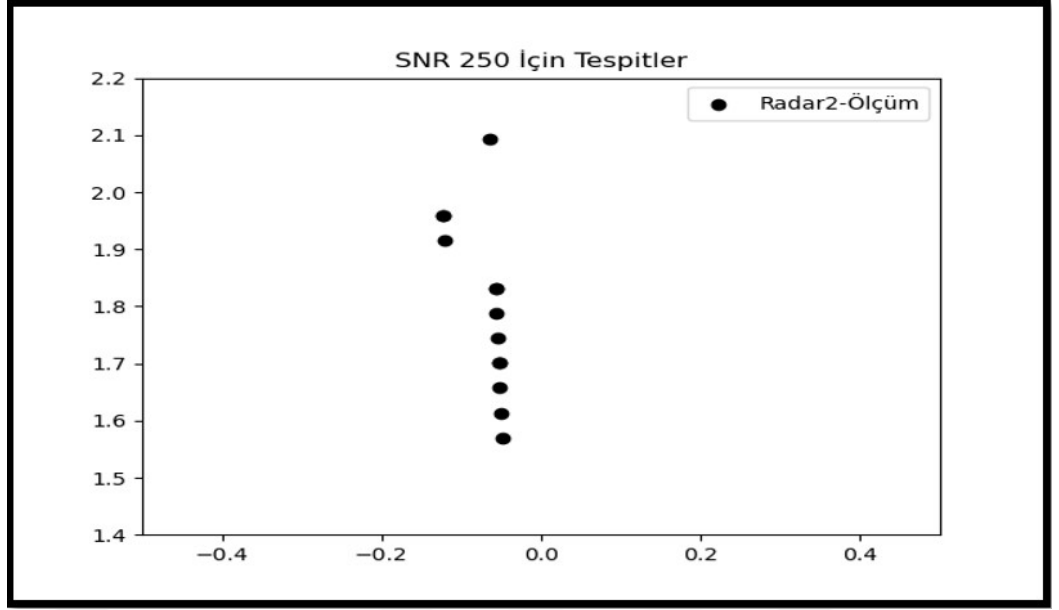


Şekil 3.20: Radar 1'e ait izlere SNR 250dBm ve kalman filtresi uygulaması (senaryo2).

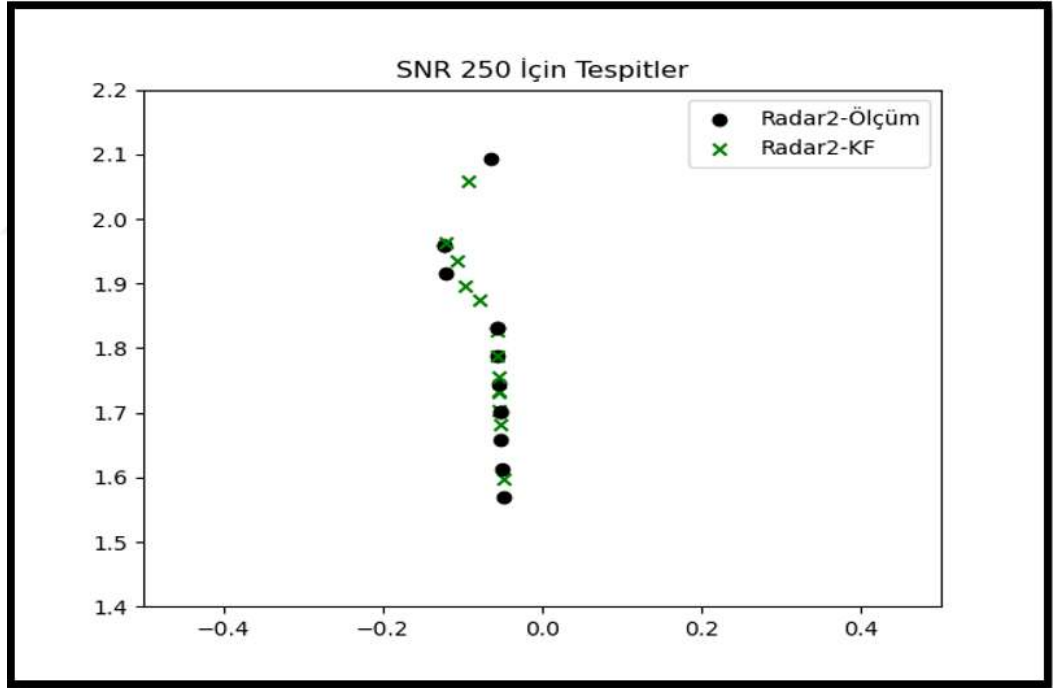
Radar 2'den elde edilmiş SNR filtresi uygulanmamış veriler, SNR filtresi uygulanmış veriler ile kalman filtresi uygulanmış verilere ait tablolar aşağıda sunulmuştur.



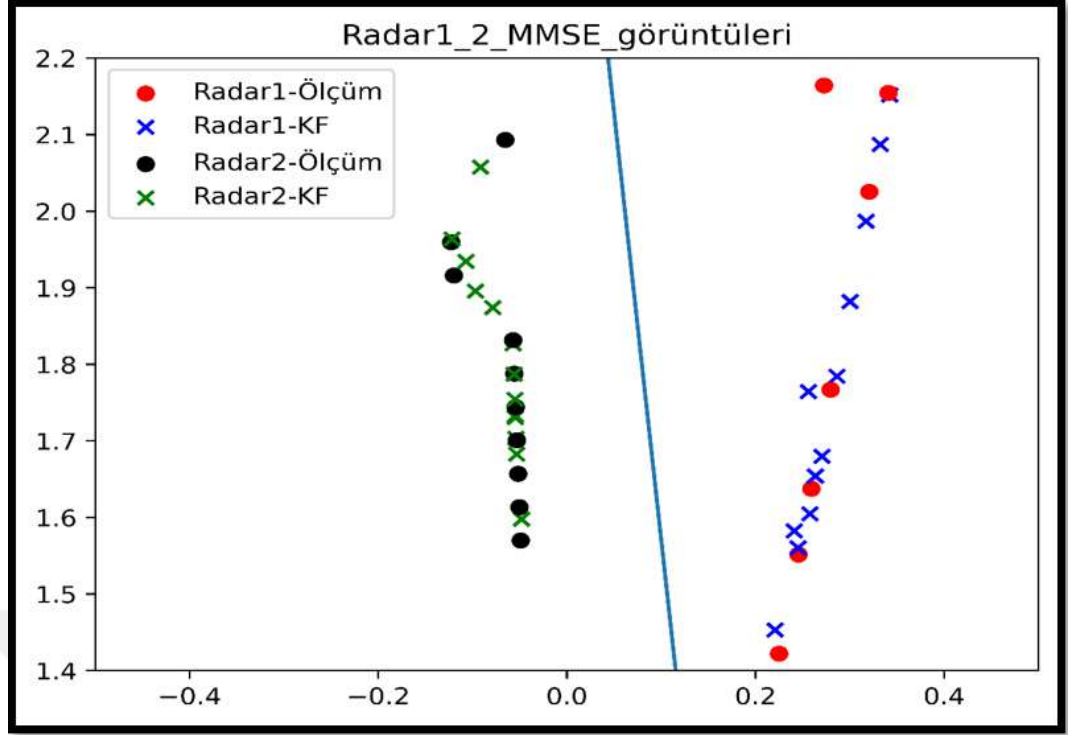
Şekil 3.21: Radar 2'e ait SNR filtresiz tespitler (senaryo2).



Şekil 3.22: Radar 2'e ait izlere SNR 250 dBm filtre uygulaması (senaryo2).



Şekil 3.23: Radar 2'e ait izlere SNR 250dBm ve kalman filtresi uygulaması (senaryo2).



Şekil 3.24: Radar 1 ve Radar 2'ye ait izlere MMSE uygulaması (senaryo2).

4. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Bu çalışmada, İHA'nın tespit ve konumlandırma yöntemlerinin ve özelde radar ile konumlandırmanın nasıl elde edildiği, literatürde yer alan İHA ve radar tipleri ile konumlandırma yöntemleri incelenmiştir. Bir İHA'nın konumlandırılması, iki adet radar ile monostatik ve multistatik mimaride, simülasyon ortamında ve deneysel uygulama olarak incelenmiştir.

Havada sabit duran İHA'nın incelendiği senaryoda, multistatik radar uygulamalarına gerek kalmadan, SNR filtresi uygulanarak monostatik mimarili radarla hassas sonuçlar alındığı ve monostatik radar uygulamalarının birbiriyle örtüştüğü görülmüştür.

Hareketli İHA'nın incelendiği senaryoda ise; eldeki filtresiz verilerin çok dağınık olduğu görülmektedir. SNR filtresi uygulanarak (belirli bir seviyenin altındaki sinyaller filtrelenerek) sağlıklı bir veri dizini elde edilmiştir. Monostatik radar uygulamasıyla elde edilen verilere kalman filtresi uygulanarak daha tutarlı patern bilgisi elde edilmiştir. İki monostatik radardan elde edilen bilgiler En Küçük Kareler Metodu (Mean Square Regression MMSE) kullanılarak yeni bir paterne ait konum bilgilerine ulaşılmıştır. Böylece bir multistatik radar mimarisi uygulaması elde edilmiştir.

Monostatik mimarideki iki radardan elde edilen konum bilgilerinde, x ekseninde yaklaşık 0.25 metrelik bir sapma gözlenmiştir. İHA'nın boyutunun buna sebep olduğu anlaşılmaktadır. Radar sinyallerinin, İHA'nın radara yakın yüzeyinden dönen ekoların SNR seviyesinin yüksek olması ve bu kenarın diğer yüzeylere mania oluşturması, bu hatanın oluşmasına sebep olmaktadır. Multistatik radar mimarisi ile elde edilen verilerde bu hata oranının azaldığı olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, monostatik radar ile basit multistatik radar uygulamalarının, konumlandırma hassasiyetlerine etkisi incelenmiş ve multisatatik radarların özellikle hareketli İHA'nın tespitinde daha etkin ve hassas olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

Bento M. de F., (2008), "Unmanned Aerial Vehicles–An Overview", Volume 1, Soartech Publications, 183-189.

Darwin N., Ahmad A., Akib W. A. A. W. M., (2014), "The Potential of Low Altitude Aerial Data for Large Scale Mapping", Jurnal Teknologi, 70(5).

Drozdowicz J., Wielgo M., Samczybski P., Kulpa K., (2016), "35 GHz FMCW Drone Detection System" 17th International Radar Symposium (IRS), Krakow, Poland, 10-12 May.

Jianchao Y., Xinyu L., Zheng D., Wenchao Y., Ke T., (2021), "A Cylindrical Phased Array Radar System for UAV Detection", IEEE 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP 2021), Xi'an, China, 09-11 April.

Korchenko A.G., Illyash O.S., (2013), "The Generalized Classification of Unmanned Air Vehicles", IEEE 2nd International Conference "Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments", Kiev, Ukraine, 15-17 October.

Laučys A., Rudys S., Kinka M., Ragulis P., Aleksandravičius J., Jablonskas D., Bručas D., Daugėla E., Mačiulis L., (2019), "Investigation Of Detection Possibility Of Uavs Using Low Cost Marine Radar" Faculty of Physics, Vilnius University (Vilnius, Lithuania), 23 (2), 48-53.

Melvin W. L., Scheer J. A., (2014), "Principle of Modern Radar, Vol III: Radar Applications", SciTech.

Nur E. A. R., Idnin P. I., Asem A. S., Musa S. A., Abdullah R. S. A. R, Sali A., Ismail A., (2019), "A Review Of Copter Drone Detection Using A Radar System", Defence S and T Technical Bulletin, 12(1), 16-38.

Savunma Sanayi Müsteşarlığı (SSM)., (2011), "Türkiye insansız hava aracı sistemleri yol haritası (2011-2030)". Uzay ve İnsansız Sistemler Daire Başkanlığı, DC Ankara.

Yiğit E., Yazar I., Karakoç H., (2018), "İnsansız Hava Araçları (İHA)'nın Kapsamlı Sınıflandırması Ve Gelecek Perspektifi", Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi, 3(1), 10-19.

Web 1, (2023), <https://www.radartutorial.eu> Wolf C. "Radarın çalışma prensibi" (Erişim Tarihi:20.05.2023).

Web 2, (2023), www.ti.com Texas Instruments AWR1642 User Manual (2021), SWRS203C–MAY2017–REVISED DECEMBER 2021, (Erişim Tarihi:20.06.2023).

ÖZGEÇMİŞ

Gökhan GÜLLÜOĞLU, 2006 yılında başladığı Hava Harp Okulu Elektronik Mühendisliği Bölümünü 2010 yılında başarıyla tamamlamıştır. 2017 yılında Anadolu Üniversitesi Hukuk Fakültesi Bölümünden mezun olmuştur. 2010 yılından bu yana Hava Kuvvetlerinde subay olarak görev yapmaktadır.



EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Güllüoğlu G., Kandemir İ., (2023), “Radar İle İHA Tespiti”, 7. GTÜ Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye, 31 Mayıs-1 Haziran.

