

**İKİ BOYUTTA HEDEF İZLEME
SİMÜLASYONU VE MODELLENMESİ**

**SIMULATION AND MODELLING OF
TARGET TRACKING IN TWO DIMENSIONS**

BURAK MANAVOĞLU

Prof. DR. ERDEM YAZGAN
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır

2014

BURAK MANAVOĞLU'nun hazırladığı “**İki Boyutta Hedef İzleme Simülasyonu ve Modellenmesi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI** 'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Adnan KÖKSAL

Başkan

.....

Prof. Dr. Erdem YAZGAN

Danışman

.....

Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR

Üye

.....

Doç. Dr. Erkan AFACAN

Üye

.....

Yrd. Doç. Dr. Nursel AKÇAM

Üye

.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Anneannem Fatma ve Dedem Duran UTKU' nun anısına...

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

--- / 01 /2014

BURAK MANAVOĞLU

ÖZET

İKİ BOYUTTA HEDEF İZLEME SİMÜLASYONU VE MODELLENMESİ

Burak MANAVOĞLU

Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erdem YAZGAN

Ocak 2014, 91 sayfa

Günümüzde pasif radarlar düşük maliyetleri, hedef izlemede gizli-izlenmesi zor hedeflere karşı sağladığı avantajlar ve karıştırma zorlulukları nedeniyle hava savunma sistemlerinde artan bir öneme sahiptir. Uygulamadaki zorluklarına rağmen sağladığı bu önemli avantajlar nedeniyle bu konuda pek çok araştırma geliştirme çalışması yapılmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, pasif radar sistemlerinin tarihsel gelişimi, çeşitleri, geometrisi ve çalışma prensipleri incelenmiştir. Uygulamada ise FM ve televizyon gibi bantlarda yayın yapan bir verici ile değişik sayıda alıcılar kullanılarak Pasif Radar modellemesi yapılmış ve Kartezyen koordinatta iki boyutta oluşturulmuş farklı hedef hareket modelleri için hedef izleme algoritmaları geliştirilmiştir. Buna ek olarak çalışmanın daha gerçekçi olması için kargo ve savaş uçağı uçuşlarından elde edilen gerçek uçuş verileri kullanılarak bu uçakların hedef izleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Durum kestirimi için Doppler, yanca (azimut) açısı ve bistatik mesafe ölçümleri kullanılmış, alıcı sayısı ve ölçüm gürültüleri değiştirilerek hedef takibindeki başarımlar analiz edilmiştir. Hedef takibi başarımlar analizinde Monte Carlo simülasyonu, hedef durum kestirimi için ise Genişletilmiş Kalman Filtre (GKF) kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Pasif Radar, Pasif Radar Modelleme, Hedef İzleme, Genişletilmiş Kalman Filtre, Monte Carlo simülasyonu.

ABSTRACT

SIMULATION AND MODELLING OF TARGET TRACKING IN TWO DIMENSIONS

Burak MANAVOĞLU

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Erdem YAZGAN

January 2014, 91 pages

Today, Passive Radars have increasing significance in air defence systems because of their low cost. They have important advantages against stealth targets and resistance to jamming. Despite its complexity in practice, a lot of research and development studies are still being done because of these significant advantages.

In this thesis study, historical improvements, types, geometry and operation principle of passive radar is examined. In application Passive Radar modelling is developed by using a transmitter which radiates at FM and television bands and the returned signals are received by a number of different receivers, target tracking algorithm is developed for different two dimensional target motion models in Cartesian coordinate. Additionally to obtain more realistic work real data gathered from the flight of cargo and jet fighter aircrafts are used to track the targets Doppler, azimuth and bistatic range measurements are used for target's state estimation. Performance in target tracking is analysed with varying number of receivers and measurement noise in order to simulate ambient variables. The Monte Carlo simulation is used in target tracking performance analysis, while the usage of Extended Kalman Filter is preferred in target estimation.

Keywords: Passive Radar, Passive Radar Modelling, Target Tracking, Extended Kalman Filter, Monte Carlo Simulation

TEŞEKKÜR

Ders dönemi ve tez çalıŐmam süresince bilgi ve tecrübelerinden faydalandıŐım, yardım ve katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen deŐerli tez danıŐmanım Sayın Prof. Dr. Erdem YAZGAN'a teŐekkürlerimi sunarım.

ŐĐrenim hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle daima yanımda olan, başta üzerimde çok emeği olan ve hakkını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim annem olmak üzere bütün aileme teŐekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, tez çalıŐmam süresince danıŐma imkânını bulduğum, bilgi birikimini benimle paylaŐan Sayın Dr. Tolga SÖNMEZ ve gösterdikleri desteklerden dolayı tüm arkadaŐlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER.....	ix
ÇİZELGELER.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Pasif Radar Tanımı, Tarihsel Gelişimi ve Yapılan Çalışmalar.....	4
1.2. Pasif Radar Çeşitleri.....	7
1.3. Pasif Radarların Kullanım Avantajları ve Dezavantajları.....	8
1.3.1. Kullanım Avantajları.....	8
1.3.2. Kullanım Dezavantajları.....	9
1.4. Pasif Radar Örnekleri.....	9
1.5. Tez Amaç ve Kapsamı.....	11
1.6. Tez Düzenlemesi.....	12
2. RADAR SİSTEMİ.....	13
2.1. Radar sistemi temelleri.....	13
2.2. Bistatik/Multistatik Radar Geometrisi ve Bistatik Radar Denklemi.....	17
2.3. Pasif Radar Alıcı Anten Özellikleri.....	22
3. HEDEF İZLEME, KESTİRİM, BİLGİ BİRLEŞTİRME ve KALMAN FİLTRE	24
3.1. Hedef İzleme.....	24
3.1.1. Ön Bilgi.....	24
3.1.2. Hedef İzleme Amaç ve Fonksiyonu.....	25
3.1.3. Hedef İzleme Sistemi.....	27
3.2. Kestirim.....	29
3.3. Veri Birleştirme.....	29
3.4. Kalman Filtre.....	31
3.4.1. Temel Kalman Filtre.....	32
3.4.2. Genişletilmiş Kalman Filtre.....	35
4. YÖNTEM.....	38

4.1.	Hareket Modellemesi	41
4.1.1.	Kesikli zaman beyaz gürültü ivmelenme modeli (Sabit Hız)	41
4.1.2.	Kesikli zaman Wiener süreci ivmelenme modeli(Sabit ivmeli).....	41
4.1.3.	Koordineli Dönüş Modeli	42
4.2.	Gerçek Uçuş Verilerinden Kartezyen Koordinat Sistemine Geçiş.....	42
4.3.	Ölçümlerin Modellenmesi	45
4.4.	Genişletilmiş Kalman Filtre.....	46
5.	UYGULAMA.....	50
5.1.	Bistatik Pasif Radar Modellenmesi ile Hedef İzleme	50
5.2.	Multistatik Pasif Radar Modellenmesi ile Hedef İzleme	52
5.2.1.	Sabit Hız Hareket Senaryosu.....	52
5.2.2.	Sabit İvme Hareket Senaryosu	56
5.2.3.	Dönüş Hareket Senaryosu	61
5.2.4.	Karışık Hareket Senaryosu	64
5.3.	Multistatik Pasif Radar Modellenmesi ile Gerçek Uçakların İzlenmesi	68
5.3.1.	Kargo Uçağı Senaryosu	68
5.3.2.	Jet Savaş Uçağı Senaryosu	73
6.	SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	80
	KAYNAKLAR	82
	EK.....	86
A.	Kalman Filtre.....	86
B.	Monte Carlo Simülasyonu	88
C.	Alicıdaki Sinyal Modeli	89
	ÖZGEÇMİŞ.....	91

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

P_d	Hedef Tespit Olasılığı
σ	Radar Kesit Alanı
k	Boltzman Sabiti
P_r	Alıcı Gücü
P_t	Verici Gücü
A_e	Anten Efektif Alanı
G_T	Verici Kazancı
G_R	Alıcı Kazancı
B	Bant Genişliği
f_d	Doppler Frekansı

Kısaltmalar

ADC	Air Data Computer (Hava Veri Bilgisayarı)
AHRS	Attitude Heading Reference System (Yönelim İstikamet Referans Sistemi)
AM	Amplitude Modulation (Genlik Kiplenimi)
AOA	Angle of Arrival (Geliş Açısı)
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar (Gelişmiş Yapay Açıklıklı Radar)
BBC	British Broadcasting Corporation
BPR	Bistatic Passive Radar (Bistatik Pasif Radar)
BW	Bandwidth (Bant Genişliği)
CDMA	Code Division Multiple Access (Kod Bölmeli Çoklu Erişim)
CFAR	Constant False Alarm Rate (Sabit Yanlış Alarm Oranı)
DBS	Direct Broadcast Satellite (Direkt Uydu Yayını)
DOA	Direction of Arrival (Sinyalin Alıcıya Geliş Yönü)
DSB	Double Side Band (Çift Yanbant)
DVB-T	Digital Video Broadcasting-Terrestrial (Sayısal Karasal Yayıncılık)
EGI	Embedded GPS INS (Gömülü Küresel Konumlama Sistemi-Ataletsel Seyrüsefer Sistemi)

ENVISAT	Environmental Satellite (Çevresel Uydu)
FAR	False Alarm Rate (Yanlış Alarm Oranı)
FDD	Frequency-Division Duplexing (Frekans Bölmeli Çoklama)
FDM	Frequency-Division Multiplexing (Frekans Bölmeli Çoklama)
FDOA	Frequency Difference of Arrival (Alıcıya Gelen Direkt ve Yansıyan Sinyaller Arasındaki Frekans Farkı)
FM	Frequency Modulation (Frekans Kiplenimi)
GKF	Genişletilmiş Kalman Filtre
GLONASS	Global Navigation Satellite System (Küresel Yöngüdümlü Uydusu Sistemi)
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying (Gaussian Minimum Kaymalı Kitleme)
GNSS	Global Navigation Satellite System (Küresel Seyrüsefer Uydu Sistemi)
GPS	Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)
GSM	Global System for Mobile Communications (Küresel Mobil İletişim Sistemi)
HF	High Frequency (Yüksek Frekans)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMM	Interacting Multiple Model (Etkileşimli Çoklu Model)
INS	Inertial Navigation System (Ataletsel Seyrüsefer Sistemi)
JDL	Joint Directors of Laboratories
KF	Kalman Filtre (Kalman Filtre)
LPDA	Log Periodic Dipole Array (Logaritmik Periyotlu Dipol Dizi)
LPI	Low Probability of Intercept (Düşük Yakalanma Olasılığı)
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (Dik Frekans Bölmeli Çoklama)
PBR	Passive Bistatic Radar (Pasif Bistatik Radar)
PCL	Passive Coherent Location (Pasif Tutarlı Konumlama)
PCR	Passive Covert Radar (Pasif Gizli Radar)
PMR	Passive Multistatic Radar (Pasif Multistatik Radar)
PRF	Pulse Repetition Frequency (Darbe Tekrarlama Frekansı)
PM	Phase Modulation (Faz Kiplenimi)
PW	Pulse Width (Darbe Genişliği)

RCS	Radar Cross Section (Radar Kesit Alanı)
RMS	Root Mean Square (Ortalama Kare Kök)
RMSE	Root Mean Square Error (Ortalama Kare Hatasının Kökü)
SAR	Synthetic-Aperture Radar (Yapay Açıklıklı Radar)
SPASUR	Space Surveillance (Uzay Gözetlemesi)
SS2	Silent Sentry
TDOA	Time Difference of Arrival (Sinyalin Verici Yayın Zamanıyla Alıcıda Alındığı Zaman Arasındaki Fark)
TDMA	Time Division Multiple Access (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim)
UCL	University College London
UHF	Ultra-High Frequency (Pek Yüksek Frekans)
UKF	Unscented Kalman Filter
VHF	Very High Frequency (Çok Yüksek Frekans)

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 1.1 Radar sınıflandırılması.....	3
Şekil 1.2 Genel multistatik PBR ve hedef yerleşimi [12]	4
Şekil 1.3 1934 Daventry deneyinde kullanılmış BBC vericisi (sağda), Handley Page Heyford uçağı (en üst solda), ve alıcı (en alt solda) [15].	5
Şekil 1.4 CELLDAR Sistemi[17]	7
Şekil 2.1 Monostatik Radar Sistemi.....	14
Şekil 2.2 Darbe tekrarlama aralığı	14
Şekil 2.3 Hareket eden hedefin yansıyan dalga üzerindeki etkisi [10].....	15
Şekil 2.4 Radyal hız.....	16
Şekil 2.5 Bistatik Radar Geometrisi[38].....	18
Şekil 2.6 Bistatik Radar ile Hedef Takibi.....	18
Şekil 2.7 Pasif Radar ile Frekans Ölçümü	19
Şekil 2.8 Çeşitli pasif radar vericilerinin yaklaşık güç yoğunlukları[31]	19
Şekil 2.9 Multistatik Radar ile Hedef Takibi	21
Şekil 3.1 İzleme Adımları.....	24
Şekil 3.2 İz düzeltilmesi	26
Şekil 3.3 İzleme sistemi blok diyagramı [9].....	27
Şekil 3.4 Durum Kestirimi	29
Şekil 3.5 Veri Birleştirme(Data Fusion) Süreç Modeli [43].....	30
Şekil 3.6 Kalman Filtre Döngüsü	33
Şekil 3.7 Kalman Filtre Sistemi.....	34
Şekil 3.8 Kalman Filtre eşitlikleri.....	35
Şekil 3.9 Genişletilmiş Kalman Filtre Sistemi.....	37
Şekil 4.1 Pasif radarda hedef izleme modeli.....	38
Şekil 4.2 Pasif radar geometrisi.....	39
Şekil 4.3 Pasif radar sinyal işleme blok diyagramı [24].....	39
Şekil 4.4 Elipsoit dünya şekli	43
Şekil 4.5 Uçuş Dinamiği Parametreleri	44
Şekil 4.6 Kullanılan GKF'nin tek döngüsü	47
Şekil 5.1 Sabit hızlı hareket senaryosu	52
Şekil 5.2 Sabit hızlı hareket pozisyon kestirimi.....	53

Şekil 5.3 Sabit hızlı hareket tarama sayısına göre pozisyonlardaki RMSE değerleri	54
Şekil 5.4 Sabit ivmeli hareket senaryosu	57
Şekil 5.5 Sabit ivmeli hareket pozisyon kestirimi	59
Şekil 5.6 Sabit ivmeli hareket tarama sayısına göre pozisyonlardaki RMSE değerleri	59
Şekil 5.7 Sabit ivmeli hareket hız kestirimi	60
Şekil 5.8 Dönüş hareketi senaryosu	61
Şekil 5.9 Dönüş hareketi pozisyon kestirimi	63
Şekil 5.10 Karışık hareket senaryosu	65
Şekil 5.11 Karışık hareket pozisyon kestirimi	66
Şekil 5.12 Karışık hareket radar tarama sayısına göre RMSE değerleri	67
Şekil 5.13 Kargo uçağının iki boyuttaki hareketi	68
Şekil 5.14 Kargo uçağı hücum açısı	70
Şekil 5.15 Kargo uçağı yuvarlanma açısı	70
Şekil 5.16 Kargo uçağı yalpalanma açısı	71
Şekil 5.17 Kargo uçağı hedef takibi	72
Şekil 5.18 Kargo uçağı iki boyutta gerçek ve kestirim hızları	72
Şekil 5.19 Jet savaş uçağının 2 boyuttaki hareketi	74
Şekil 5.20 Jet savaş uçağı hücum açısı değişimi	75
Şekil 5.21 Jet savaş uçağı yuvarlanma açısı değişimi	75
Şekil 5.22 Jet savaş uçağı yalpalanma açısı değişimi	76
Şekil 5.23 Jet savaş uçağı hedef takibi	76
Şekil 5.24 Jet savaş uçağı iki boyutta gerçek ve kestirim hızları	77

ÇİZELGELER

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 SS2(Silent Sentry) Performans Değerleri	6
Çizelge 1.2 Pasif Radar Örnekleri	10
Çizelge 2.1 Çeşitli Pasif radar verici kaynakları için sinyal tipleri($G_t = 1$ için) [38]	20
Çizelge 3.1 Kestirim problem örnekleri	31
Çizelge 5.1 Sabit Hızlı Hareket Girdileri	51
Çizelge 5.2 Sabit hız hareketi için değişen Doppler ölçüm gürültüsüne göre 100 Monte Carlo Simülasyonu sonucunda iki boyuttaki pozisyonlardaki $RMSE\xi$ değerleri	54
Çizelge 5.3 Sabit hız hareketi için değişen bistatik mesafe ölçüm gürültüsüne göre 100 Monte Carlo Simülasyonu sonucunda iki boyuttaki pozisyonlardaki $RMSE\xi$ değerleri.....	55
Çizelge 5.4 Sabit hız hareketi için değişen yanca açısı ölçüm gürültüsüne göre 100 Monte Carlo Simülasyonu sonucunda iki boyuttaki pozisyonlardaki $RMSE\xi$ değerleri.....	55
Çizelge 5.5 Sabit hız hareketi için değişen alıcı sayılarına göre iki boyuttaki pozisyonlardaki $RMSE\xi$ değerleri.....	56
Çizelge 5.6 Sabit hız hareketi için değişen ölçüm veri tipi sayılarına göre iki boyuttaki pozisyonlardaki $RMSE\xi$ değerleri	56
Çizelge 5.7 Sabit ivmeli hareket girdileri.....	58
Çizelge 5.8 Sabit ivmeli hareket için değişen ölçüm gürültülerine göre 100 Monte Carlo Simülasyonu sonucunda iki boyuttaki pozisyonlardaki $RMSE\xi$ değerleri....	60
Çizelge 5.9 Sabit ivmeli hareket için değişen ölçüm veri tipi sayılarına göre iki boyuttaki pozisyonlardaki $RMSE\xi$ değerleri	61
Çizelge 5.10 Dönüş hareketi girdileri.....	62
Çizelge 5.11 Dönüş hareketi için değişen ölçüm gürültülerine göre 100 Monte Carlo Simülasyonu sonucunda iki boyuttaki pozisyonlardaki $RMSE\xi$ değerleri....	64
Çizelge 5.12 Sabit ivmeli hareket için değişen ölçüm veri tipi sayılarına göre iki boyuttaki pozisyonlardaki $RMSE\xi$ değerleri	64
Çizelge 5.13 Karışık hareket girdileri	66

Çizelge 5.14 Karışık hareket değişen ölçüm gürültülerine göre 100 Monte Carlo Simülasyonu sonucunda iki boyuttaki pozisyonlardaki $RMSE\xi$ değerleri	67
Çizelge 5.15 Karışık hareket için değişen ölçüm veri tipi sayılarına göre iki boyuttaki pozisyonlardaki $RMSE\xi$ değerleri	67
Çizelge 5.16 Kargo uçağı senaryo değişkenleri	69
Çizelge 5.17 Jet savaş uçağı senaryo değişkenleri.....	73

1.GİRİŞ

Radar, radyo sezim (tespit etme) ve menzil tayini sözcüklerinin kısaltmasıdır [1]. IEEE radar tanımını “Yayıdığı elektromanyetik sinyallerin, hedefler üzerinden yansımalarını işleyerek konum ve diğer bilgileri çıkaran, hedeflerin tespit ve konumunu belirlemek için kullanılan bir elektromanyetik sistem” olarak yapmıştır [2].

Birincil radarlarda (kendi gönderdiği sinyallerden yansıyan dönüş sinyallerini alan radarlar) radar anteni hedefe belirli bir dalga şeklindeki elektromanyetik sinyali, güçlü bir yüksek frekans üretici kullanarak yollar. Hedefe çarpan sinyal yayılır ve kendi yönünde geri yansıyan kısmı çok hassas olan alıcı cihaz tarafından alınır. Daha sonra yansıma sinyali (alıcı anten tarafından alınan elektrik sinyali) alıcı anteni ve devresi ile işlenerek hedefin varlığı, konumu ve hızının tespiti ile radar ekranında gösterimi için kullanılır.

Radar kullanılarak hedefin konumu, radar sinyalinin hedefe çarpması ve alıcıya geri dönmesi sırasında geçen toplam sürenin (TDOA: time difference of arrival) hesaplanması ile bulunur. Alıcıya göre açılal pozisyonu yansıyan sinyalin varış yönünün (DOA: direction of arrival) belirlenmesi ile tespit edilir. Radyal hızı ise gönderilen ve alınan sinyaller arasındaki frekans farkının (FDOA: frequency difference of arrival) ölçülmesi ile elde edilir [1].

Radarın çalışması sırasında James Clerk Maxwell ve Heinrich Rudolf Hertz'in keşfettiği ve geliştirdiği üç temel fizik kuralı rol oynamaktadır [3]:

1. Elektromanyetik dalgaların yansıması: Elektromanyetik dalgalar elektriksel iletken bir yüzeye çarpmaları durumunda yansır. Yansıma sinyali dalganın çıkış merkezinde yeniden kaydedilir. Bu dalganın yayıldığı yönde bir cismin varlığını kanıtlamaktadır.

2. Elektromanyetik dalgaların sabit yayılma hızı: Elektromanyetik dalgalar ışık hızı (3×10^8 m/s) ile yayılırlar. Elektromanyetik dalgaların sabit hızla yayılma özelliğinden faydalanarak ışınların çarparak yansıdığı hedeflerin (uçaklar, gemiler, taşıtlar) mesafelerini (menzillerini) bu radar darbelerinin geri dönüş sürelerini ölçerek hassas bir şekilde belirlenmesi için kullanılabilir.

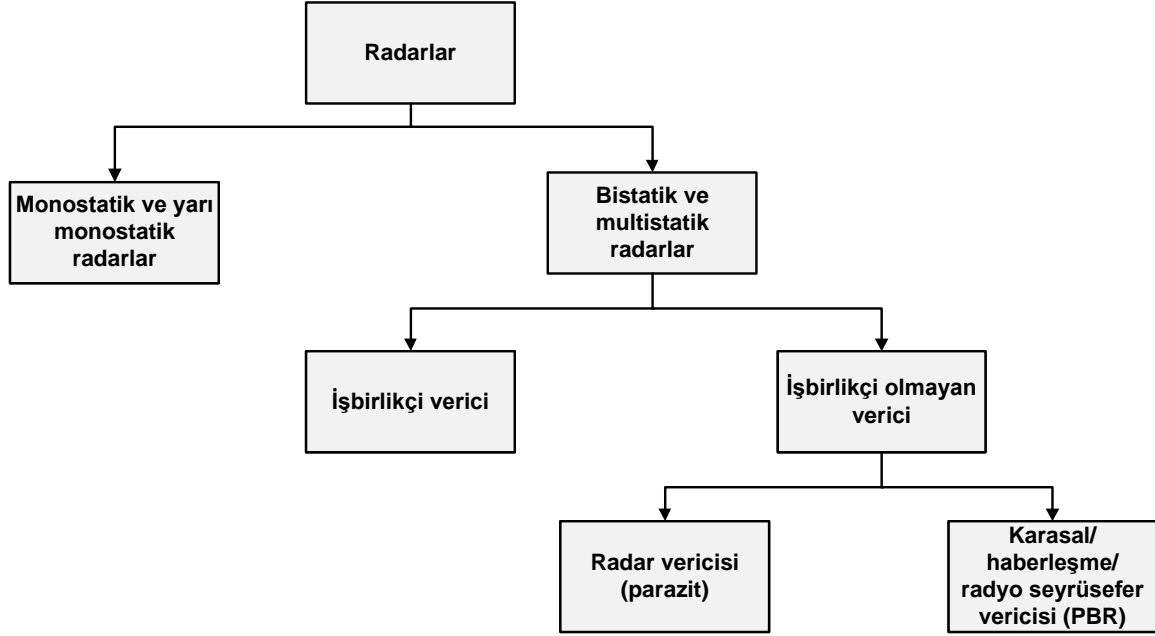
3. Elektromanyetik dalgaların doğrusal yayılması: Elektromanyetik dalgalar radarların frekans bölgesinde doğrusal olarak yayılırlar. Bazı özel antenler kullanarak elektromanyetik dalgalar belli bir yönde yoğunlaştırılabilir. Böylece hedefin açısal koordinatları (yanca ve yükseklik açısı) bulunabilir.

İlk radar 1904'de Alman mühendis Christian Hulsmeyer tarafından gemileri tespit etmek amacıyla geliştirildi. Bu radarın adı "telemobiloscope"du [4] ve 40-50 cm dalgaboyunda çalışıyordu. Metal bir nesneden çarparak dönen elektromanyetik dalgaların süresini ölçüyor ve böylece menzil hesaplanabiliyordu. En eski radarlar alıcı ve vericilerin farklı yerlerde bulunduğu tek alıcı ve vericiden oluşan bistatik radarlardır [5]. Bistatik radar ilk kez "The Electrical Experimenter"ın Ağustos 1917 yılındaki sayısında Hugo Gernsbach tarafından Nikola Tesla ile yapılan röportajda dokümente edildi [4]. Tesla'nın düşman denizaltıları için ortaya koyduğu fikirler, bistatik ve multistatik radar çalışma şeklini açıkça tanımlıyordu. Bistatik radarlar ile hedef tespitinin ilk kanıtı 1922'de Amerikan Deniz Araştırma Laboratuvarında 60 MHz'de sürekli dalga yayını yapan bir verici kullanılarak tahta bir geminin tespit edildiği çalışmadır [6]. Daha sonra 1932'de vericiden 80 km uzaklıktaki bir uçağın tespit edildiği, Taylor, Young ve Hyland tarafından yapılan çalışma sonrası alınan patentle [7] geliştirilmiştir. Dupleks cihazların (alıcı-verici anahtarlama cihazları) gelişmesinden sonra ise alıcı ve vericinin aynı antende olduğu monostatik sistemler geliştirildi. Bu tasarım birincil radarların gönderdiği sinyaller ve yansıyan sinyallerin aynı frekansta olması ve bu iki olayın farklı zamanlarda meydana gelmesi nedeniyle, tek bir antenin yeterli olması sonucuna ulaşılarak yapılmıştır. Bu şekilde o zamanki koşullarda maliyet ve yer avantajı sağlanmıştır. Bistatik radarlar daha sonra 1950-1960 yılları arasında yarı aktif füzeler (SPASUR) ile tekrar kullanılmaya başlandı. 1975-1985 arasında multistatik ölçüm sistemleri (Kwajalein) gibi kullanımları oldu. 1995'den günümüze ise pasif tutarlı konumlama sistemlerinin gelişmesi ile bistatik radarların kullanımına devam edilmektedir [5].

Bistatik radar sistemlerindeki tek alıcı ve tek vericiden oluşan iki sistem elemanın yerine bu sistem eleman sayısının korunduğu ve ikiden fazla olduğu sistemler multistatik radarlar olarak tanımlanmaktadır. Multistatik radarların kullanımı enerji kazancı sağlamaktadır ve bu efektif menzilin artışı, açısal koordinat ölçüm hatalarının azalması, kaynağın üç boyutta koordinat ve hızını ölçme olanağı,

gürültü etkisinin azalması, yayılım yeteneğinin artması ve gözetlemede iyileşme gibi avantajlar getirmektedir [8].

Radarlar genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır [9].



Şekil 1.1 Radar sınıflandırılması

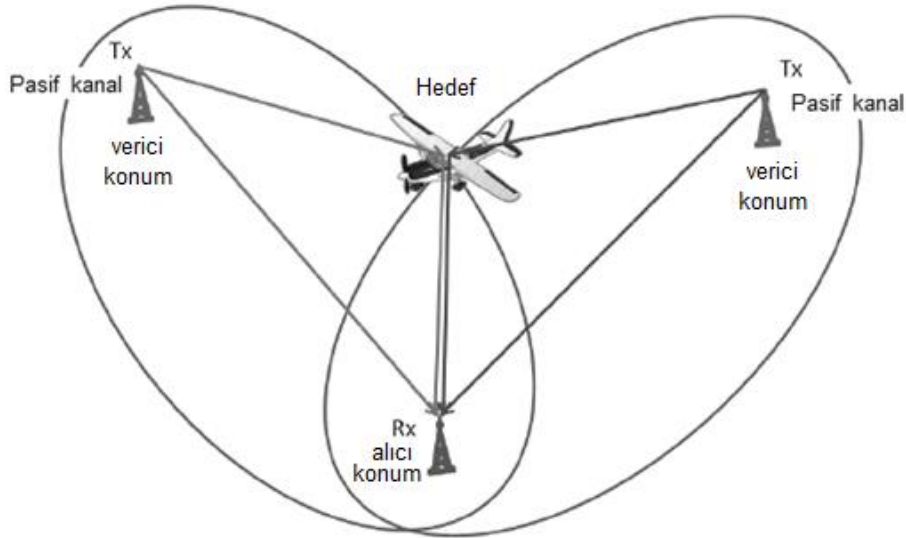
Radar sistemleri yer, hava, uzay ve gemi gibi platformlara kurulabilirler. Bunun yanı sıra radara özgü karakteristiklere (frekans bandı, anten tipi, kullandığı dalga şekli), görev ve işlevsellik gibi pek çok kategoride sınıflandırılabilirler [10].

Radarın başlıca fonksiyonları darbe gecikmesinden elde edilen menzil ölçümü, Doppler frekans kaymasından elde edilen hız ölçümü ve anten yönlendirmesi yoluyla elde edilen açı ölçümü olarak sayılabilir. Radarın performansını etkileyen faktörlerden radar kesit alanı ve geri yansıma (eko) karakteristiği hedefin fiziksel büyüklüğüne, şekline, hareketli bileşenlerine ve malzeme yapısına bağlıdır. Radarın temel işlevi hedef tespiti, hedef takibi (aynı hedeften dönen ardışık ekoların tümleştirilmesi ve hedef konum bilgisinin güncellenmesi), hedef sınıflandırması (jet uçağı, kargo uçağı vb.), hedef tanımlaması (F-16, C-130 vb.) ve silah yönlendirmesi (silah sistemlerine hedef koordinatlarının aktarımı) olarak sıralanabilir. İşlevsel olarak radarlar askeri ve sivil alanlarda kullanılmaktadır. Radarlar her iki alanda hava olaylarından kaçınma, seyrüsefer, izleme, arama, gözetleme, yüksek çözünürlükte görüntü alma ve haritalama gibi amaçlarla

kullanılmaktadır. Bununla birlikte sivil alanda uzay uçuşları, askeri alanda ise elektronik harp kullanıldığı diğer yerlerdir.

1.1. Pasif Radar Tanımı, Tarihsel Gelişimi ve Yapılan Çalışmalar

Pasif Tutarlı Konumlama (PCL: Passive Coherent Location), Pasif Gizli Radar (PCR: Passive Covert Radar), Pasif Bistatik Radar (PBR), Pasif Multistatik Radar (PMR), pasif radar veya parazit radar pasif radar sistemleri için kullanılan genel isimlerdir [11]. Pasif radarlar bir ya da daha fazla pasif alıcıya sahip olan, fakat kendisine ait aktif bir verici (aydınlatıcı) içermeyen radar sistemleridir. Pasif radarlarda kullanılan verici ya da vericiler ortamda bulunan, çeşitli özellikleri bilinen işbirlikçi olmayan sistemlerdir. Bu durumda kullanıcı yapılan yayına müdahale edemez ve herhangi bir değişiklik yapamaz. İşbirlikçi olmayan kaynaklar radyo, televizyon, cep telefonu istasyonları (3G-GSM), sayısal ses ve video yayınları, GPS uyduları ve düşman radar vericileri olabilmektedir. Bunların seçimi ve kullanımı yapılacak ortamda bulunan işbirlikçi olmayan kaynakların sayısı ve konumlarına, hangi mesafede bir hedefin takibinin yapılmak istendiği gibi değişik parametrelere göre analiz edilerek optimum şekilde yapılmaktadır.

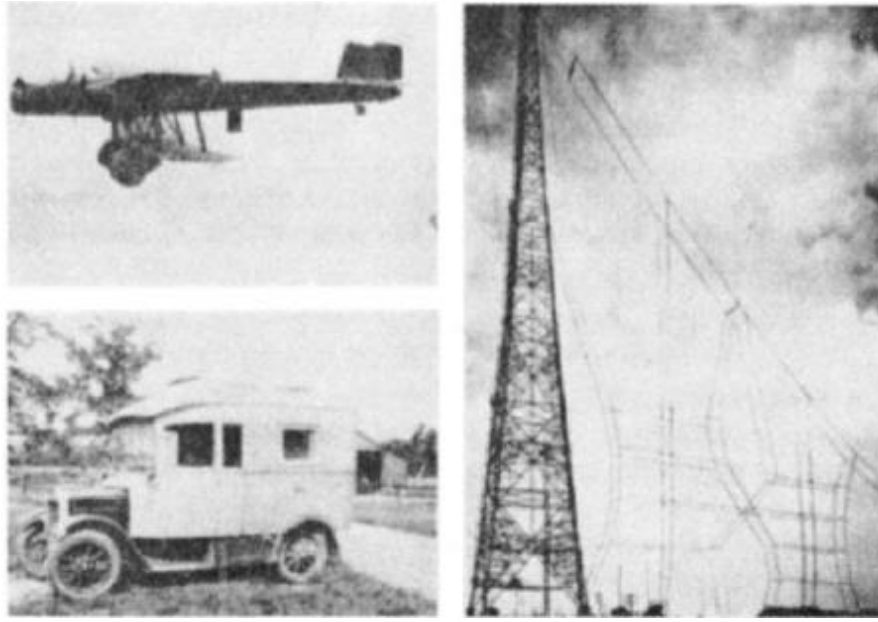


Şekil 1.2 Genel multistatik PBR ve hedef yerleşimi [12]

Şekil 1.2’de Genel multistatik PBR hedef yerleşimi gösterilmiştir. Burada verici ve alıcı arasındaki mesafe bilindiği için direkt sinyal ve hedeften yansıyan sinyal arasında geçen TDOA hesaplanabilir. İki verici-alıcı çifti kullanmak iki tane sabit menzil elipsi oluşturur ve böylece iki tane TDOA elde edilir. Buradan sonuç

elipslerinin arasındaki kesişim hesaplanabilir. Tek alıcı-verici çifti kullanılarak kestirim imkânı olsa da, iki verici-alıcı çifti kullanılarak yapılan sinyal işleme işlemleri sırasında hatalı hedeflerin elimine edilmesi ve gerçek hedeflerin ayırt edilebilerek iki boyutta hedefin gerçek pozisyonu bulunması sırasında çok daha başarılı sonuçlar ile sağlanabilmektedir. Üç boyutta kestirim için ise en az 3 adet alıcı-verici çifti olmalıdır [12].

Pasif radarın temelleri, İngiltere’de 1935 yılında Robert Watson-Watt [13] tarafından 25 metre kanat açıklığındaki Handley Page Heyfor bombardıman uçağının BBC kısa dalga vericisi kullanılarak tespit edilmesi ile atılmıştır [14].



Şekil 1.3 1934 Daventry deneyinde kullanılmış BBC vericisi (sağda), Handley Page Heyford uçağı (en üst solda), ve alıcı (en alt solda) [15].

İkinci dünya savaşı sırasında Almanlar Klein Heidelberg olarak bilinen İngiliz Chain Home radar sistem vericilerini kullanan bistatik parazit sistemini geliştirdi [4]. Klein Heidelberg çalışan ilk işbirlikçi olmayan-pasif vericileri kullanan bistatik radardır.

Raporlanan ilk çalışan sistem pasif tutarlı konumlama sistemi ise Lockheed Martin firmasının hava ve uzay gözetlemesi için kullanılan “Silent Sentry” sistemidir [16].

Sistem sürekli dalga multistatik teknolojisi sayesinde tüm hava koşullarında gözetleme yapabilmektedir. Silent Sentry sistemi multistatik teknolojisi aracılığıyla FM bantta yayın yapan radyo istasyonlarını kullanmaktadır. Hava hedeflerinden yansıyan sinyal yatay doğrusal faz dizi anteni ile alınır. Referans anteni ise FM

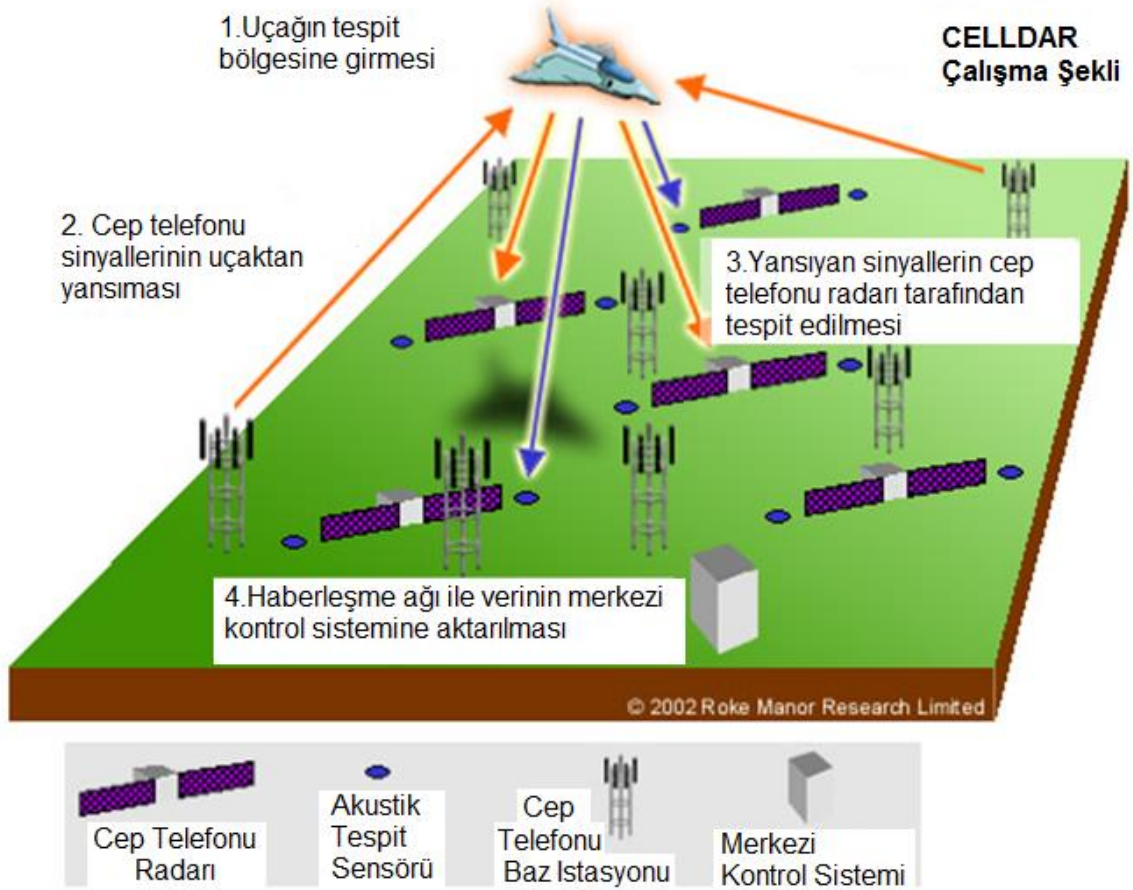
vericiden gelen direk sinyali almak için kullanılır. Direkt ve yayılan sinyal aynı anda yüksek dinamik aralıklı alıcılar ile alınmaktadır. Sistem kestirim için gecikme (TDOA) ve Doppler (FDOA) ölçümlerini kullanmaktadır. Bunların izleme filtresinde kullanılması ile her hedef için pozisyon, hız ve ivme verilerinden oluşan durum vektörü kestirimi yapılmaktadır. Bu durum verisi bu bilgiyi kullanacak yerdeki taktik ekranlara ve standart veri yolları aracılığı ile ilgili sistemlere iletebilmektedir. Sistemin genel özellikleri sırasıyla çok çeşitli hedeflerin menzil tespitinin yapılması, sürekli dalga tipi sinyallerin kullanımı ile yüksek hızda güncelleme, tam ve sürekli hava sahası kapsamasıdır. Bu sistem hava hedeflerinin gerçek zamanlı olarak 3 boyutlu izleme ve gözlenmesini ve çok çeşitli aydınlatıcı (radyo ve TV yayını) kullanım imkânı sağlamaktadır.

Çizelge 1.1 SS2(Silent Sentry) Performans Değerleri

Sistem Parametresi	Değer
*Sezim Menzili	220km
Yanca Kapsaması	60° - 360°
Yükseklik Kapsaması	50°
Hedef İzleme Güncelleme Hızı	1/8s
Hedef Kapasitesi	200+
Güç Gereksinimi	10kW

* RCS=10 m² @ 100 MHz, P_d > 0.95, FAR < 10⁻³.

Hava hedefleri tespiti için kullanılan Roke Manor Research CELLDAR sistemi [17] ise bir diğer uygulamadır. Bu sistem aydınlatıcı olarak GSM sistemlerini kullanmaktadır. Sistem aydınlatıcı yayını düşük güce sahip olmasına rağmen, baz istasyonu ağının yoğunluğu nedeniyle pek çok yerde üstün kapsama alanı sağlamaktadır. Bu sistem kara araçları, askeri ve sivil hava araçlarını izleyebildiği bilinmektedir. Şekil 1.4'de CELLDAR sisteminin çalışma prensibi görülmektedir. Görüldüğü gibi hedef tespit alanına girdikten sonra GSM sinyalleri hedeften yansımaktadır. Daha sonra yansıyan bu sinyaller cep telefonu radarları tarafından toplanmaktadır. Bundan sonra ise tüm veriler merkezi kontrol sisteminde haberleşme ağları ile gönderilmektedir.



Şekil 1.4 CELLDAR Sistemi[17]

Ayrıca atmosferik ve iyonosferik çalışmalar için Manastash Ridge radarı [18] diğer benzer şekilde çalışan sistemlerdendir. Dynetics [19], UCL [20] raporlanan deneysel çalışmalardan bir kısmıdır. Pasif radar sistemleri hava-uzay gözetleme [16][17], deniz gözetlemesi [21] atmosferik ve iyonosfer çalışmalar [18], okyanus coğrafyası [22] gibi alanlarda kullanılmaktadır. Pasif radarlar üzerine hedef izleme ve hedef sınıflandırma gibi alanlarda algoritmalar geliştirilerek pek çok yayın yapılmaktadır ([23]-[30]).

1.2. Pasif Radar Çeşitleri

Pasif radarlar alıcı-verici sayısına göre bistatik ve multistatik pasif radarlar olmak üzere iki çeşitten oluşmaktadır. Tek alıcı ve vericiden oluşan, aydınlatıcı kaynağı olarak ortamda bulunan çeşitli özellikleri bilinen işbirlikçi olmayan kaynakları kullanan sistemler bistatik pasif radarlardır. Alıcı ve vericiden oluşan sistemin elaman sayısının ikiden fazla olduğu ve işbirlikçi olmayan kaynakları kullanan

sistemler ise multistatik pasif radarlardır. Ayrıca pasif radarlar ölçüm yaptıkları veri tiplerine göre de sınıflandırılmaktadır. Doppler kayması, yön (yanca açısı, yükseklik açısı), alıcı antene gelen eko zamanı ile referans antene gelen sinyal zamanı arasındaki farktan sinyalin geliş süresini ve buradan da bistatik mesafe gibi ölçüm veri tipleri bulunmaktadır. Pasif radar sistemleri bu ölçüm veri tiplerinin çeşitli kombinasyonlarını kullanarak çalışmaktadır. Bu çalışmada ölçüm verisi olarak bu veri tiplerinin üçü de kullanılmaktadır. Son olarak pasif radarlar aydınlatıcı olarak kullandıkları işbirlikçi olmayan kaynakların türlerine göre de sınıflandırılmaktadır. Bunlar radyo, televizyon, cep telefonu istasyonları (3G-GSM), sayısal ses ve video yayınları, GPS uyduları ve düşman radar vericileri gibi kaynaklar olabilmektedir ve bu aydınlatıcılar yayın özelliklerine göre hedef üzerindeki güç yoğunluğu, uzaysal/zamansal kapsama ve dalga şekli olmak üzere üç kısımda incelenmektedir [31].

1.3. Pasif Radarların Kullanım Avantajları ve Dezavantajları

Genel olarak ele alındığında pasif radarların kullanımının geleneksel radarlara göre, aşağıda verildiği gibi bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır [9][32].

1.3.1. Kullanım Avantajları

- Pasif olmaları nedeniyle daha basit ve düşük maliyetlidirler.
- İşbirlikçi bir verici yoktur.
- Bakımı ve çalışması işbirlikçi bir verici olmadığından daha kolaydır.
- Alıcı gizilidir ve pek çok durumda daha güvenlidir.
- Frekans tahsisi ve lisanslama gerekliliği yoktur.
- Karşı tedbir oluşturulması zordur.
- İnsansız hava araçlarının kullanılması hava savunma sistemlerinde pasif radarları cazip kılmaktadır.
- Daha önce çok zor olan senkronizasyon sorunu GPS ile daha kolay çözülebilir durumdadır.
- Gizli alıcılar olduğundan karıştırılmaları zordur.

- Anti radyasyon füzelerden fiilen etkilenmez.
- Hızlı(saniyede 1 ya da 2 kez) güncelleme yapabilirler.
- Fiziksel olarak küçük olduğundan geleneksel radarlara göre değişik yerlerde kurulumu daha kolaydır.
- Gizli-izlenmesi zor hedeflere karşı radar kesit alanı monostatik radarlara göre daha yüksek olduğundan tespit yeteneği monostatik radarlara göre fazladır.

1.3.2. Kullanım Dezavantajları

- Daha karmaşık geometrisi vardır.
- Direkt olarak verici sinyali kontrol edilemez.
- Teknolojik olarak olgunlaşmamıştır.
- Alıcı ve verici arasında senkronizasyon için vericiden darbe yayını yapıldığı an, verici anten taraması sırasındaki verici anten yanca açısı ve uyumlu işlem yapıldığı durumda yayımlanan sinyal fazı bilgileri gereklidir.
- 2 boyutlu çalışma yapılmaktadır ve 3 boyutlu çalışma için daha yüksek sayıda alıcı-verici çifti gerekmektedir ve bu da sistemin uygulamasını ciddi şekilde zorlaştırmaktadır.

1.4. Pasif Radar Örnekleri

Aşağıda Çizelge 1.2 'de farklı ülkelerin geliştirdiği sistemler verilmiştir ([32]-[35]). Çizelge 1.2'de geçen pasif radar örneklerinde aydınlatıcı sinyal tipi olarak FM, sayısal ses video yayını ve çeşitli frekans bantları kullanıldığı görülmektedir. Farklı ülkelerde farklı özellikte sistemler üretilmiştir. Lockheed Martin, Thales, BAE ve SELEX gibi büyük savunma firmalarında yapılan tüm bu kapsamlı çalışmalar pasif sensörlerin elektronik destek tedbirleri için önemini göstermektedir. Bu sistemler hava savunması için gözetleme sırasında büyük kolaylık sağlamaktadır.

Çizelge 1.2 Pasif Radar Örnekleri

Sistem	Sinyal	Üretici
Silent Sentry	FM	Lockheed Martin, Amerika
HA-100	FM	Thales/Onera, Fransa
NECTAR	Sayısal ses yayını, Sayısal video yayını(karasal)	Thales/Onera, Fransa
PARADE	FM, Sayısal ses yayını, Sayısal video yayını	CASSIDIAN, Almanya
AULOS	FM	SELEX, İtalya
DELIA	Sayısal ses yayını	Fraunhofer FHR, Almanya
CORA	Sayısal ses yayını, Sayısal video yayını(karasal)	Fraunhofer FHR, Almanya
PETRA II	Sayısal video yayını(karasal)	Fraunhofer FHR, Almanya
TAMARA	0.8-18 GHz	Çek Cumhuriyeti
VERA	1.18 GHz	Çek Cumhuriyeti
PCL Demonstrator	FM	ERA, Çek Cumhuriyeti
Kolchuga	(VHF) –X/Ku bandı	Ukrayna
85V6 Vega	0.2-18 GHz	Rusya
DWL002	X-bandı veya Ku-bandı	CETC, Çin Halk Cumhuriyeti
YLC-20	380 MHz - 12 GHz	CETC, Çin Halk Cumhuriyeti
Lantan/Almaz-Antey Valeria E	VHF - Ku/Ka bandı	Rusya
CELLDAR	Cep telefonu	Roke Manor / BAE Systems, İngiltere
GAMMA 1 ve 2	Cep telefonu	Fraunhofer FKIE, Almanya

1.5. Tez Amaç ve Kapsamı

Pasif radarların üretim, çalışma ve bakım maliyetlerinin düşük olması ve küçük boyutta olmaları yaygınlık kazanmalarını sağlamaktadır. Multistatik tiplerinde izlenmesi zor hedeflerin tespit edilmesi ve karıştırılmasının zor olması gibi avantajları bulunmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalar günümüzde de giderek önem kazanmaktadır ve halen gelişim aşamasında olup pratikte tam olarak olgunlaşmamıştır.

Bu çalışmadaki temel amaç pasif bistatik ve multistatik radar sistemlerin analizi ve gerçek hayatta bu sistemlerin kullanıldığı hava gözetleme sistemlerinde hedef izleme işleminin nasıl yapıldığının incelenmesi, yapılan uygulamalarla bu konuda uzmanlaşmaktır. Çeşitli aydınlatıcıların benzetimleri yapılarak, hangi aydınlatıcıların hedef takibi uygulamalarında daha uygun olduğu, hedef tespitinde birden fazla alıcı kullanılması ve ölçüm veri tipi sayısının artması durumunda veri birleştirme (data fusion) kullanılarak hedef takip performansın artırılıp artırılamayacağı araştırılması hedeflenmiştir. Bu şekilde hedef izleme uygulamalarında farklı benzetim ve modellemesi yapılan senaryolar ile hangi durumlarda nasıl iyileşme elde edileceğinin tespit edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla öncelikle pasif radarların tarihi, geçmişte kullanıldığı yerler ve günümüzdeki örnekleri incelenmiştir.

Sonrasında pasif radarların kullanımları sırasında sağladığı avantaj ve dezavantajlar, pasif radar teorisi ve geometrisi araştırılmıştır. Pasif bistatik ve multistatik radar sistemleri ile hedef izleme uygulamalarının nasıl yapıldığının gösterimi için pasif bistatik ve multistatik radar hava gözetleme sistem modellemeleri yapılmıştır. İki boyutta Kartezyen koordinatlarda değişik sayıda alıcı ve verici senaryoları oluşturulmuştur. Pasif radar hava gözetleme sistemi modellemesi sırasında değişik bantta yayın yapan radyo ve televizyon vericisi frekanslarında çalışma yapılmıştır.

Farklı hareket modelleri oluşturularak hedef hareketlerinden elde edilen anlık hedef pozisyon ve hız vektörleri, sabit olan iki boyuttaki alıcı ve verici koordinatları ile ölçüm verisi arasındaki formülasyon kullanılarak elde edilen Doppler, yanca açısı ve bistatik mesafe değerlerine sıfır ortalamalı belirli varyanslara sahip Gauss gürültü eklenerek ölçüm verileri elde edilmiştir. Bu şekilde gerçek uygulamalarda

alıcı tarafındaki referans ve ölçüm antenlerine sırasıyla gelen direkt sinyal ve hedef ekosu kullanılarak sinyal işleme teknikleri ile elde edilen Doppler, yanca açısı ve bistatik mesafe ölçümleri kullanılmış gibi benzetim yapılmıştır. Hareket modellemelerine ek olarak gerçek uçuş verileri de kullanılmıştır. Ölçüm verileri belirli bir periyotta hedef hareketine göre güncellenerek hedef izleme algoritmasına verilmiştir. Burada iki boyutta durum kestirimi için Genişletilmiş Kalman Filtre kullanılmıştır. Durum kestirimi vektörü iki boyutta pozisyon ve hız vektörlerinden oluşturulmuştur. Son olarak ise geliştirilen hedef izleme algoritması ile işlenen verinin analizi yapılmış ve sonuçları ortaya konmuştur.

1.6. Tez Düzenlemesi

Bölüm 2'de, öncelikle radarlar hakkında genel bilgiler verilmiş, daha sonra bistatik/multistatik radar denklemi, pasif radar sistem geometrisi, Doppler kayması, alıcı sistem anten özellikleri ve gereksinimleri tanımlanmıştır.

Bölüm 3'te, hedef izlemenin temelleri anlatılmış, kestirim, veri birleştirme, doğrusal ve Genişletilmiş Kalman Filtre tanımları verilmiştir.

Bölüm 4'te, tez çalışması boyunca kullanılan yöntem anlatılarak yapılan uygulamalarda kullanılan sistemler gösterilmiştir. İncelenen ve önerilen pasif multistatik radar sistemlerinde kullanılan hedef durum ile ölçüm modelleri, Kartezyen koordinata geçiş ve Genişletilmiş Kalman Filtre denklemleri verilmiştir.

Bölüm 5'te, tez çalışması boyunca yapılan uygulamalar, burada kullanılan simülasyon başlangıç verileri ve simülasyonlar sonucunda elde edilen grafikler verilmiştir. Ayrıca, gerçek uçuş verileri kullanılarak pasif multistatik radar sistemi konfigürasyonun ortamda bulunan bir hedefi izlediği benzetimler sunulmuştur.

Bölüm 6'de ise bu çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş, ileride yapılacak çalışmalarda tezin iyileştirilmesi ve genişletilmesi amacıyla yapılması önerilen çalışmalara değinilmiştir.

2. RADAR SİSTEMİ

2.1. Radar sistemi temelleri

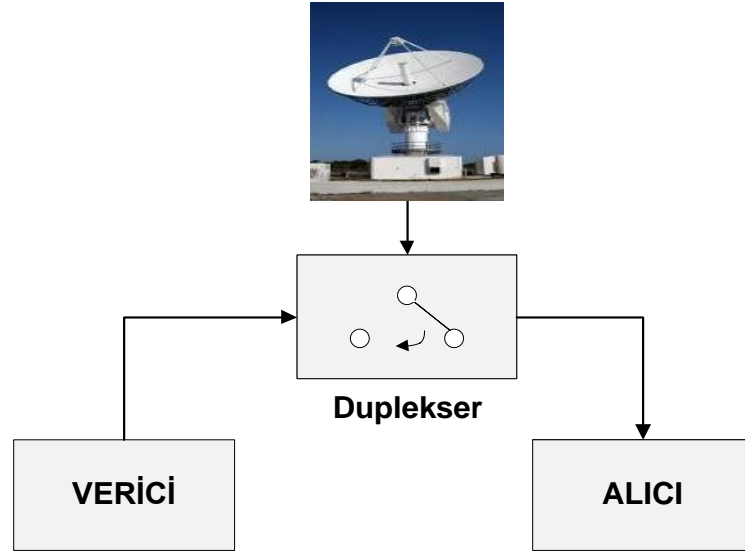
Radarin temel fonksiyonu nesnelere varlığını tespit etmek ve radyo dalgalarını kullanarak onların pozisyonlarını belirlemektir [36]. Radar objeleri radyo dalgası yollayıp alarak tespit eder. Radar radyo dalgalarının gidiş-geliş zamanı kullanılarak hedefe ilişkin mesafe ölçümü yapabilir, Doppler etkisi ile hedef hızını ölçebilir, bununla beraber hareket eden ve durağan bir hedefi ayırt edebilir ve dar bir huzme ile açısal bilgi elde edebilir [37].

Radarin en temel görevi hedefin olup olmadığını tanımlamaktır. Radar bu özelliğini dışarıya sinyal yollayarak ve dönen sinyalleri analiz ederek icra etmektedir. Gürültü ve parazit yansımaları gibi çevredeki etmenler radarın işini bazen zorlaştırabilir. Bunları çeşitli sinyal işleme teknikleri ile ayrıştırarak hedefin olup olmadığını tespit eder. Bu yüzden radarın tespit etme özelliği diğer özelliklerinden öne çıkar. Radar ayrıca tek ya da çok hedef var mı veya eğer çok hedef varsa bunun sayısını da tespit edebilmektedir. Radarin diğer önemli özellikleri ise hedef izleme ve sınıflandırmadır. Hedefin var olduğu tespit edildikten sonra hedefin 2 veya 3 boyutta menzil ve hız gibi temel parametreleri ölçülmektedir. Bu radar parametrelerinin kestirimi işlemidir. Hedef menzili eko sinyalinden çıkarılmaktadır. Parametre kestiriminin ne kadar doğrulukta olduğu pek çok faktöre dayanmaktadır. Sinyal ve gürültü gücü iki kritik parametredir. Hedef parametrelerini elde etmek için kullanılan sinyal işleme metodu da parametre kestirimi doğruluğu açısından oldukça önemli bir faktördür.

İzleme radarın diğer bir önemli özelliğidir. Radar sistemi bu özelliği gerçekleştiriyorsa hedefin geçmişteki yolunu tanımlamak ve gelecekteki yolunu tahmin etmek amacıyla hareket eden hedefin yerini ve hızını sürekli takip etmektedir. İzleme radarı bir hedefi sürekli olarak yüksek doğruluk ile gözlemlemeye odaklanmıştır. Radar izleme özelliğini gerçekleştirirken radar anteni sürekli hedef üzerinde olabilir. Bu hedefin radar ana huzmesi merkezinde kalmasını ve maksimum sinyal gürültü oranı elde edilmesini sağlamaktadır. Hedef radar ana huzmesi merkezinden hareket ettiğinde, hata voltajı üretilir ve antenin tekrar direkt hedefe dönmesi için beslenir.

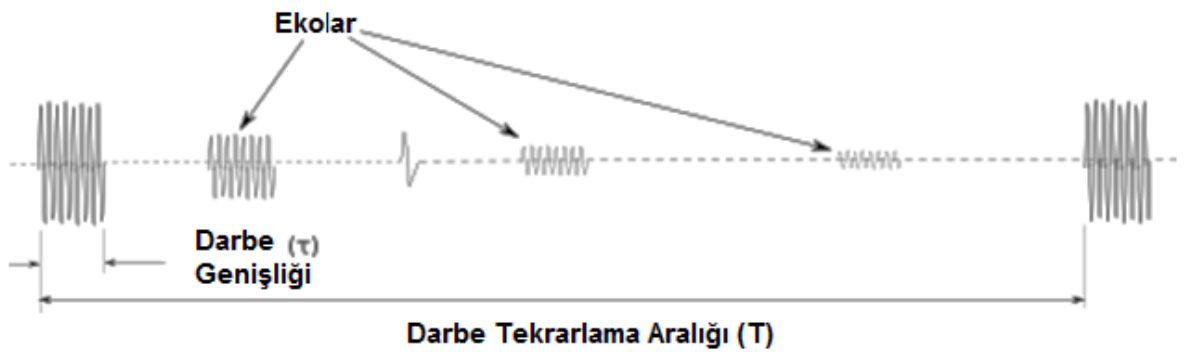
Hedef tespit edilip hedef bilgileri elde edildikten sonra tüm ilgili bilgiler hedefin belirlenmesi veya sınıflandırılması için kullanılmaktadır. Hedef belirlenmesi radar sinyal seviyesine dayanır.

Radarlar alıcı ve vericinin yerleşimine göre monostatik ve bistatik olarak ikiye ayrılmaktadır. İkisinde de tek alıcı verici bulunmaktadır. Monostatik radar sistemi en basit olarak Şekil 2-1'deki gibi ifade edilebilir.



Şekil 2.1 Monostatik Radar Sistemi

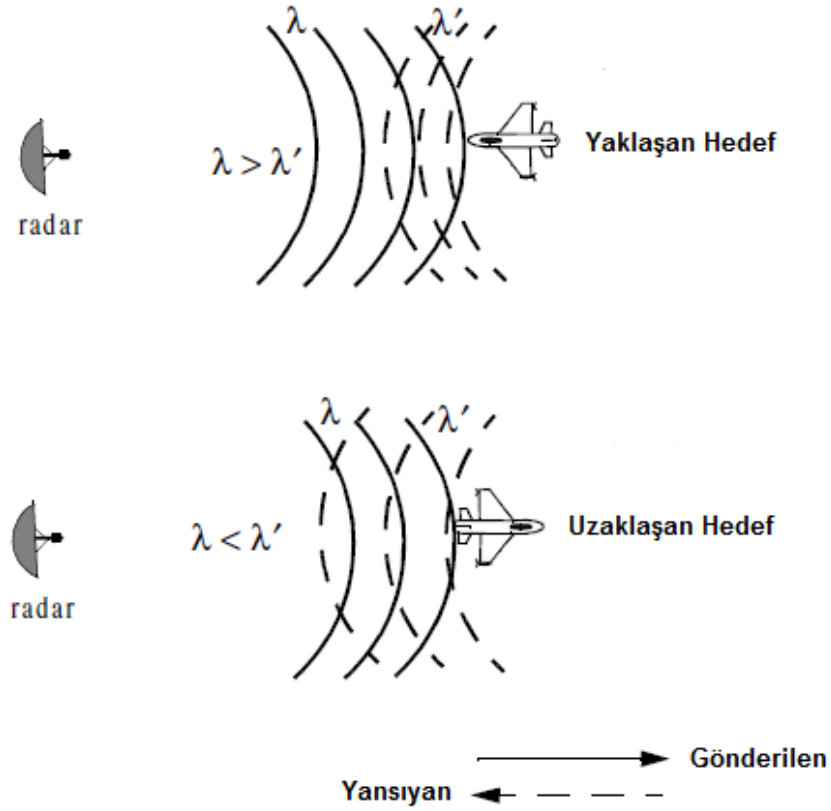
Radarların operasyonel çalışma performansını belirleyen temel özellikler darbe karakteristiği, darbe sıkıştırma özelliği ve Doppler frekansıdır.



Şekil 2.2 Darbe tekrarlama aralığı

Alınan frekans ile yayım yapılan sinyal frekansı arasındaki farka Doppler kayması denmektedir ve f_d ile ifade edilmektedir. Doppler kayması hedef hızı ile doğru orantılıdır. Doppler sayesinde duran ve hareket eden hedefler birbirinden ayrılır.

Doppler etkisi uzaklaşan hedefler için $(f_c - f_d)$, yaklaşan hedefler için ise $(f_c + f_d)$ şeklinde ifade edilmektedir.



Şekil 2.3 Hareket eden hedefin yansıyan dalga üzerindeki etkisi [10]

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

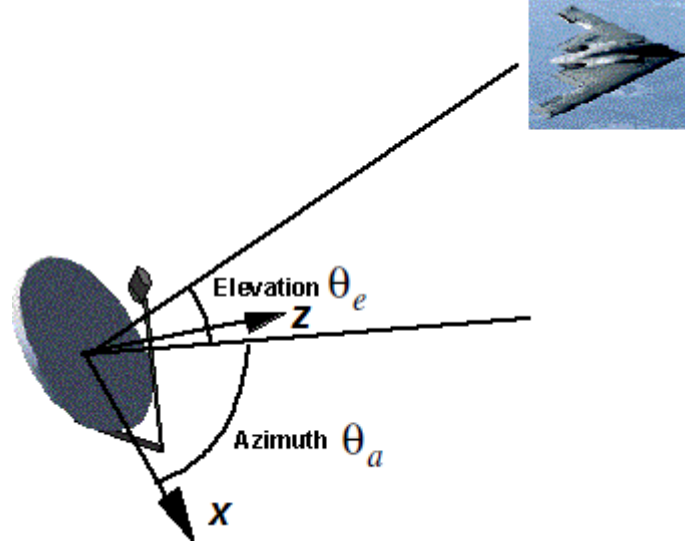
Yukarıdaki Eşitlik 2.7’de radara göre hedef radyal hızı eşit kabul edilmiştir. Fakat gerçekte bu durum hep böyle değildir. Doppler kayması hedef hızının radar yönündeki bileşenine bağlıdır.

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

$$\cos \theta = \cos \theta_e \cos \theta_a \quad (2.9)$$

Eşitlik 2.8’de $V \cdot \cos \theta$ radyal hız , θ radarla sinyalin yollandığı hedef arasındaki toplam açı yanca ve elevation (yükseklik) açılarına bağlıdır ve Eşitlik 2.9’daki gibi

ifade edilmektedir. Radarla sinyalin yollandığı hedef arasındaki toplam açı Şekil 2.4'de θ_e ve θ_a yanca ve elevation (yükseklik) açılarıdır.



Şekil 2.4 Radyal hız

2.2. Bistatik/Multistatik Radar Geometrisi ve Bistatik Radar Denklemi

Sürekli, genlik modülasyonlu, frekans modülasyonlu ve darbe gibi tüm dalga tiplerinde geçerli olan bistatik radar denklemindeki hedef tespiti için gerekli sinyal - gürültü güç oranı Eşitlik 2.10'de ifade edilmiştir [11].

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{min} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_b F_T^2 F_R^2}{(4\pi)^3 k T_s B R_T^2 R_R^2 L_T L_R} \quad (2.10)$$

$(S/N)_{min}$: hedef tespiti için gerekli sinyal - gürültü güç oranı

P_t : iletim gücü (Watt)

G_t : iletim anten kazancı

R_T : verici – hedef mesafesi (metre)

σ_b : hedefin bistatik radar kesit alanı (RCS- m^2)

R_R : hedef – alıcı mesafesi (metre)

G_r : alıcı anten kazancı

λ : sinyal dalga boyu (metre)

k : Boltzmann sabiti($1,38. 10^{-23} \text{ Joule/Kelvin}$)

T_s : gürültü referans sıcaklığı(*Kelvin*)

B : alıcı efektif bant genişliği (*Hz*)

F_T : verici-hedef yayılım faktörü

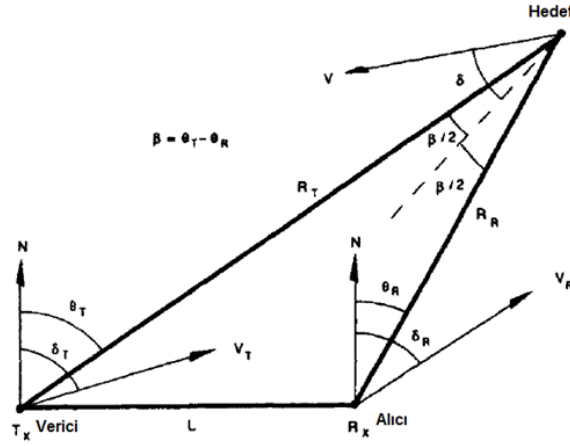
F_R : hedef- alıcı yayılım faktörü

L_T : verici sistem kayıpları(>1)

L_R : alıcı sistem kayıpları(>1)

Yukarıda Eşitlik 2.10'da geçen parametrelerin karşılıkları yer almaktadır. Görüldüğü gibi hedef tespiti için gerekli sinyal - gürültü güç oranı pek çok değişkene bağlıdır. Bu eşitlik hedef tespiti için ihtiyaç duyulan $(S/N)_{min}$ oranına göre nasıl bir anten kullanılması, nasıl bir iletim gücüne ihtiyaç olduğu gibi pasif bistatik/multistatik sistemler kurulmadan önce yapılacak tasarımın gereksinimlerini belirlemek için kullanılmaktadır. F_T ve F_R verici-hedef ile alıcı-hedef arasındaki

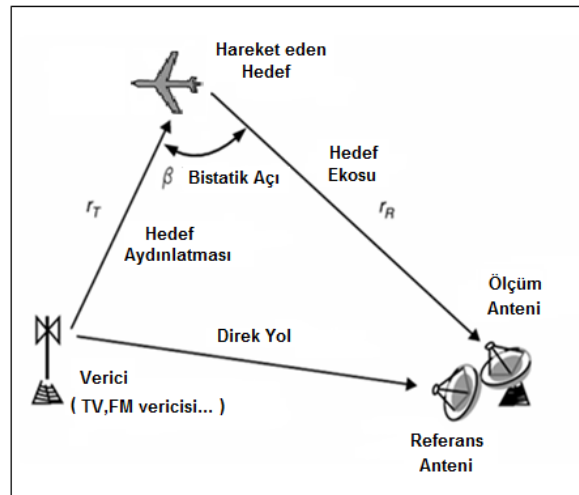
hüzme şekli, çokyolluluk, kırınım ve kırılmadan oluşan kayıplar yüzünden dalga yayılımının serbest uzayda olduğu gibi olmadığını ifade etmektedir. Şekil 2.5'de Eşitlik 2.10'un çıkarıldığı bistatik radar geometrisi yer almaktadır. V, V_T, V_R sırasıyla hedef, verici ve alıcı hızlarıdır. Burada genelde sabit olan alıcı ve verici konumları zamanla hızları doğrultusunda değişmektedir. Q_R ve Q_T geliş açıları(AOA) olarak bilinmektedir. Q_R kuzey referanslı yanca açısı, β ise bistatik açıdır.



Şekil 2.5 Bistatik Radar Geometrisi[38]

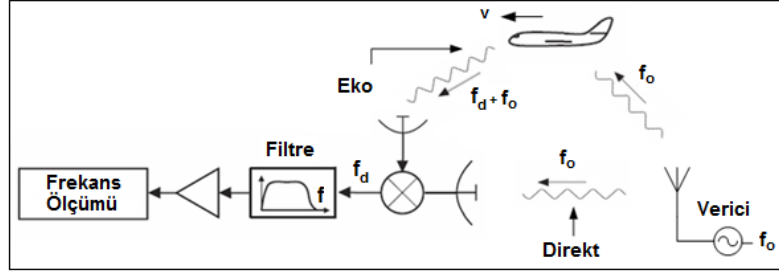
Belirli bir hedef hızı, durağan alıcı ve vericiler için bistatik Doppler kayması Eşitlik 2.11'deki gibidir [11].

$$f_D = \left(\frac{2V}{\lambda} \right) \cos \delta \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad (2.11)$$



Şekil 2.6 Bistatik Radar ile Hedef Takibi

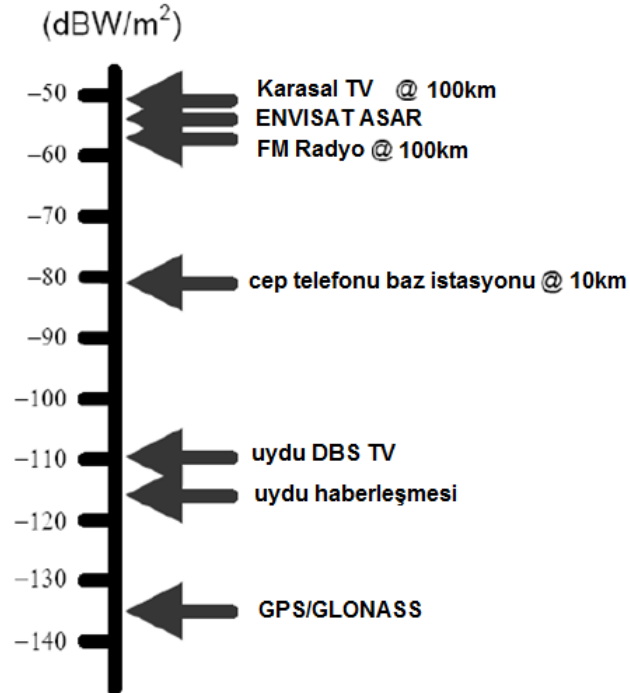
Şekil 2.6'da görüldüğü gibi Doppler frekans ölçümünü elde etmek için alıcı tarafında iki farklı anten kullanılmıştır. Bunlardan birisi vericiden gelen direkt sinyallerin alındığı referans anteni diğeri ise hedeften gelen ekonun alındığı ölçüm antenidir. Şekil 2.7'de pasif radar ile frekans ölçümü işleminin nasıl yapıldığı görülmektedir. Vericiden gelen direkt sinyal ve hedeften gelen eko alındıktan sonra gerekli sinyal işleme işlemleri yapılarak Doppler frekans ölçümü elde edilmektedir.



Şekil 2.7 Pasif Radar ile Frekans Ölçümü

Eşitlik 2.12'da Φ (W/m^2) güç yoğunluğu verilmiştir. Güç yoğunluğu görüldüğü gibi verici gücü (P_T), verici kazancı (G_T) ve hedef ile verici arasındaki mesafeye göre değişmektedir.

$$\Phi = \frac{P_T G_T}{4\pi R_T^2} \quad (2.12)$$



Şekil 2.8 Çeşitli pasif radar vericilerinin yaklaşık güç yoğunlukları[31]

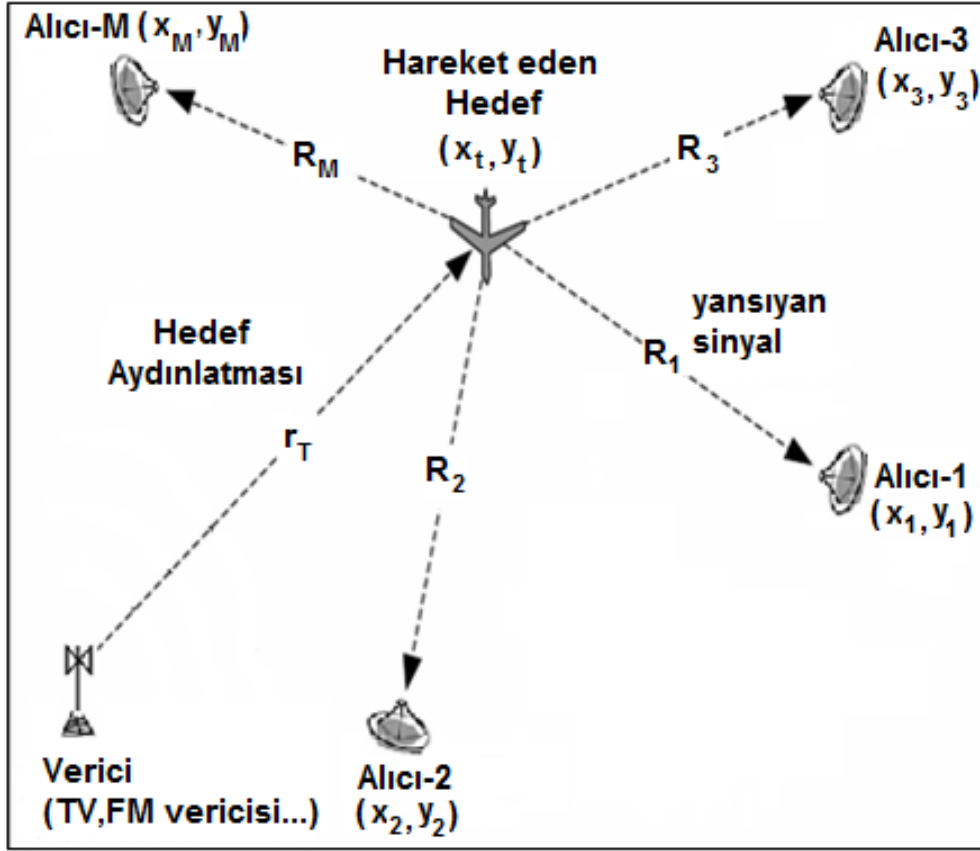
Şekil 2.8’de çeşitli pasif radar vericilerinin yaklaşık güç yoğunlukları görülmektedir. En yüksek güç yoğunluğu karasal televizyon/radyo vericilerinin, en düşük güç yoğunluğu ise GPS/GLONASS uydularınınındır. Yüksek güç yoğunluğu radar sistem menziline yüksek olmasını sağlamaktadır. Pasif radar aydınlatıcı seçiminde güç yoğunluğu, uzaysal/zamansal kapsama önemli parametrelerdir. Hedefin ne kadar süre izlenmek istendiği, ne kadarlık bir menzildeki bir hedefin izlenmek istendiği gibi gereksinimlerin belirlenmesi sonrasında uygun aydınlatıcı seçilmektedir. Aydınlatıcı tiplerine göre çok sayıda performans analizleri yapılmaktadır. Çizelge 2.1’de yapılan bu çalışmaların bir örneği görülmektedir.

Çizelge 2.1 Çeşitli Pasif radar verici kaynakları için sinyal tipleri($G_t = 1$ için) [38]

İletim	Frekans	Modülasyon, Bant Genişliği	$P_t G_t$	Güç Yoğunluğu $\Phi = (P_t G_t) / 4\pi r_1^2$
HF yayın	10-30 MHz	DSB AM, 9kHz	50 MW	-67- -53 dBW m ⁻² r1 =1000 km
VHF FM (analog)	~100 MHz	FM,50kHz	250 kW	-57 dBW m ⁻² r1 =100 km
UHF TV (analog)	~550 MHz	FM(ses),5.5 MHz	1MW	-51 dBW m ⁻² r1 =100 km
Sayısal Ses Yayını	~220 MHz	Dijital, OFDM 220kHz	10kW	-71 dBW m ⁻² r1 =100 km
Sayısal TV	~750 MHz	Dijital,6 MHz	8kW	-72 dBW m ⁻² r1 =100 km
Cep Telefonu Baz İstasyonu (GSM)	900 MHz, 1.8GHz	GMSK, FDM/TDMA/ FDD 200kHz	100W	-81 dBW m ⁻² r1 =10 km
Cep Telefonu Baz İstasyonu (3G)	2GHz	CDMA 5MHz	100W	-81 dBW m ⁻² r1 =10 km

Tek alıcı-birden fazla verici, tek verici-birden fazla alıcı veya birden fazla alıcı ve verici sayısının olduğu radar sistemleri multistatik sistemler olarak

tanımlanmaktadır. Şekil 2.9'da örnek bir multistatik radar sistemi ile bir hava aracının pasif izleme işlemi verilmiştir.



Şekil 2.9 Multistatik Radar ile Hedef Takibi

$$T_i = 1/B \quad (2.13)$$

Eşitlik 2.13'de geçen T_i hedefin radar huzmesi tarafından aydınlatılma süresi (entegrasyon zamanı), B ise bant genişliği olarak ifade edilmektedir. Pasif bistatik/multistatik radar sistemlerinin FM ve DVB-T yayını yapan vericiler nedeniyle sağladığı iki önemli özellik vardır. Bunlardan ilki, yayın yapan vericiler %100'lük aydınlatma faktörü (duty cycle) değeri ile sürekli yayın yaptıklarından alıcı anten olarak kullanılan sabit huzmeli antenler aracılığı ile gözetleme yapılan alan ve hacmi tam olarak kapsamasıdır. Fakat bunun için tüm pasif sistemlerde mevcut olmayan sürekli işlem yapan ve yüksek güç gereksinimi olan bir sistem yeteneği gereklidir. İkincisi ise klasik monostatik radarlara göre kullanılan uzun entegrasyon zamanı olmasıdır. Bu özellik çok iyi bir Doppler çözünürlüğü sağlamaktadır ve hedeflerin ayrılmasında doğru sonuçlar vermektedir.

2.3. Pasif Radar Alıcı Anten Özellikleri

Radar anteni alıcı sisteminin kapsama alanı ve açısal çözünürlüğü radar anten tasarımında dikkat edilen iki kritik parametredir. Alıcı anten kazancı menzilin karesi ile doğru orantılıdır. Geleneksel radarlardaki durum bistatik durumdakinin karesidir. Bu ilişkiden ötürü alıcı kazancı bistatik radar kapsama alanı için gereklidir. Anten kazancı kontrol edilebilir bir parametredir. Anten kazancını arttırmak otomatik olarak alıcı gücünü artırır bu da sistem menzilin arttırır. FM radyolar için bistatik menzil çözünürlüğü yapılan çalışmalarda 3-30 km arasındayken sayısal karasal yayın için 40 m olarak raporlanmıştır [39].

Açısal çözünürlük alıcı pasif radar sistemi için diğer önemli bir parametredir. Çözünürlük boşlukta duran nesnelerin farkına varma yeteneğidir ve direk olarak antenin elektriksel büyüklüğü ile ilişkilidir. Daha büyük elektriksel boyutlardaki antenlerin çözünürlükleri daha iyi olmaktadır. Radar anteni boyutu dalga boyu olarak ölçülür ve huzme genişliği ile ters orantılıdır.

Dizi anten tasarımında daha fazla sayıda eleman kullanılması kazancı artırır veya ana huzmeyi daraltır. Bu işlem radar performansını artırır. DOA yanca kestirimi için alıcıda en azından iki farklı kanal gerekmektedir. Dizi anten kullanarak alıcı kanal sayısı artırılabilir. Bu da DOA sonuçlarında daha doğru veriler alınmasını sağlar. Bu sonuçla birlikte dizi sayısını arttırmak antenin elektriksel boyutunu da artırır. Bu da ana huzmenin darlaşmasına yani açısal çözünürlüğün artmasını sağlar. Kanal sayısının artması alınan sinyal hakkında daha fazla bilgi etmeyi sağlar böylece alıcı sisteminin hassasiyeti gelişir.

Pasif Radar anten tasarım gereksinimleri

- Geniş bant (Örneğin FM yayın yapan bir verici olduğu durumda 88-108 MHz)
- Yüksek kazanç veya yönlülük çünkü pasif sistemin tepe gücü tipik radara göre daha düşüktür
- Düşük yan kulakçık
- Düşük maliyet

Alıcının görevi her zaman sinyali almaktır. Yüksek güçlü vericilerin çoğalması ve elektronik gürültü seviyesinin büyüyerek artması zayıf sinyallerin alınmasını

zorlaştırmıştır. Alıcı dinamik aralığı, alıcının sinyal güç aralığının zayıf olandan güçlü olana işlenmesi yeteneğinin ölçüsüdür. Bu yüzden alıcı dinamik aralığı yüksek olan pasif radar sistemleri daha iyi sonuçlar vermektedir.

Pasif radar sistemleri genellikle TV ve FM yayınlarını kullandığı için alıcı anten olarak geleneksel Yagi antenleri kabul edilebilirdir. Fakat buna karşın dizi anten kullanmanın pek çok avantajı bulunmaktadır. Bu yüzden pasif radar sistemlerinde genelde dizi anten kullanılmaktadır. Örneğin Lockheed Martin firmasının Silent Sentry sisteminde yatay doğrusal faz dizi anteni kullanılmaktadır [16]. Dinamik aralık gereksinimlerini sağlamak amacıyla gelen direkt ve yansıyan sinyalleri aynı anda almak için yüksek dinamik aralıklı alıcılar kullanılmıştır. Selex ise AULOS sisteminde geniş bantlı LPDA antenini kullanmaktadır [34]. Bu anten yönlü periyodik dipol dizi antenidir.

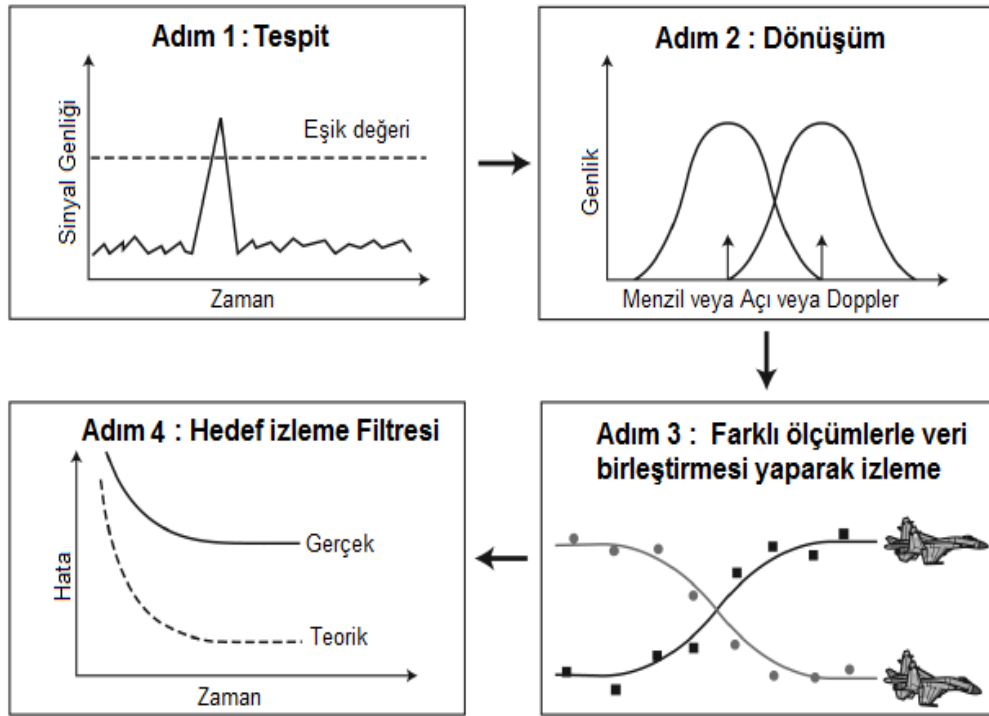
3. HEDEF İZLEME, KESTİRİM, BİLGİ BİRLEŞTİRME VE KALMAN FİLTRE

3.1. Hedef İzleme

3.1.1. Ön Bilgi

Hedef izleme radarı hedefin koordinatlarını ölçer ve hedefin gelecekteki konumunu belirlemek için veri sağlar. Hedef izleme işlemi menzil, açı ve Doppler bilgilerinin kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Temel amaç filtreleme kullanımı ile ölçüm gürültüsünü azaltarak hedefin anlık durum kestirimini ve bir sonraki ölçüm anındaki durum tahminini yapabilmektedir [40]. Açı hedef izleme radarlarında en büyük karakteristik özelliklerden biridir.

Genel olarak iki tip izleme olduğunu kabul edebiliriz. Bunlardan ilki tarama yaparken izleme diğeri ise sürekli izlemedir. Tarama yaparken izleme tipinde radar gözetleme modundadır ve tespit edilen hedeflerin izleme işlemi yapılmaktadır. Bu yolla çoklu hedefler izlenebilir. Sürekli izleme tipinde ise radar izleme fonksiyonunu gerçekleştirmektedir. Gözetleme radarı izleyici için koordinat bilgisini sağlar fakat geniş hacimde bir tarama yapamaz. Çoğunlukla tek hedef izlenir.



Şekil 3.1 İzleme Adımları

Şekil 3.1’de izleme adımları görülmektedir. Hedef tespit edildikten sonra eşik değerini aşan sinyal, zaman alanından yapılan ölçümün çeşidine göre menzil, açı veya Doppler alanına geçilir. Sonrasında ise farklı ölçümler kullanılarak veri birleştirmesi (data fusion) işlemi yapılır. En son aşamada ise hedef izleme filtresi çalıştırılarak hedefin gerçek pozisyon, hız ve ivme gibi değerleri kestirilir.

3.1.2. Hedef İzleme Amaç ve Fonksiyonu

Hedef izlemenin amacı bir hedefin pozisyon, hız ve ivmesini sürekli ve doğru bir şekilde ölçmektir. İzleme sırasında gerçekleştirilen 4 fonksiyon vardır [9].

- Ölçüm (Parametre elamanlarının tanımlanması için)
- Filtreleme(Gürültü ve bunun gibi nedenlerden oluşan hataları minimize etmek için ardışık ölçümlerin işlenmesi)
- Kontrol(filtrelenmiş ölçümlerin içindeki bilgi doğrultusunda komuta sinyalinin oluşturulması)
- Tepki(Örneğin hedefin yeni pozisyonuna göre radar anteninin huzmesinin yönünü değiştirmek)

Bu tez çalışmasında tek hedefin izleme uygulamaları yapılmış, izleme işleminin ilk iki fonksiyonu olan ölçüm ve filtreleme kısımlarının benzetimi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan çeşitli hareket modellerinden konum ve hız bilgileri kullanılarak ölçüm değerleri elde edilmiş, sonrasında bu elemanlara gürültü eklenmiştir. Sonrasında izleme sisteminin filtreleme bloğuna gelen ölçümler üzerindeki gürültü filtrelenerek hedefin durum vektörü değerlerinin kestirimi elde edilmiştir. Filtreleme kısmında ölçümü yapılan bilgi ile kestirimi yapılan değerler arasında doğrusal bir ilişki olmadığından Genişletilmiş Kalman Filtre kullanılmıştır.

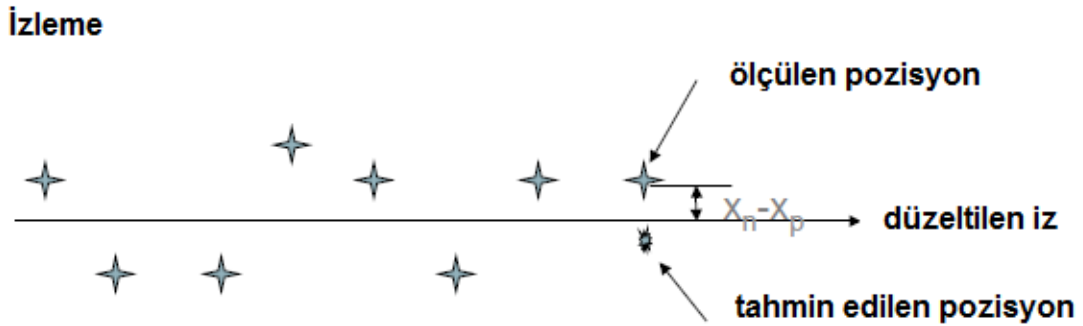
İzleme menzil, Doppler ve açı ölçümleri ile yapılır. Pek çok radar uygulamasında hedef menzil ölçümü ile izlenir.

Doppler ölçümü ile yapılan izlemede seri halde gelen radar darbelerinin Fourier dönüşümü alınarak hedefin hızı ve hızındaki değişimin kestirimi yapılır. Sürekli dalga ve darbe Doppler radar sistemleri Doppler ölçümü yapabilmektedir. Bu işlem dar bant filtre kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Doppler ölçümü özellikle Doppler frekans kayması parazit yansımalarına kıyasla daha büyük olduğunda sinyal

gürültü oranının artırılmasını ve aynı açı ile menzilde bulunan bir grup arasından hedefin ayırt edilmesini sağlar. Özetle Doppler ölçümü pozisyon kestiriminde iyileşme sağlamak ve optimum izleme için radarı değiştirmek için kullanılmaktadır.

Açı ise tek darbe gibi teknikler ile ölçülür. Bu bilgi Doppler ile birleşerek anten huzmesini hedefi izlemek için merkezde tutmak ve hedef üzerinde maksimum gücü tutmayı sağlamak için kullanılır.

Şekil 3.2’de iz düzeltilmesi işlemi görülmektedir. Burada x_p bir sonraki adımda tahmin edilecek hedef pozisyonunu, x_n ise ölçülen hedef pozisyonunu ifade etmektedir.

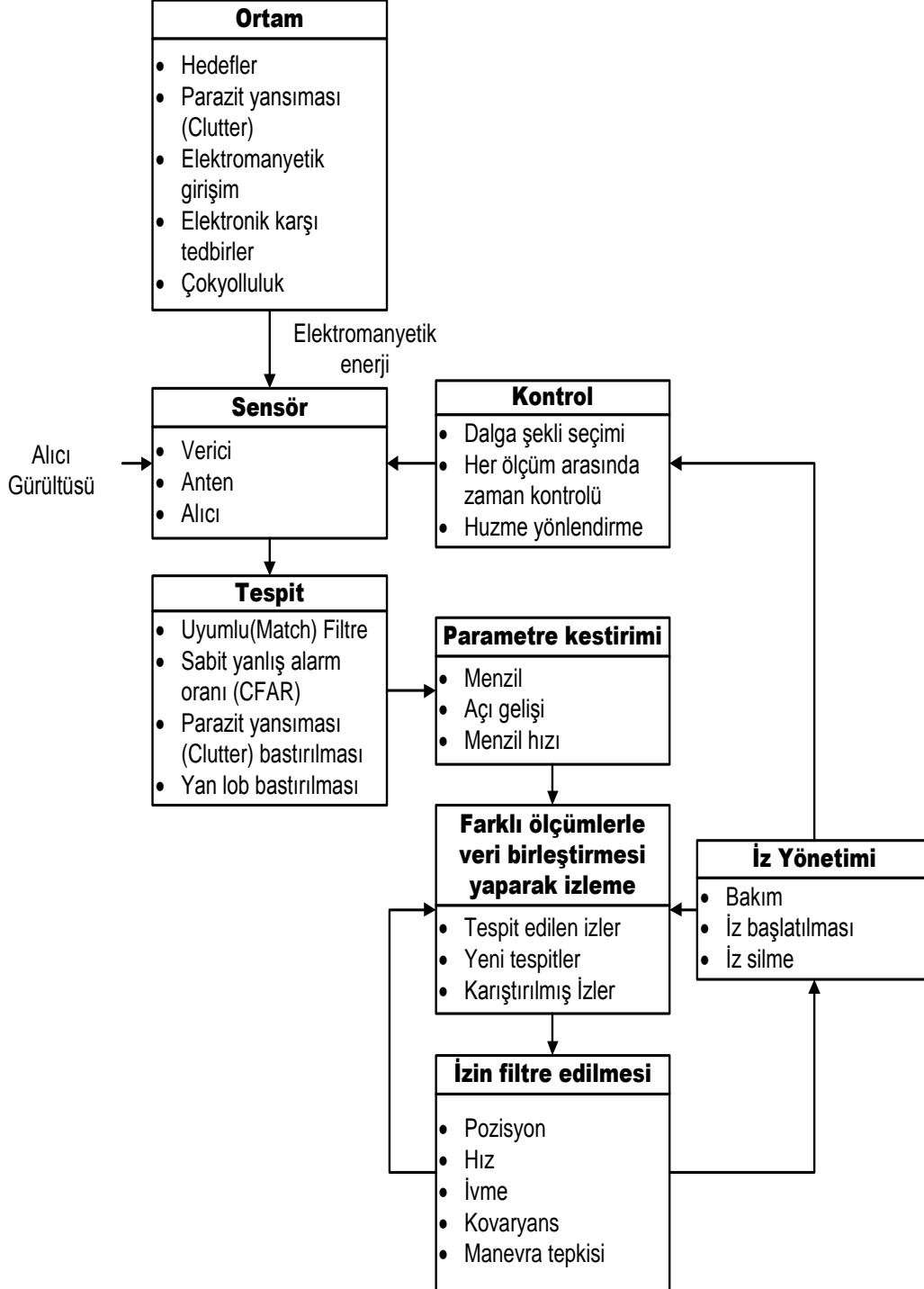


Şekil 3.2 İz düzeltilmesi

İzler oluşturulduktan ve gürültü filtrelendikten sonra ortamdaki hedef sayısı kestirebilir ve her izin hızı, gelecekteki pozisyonu hesaplanabilir. Ayrıca hedef eğer hava aracı ise hesaplanan hız değerlerine göre savaş uçağı, yolcu uçağı veya farklı bir tip uçak olup olmadığı da tespit edilebilir. Eğer bir hedef öngörülemez bir manevra yaparsa, radarın çok yakın bölgesinde rastgele dağılmış bir gürültünün içinde bulunuyorsa, zorunlu olarak aktif gürültü kaynaklarının etkisi altındaki hedef kayıplarının ya da yanlış alarmlar bulunduğu bir yerde bulunuyorsa bu hedefin izlenmesi hayli güçleşir. Bir radar izleyicisinin bu koşullar altında etkin bir şekilde çalışabilmesi için elinde bulunan gelişmiş algoritmalar içinden bir seçim yapmalıdır. İzlerin (hatta aynı anda yüzlerce hedefe ait izlerin) olabildiğince gerçek zamanlı yaratılması gerektiğinden işlemcinin kapasitesi yetersiz kalabilir ve bu radar izleyicisinin yeteneğini kısıtlayabilir.

3.1.3. Hedef İzleme Sistemi

Şekil 3.3'de izleme sisteminin ayrıntılı blok diyagramı görülmektedir. İzleme sırasında ortamda bulunan hedefler, parazit yansımaları, elektromanyetik girişim, elektronik karşı tedbirler ve çokyolluluk gibi elemanlardan dönen elektromanyetik enerji sensörler aracılığı ile toplanır.



Şekil 3.3 İzleme sistemi blok diyagramı [9]

Sonrasında bu sinyal uyumlu(match) filtreden geçirilir. Dönen sinyalin gerçek hedef olduğu CFAR ile belirlendikten sonra parazit ve anten yan kulakçık yansımaları bastırılarak hedef tespit işlemi bitirilir. Hedefin radar kesit alanının dağılımının kuş ve diğer parazit oluşturan hedeflerin kesit alanı dağılımları ile örtüşmesinden ötürü bu hedefler ortalama seviye sabit yanlış alarm oranını geçerler. CFAR teknikleri bu sorunları çözer ve gerçek hedef tespit edilir.

Hedef tespit işleminden sonra menzil, açı menzil hızı ölçüm parametreleri kestirimi yapılır. Farklı ölçümler kullanılarak veri birleştirme işlemi yapılır. Sonrasında oluşturulan izin filtre edilmesi gerçekleştirilerek hedefin pozisyon, hız, ivme vb bilgileri kestirimi yapılır. Bu bilgilere göre kontrol işlemi gerçekleştirilir. Kontrol işlemi hedefin kestirimi yapılan pozisyon, hız ve ivme gibi bilgilerine göre izleme sırasında kullanılan dalga şeklinin değiştirilmesi, her ölçüm arasında geçen zaman ayarlamasının yapılması(eğer hedef hızlı ise daha sık yavaşsa daha seyrek yayın) ve anten huzmesinin hedefe doğru yönlendirilmesidir.

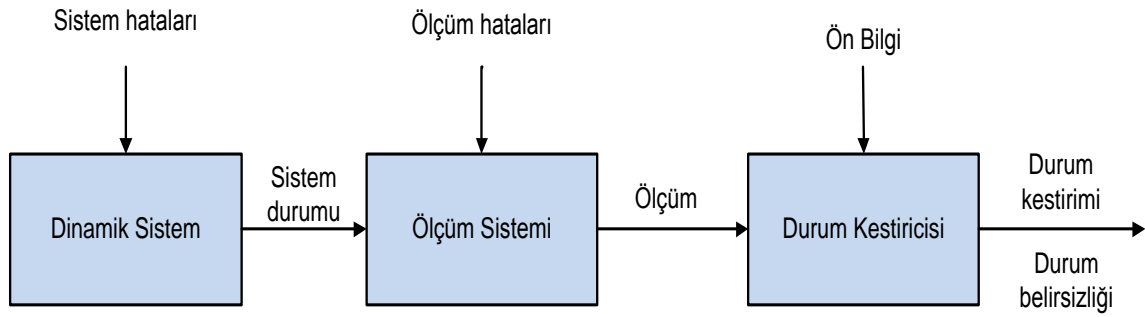
Hedef takibi yani iz yönetimi 3 temel aşamadan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla hedef izinin başlatılması, hedef izinin devam ettirilmesi ve hedef izinin silinmesidir. İz bilgisi içerik olarak her tespitteki pozisyon, açı ve Doppler hızı ölçümleri ve bunların zamanlarını, düzeltilmiş pozisyon ve hız bilgilerini, bir sonraki iz güncellemesindeki tahmin edilmiş pozisyon ile hız bilgilerini ve iz kesinliğini içerir. Bir tespit bir izle birleştirilmesinden sonra iz güncellenir. Hedef izinin başlatılması aynı hedeften gelen ölçümlerin belirlenerek bu ölçümlerin kullanılmasıyla hedef durumunun elde edilmesidir. İzi başlatılan bir hedefin hedef takip sınırları içinde kaldığı süre boyunca devam ettirilmesi ise hedef izinin devam ettirilmesidir. Takibi yapılan hedeften ölçüm alınamadığı durumda takip işleminin sonlandırılması ise hedef izinin silinmesidir. İz bakımı bir izle son verilip verilmeyeceğinin kararının verildiği süreçtir.

İz düzeltme bir önceki konum tahminindeki olası istatistikî hataların düzeltilebilmesini sağlar ve bu şekilde hedef izlemenin hassasiyetini arttırmakta mümkün olabilmektedir. Bir sonraki taramada daha hassas bir konum hesaplaması yapabilmek için bir önceki tahmindeki değer radar tarafından ölçülen konum değeri ile karşılaştırılır. Bu fonksiyonun yerine getirebilmesi için çok sayıda karmaşık algoritmalar ve değişik güçte işlemciler gerekir. Bu algoritmalar ve

işlemciler filtre olarak adlandırılan ön tahmin ve düzeltme olmak üzere iki adımdan oluşan bir yazılım modülünde kullanılır. Bir izin hedefinin ölçülen koordinatları iki ya da daha fazla tarama boyunca bellekte tutulur. Son istatistikî ölçüm hatası düzleştirilir ve hedefin hareket modelinden yeni konumu, hızı ve ivmesi hesaplanır. Bu yeni verilerden bir sonraki tarama için tahminler elde edilir.

3.2. Kestirim

Kestirim doğru ve kesin olmayan ölçümlerden dolayı olarak anlam çıkarma işlemidir. Bu ölçümler ardışık olarak yapılmaktadır. Bu işlem dinamik durum kestirimi olarak ifade edilmektedir. Şekil 3.4 'de de görüldüğü gibi kestirim için sistem dinamik modeli, ölçüm modeli, sistem ve ölçüm hataları ile ön bilgi kullanılır. Kestiricinin dinamik sistem ve ölçüm sistemi içinde yer alan değişkenlere erişim imkânı bulunmamaktadır[41].



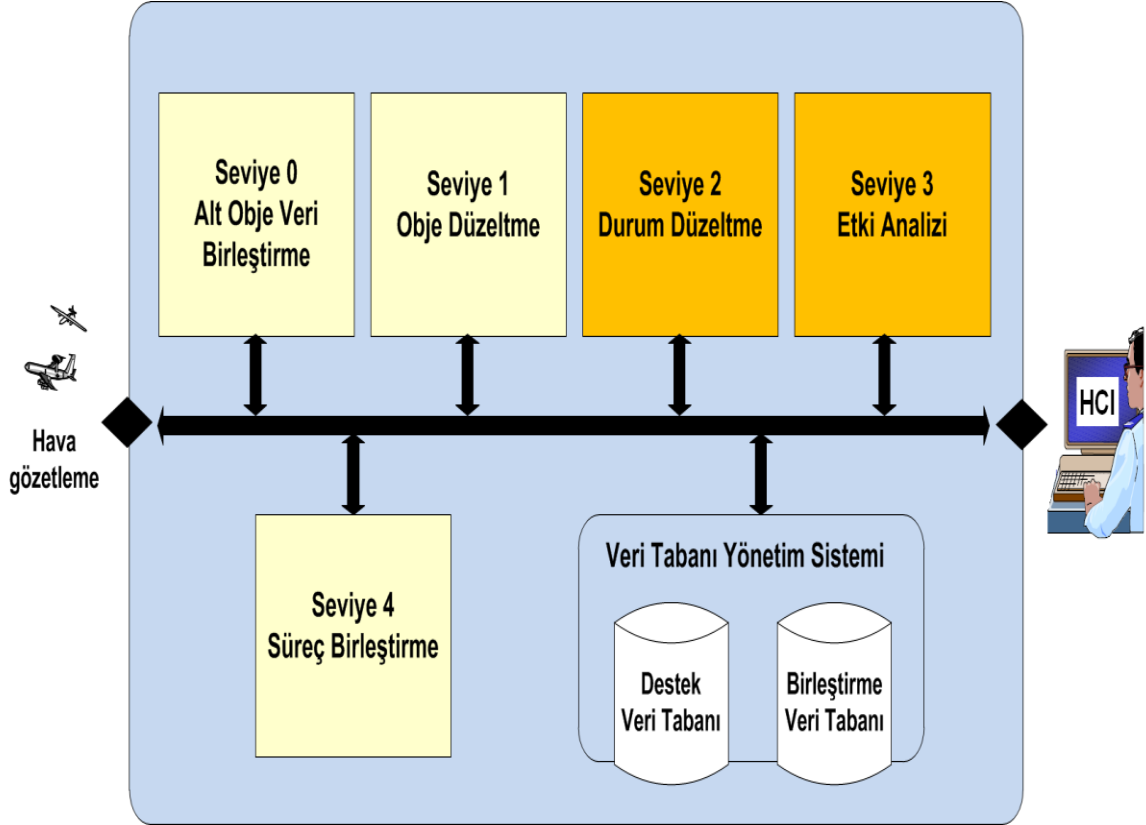
Şekil 3.4 Durum Kestirimi

3.3. Veri Birleştirme

Veri Birleştirme(Data Fusion) geometrik ve coğrafik olarak, farklı veya aynı yapıdaki birden fazla sayıda sensörden gelen sinyallerden belirli bir anlam çıkarmak üzere gerçekleştirilen işlem ve metotların tümüdür. Burada genel olarak tek bir sensör ile elde edilemeyecek kadar karmaşık ara yüzler için çoklu sensörlerdeki verilerin bir araya getirilerek istenen bilginin elde edilmesi sağlanır. Veri Birleştirme araştırma, ticari seyrüsefer ve askeri gibi pek çok alanda uygulaması bulunan bir araçtır [42]. Şekil 3.5'de gösterilen JDL veri birleştirme süreç modeli algoritma, sistem ve araştırmalarda en çok kullanılan modeldir.

Seviye-0 ön obje işleme olarak kabul edilebilir. Ne çeşit hedef veya sinyaller ile ilgilendiğinden yola çıkarak sinyal veya objelerin kestirim ve tahmin işlemleri yapılabilir.

Seviye-1 sensör birleştirme olarak geçmektedir. Bu seviyede o anki durum vektörünün değerlerini kestirim için ham ölçümler kullanılır. Tüm sensör bilgileri birleştirilir. Veri düzeltme sırasında ölçümler ve gözlemler temel alınarak obje durumlarının kestirim ve tahminleri gerçekleşir. Buradaki amaç objenin nerede ve kim olduğudur. JDL'ye göre Seviye-1 birleştirme, gözlem ve iz birleştirme ile öz durumların kestirim ve tahminidir.



Şekil 3.5 Veri Birleştirme(Data Fusion) Süreç Modeli [43]

Seviye-2'de dinamik olarak nesnenin durumu ile çevresel faktörleri arasındaki ilişkiler dikkate alınarak, takip edilen nesneye ait izlerin birleştirilmesi, bazı hesaplamaların yapılması ve aralarında bağlantı kurulması sağlanır. Bu tez çalışmsain

Seviye-3 genellikle ikinci seviyede yapılan birleştirmeler anlık durumu algılamakla birlikte gelecekte olabilecek düşman tehditleri, dost ve düşman ayrımı yapılabilmesi ve operasyon fırsatlarını yaratmak amacıyla değişik ara yüzler

oluşturabilmek için bir nevi olasılık hesabının uygulanması, ihtimallerin hesaplanması aşamasıdır.

Seviye-4 hesaplama değil, planlama ve kontrol aşamasıdır [44].

3.4. Kalman Filtre

Kalman Filtresi(KF) [45] basitliği ve verdiği sonuçlardaki doğruluk nedeniyle izleme ve kestirim için en sık kullanılan metotlardan biridir. Tanımı belirli bir sürecin durumlarının kestirimi için kullanılan, etkin ve yinelemeli bir matematiksel denklem serisi olarak yapılabilir. Filtrenin asıl amacı kovaryans matrisindeki hataları minimize ederek sistem durumlarını kestirmektir. Kalman Filtre dinamik sistem durumlarını kestirmek ve kestirim sistemlerinin performans analizini yapmak için kullanılır. Aşağıdaki Çizelge 3.1 'de bazı kullanım alanları verilmiştir [46].

Çizelge 3.1 Kestirim problem örnekleri

Uygulama	Dinamik Sistem	Sensör Tipi
Süreç kontrolü	Kimyasal Tesis	Basınç Sıcaklık Akış hızı Gaz çözümlenici
Sel tahmini	Nehir sistemi	Su seviyesi Yağmur ölçme aleti Hava radarı
İzleme	Uzay aracı	Radar Görüntüleme sistemi
Seyrüsefer	Gemi	Gemi hızölçeri Jiroskop İvmeölçer GNSS alıcısı

Bu tez çalışmasında izleme uygulaması yapılarak hava aracı dinamik sistemi için pasif radar sensörü kullanılarak sistem durumu olan pozisyon ve hız bilgilerinin kestirimi yapılmıştır. İzleme ve kestirim sistem analizi konularında çalışma yapılmıştır. Bu konuda [40][41][46] ve [47]'den ayrıntılı bilgi edinilebilir.

Temel Kalman Filtre ölçüm modelini sistem durumlarının doğrusal bir fonksiyonu olarak kabul eder. Buna rağmen pek çok sistem doğrusal değildir. Bir sistemin

doğrusal olmama durumu süreç modeli ve ölçüm modelinin doğrusal olmaması veya ikisinden birinin doğrusal olmaması durumudur.

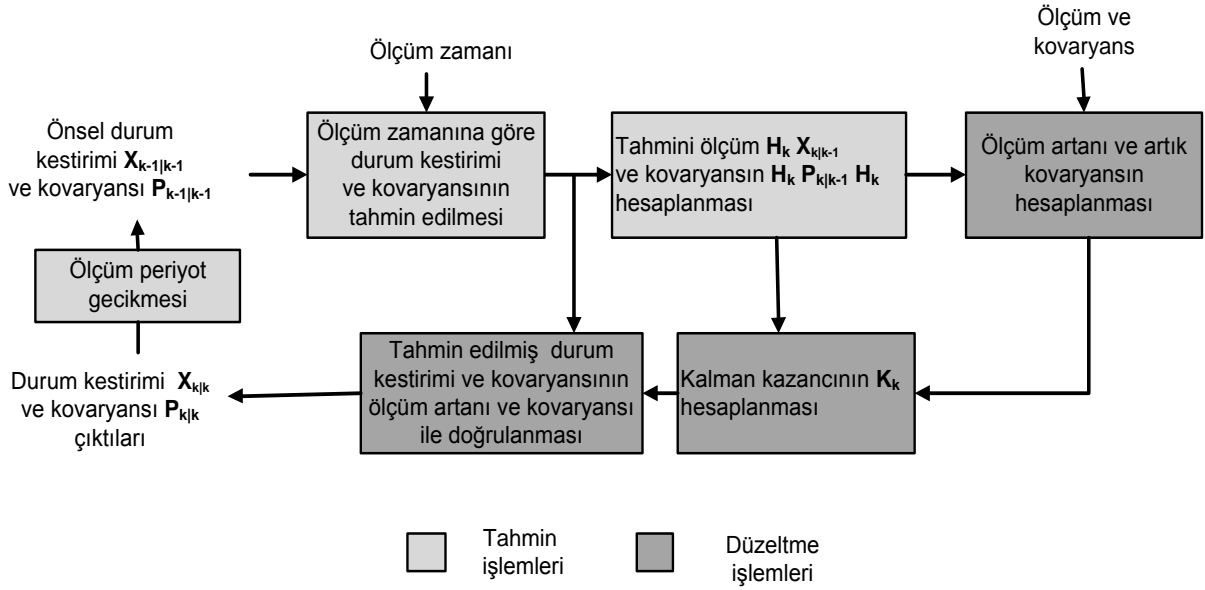
Haykin [48] ve Moral [49] KF'ye yeni bir yaklaşım getirerek Genişletilmiş Kalman Filtre'yi(GKF) geliştirmişlerdir. GKF'de durum geçiş ve ölçüm modellerinin doğrusal olması gerekli değildir. Bu fonksiyonlar bir önceki kestirimden tahmini durum ve tahmin edilen durumdan tahmin edilen ölçümün hesaplanmasında kullanılır. İzleme ve kontrol topluluklarında GKF'nin uygulamada zor olduğu ve sadece güncelleme aralığının zaman ölçeğinde yaklaşık olarak doğrusal olan sistemler için güvenilir olduğu bilinmektedir.

Wan ve Merwe [50] UKF(Unscented Kalman Filtresi) isminde bir kestirim sistemi geliştirmiştir. Bu yaklaşım yinelemeli bir analitik çözüm sunar. Her adımda izin tüm önceki kestirimleri kullanılarak, hedefin gelecekteki pozisyonunu tahmin etmek için kullanılır. Hedefin dinamik davranışı ile kestirimi eşleştirmek için filtre değişkenleri uyumlu bir şekilde seçilir. Ayrık olarak örneklenen noktalar EKF'deki doğrusallaştırma adımları olmadan ortalama ve kovaryansı parametrize etmek için kullanılabilir.

3.4.1. Temel Kalman Filtre

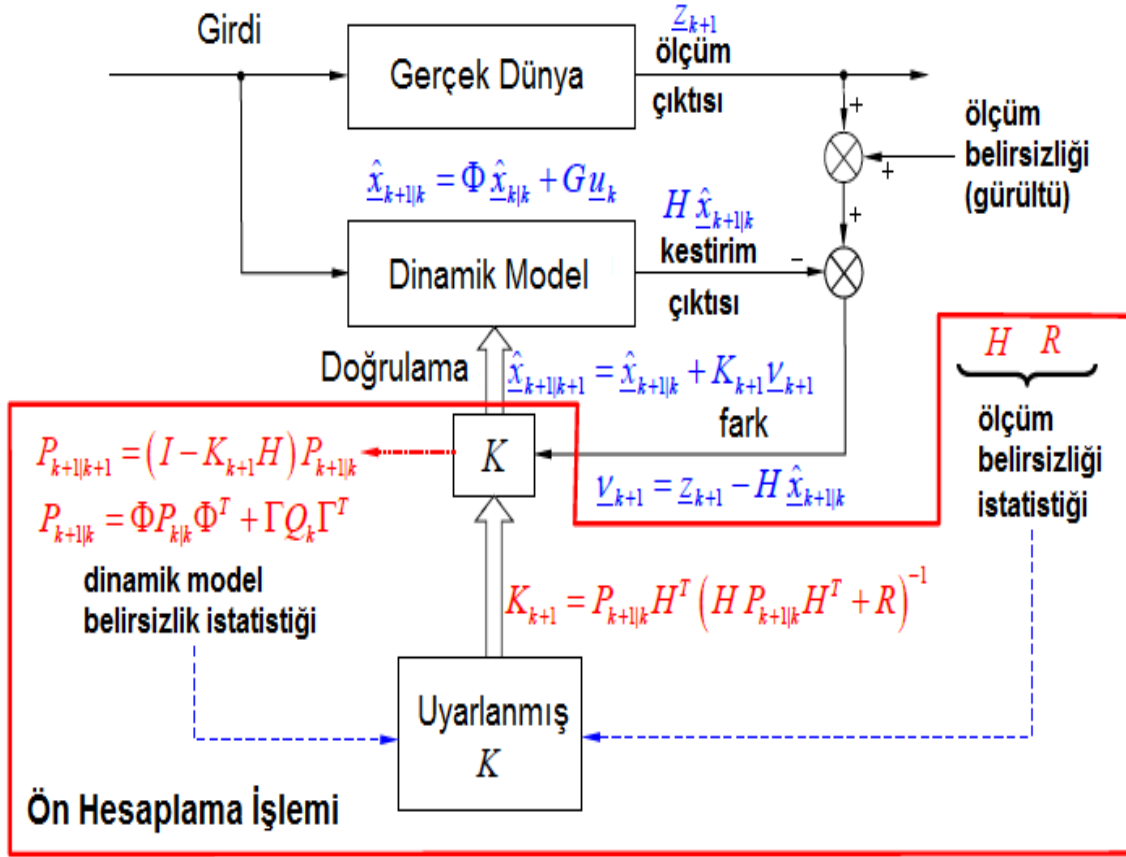
Şekil 3.6'da temel Kalman Filtre döngüsü verilmiştir. Görüldüğü gibi filtre tahmin ve düzeltme işlemlerinden oluşmaktadır. Kalman Filtre çalışma süresi boyunca sürekli çalışan bir döngü olarak düşünülebilir. Kalman Filtre'nin başlatılması için başlangıç durum kestirimleri, başlangıç kovaryans matrisi, süreç ve ölçüm gürültüleri belirlenmelidir. Bunlar belirlendikten sonra ilk durum kestirimi ve kovaryans matrislerinin tahminleri yapılır. Bu döngünün ilk çalışmasında tahmin değerleri hesaplanmasında başlangıç değerleri kullanılır. Fakat diğer adımlarda filtrenin bir döngüsü çalışması sırasında çıktı olarak üretilen durum kestirimi ve kovaryans matrisi kullanılır. Ön tahmin işlemleri sonrasında ölçüm kestirimleri ilk durum kestirimi kullanılarak hesaplanır. Ölçüm artanı ise ölçüm ve ölçüm kestirimleri farkı alınarak elde edilir. Ardından artık kovaryans ölçüm matrisi, ölçüm gürültü kovaryansı, ilk kovaryans matrisleri kullanılarak bulunur. İlk kovaryans matrisi, ölçüm matrisi ve artık kovaryans matrisleri ile Kalman kazancı hesaplanır. Artık son aşama olan düzeltme işlemlerinin yapıldığı ve sonsal kestirim kısmına gelinmiştir. Burada ilk kestirimi yapılmış ilk durum kestirimi ve kovaryansı ölçüm

artanı ile ölçüm matrisi kullanılarak doğrulanır. Böylece sonsal durum kestirimi ve kovaryans matrisi elde edilir. Filtre çalışması sürdükçe her döngü çıktısı diğer döngüde kullanılır.



Şekil 3.6 Kalman Filtre Döngüsü

Şekil 3.7’de Kalman Filtre sistemi verilmiştir. Burada kazanç minimum varyans durum hata kestirimi elde etmek için ayarlanır. Sisteme hem ölçüm hem modelleme gürültü etkileri de katılmıştır. Kalman Filtre’nin yinelemeli bir hesaplama yapısı vardır. Süreç ve gözlemlerin açıkça tanımlanması temel KF algoritması içinde farklı sensör modellerinin yer alabilmesini sağlar. Hata kovaryans matrisi aracılığıyla belirsizliklerin istatistiksel ölçümlerinin kullanılması her sensörün genel sistem performansı içinde ne kadar rolü olduğunu değerlendirme imkânı verir. Bu nedenler KF’nin neden bu kadar sık kullanılıp popüler olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.7 Kalman Filtre Sistemi

EK-A'da Kalman Filtre eşitlikleri ve açıklamaları yer almaktadır. Şekil 3.8'de tüm Kalman Filtre eşitlikleri blok diyagram halinde görülmektedir. Eşitlikler gözlemci dinamik modeli ve hata istatistik modelinden oluşmaktadır. Temel Kalman Filtre'nin başarımına rağmen oluşturulan sistem modeli hiçbir zaman mükemmel değildir. Sistem modeli oluşturulurken modellenemeyen hatalar ve ölçümlerdeki hatalar sistemde belirsizlikler oluşturur. Model kusurları parametre belirsizliği, hedef manevrası gibi modellenemeyen girdiler, süreç gürültüsü ve nümerik sıkıntılar olarak sıralanabilir. Model doğruluğu ölçüm gürültüsüne yakınsıyorsa KF performansının iyi ve uygulanan sistem için uygun olduğu sonucuna ulaşılabilir. Fakat bir uyumsuzluk varsa durum ve kestirimler ıraksar. Yani gerçek ve kestirim değerleri arasındaki hata filtrelenemez.

başlangıçta düzgün kurulmadığında kararsızlık ve yakınsamaya yatkındır. GKF'yi kararlı hale getirmek için kullanılan Q matrisi ile ekstra bir belirsizlik getirir.

GKF süreç ve ölçüm modelleri, aşağı yuvarlama işleminden kaynaklanan hataların küçük olduğu varsayımı ile birinci dereceden Taylor serileri açılımları kullanılarak doğrusallaştırılır. Yapılan bu kabul uygulamada gerçekleşmeyebilir ve filtrenin ıraksamasına neden olabilir. Bu sorunu aşmak için Q matrisi süreç gürültüsü kullanılır. Bu ölçülü kovaryans kestirimleri ve en uygun olmasa da ortalama bir kalman kazancının üretilmesini sağlar.

GKF doğrusallaştırılmış Kalman Filtre'ye benzerdir ve doğrusallaştırma işlemi filtrenin ortalaması boyunca yapılır. GKF'de $\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial x}$ kısmi türevleri ortalaması boyunca filtrenin o anki durum kestirimleri temel alınarak hesaplanır. Genişletilmiş Kalman Filtre'nin kararlılık ve yakınsamasının doğrusal kalman filtre kadar olacağı kesin değildir. Değişik tipteki Genişletilmiş Kalman Filtre tipleri kararsızlık ve ıraksama problemlerini minimize etmeyi sağlamaktır. Eşitlik ([3.1]-[3.7])'da EKF eşitlikleri görülmektedir.

Ön tahmin(model güncellemesi) işlemleri Eşitlik 3.1 ve 3.2 ile gerçekleştirilmektedir.

$$\hat{x}_{k+1|k} = f(\hat{x}_{k|k}, u_k) \quad (3.1)$$

$$P_{k+1|k} = \nabla f_x P_{k|k} \nabla f_x^T + \Gamma_k Q_k \Gamma_k^T \quad (3.2)$$

Doğrulama (ölçüm güncellemesi) Eşitlik ([3.3]-[3.7]) numaralı eşitliklerde gösterilmiştir.

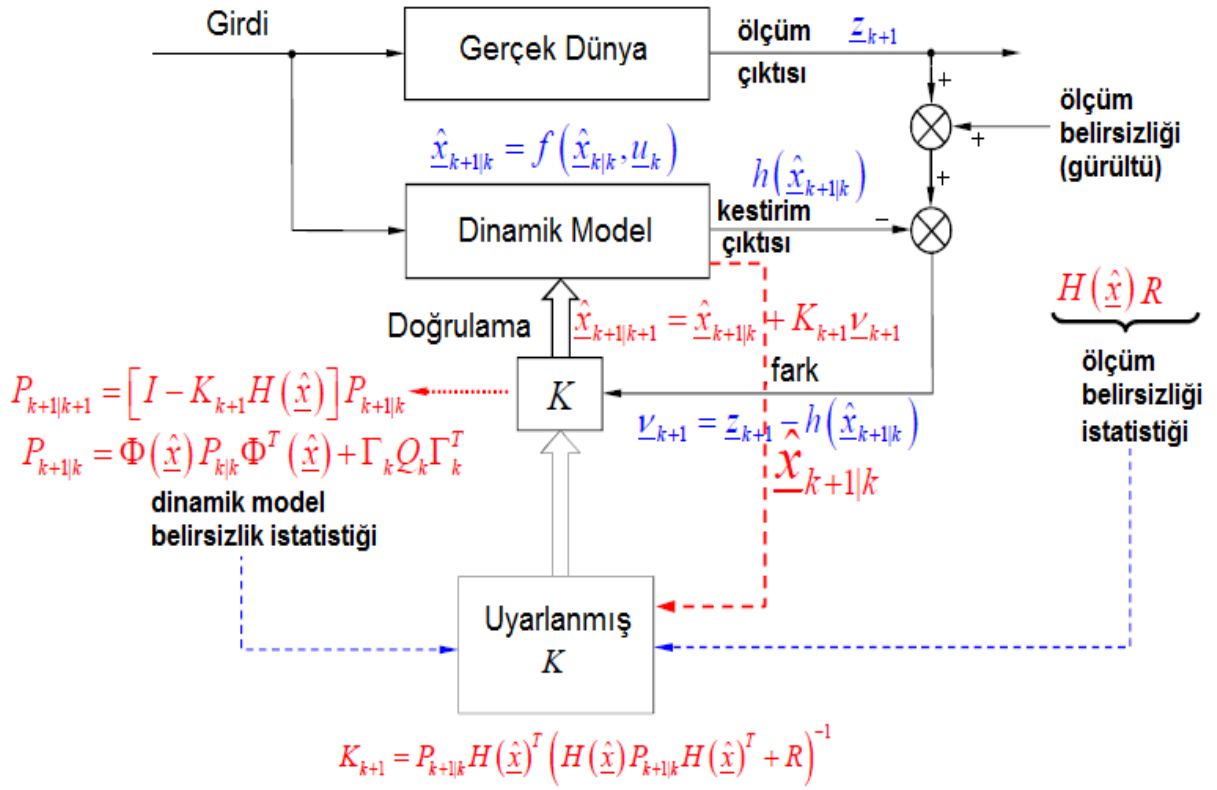
$$V_{k+1} = z_{k+1} - h(\hat{x}_{k+1|k}) \quad (3.3)$$

$$S_{k+1} = \nabla h_x P_{k+1|k} \nabla h_x^T + R_{k+1} \quad (3.4)$$

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} \nabla h_x^T S_{k+1}^{-1} \quad (3.5)$$

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1} V_{k+1} \quad (3.6)$$

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1} \nabla h_x) P_{k+1|k} \quad (3.7)$$

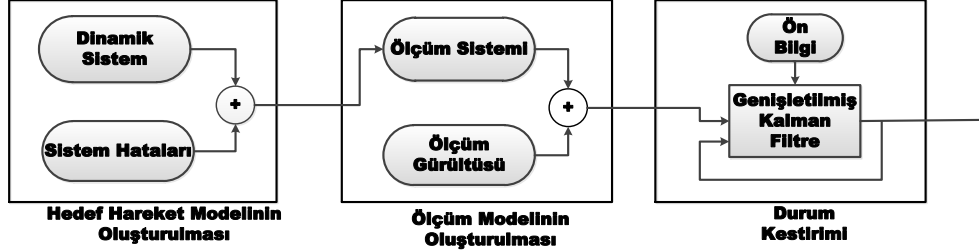


Şekil 3.9 Genişletilmiş Kalman Filtre Sistemi

Doğrusal olmayan Kalman Filtre’de ortalama ve kovaryansın süreç ve ölçüm modelleri ile güncellenmesi gereklidir. Eğer doğrusal olmayan dönüşümden ortalama ve kovaryans hesaplanabiliyorsa Kalman güncelleme eşitlikleri uygulanabilir. Şekil 3.9’da Genişletilmiş Kalman Filtre sistemi görülmektedir. Buradan görüldüğü gibi GKF durum geçiş matrisi ve ölçüm matrisi doğrusallaştırma işlemleri dışında doğrusal Kalman Filtre ile tamamen aynı yapıdadır. Tüm Kalman Filtre eşitlik çıkarımları için ayrıntılı ve ek bilgiler [40][41][46] ve [47]’den alınabilir.

4. YÖNTEM

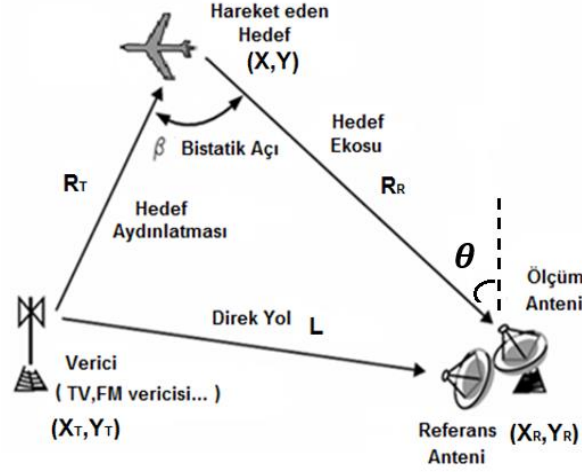
Yapılan tez çalışması uygulamasında tek hava hedef hareketinin pasif radar sistemi ile izlenimi için Şekil-4.1'deki pasif radar hedef izleme sistem modeli oluşturulmuştur. Bu çalışma ilk olarak bistatik radar sisteminde yani tel alıcı- tek verici için gerçekleştirilmiş, sonrasında izleme işleminin yapılamaması nedeniyle multistatik sistemde birden fazla alıcı ve tek verici için çalışmalar yapılmıştır.



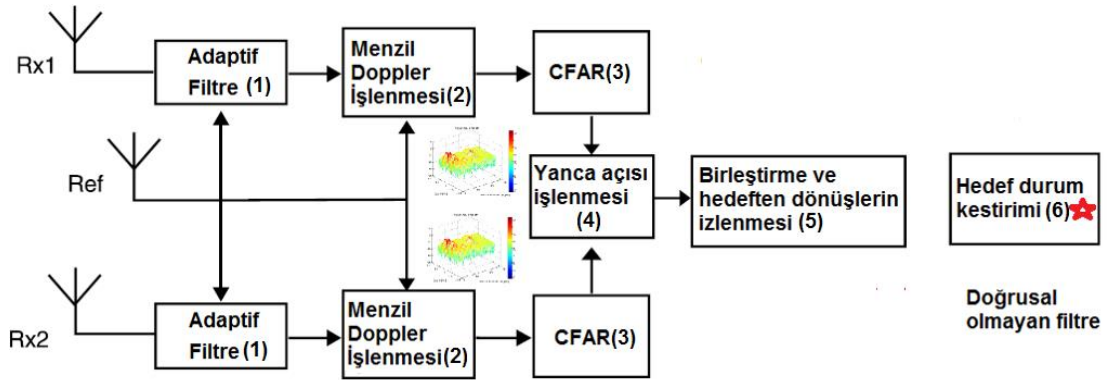
Şekil 4.1 Pasif radarda hedef izleme modeli

Hedef izleme modeli oluşturulurken öncelikle sabit hız, kesikli zaman Wiener süreci ivmelenme ve koordineli dönüş modeli kullanılarak Kartezyen koordinat düzleminde x ve y eksenlerinde iki boyutta farklı hareket modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan hedef hareket modellerinde dinamik sistemlere hareket sırasında rüzgâr vb. hava etkilerinin de olabileceği varsayılarak sıfır ortalamalı Gauss sistem gürültüsü eklenmiştir. Bununla birlikte yapılan çalışmanın daha gerçekçi olmasını sağlamak amacıyla kargo ve jet savaş uçağı gerçek uçuş verileri kullanılmış ve gerçek uçak hareketleri iki boyuta indirgenerek [51] izleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra hedef gerçek hareket modelinden elde edilen iki boyuttaki konum-hız bilgileri ve Şekil-4.2'deki pasif radar geometrisi [52] kullanılarak, bölüm 4.3'deki eşitlikler [(4.11)-(4.16)] ile ölçüm sistemi oluşturulmuş ve bu sisteme ölçüm gürültüsü eklenerek ölçüm modeli elde edilmiştir. Ölçüm bilgisi olarak öncelikle Doppler kayması ve yanca açısı verileri kullanılmış daha sonra bu verilere bistatik mesafe verisi de eklenerek üç farklı ölçüm verisi kullanılmıştır. Ölçüm modeli elde edildikten sonra bu ölçümler durum kestiricisine gönderilmiştir. Burada birden fazla sensörden(farklı alıcılardan) gelen ölçüm değerleri veri birleştirme yoluyla birleştirilmiş, GKF kullanılarak filtrelenmiş ve hedef takip işlemi yapılmıştır. Hedef takibi başarımlı analizi için EK-B'de ayrıntılı olarak verilen Monte Carlo simülasyonu [53] kullanılmıştır. Simülasyon birden fazla

kez çalıştırılmış ve her çalıştırılmasında farklı ölçüm gürültüleri kullanılarak bu şekilde x ve y pozisyonlarındaki RMS hata değerlerinin zaman ortalamaları hesaplanmıştır.



Şekil 4.2 Pasif radar geometrisi



Şekil 4.3 Pasif radar sinyal işleme blok diyagramı [24]

EK-C'de alıcı referans ve gözetleme antenleri tarafından toplanan referans ve gözetleme sinyalleri verilmiştir. Sonrasında bu analog sinyaller Şekil 4.3'deki pasif radar sinyal işleme blok diyagramı kullanılarak hedefin pozisyon ve hızı gibi bilgiler elde edilir. Bunun için öncelikle analog sinyaller en az 3 kanal tarafından oluşan dijital bir alıcı tarafından alınır. Bu üç kanal bir referans ve iki gözetleme kanalından oluşan faz dizi anten aracılığı ile yön bulmayı sağlamaktadır. Sonrasında ise alıcı tarafından alınan sinyaller aşağıdaki 6 adımdan geçer.

- 1) Clutter gibi istenmeyen verici sinyallerini filtrelemek için iki gözetleme kanalına adaptif filtre uygulanır. Böylece $Sur'=(Sur-Ref)$ elde edilir. Bu işlem aktif gürültü kontrolüne benzerdir.
- 2) Daha sonra üç kanaldan alınan sayısal veri çapraz korelatöre (cross-correlator) iletilir ve burada genlik-menzil-Doppler çıktıları üretilir. Bu adım uyumlu filtre gibi davranmaktadır. Pasif radarda tespit işlemi referans ve hedeften dönen eko sinyalleri arasındaki aşağıdaki Eşitlik 4.1'deki (gecikme) menzil ve Doppler çapraz korelasyon fonksiyonunun hesaplanması ile elde edilir.

$$\psi(\tau, f_D) = \int_0^{T_0} u_{sur}(t)u_{ref}^*(t - \tau)e^{j2\pi f_D t} dt \quad (4.1)$$

- 3) Daha sonra her hedefin menzil ve Doppler'ini bulmak için CFAR tespiti kullanılır. Burada adaptif bir eşik değeri altındaki dönen sinyaller ihmal edilir.
- 4) Her gözetleme kanalı tarafından alınan hedef ekosunun karmaşık genliği yön bulunması işlemcilerine iletilir. Sadece iki gözetleme kanalı kullanıldığında yön bulma sistemleri hedef yanca açısını bulmak için faz farkı kullanılır.
- 5) Bu aşamada artık menzil, yanca açısı ve Doppler bulunmuştur. Bu aşamada veriler birleştirilir.
- 6) Son aşamada ise doğrusal olmayan bir filtre kullanılarak menzil, yanca açısı ve Doppler ölçümleri kullanılarak hedefin konumu ve hızı bulunur.

Bu tez çalışmasında sinyal işleme blok diyagramında 6. aşama olan ve yıldız ile ifade edilen hedef durum kestirimi kısmı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Doppler, bistatik mesafe ve yanca açısı ölçümlerin oluşturulması başlangıçta oluşturulan hareket modellerinden ve gerçek uçuş verilerinden elde edilen iki boyuttaki pozisyon ve hız değerleri ile pasif verici-alıcı konumlarının Bölüm 4-3'deki eşitliklere uygulanmasıyla elde edilmiştir. Bunlara varyansı bilinen Gaussian gürültü eklenerek sanki bu sinyal işlemi yapılarak ölçümler elde edilmiş gibi benzetimi yapılmıştır.

4.1. Hareket Modellemesi

Yapılan çalışmada gerçek uçuş verileri kullanmadan önce jet uçağı hızına yakın olan hız(standart atmosferde maksimum 2 mach), ivme(maksimum 2.5-3 m/s²) ve dönüş açıları(maksimum 0.45 radyan/saniye) referans alınarak [54] sabit hız, ivmeli, dönüş yapan ve bunların birlikte olduğu farklı hareket modelleri oluşturulmuştur. Gerçek uçuş verilerinin kullanıldığı uygulamalar haricindeki uygulamalarda aşağıdaki hareket modelleri kullanılmıştır [41].

4.1.1. Kesikli zaman beyaz gürültü ivmelenme modeli (Sabit Hız)

Durum vektörü ikinci derecedendir ve pozisyon ile hız değişkenlerinden oluşmaktadır. Süreç gürültüsü sıfır ortalamalı, varyansı bilinen ve Gauss dağılımlıdır.

$$X_k = F X_{k-1} + G w_{k-1} \quad (4.2)$$

$$X = [x \quad \dot{x} \quad y \quad \dot{y}]^T, \quad F = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T^2 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}T^2 \\ 0 & T \end{bmatrix}, \quad w_{k-1} \sim N(0, \sigma^2) \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.2'de kesikli zaman beyaz gürültü ivmelenme dinamik modeli denklemini verilmiştir. Eşitlik 4.3'de X_k , durum vektörünü, F , durum geçiş matrisini, G , süreç gürültüsü kazanç matrisini, w_{k-1} , süreç gürültüsünü, T , örnekleme zamanını ve σ^2 , dinamik süreç gürültüsü varyansını ifade etmektedir.

4.1.2. Kesikli zaman Wiener süreci ivmelenme modeli(Sabit ivmeli)

Durum vektörü X pozisyon, hız ve ivme durumlarını içermektedir ve Eşitlik 4.4'de görüldüğü gibi 3. derecedendir. Bu model ile sabit ivme durumunun sıfır ortalamalı Gauss gürültü ile bozulduğu durum modellenir. Kesikli zaman Wiener süreci ivmelenme dinamik modeli, Eşitlik 4.2'deki sabit hız dinamik model denklemini ile aynıdır. Sadece durum vektörü, durum geçiş matrisi F ve gürültü kazanç matrisi G değerleri Eşitlik 4.4'deki gibi değişmektedir.

$$X = [x \ \dot{x} \ \ddot{x} \ y \ \dot{y} \ \ddot{y}]^T, \quad F = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{2}T^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & \frac{1}{2}T^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T^2 & 0 \\ T & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}T^2 \\ 0 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

4.1.3. Koordineli Dönüş Modeli

Koordineli dönüş hareketi bir cismin düzlemde sabit açısal hız ile sabit hızda yaptığı dönüş hareketidir. Süreç gürültüsü sıfır ortalamalı, varyansı bilinen ve Gauss dağılımlıdır.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin \Omega}{\Omega} & 0 & -\frac{1-\cos \Omega}{\Omega} \\ 0 & \cos \Omega & 0 & -\sin \Omega \\ 0 & \frac{1-\cos \Omega}{\Omega} & 1 & \frac{\sin \Omega}{\Omega} \\ 0 & \sin \Omega & 0 & \cos \Omega \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Kartezyen uzayda x-y düzlemi için koordineli dönüş dinamik modeli denklemi Eşitlik 4.2'deki gibidir. Kesikli zaman beyaz gürültü ivmelenme dinamik modeli denkleminde tek fark yukarıda Eşitlik 4.5'deki durum geçiş matrisidir. Eşitlik 4.5'deki Ω açısal hız değerini göstermektedir.

4.2. Gerçek Uçuş Verilerinden Kartezyen Koordinat Sistemine Geçiş

Yapılan uygulamaların bir kısmında izleme işlemi yapılacak hedefin hareket modellemesi yapılmış bir kısmında ise gerçek uçuş verileri kullanılmıştır. Bu nedenle gerçek kargo ve jet savaş uçağı uçuş kayıtlarından belirli bir örnek süresi boyunca, belirli sayıda veriler alınmıştır. Bu veriler uçaktaki EGI ekipmanından alınan uçağın anlık enlem ve boylam bilgileri ile ADC cihazından alınan uçağın anlık barometrik irtifa bilgileridir. Bu veriler kayıt alınan süre boyunca, örnek süresi kapsamında aşağıdaki Eşitlik 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 ve 4.10 kullanılarak [51] 3 boyutta Kartezyen koordinat düzlemine geçilmesinde kullanılmıştır.

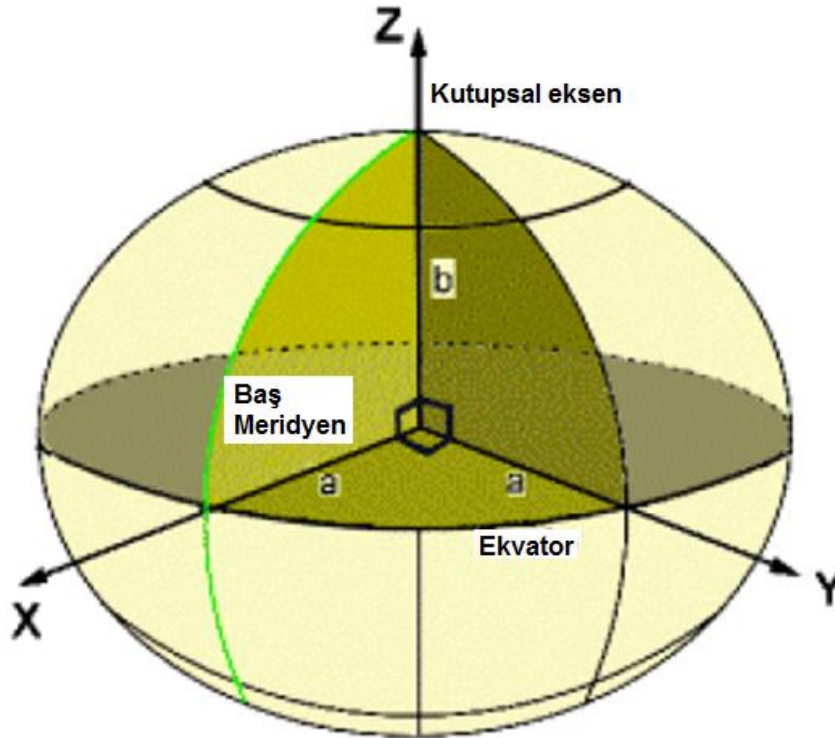
$$x = (R_N + h) \cos \phi \cos \kappa \quad (4.6)$$

$$y = (R_N + h) \cos \phi \sin \kappa \quad (4.7)$$

$$z = ([1 - e^2]R_N + h) \sin \phi \quad (4.8)$$

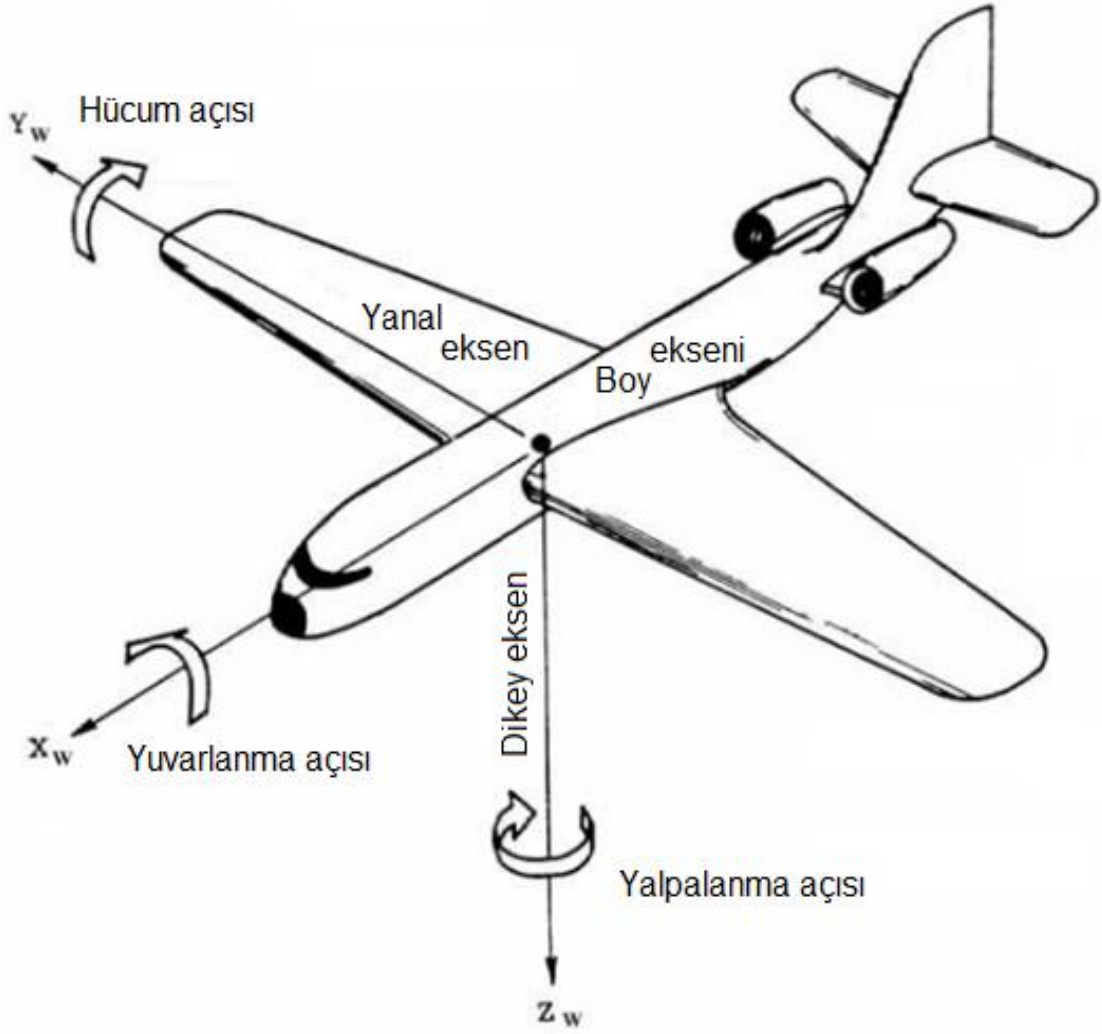
$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (4.9)$$

$$R_N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (4.10)$$



Şekil 4.4 Elipsoit dünya şekli

Burada dünya Şekil 4.4'de görüldüğü gibi elipsoit olarak kabul edilmiştir. Eşitlik 4.6'da yer alan R_N kuzey yönündeki eğriliğin yarıçapını, h uçağın irtifasını, ϕ ve κ sırasıyla uçağın enlem ve boylam bilgilerini ifade etmektedir. e ise eksen eğriliğidir. Eşitlik 4.9'da eksen eğriliği, dünyanın ekvatordaki yarı çapı a (6378117.76 m) ve b (6356733.14 m) kutupsal mesafe sabitleri kullanılarak elde edilir.



Şekil 4.5 Uçuş Dinamiği Parametreleri

Şekil 4.5’de uçuş dinamiği parametreleri verilmiştir. Bunlar sırasıyla yuvarlanma, hücum ve yalpalanma (roll, pitch ve yaw) açılarıdır. Yuvarlanma açısı x yani boy eksenindedir ve sabit kanatlı bir uçakta uçuşun yataydaki yönünü değiştirmek için kullanılır. Hücum açısı y-yanal ekseninde yer alır. Sabit kanatlı bir uçakta uçağın burnunu aşağı veya yukarı kaldırılır yani hücum açısı sıfırın altı ve üstüne çıkarılarak irtifanın azalıp artırılması sağlanır. Yalpalanma açısı ise z-dikey ekseni ifade eder ve baş açısı olarak bilinmektedir. Gerçek uçuş kayıtları enlem, boylam ve irtifa bilgileri kullanılarak üç boyuttan iki boyuta çevrilmesine rağmen bu üç parametre (yuvarlanma, hücum ve yalpalanma açıları) uçuş kayıtlarından AHRS ekipmanından alınarak incelenmiştir. Bu şekilde uçağın üç boyutta nasıl bir hareket yaptığı hakkında fikir sahibi olunmuştur.

4.3. Ölçümlerin Modellenmesi

Gerçek uygulamalarda hedeften dönen eko alıcı anteni, verici yayını ise referans anteni tarafından alınmaktadır. Daha sonra ise sinyal işleme metotları kullanılarak Doppler frekansı ve yanca açısı elde edilmektedir. Alıcı ve verici arasındaki senkronizasyon sağlandığından verici antenin ne zaman yayın yaptığı bilinmektedir. Bu yüzden alıcı antene gelen eko zamanı ile referans antene gelen sinyal zamanı arasındaki farktan sinyalin geliş süresi çıkarılmaktadır. Yayını yapılan elektromanyetik sinyalin ışık hızı ile hareket ettiği bilindiği için geliş süresi ile ışık hızı bilgisi kullanılarak bistatik mesafe (sinyalin vericiden hedefe çarpıp hedeften dönen sinyalin alıcı tarafından alınana kadar aldığı mesafe) bilgisi elde edilmektedir. Yapılan modellemede ise Şekil 4.2'deki pasif radar sistemi geometrisine göre modellenen aşağıda Eşitlik 4.11'deki Doppler (f_d), Eşitlik 4.12'deki yanca açısı (θ) ve Eşitlik 4.16'daki bistatik mesafe (R_b) formülüzasyonu [27] ile hedefin iki boyuttaki gerçek konum ve hız bilgileri kullanılarak simülasyonun her örnekleme süresindeki ölçüm verileri elde edilmiştir. Sonrasında ise bu ölçüm verilerine alıcı tarafında gerçekte oluşacak ölçüm gürültüleri eklenmiştir ve ölçüm verileri durum kestiricisine iletilmiştir. Böylece gerçek uygulamalarda sinyal işleme metotları kullanılarak elde edilen ölçümler sanki gerçek radar alıcısı çıkışımdan alınmış gibi hedef izleme işleminin yapıldığı durum kestiricisine iletilmiştir. Eşitlik 4.11'de i , verici numarasını, j , ise alıcı numarasını ve λ verici dalga boyunu göstermektedir.

$$f_{d_{ji}} = -\frac{1}{\lambda_i} \left[\frac{\dot{x}(x - x_{T_i}) + \dot{y}(y - y_{T_i})}{\sqrt{(x - x_{T_i})^2 + (y - y_{T_i})^2}} + \frac{\dot{x}(x - x_{R_j}) + \dot{y}(y - y_{R_j})}{\sqrt{(x - x_{R_j})^2 + (y - y_{R_j})^2}} \right] \quad (4.11)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{x - x_R}{y - y_R} \right) \quad (4.12)$$

$$R_T = \sqrt{(x - x_T)^2 + (y - y_T)^2} \quad (4.13)$$

$$R_R = \sqrt{(x - x_R)^2 + (y - y_R)^2} \quad (4.14)$$

$$L = \sqrt{(x_T - x_R)^2 + (y_T - y_R)^2} \quad (4.15)$$

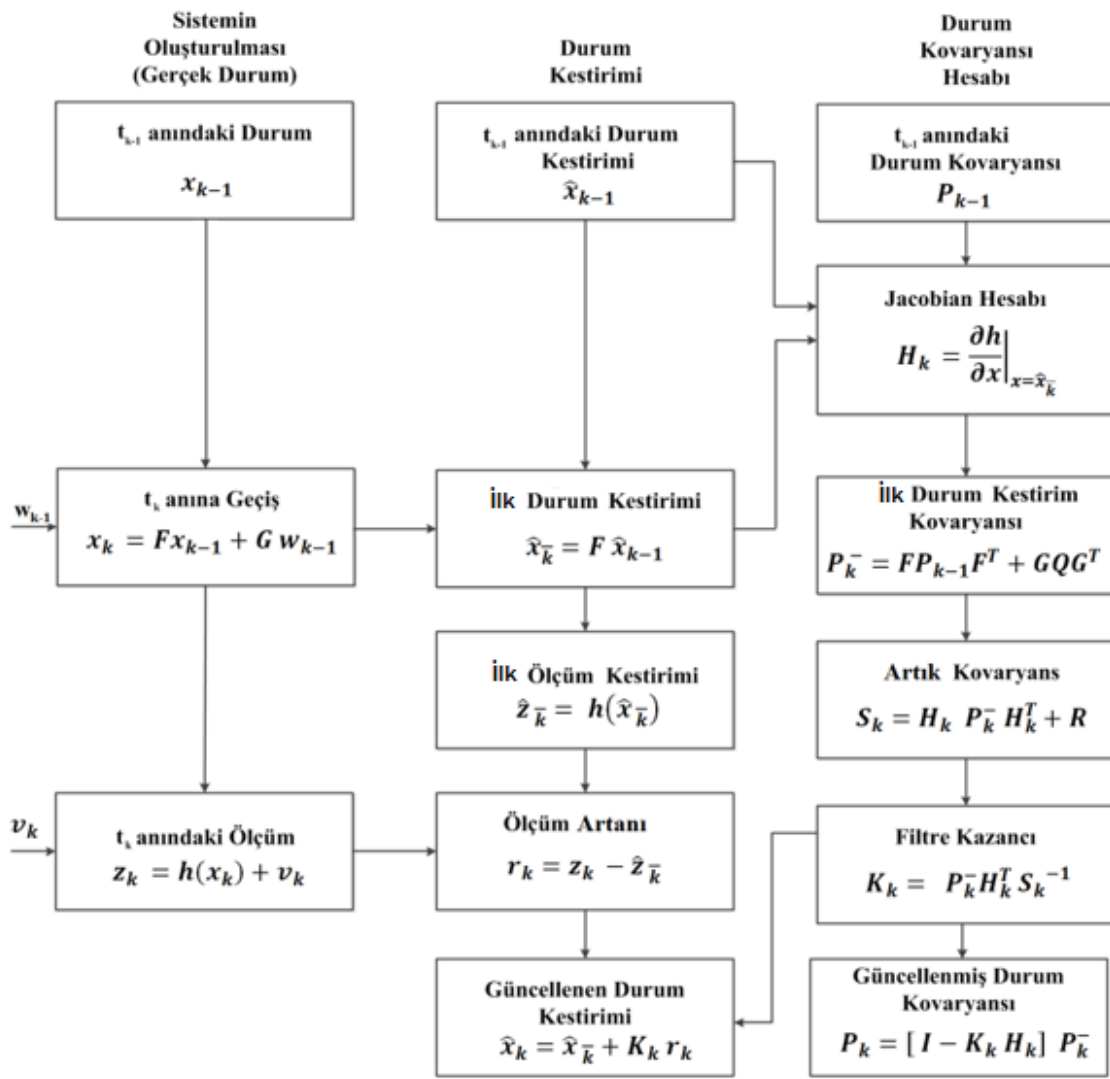
$$R_b = R_T + R_R - L \quad (4.16)$$

Yukarıda Eşitlik 4.13'deki R_T hedef ile verici arasındaki mesafeyi, Eşitlik 4.14'deki R_R hedef ile alıcı arasındaki mesafeyi ve Eşitlik 4.15'de L ise alıcı ile verici arasındaki mesafeyi ifade etmektedir.

4.4. Genişletilmiş Kalman Filtre

Kestirimi yapılan süreç ve ölçüm modellerinden bir veya ikisinin doğrusal olmadığı durumlarda durum kestirimi için GKF kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada GKF kullanılmasının nedeni Eşitlik 4.11, Eşitlik 4.12 ve Eşitlik 4.16'da görüldüğü gibi ölçüm modelinin doğrusal olmamasıdır. Ayrıca süreç modeli doğrusal kabul edilerek durum geçiş matrisi (F) sabit alınmıştır.

Şekil 4-6'da hedef durum kestirimi için kullanılan GKF'nin tek döngüsünün işleyişi görülmektedir [41]. Filtrenin ilk döngüsünün çalışması için filtrenin başlangıç durum vektörü kestirimi (\hat{x}_{k-1}) ve başlangıç kovaryans (P_{k-1}) değerleri verilerek ilklendirilmesi gerekmektedir. GKF'ye başlangıç kestirimleri verildikten sonra sırasıyla zaman güncelleme (öngörme) ve ölçüm güncelleme (düzeltme) adımları yapılmaktadır. Zaman güncelleme(öngörme) adımında başlangıç durum vektörü kestirimi (\hat{x}_{k-1}) ve başlangıç kovaryans (P_{k-1}) değerleri kullanarak ilk durum kestirimi ve kovaryans matrislerinin tahminleri yapılır. Ölçüm güncelleme (düzeltme) adımında ise ölçümler kullanılarak elde edilen ölçüm artanı ile ölçüm matrisi kullanılarak kestirimi yapılmış ilk durum kestirimi ve kovaryansı doğrulanır ve sonsal durum kestirimi ile kovaryans matrisi elde edilir. Yapılan öngörme ve düzeltme işlemleri filtrenin çalışması bitip son kestirim yapılanaya kadar her döngüde devam etmektedir. İlk döngüden sonraki döngülerde filtrenin çalışması için bir önceki döngüde güncellenen durum ve kovaryans kestirimleri kullanılmaktadır.



Şekil 4.6 Kullanılan GKF'nin tek döngüsü

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_{\dot{x}^2} & 0 \\ 0 & \sigma_{\dot{y}^2} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{f_d}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{R_b}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Eşitlik 4.17'de Q süreç gürültüsü kovaryansını, Eşitlik 4.18'de R ölçüm gürültüsü kovaryansını ifade etmektedir.

Hedef manevrasını tanımlarken sıfır ortalamalı, ortak kovaryansı bilinen, Gauss dağılımlı gürültü modeli kullanılmıştır. Zamanla değişmeyecek şekilde her iki yöndeki ivmenin ilintisiz oldukları da kabul edilmiştir.

Sistem gürültüsü sistemin iki güncellenme arasında durum değişkenlerinin üzerindeki gürültü süreçlerini ifade eder. Yapılan uygulamalarda durum vektöründe iki eksenindeki konum ve hızlar bulunmaktadır. Bu yüzden iki güncelleme arasında durum olarak modellenmeyen ivme sürecinin sistemi etkileyeceği bilinmektedir. Takip edilen uçak eğer sabit hızla gitmiyorsa her iki güncelleme sırasında yavaşlama ve hızlanma olacağından, iki güncelleme arasında mutlaka hız ve konum değişkenlerinde bir belirsizlik olacaktır. Q matrisi bunları belirleyecektir. İvme süreci ise izlenmek istenen hedefin ivme verilerine göre belirlenmiştir ve takip edilen platformla ilgili bir durumdur. Takip edilecek uçağın tipine göre genel olarak konum ve ivme verileri incelenip ona göre Q matrisinin düzenlenmesi gerekmektedir. Bunun dışında Q matrisini ayar parametresi gibi de kullanılabilir. Yani esasında Q ve R matrisi durum ve modeller ile ölçümler arasında bir ağırlıklandırma yapmaktadır. Eğer Q yüksek olursa ölçümlere daha çok güvenilir ve ölçüm gürültülerinden daha çok etkilenilir. Eğer Q çok düşük olursa bu sefer de ölçümlere fazla ağırlıklandırılmadığından daha düz bir filtre olur. Fakat bu şekilde de hedefin yapacağı ani manevralar kaçırılabilir. Yani uygulamaya göre de bu ağırlıklandırma her iki yöne de olması gerekenden daha fazla kaydırılabilir.

$$H_k = \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=\hat{x}_k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{d_{11}}}{\partial x} & \frac{\partial f_{d_{11}}}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial f_{d_{11}}}{\partial y} & \frac{\partial f_{d_{11}}}{\partial \dot{y}} \\ \frac{\partial \theta_{11}}{\partial x} & \frac{\partial \theta_{11}}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial \theta_{11}}{\partial y} & \frac{\partial \theta_{11}}{\partial \dot{y}} \\ \frac{\partial R_{b_{11}}}{\partial x} & \frac{\partial R_{b_{11}}}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial R_{b_{11}}}{\partial y} & \frac{\partial R_{b_{11}}}{\partial \dot{y}} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial f_{d_{MN}}}{\partial x} & \frac{\partial f_{d_{MN}}}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial f_{d_{MN}}}{\partial y} & \frac{\partial f_{d_{MN}}}{\partial \dot{y}} \\ \frac{\partial \theta_{MN}}{\partial x} & \frac{\partial \theta_{MN}}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial \theta_{MN}}{\partial y} & \frac{\partial \theta_{MN}}{\partial \dot{y}} \\ \frac{\partial R_{b_{MN}}}{\partial x} & \frac{\partial R_{b_{MN}}}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial R_{b_{MN}}}{\partial y} & \frac{\partial R_{b_{MN}}}{\partial \dot{y}} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Eşitlik 4.19'da H doğrusallaştırılmış ölçüm matrisini göstermektedir. Ayrıca $\sigma_{\dot{x}^2}$ ve $\sigma_{\dot{y}^2}$ rasgele modellenmiş, x ve y doğrultusundaki ivme varyanslarını göstermektedir ve bunlar birbiriyle ilintisizdir. R 'nin boyutu alıcı verici sayısına göre değişmektedir. $\sigma_{f_d}^2$ Doppler (f_d), σ_{θ}^2 yanca açısı (θ) ve $\sigma_{R_b}^2$ bistatik mesafe (R_b) üzerindeki gürültünün varyanslarıdır. Yapılan tüm ölçüm hatalarının ilintisiz olduğu kabul edilmiştir.

GKF ilklenmesi(initialization) aşağıda Eşitlik 4.20'deki \hat{x}_0 başlangıç durum vektörü kestirimi ve P_0 başlangıç kovaryans matrisi kestirimi ile yapılmaktadır. Başlangıç durum vektörü kestirimi x ve y yönündeki konum ve hız değerlerinden oluşmaktadır. Başlangıç kovaryans matrisi kestirimi ise durum vektörü başlangıç kestirimindeki hataları ifade etmektedir. P_0 matrisindeki elemanlar hedefin x ve y yönlerindeki pozisyon ve hızlarına ait başlangıç kestirimleri üzerindeki belirsizliklerin varyanslarıdır.

$$\hat{x}_0 = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ y \\ \dot{y} \end{bmatrix}, \quad P_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{\hat{x}_0}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\hat{x}_0}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\hat{y}_0}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\hat{y}_0}^2 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

5. UYGULAMA

Uygulamada FM(100MHz) veya TV(200 MHz) bantlarında yayın yapan bir verici kullanılıp alıcı istasyon sayısı değiştirilerek, verici istasyon yayını üzerinde oluşan Doppler kayması, yanca açısı ve bistatik mesafe ölçümleri ile farklı hareket modelleri için hedef takibi yapılmaktadır. Literatürde yayınlanan makaleler ve bazı gerçek uygulamalarda ölçüm verisi olarak Doppler kayması, yanca açısı ve bistatik mesafe ölçümlerinden iki veri tipi kullanıldığı bilinmektedir. Bu tez çalışmasında yapılan uygulamada ise üç ölçüm veri tipi de kullanılarak hedef kestiriminde daha iyi sonuçlar elde edilebileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Pasif radar alıcılarında toplanan bu ölçümler sonrasında bir izleme platformunda birleştirilerek durum kestiricisine iletilmektedir. Uygulamada durum kestirimi için GKF algoritması kullanılarak hedef pasif olarak izlenmektedir. İzleme işlemi yapılacak hedef için oluşturulan hareket modelleri ile oluşturulan pasif hedef izleme modelleme sistemi doğrulanmış, sonrasındaki uygulamalarda kargo ve jet savaş uçağı gerçek uçuş kayıtları da kullanılarak hedef izleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Gerçek uçakların uçuş kayıtlarının enlem, boylam ve irtifa bilgileri kullanılarak buradan üç boyutta Kartezyen koordinat düzlemine geçilmiş ve sonrasında iki boyuta indirgeme yapılarak hedef takip edilmiştir.

Uygulamadaki başarımların analizi için Monte Carlo simülasyon yöntemi kullanılmıştır. Simülasyon birden fazla sayıda çalıştırılmış, her çalıştırma sırasında Gauss dağılımlı rastgele olarak atanan ölçüm gürültüleri farklı değerler almış ve böylece hata ile kestirim değerleri arasındaki farkın zaman bağılı ortalaması alınarak daha sağlıklı ve doğru değerlendirmelerin yapılabileceği sonuçlar elde edilmiştir. Monte Carlo simülasyon sayısının artması durumunda daha doğru bilgiler elde edildiği bilinmektedir. Fakat bu da hesaplama ve işlem zamanının artmasını sağlamaktadır. Bu yüzden literatürde yapılan hedef izleme çalışmalarında kullanılan 50-120 arası örnek sayısı değerlerinden optimum olacağı düşünülen 100 değeri seçilmiştir.

5.1. Bistatik Pasif Radar Modellenmesi ile Hedef İzleme

BPR ile hedef izleme senaryosunda bir verici/bir pasif alıcı kullanılarak öncelikle sabit hızda x ve y yönlerindeki belirli ilk hızları olan ve benzetim süresi boyunca ivmesiz hareket eden bir hedefin izlendiği benzetim gerçekleştirilmiştir.

İzlenmek istenen hedef gözetleme yapılmak istenen belirli bir alanda ses hızı civarındaki bir hızla giden bir jet uçağı olduğu için \hat{x}_0 ve P_0 değerleri buna göre seçilmiştir.

Çizelge 5.1 Sabit Hızlı Hareket Girdileri

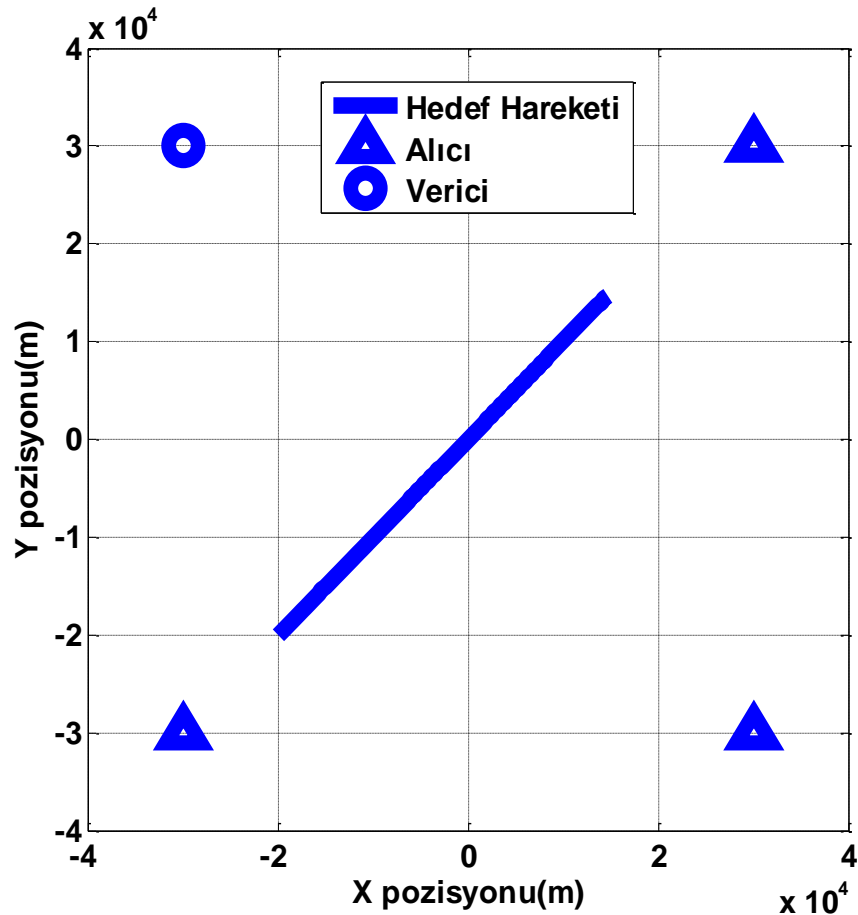
Simülasyon Değişkenleri	Sabit Hızlı Hareket Girdileri
Alici koordinatları (x_i, y_i)	$A_1 = (30km, -30km)$
Verici koordinatları(x_i, y_i)	$V_1 = (-30km, 30km)$
Verici frekansı (f_T)	100 MHz
Dinamik hareket modeli gürültü varyansı	$\sigma^2 = 10^{-2} m^2/s^4$
Ölçüm gürültüsü varyansı	$\sigma_{f_d}^2 = 1 Hz^2$ $\sigma_{\theta}^2 = 10^{-4} rad^2$ $\sigma_{R_b}^2 = 400 m^2$
Süreç gürültüsü varyansı	$\sigma_{\dot{x}^2} = 1 m^2/s^4$ $\sigma_{\dot{y}^2} = 1 m^2/s^4$
Hedef başlangıç gerçek durum vektörü $x_i = [x \quad \dot{x} \quad y \quad \dot{y}]^T$	$x = -20km, \dot{x} = 350 m/s$ $y = -20km, \dot{y} = 350 m/s$
Başlangıç durum vektörü kestirimi $\hat{x}_0 = [x \quad \dot{x} \quad y \quad \dot{y}]^T$	$x = -35km, \dot{x} = 250 m/s$ $y = -10km, \dot{y} = 250 m/s$
Başlangıç kovaryans matrisi kestirimi (P_0)standart sapma değerleri	$\sigma_{\hat{x}_0} = 25km, \sigma_{\dot{\hat{x}}_0} = 100 m/s$ $\sigma_{\hat{y}_0} = 15km, \sigma_{\dot{\hat{y}}_0} = 100 m/s$
Simülasyon süresi	100 saniye
Monte Carlo Simülasyon Sayısı	100
Radar tarama periyodu	1 saniye

Çizelge 5.1'de yer alan girdiler kullanılarak tek alıcı-vericili senaryo için yapılan simülasyonlarda, GKF'nin iraksadığı ve durum kestiriminde istenildiği gibi RMS hata değerleri üretmediği gözlenmiştir. Hedef izlemede radar tarama sayısı arttıkça iki boyuttaki pozisyon RMS hata değerlerinin azalması gerekirken filtrenin hataları filtreleyemediği gözlemlenmiştir. Bu sebeplerden ötürü oluşturulan senaryolarda GKF ile pasif izlemenin mümkün olmadığı görülmüştür.

5.2. Multistatik Pasif Radar Modellenmesi ile Hedef İzleme

5.2.1. Sabit Hız Hareket Senaryosu

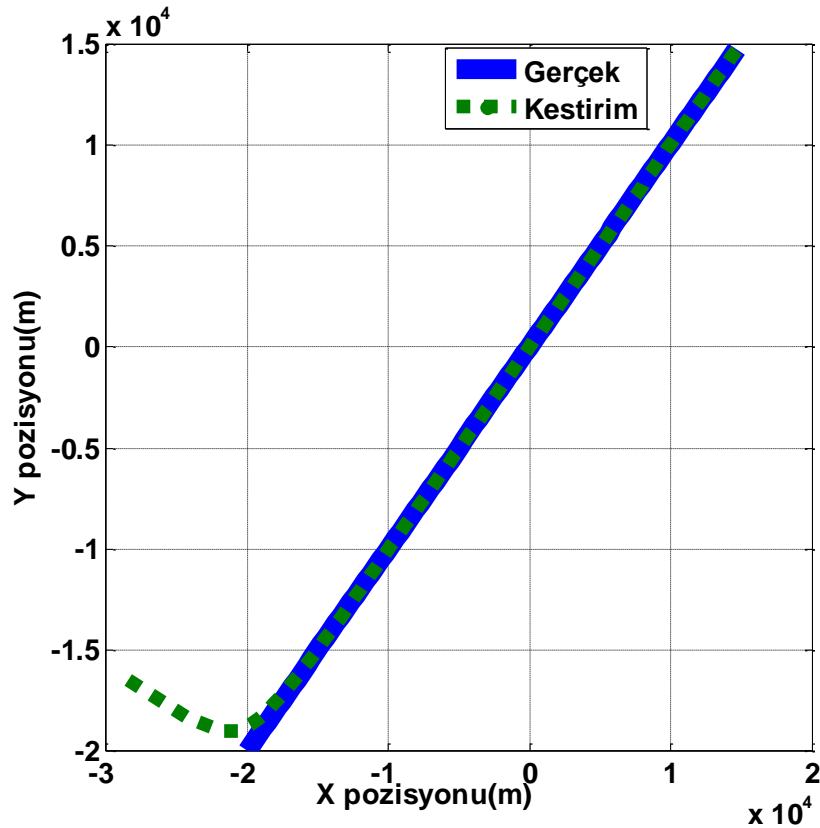
Çizelge 5.1'de verilen girdilerden farklı olarak üç alıcı kullanılmış ve koordinatları $A_1 = (30km, -30km)$, $A_2 = (-30 km, -30km)$, $A_3 = (30 km, 30km)$ şeklinde alınıp, benzetimler yapıldığında alınan sonuçlar aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.1 Sabit hızlı hareket senaryosu

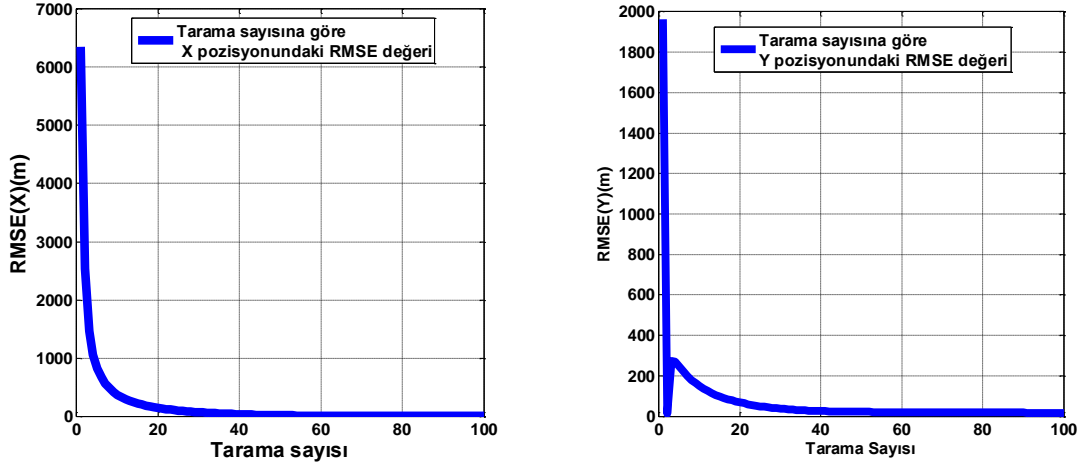
Oluşturulan sabit hareket modeli ve kurulan pasif radar geometrisi Şekil 5.1'de görülmektedir. Üç alıcı ve bir vericiden oluşan pasif radar izleme sisteminde Kartezyen koordinat düzleminde x ve y yönünde 350 m/s sabit hızla giden bir hava aracının iki boyutta kestirimi yapılmıştır. Yapılan çalışmada FM bantta, 100 MHz'de yayın yapan bir verici seçilmiştir. Bu vericinin çalışma frekansı ve koordinatları bilinmektedir. Oluşturulan hedef dinamik hareket modeline rüzgâr vb. etkilerin olabileceği varsayılarak sistem gürültüsü eklenmiştir.

Durum vektörünün x ve y yönündeki pozisyon bilgilerinin gerçek ve kestirim değerleri Şekil 5.2'de görülmektedir. Başlangıçta hedefin konumu ve hızı bilinmemektedir. Bu yüzden filtre iliklendirilirken başlangıç konum ve hız bilgileri izlenmek istenen hedefe göre seçilmiştir. Gözlenmek istenen bölgenin yaklaşık konum bilgileri ve aynı zamanda nasıl bir hava aracının takibi yapılmak istendiği de kullanıcı tarafından bilinmektedir. Buna göre bu uygulamada ses hızına yakın, belirli bir bölgedeki hava aracının takibi yapılmak istendiği için başlangıç konum ve hız değerleri buna göre seçilmiştir.



Şekil 5.2 Sabit hızlı hareket pozisyon kestirimi

Şekil 5.3’de iki boyutta RMS pozisyon hatasının zamanla değişimi görülmektedir. Burada 100 kere çalıştırılmış simülasyonda her çalıştırmada aynı zaman değerlerinde farklı ölçüm hataları verildiği için farklı pozisyon hataları alınmıştır. Her zamandaki hata değerlerinin ortalaması alınmıştır. Görüldüğü gibi zaman geçtikçe yani tarama sayısı arttıkça ortalama hatanın karesi azalmaktadır.



Şekil 5.3 Sabit hızlı hareket tarama sayısına göre pozisyonlardaki RMSE değerleri

Çizelge 5.2 Sabit hız hareketi için değişen Doppler ölçüm gürültüsüne göre 100 Monte Carlo Simülasyonu sonucunda iki boyuttaki pozisyonlardaki \overline{RMSE}_{ξ} değerleri

\overline{RMSE}_{ξ}	$\sigma_{f_d}^2 = 1$ $\sigma_{\theta}^2 = 10^{-2}$ $\sigma_{R_b}^2 = 1000$	$\sigma_{f_d}^2 = 10$ $\sigma_{\theta}^2 = 10^{-2}$ $\sigma_{R_b}^2 = 1000$	$\sigma_{f_d}^2 = 100$ $\sigma_{\theta}^2 = 10^{-2}$ $\sigma_{R_b}^2 = 1000$	$\sigma_{f_d}^2 = 1000$ $\sigma_{\theta}^2 = 10^{-2}$ $\sigma_{R_b}^2 = 1000$
X hızı hatası(m/s)	2.32	5.78	25.36	82.4
Y hızı hatası(m/s)	2.30	3.85	6.77	17.5

Çizelge 5.2’de Doppler ölçümü sırasındaki ölçüm hatasının artmasının genel pozisyon kestirimini çok fazla etkilemediği görülmüştür. Sadece zamansal olarak hatanın azalma süresi biraz uzamıştır. Yani Doppler ölçüm hatası artırılması durumunda iyi sonuç alabilmek için daha çok tarama yapılması gerektiği gözlemlenmiştir. Pozisyon kestirimlerinin çok etkilenmemesine karşın hız kestirimlerinin oldukça etkilendiği görülmüştür. Doppler gürültüsünün çok artması durumunda hız kestirimlerinde iraksama olmuştur.

Çizelge 5.3'de bistatik mesafe ölçüm gürültüsünün artması belli bir seviyenin üzerinde pozisyon kestiriminde ıraksamaya neden olduğu görülmüştür. Özetle bistatik mesafe ölçüm hatası arttıkça hedef kestirimi sırasındaki gerçek ve kestirim pozisyonlar arasındaki hata artmıştır. Bu bistatik mesafenin pozisyon kestirimi için Doppler frekansına göre daha önemli bir bilgi olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.3 Sabit hız hareketi için değişen bistatik mesafe ölçüm gürültüsüne göre 100 Monte Carlo Simülasyonu sonucunda iki boyuttaki pozisyonlardaki \overline{RMSE}_ξ değerleri

\overline{RMSE}_ξ	$\sigma_{f_d}^2= 10$ $\sigma_\theta^2= 10^{-4}$ $\sigma_{R_b}^2= 400$	$\sigma_{f_d}^2= 10$ $\sigma_\theta^2= 10^{-4}$ $\sigma_{R_b}^2= 800$	$\sigma_{f_d}^2= 10$ $\sigma_\theta^2= 10^{-4}$ $\sigma_{R_b}^2= 1000$	$\sigma_{f_d}^2= 10$ $\sigma_\theta^2= 10^{-4}$ $\sigma_{R_b}^2= 2000$
X pozisyon hatası(m)	237.1	287.2	304.7	562
Y pozisyon hatası(m)	74.3	96.5	103.9	200.8

Çizelge 5.4'de yanca ölçüm gürültüsünün artması 100 radar taraması boyunca ortalama değerini arttırdığı görülmüştür.

Çizelge 5.4 Sabit hız hareketi için değişen yanca açısı ölçüm gürültüsüne göre 100 Monte Carlo Simülasyonu sonucunda iki boyuttaki pozisyonlardaki \overline{RMSE}_ξ değerleri

\overline{RMSE}_ξ	$\sigma_{f_d}^2= 1$ $\sigma_\theta^2= 10^{-4}$ $\sigma_{R_b}^2= 400$	$\sigma_{f_d}^2= 10$ $\sigma_\theta^2= 10^{-3}$ $\sigma_{R_b}^2= 400$	$\sigma_{f_d}^2= 10$ $\sigma_\theta^2= 10^{-2}$ $\sigma_{R_b}^2= 400$	$\sigma_{f_d}^2= 10$ $\sigma_\theta^2= 10^{-1}$ $\sigma_{R_b}^2= 400$
X pozisyon hatası(m)	210	214.4	215.6	216.2
Y pozisyon hatası(m)	58.6	62.2	63.2	65.1

Çizelge 5.5'de $\sigma_{f_d}^2= 1$, $\sigma_\theta^2= 10^{-4}$ ve $\sigma_{R_b}^2= 400$ değerleri alınarak iki alıcı- tek verici ve üç alıcı-tek vericili multistatik senaryolardaki hata değerleri görülmektedir. Alıcı sayısı arttıkça yani yapılan ölçüm sayısı arttıkça pozisyon hatası azalmıştır.

Çizelge 5.5 Sabit hız hareketi için değişen alıcı sayılarına göre iki boyuttaki pozisyonlardaki \overline{RMSE}_ξ değerleri

\overline{RMSE}_ξ	$A_1 = (30km, -30km),$ $A_2 = (30 km, 30km)$	$A_1 = (30km, -30km),$ $A_2 = (-30 km, -30km),$ $A_3 = (30 km, 30km)$
X pozisyon hatası(m)	259.22	210.1
Y pozisyon hatası(m)	62.52	59.2

Çizelge 5.6 Sabit hız hareketi için değişen ölçüm veri tipi sayılarına göre iki boyuttaki pozisyonlardaki \overline{RMSE}_ξ değerleri

\overline{RMSE}_ξ	Doppler ve yanca açısı	Bistatik mesafe, Doppler ve yanca açısı
X pozisyon hatası(m)	633.6	213.41
Y pozisyon hatası(m)	193.4	60.56

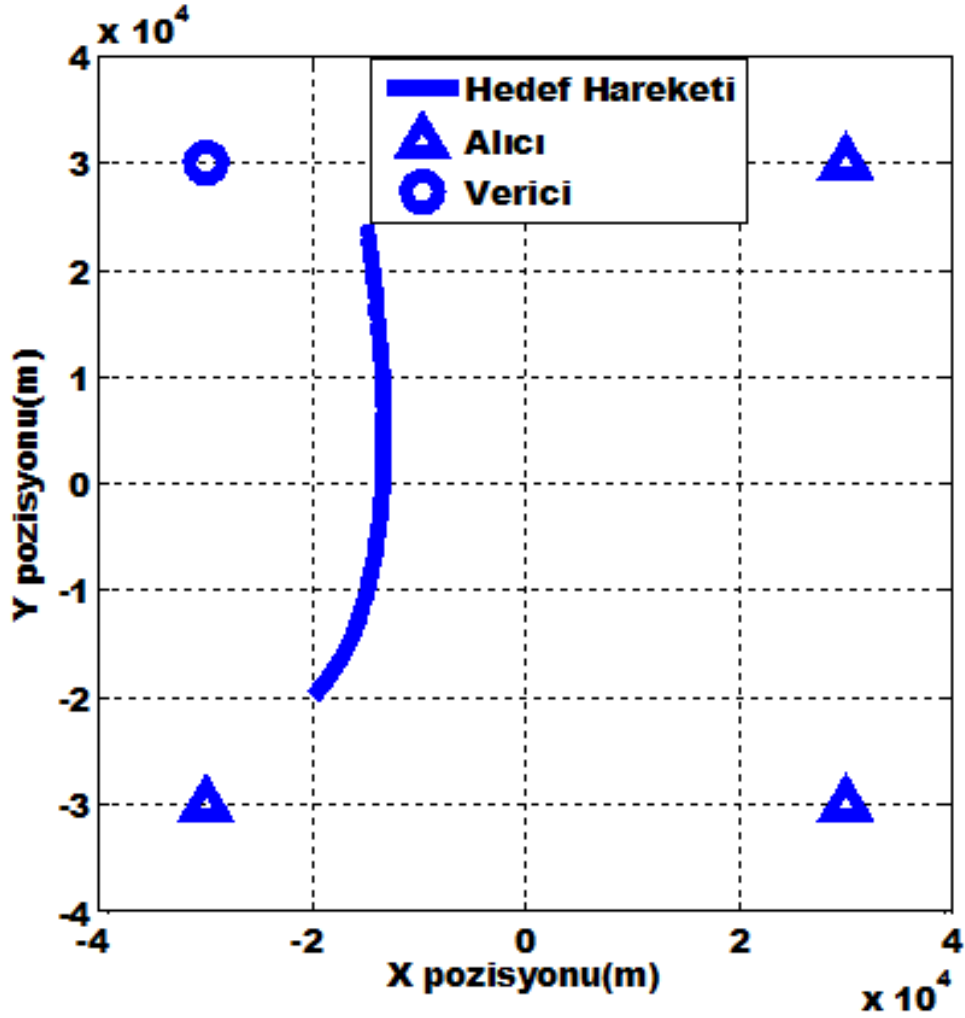
Çizelge 5.6'da Çizelge 5.1 kullanılarak 3 alıcı-1 vericili sabit hızlı hareket senaryosunda değişen ölçüm veri tipi sayısına göre pozisyonadaki RMS hatalarının zaman ortalaması alınmış değerleri verilmiştir. İlk senaryoda ölçüm verisi olarak Doppler ve yanca açısı ölçümleri kullanılmış daha sonra ise ölçüm veri tipi sayısı artırılarak bistatik mesafe ölçümü de eklenmiştir. Görüldüğü gibi ölçüm veri tipinin artması dolayısıyla yapılan ölçüm sayısının artmasıyla hedef kestirimindeki başarı artarak pozisyon hatası azalmıştır.

5.2.2.Sabit İvme Hareket Senaryosu

Multistatik üç alıcı ve bir vericili senaryoda sabit ivmeli hareket eden bir hedef modeli oluşturularak hedef izleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Verici olarak 200 MHz'de yayın yapan karasal bir televizyon vericisi kullanılmıştır. Şekil 5.4'de hedefin iki boyutta x ve y Karezyen koordinatlardaki hareketi ile alıcı-vericilerin yerleşiminin olduğu sabit ivmeli hareket senaryosu görülmektedir. Hedef x yönünde -3 m/s^2 , y yönünde ise 5 m/s^2 sabit ivme ile hareket etmektedir.

Şekil 5.4'deki hareket modelinin oluşturulması, alıcı-verici yerleşimi ve hedef izleme işlemleri Çizelge 5.7'de belirlenen değişkenlere göre yapılmıştır. Buna göre iki boyutta x yönünde negatif sabit ivmelenme ve y yönünde pozitif sabit

ivmelenme yapan bir hedef hareketi modellenmiştir. Dinamik hedef hareket modeline ve ölçüm değerlerine gürültü değişkenleri eklenmiştir. GKF iklenendirilirken hedefin başlangıçtaki pozisyon ve hızının bilinmediği varsayılarak başlangıç durum vektörü elemanları hedefin gerçek pozisyon, hız ve ivme değerlerinden farklı olarak verilmiştir. Başlangıç kovaryans matrisi elemanları da buna göre analiz edilerek belirlenmiştir. Radar tarama periyodu bir saniye, benzetim süresi 100 saniye ve Monte Carlo simülasyonu sayısı 100 olarak alınmıştır.



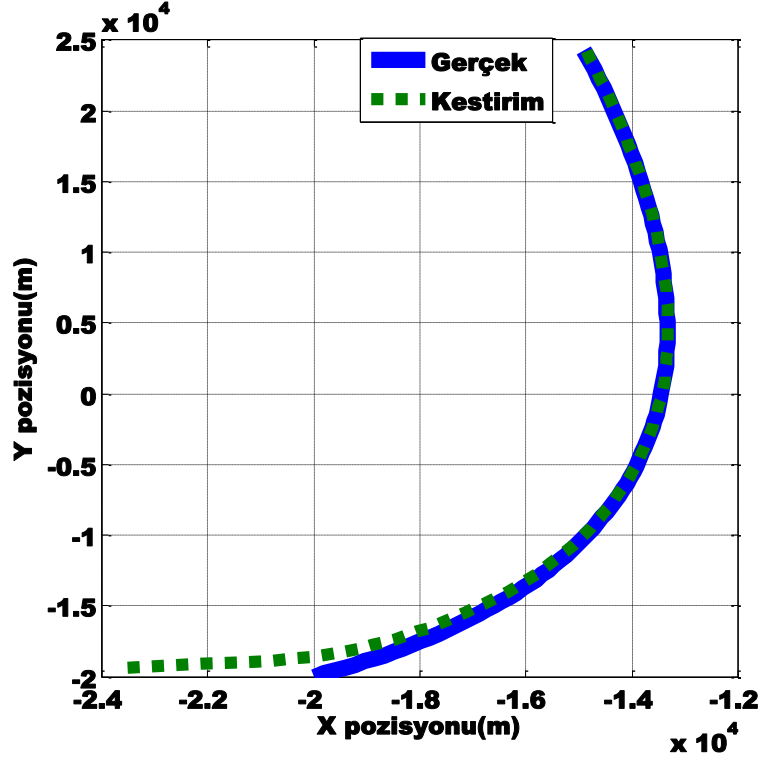
Şekil 5.4 Sabit ivmeli hareket senaryosu

Çizelge 5.7 Sabit ivmeli hareket girdileri

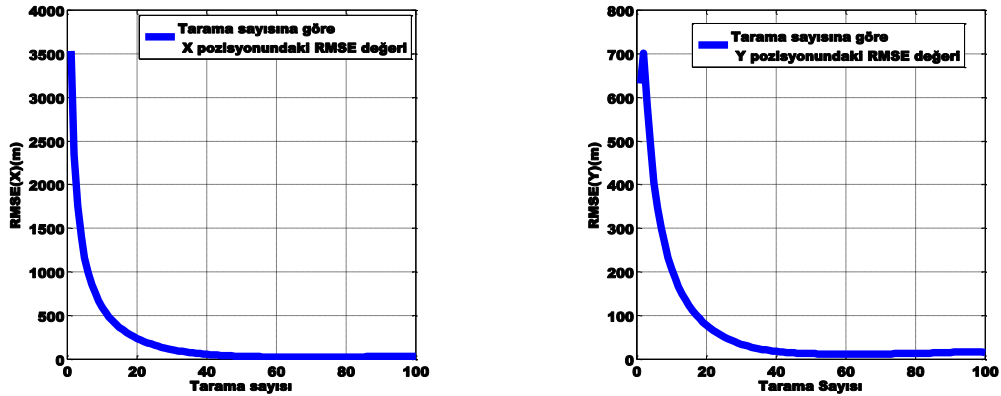
Simülasyon Değişkenleri	Sabit ivme hareketi senaryosu
Alıcı koordinatları (x_i, y_i)	$A_1 = (30km, -30km)$ $A_2 = (-30km, -30km)$ $A_3 = (30km, 30km)$
Verici koordinatları (x_i, y_i)	$V_1 = (-30km, 30km)$
Verici frekansı (f_T)	200 MHz
Dinamik hareket modeli gürültü varyansı	$\sigma^2 = 10^{-2} m^2/s^4$
Ölçüm gürültüsü varyansı	$\sigma_{f_d}^2 = 1 Hz^2$ $\sigma_{\theta}^2 = 10^{-4} rad^2$ $\sigma_{R_b}^2 = 400 m^2$
Sistem gürültüsü varyansı	$\sigma_{\ddot{x}^2} = 1.5 m^2/s^4$ $\sigma_{\ddot{y}^2} = 2.5 m^2/s^4$
Hedef başlangıç gerçek durum vektörü $x_i = [x \ \dot{x} \ \ddot{x} \ y \ \dot{y} \ \ddot{y}]^T$	$x = -20km, \dot{x} = 200m/s, \ddot{x} = -3 m/s^2$ $y = -20km, \dot{y} = 200 m/s, \ddot{y} = 5 m/s^2$
Başlangıç durum vektörü kestirimi $\hat{x}_0 = [x \ \dot{x} \ \ddot{x} \ y \ \dot{y} \ \ddot{y}]^T$	$x = -35km, \dot{x} = 250m/s, \ddot{x} = -1 m/s^2$ $y = -10km, \dot{y} = 250m/s, \ddot{y} = 3 m/s^2$
Başlangıç kovaryans matrisi kestirimi (P_0) standart sapma değerleri	$\sigma_{\hat{x}_0} = 25km, \sigma_{\hat{\dot{x}_0}} = 100m/s, \sigma_{\hat{\ddot{x}_0}} = 2 m/s^2$ $\sigma_{\hat{y}_0} = 15km, \sigma_{\hat{\dot{y}_0}} = 100m/s, \sigma_{\hat{\ddot{y}_0}} = 2 m/s^2$
Simülasyon süresi	100 saniye
Monte Carlo Simülasyon Sayısı	100
Radar tarama periyodu	1 saniye

Şekil 5.5’de sabit ivmeli hareket senaryosundaki hedefin iki boyuttaki pozisyonun gerçek ve kestirimi karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi başlangıçta hedefin pozisyonu bilinmemektedir ve gerçek-kestirim pozisyonları arasında ciddi bir fark

bulunmaktadır. Fakat radar tarama sayısı arttıkça gerçek ve kestirim pozisyonları arasındaki fark azalmıştır. Bu şekilde hedef izleme işlemi başarıyla gerçekleştirilmiştir.

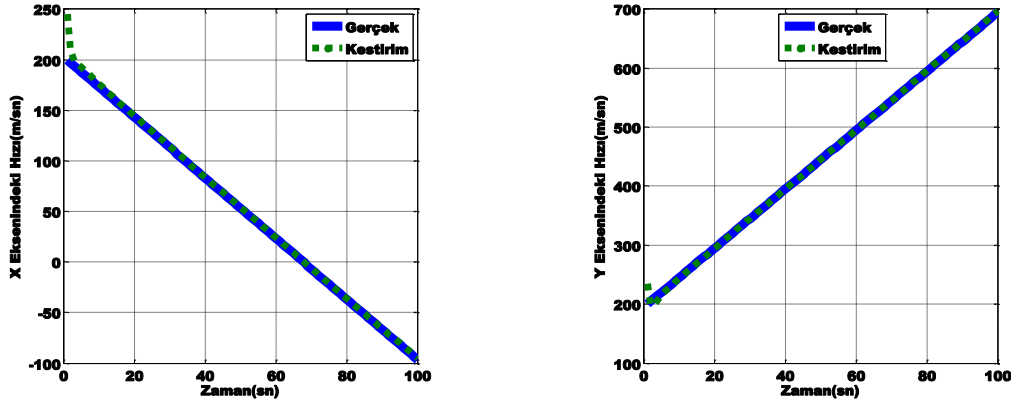


Şekil 5.5 Sabit ivmeli hareket pozisyon kestirimi



Şekil 5.6 Sabit ivmeli hareket tarama sayısına göre pozisyonlardaki RMSE değerleri

Şekil 5-6'da tarama sayısına göre iki boyutta x ve y pozisyonlarındaki RMSE değerleri görülmektedir. GKF'nin istenildiği gibi çalışarak ölçüm gürültüsünü filtrelemiştir ve başlangıçtaki pozisyon hatası zamanla azalmıştır.



Şekil 5.7 Sabit ivmeli hareket hız kestirimi

Şekil 5.7’de ise sabit ivmeli hedef hareketi boyunca yapılan hız kestirimi görülmektedir. Gerçek ve kestirim hız değerleri arasındaki fark çok kısa bir sürede azalarak eşitlenmiştir.

Çizelge 5.8’de değişen ölçüm gürültülerine göre iki boyuttaki x ve y koordinatlarındaki RMS pozisyon hatalarının zaman ortalamaları verilmiştir. Yapılan uygulamalarda ölçüm gürültüsü arttıkça x ve y pozisyonlardaki hataların arttığı görülmüştür. Ölçüm gürültüsünün belirli bir seviyeden sonra artırılmasının filtrenin ıraksamasına neden olmuştur.

Çizelge 5.8 Sabit ivmeli hareket için değişen ölçüm gürültülerine göre 100 Monte Carlo Simülasyonu sonucunda iki boyuttaki pozisyonlardaki \overline{RMSE}_ξ değerleri

\overline{RMSE}_ξ	$\sigma_{f_d}^2=1$ $\sigma_\theta^2=10^{-4}$ $\sigma_{R_b}^2=400$	$\sigma_{f_d}^2=1$ $\sigma_\theta^2=10^{-4}$ $\sigma_{R_b}^2=1000$	$\sigma_{f_d}^2=1$ $\sigma_\theta^2=10^{-2}$ $\sigma_{R_b}^2=1000$	$\sigma_{f_d}^2=10$ $\sigma_\theta^2=10^{-4}$ $\sigma_{R_b}^2=1600$
X pozisyon hatası(m)	293.4	362.9	370.6	439.5
Y pozisyon hatası(m)	88.4	104.5	116.2	144.5

Çizelge 5.9’da Çizelge 5.7’deki girdiler kullanılarak yapılan sabit ivmeli hareket senaryosunda değişen ölçüm veri tipi sayısına göre pozisyondaki RMS hatası değerlerinin zaman ortalamaları verilmiştir. İlk senaryoda ölçüm verisi olarak Doppler ve yanca açısı ölçümleri kullanılmış daha sonrasında ölçüm veri tipi sayısı artırılarak bistatik mesafe ölçümü de eklenmiştir. Görüldüğü gibi iki veri tipi kullanılarak yapılan ölçümler ile hedef izlemede elde edilen ıraksamadan sonra

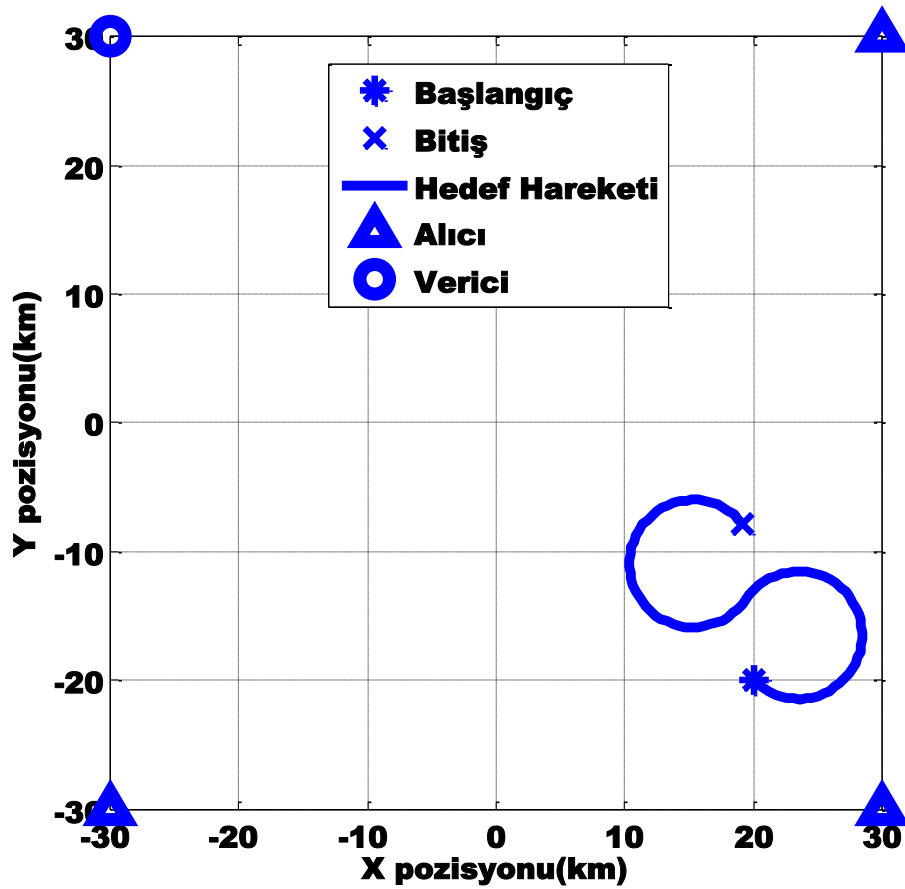
ölçüm veri tipinin artması dolayısıyla yapılan ölçüm sayısının artmasıyla hedef kestirimindeki başarımlar artmış ve pozisyon hatası azalmıştır.

Çizelge 5.9 Sabit ivmeli hareket için değişen ölçüm veri tipi sayılarına göre iki boyuttaki pozisyonlardaki \overline{RMSE}_ξ değerleri

\overline{RMSE}_ξ	Dopler ve yanca açısı	Bistatik mesafe, Dopler ve yanca açısı
X pozisyon hatası(m)	5770.8	222.3
Y pozisyon hatası(m)	20466.4	68.7

5.2.3. Dönüş Hareket Senaryosu

Üç alıcı ve bir vericili multistatik pasif radar sistemi ve dönüş yapan bir hedefin olduğu benzetimi yapılan senaryo Şekil 5.8’de verilmiştir. Hedef izleme işlemi için 200 MHz’de yayın yapan karasal bir televizyon vericisi kullanılmıştır. Hedef 100 saniyelik hareketinin ilk 50 saniyelik bölümünde sabit $\Omega = 0.1$ rad/sn, son 50 saniyelik bölümünde ise sabit $\Omega = -0.1$ rad/sn dönüş açısı ile dönüş yapmıştır.



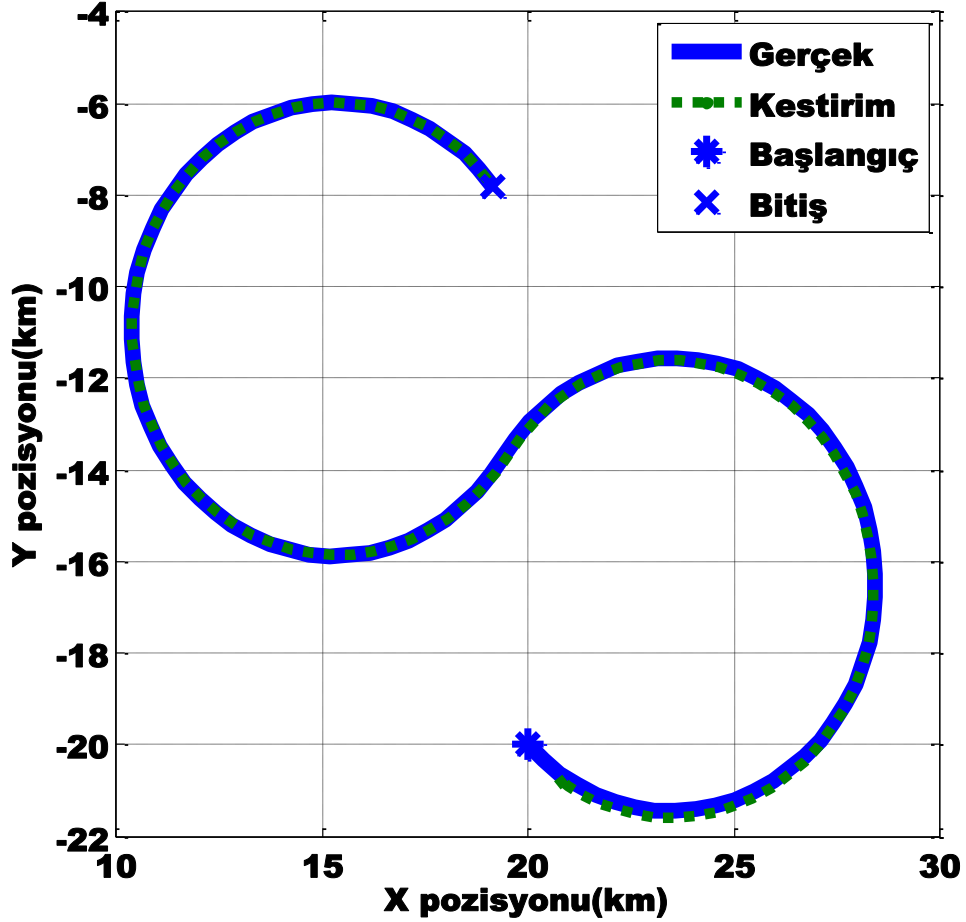
Şekil 5.8 Dönüş hareketi senaryosu

Çizelge 5.10 Dönüş hareketi girdileri

Simülasyon Değişkenleri	Dönüş hareketi senaryosu
Alıcı koordinatları (x_i, y_i)	$A_1 = (30km, -30km)$ $A_2 = (-30km, -30km)$ $A_3 = (30km, 30km)$
Verici koordinatları (x_i, y_i)	$V_1 = (-30km, 30km)$
Verici frekansı (f_T)	200 MHz
Dinamik hareket modeli gürültü varyansı	$\sigma^2 = 10^{-2} m^2/s^4$
Ölçüm gürültüsü varyansı	$\sigma_{f_d}^2 = 1 Hz^2$ $\sigma_{\theta}^2 = 10^{-4} rad^2$ $\sigma_{R_b}^2 = 600 m^2$
Sistem gürültüsü varyansı	$\sigma_{\dot{x}^2} = 1 m^2/s^4$ $\sigma_{\dot{y}^2} = 1 m^2/s^4$
Hedef başlangıç gerçek durum vektörü $x_i = [x \quad \dot{x} \quad y \quad \dot{y}]^T$	$x = 20km, \dot{x} = 350m/s,$ $y = -20km, \dot{y} = -350 m/s$
Başlangıç durum vektörü kestirimi $\hat{x}_0 = [x \quad \dot{x} \quad y \quad \dot{y}]^T$	$x = 10km, \dot{x} = 250m/s$ $y = -10km, \dot{y} = -250m/s$
Başlangıç kovaryans matrisi kestirimi (P_0) standart sapma değerleri	$\sigma_{\hat{x}_0} = 15km, \sigma_{\hat{x}_0} = 100m/s$ $\sigma_{\hat{y}_0} = 15km, \sigma_{\hat{y}_0} = 100m/s$
Simülasyon süresi	100 saniye
Monte Carlo Simülasyon Sayısı	100
Radar tarama periyodu	1 saniye

Çizelge 5.10'da ise bu modelleme ve benzetimin yapılması için kullanılan dönüş hareketi senaryosu girdileri görülmektedir. Bundan önceki uygulamalarda olduğu

gibi hedefin başlangıç pozisyon ve hızının bilinmediği varsayılarak izlenmek istenen hedef özelliklerine göre kestirim için kullanılan GKF ilklendirilmiştir. Başlangıç durum vektörü ve kovaryans matrisi kestirimleri buna göre analiz edilerek belirlenmiştir. Ölçümü yapılan Doppler, yanca açısı ve bistatik mesafe verilerine gerçekçiliği arttırmak amacıyla radar alıcısında oluşacak gibi ölçüm gürültüsü eklenmiştir.



Şekil 5.9 Dönüş hareketi pozisyon kestirimi

Şekil 5.9'da ise hedef gerçek ve kestirim pozisyonlarının karşılaştırılması verilmiştir. Başlangıçta hedefin pozisyonu bilinmediği için gerçek ve kestirim arasında fark bulunmaktadır. Fakat zamanla bu fark kapanmış, kestirim ve gerçek pozisyonlar iki boyutta eşitlenmiştir.

Çizelge 5.11'de ise artan ölçüm gürültülerine göre 100 radar taraması ve 100 Monte Carlo simülasyonu boyunca iki boyuttaki pozisyonlardaki RMS hata değerlerinin zaman ortalamalarını göstermektedir.

Çizelge 5.11 Dönüş hareketi için değişen ölçüm gürültülerine göre 100 Monte Carlo Simülasyonu sonucunda iki boyuttaki pozisyonlardaki \overline{RMSE}_ξ değerleri

\overline{RMSE}_ξ	$\sigma_{f_d}^2=1$ $\sigma_\theta^2=10^{-4}$ $\sigma_{R_b}^2=600$	$\sigma_{f_d}^2=1$ $\sigma_\theta^2=10^{-4}$ $\sigma_{R_b}^2=1000$	$\sigma_{f_d}^2=1$ $\sigma_\theta^2=10^{-2}$ $\sigma_{R_b}^2=1000$	$\sigma_{f_d}^2=10$ $\sigma_\theta^2=10^{-4}$ $\sigma_{R_b}^2=1600$
X pozisyon hatası(m)	58.6	63.5	66.5	237.7
Y pozisyon hatası(m)	79.9	84	86.1	312.7

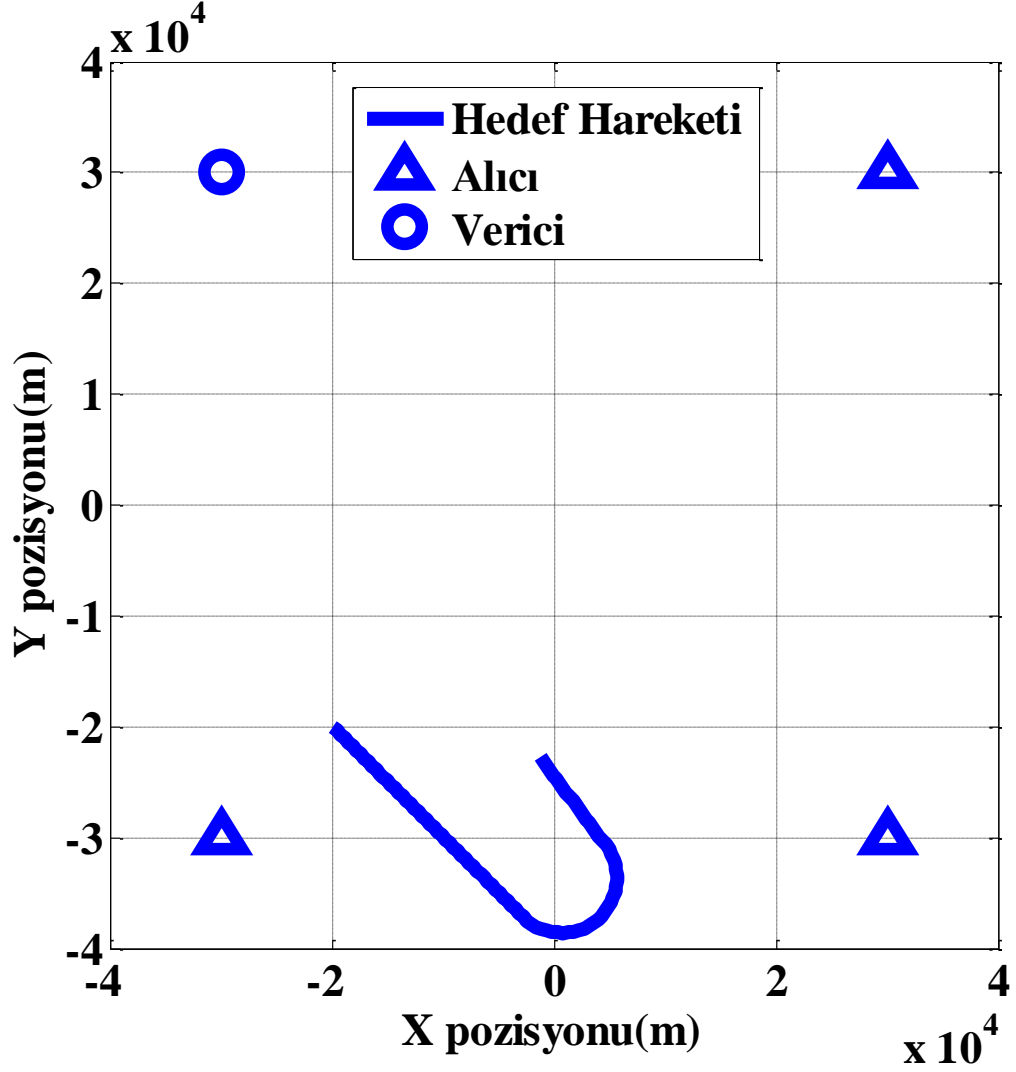
Çizelge 5.12 Dönüş hareketi için değişen ölçüm veri tipi sayılarına göre iki boyuttaki pozisyonlardaki \overline{RMSE}_ξ değerleri

\overline{RMSE}_ξ	Doppler ve yanca açısı	Bistatik mesafe, Doppler ve yanca açısı
X pozisyon hatası(m)	663.5	60.9
Y pozisyon hatası(m)	1057.2	80.7

Çizelge 5.12’de, Çizelge 5.10’daki girdiler kullanılarak yapılan dönüş hareket senaryosunda değişen ölçüm veri tipi sayısına göre pozisyonadaki RMS hatası değerlerinin zaman ortalamaları verilmiştir. İlk senaryoda ölçüm verisi olarak Doppler ve yanca açısı ölçümleri kullanılmış daha sonrasında ölçüm veri tipi sayısı artırılarak bistatik mesafe ölçümü de eklenmiştir. Görüldüğü gibi ölçüm veri tipinin artması dolayısıyla yapılan ölçüm sayısının artmasıyla hedef kestirimindeki başarımlar artarak pozisyon hatası azalmıştır.

5.2.4.Karışık Hareket Senaryosu

Şekil 5.10’da üç alıcı-bir vericiden oluşan pasif multistatik radar sistemi ve karışık hareket yapan bir hedefin yer aldığı senaryo görülmektedir. Hedef simülasyonun ilk yarısında ivmesiz sabit hızla hareket etmekte, daha sonraki %30’luk zaman diliminde $\Omega = 0.1$ rad/s açısal hız ile dönüş yapmakta ve kalan zamanda yine ivmesiz sabit hızla hareket etmiştir.

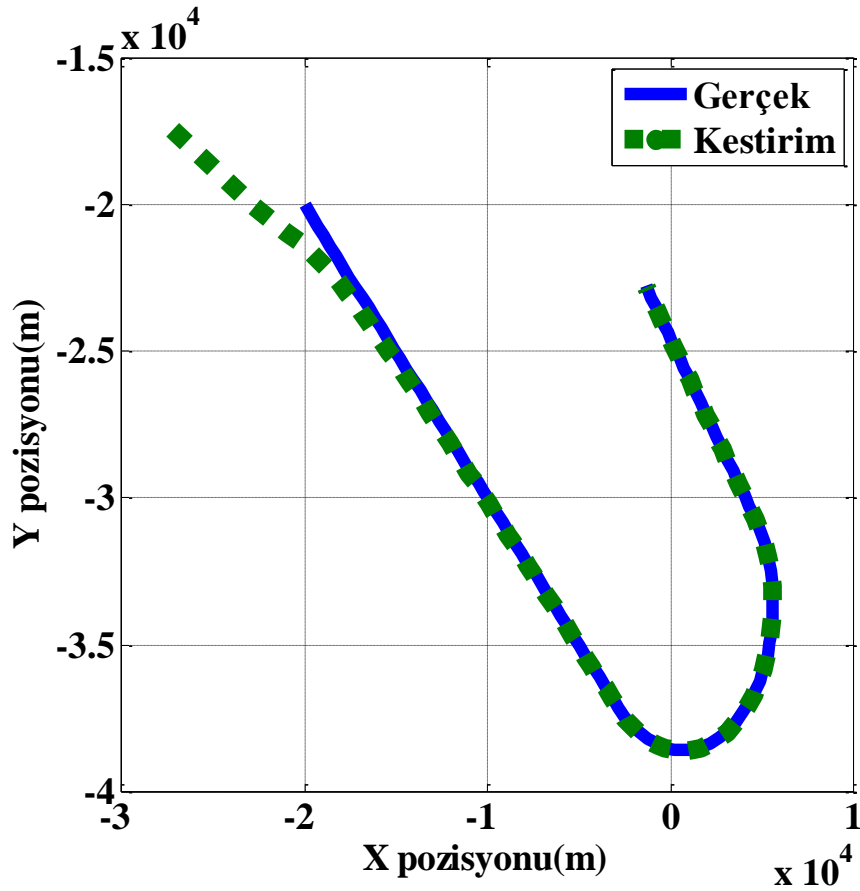


Şekil 5.10 Karışık hareket senaryosu

Çizelge 5.13'de ise bu karışık hareket senaryosunun oluşturulması için kullanılan simülasyon girdileri verilmiştir. Alıcı-verici koordinatları, dinamik hareket modeli gürültü varyansı, simülasyon süresi, sistem gürültü varyansı, Monte Carlo simülasyon sayısı ve radar tarama periyodu girdileri sabit ivmeli hareket senaryosundaki girdiler ile aynı alınmıştır. Oluşturulan dinamik hareket modeline göre hedef pasif olarak izlenmiştir. Verici olarak 100 MHz'de yayın yapan bir radyo vericisi kullanılmıştır. Doppler, yanca açısı ve bistatik mesafeden oluşan ölçüm verilerine ölçüm gürültüsü eklenmiştir. Hedefin yine başlangıç pozisyon ve hız bilgilerinin bilinmediği varsayılarak başlangıç durum ve kovaryans matrisi kestirimleri belirlenmiştir.

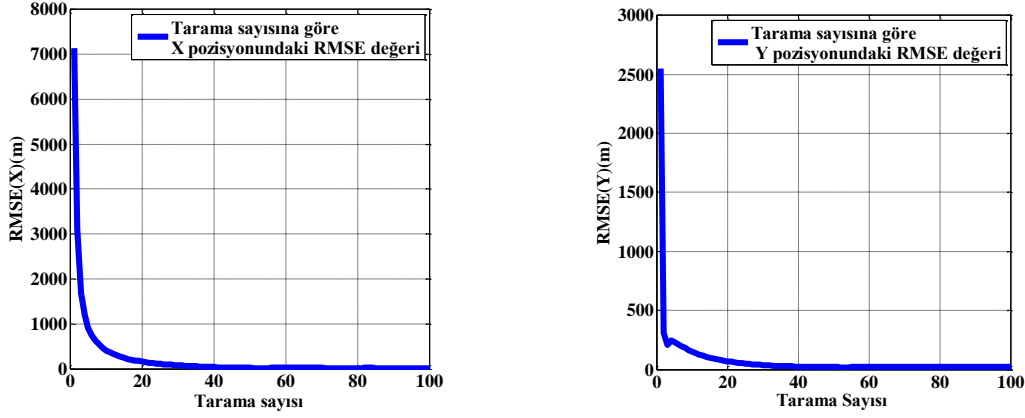
Çizelge 5.13 Karışık hareket girdileri

Simülasyon Değişkenleri	Karışık Hareket
Verici frekansı (f_T)	100 MHz
Ölçüm gürültüsü varyansı	$\sigma_{f_d}^2 = 1 \text{ Hz}^2$ $\sigma_\theta^2 = 10^{-4} \text{ rad}^2$ $\sigma_{R_b}^2 = 400 \text{ m}^2$
Hedef başlangıç gerçek durum vektörü $x_i = [x \ \dot{x} \ y \ \dot{y}]^T$	$x = -20 \text{ km}, \dot{x} = 350 \text{ m/s}$ $y = -20 \text{ km}, \dot{y} = -350 \text{ m/s}$
Başlangıç durum vektörü kestirimi $\hat{x}_0 = [x \ \dot{x} \ y \ \dot{y}]^T$	$x = -35 \text{ km}, \dot{x} = 250 \text{ m/s}$ $y = -10 \text{ km}, \dot{y} = -250 \text{ m/s}$
Başlangıç kovaryans matrisi kestirimi (P_0) standart sapma değerleri	$\sigma_{\hat{x}_0} = 25 \text{ km}, \sigma_{\dot{x}_0} = 100 \text{ m/s}$ $\sigma_{\hat{y}_0} = 15 \text{ km}, \sigma_{\dot{y}_0} = 100 \text{ m/s}$



Şekil 5.11 Karışık hareket pozisyon kestirimi

Şekil 5.11’de hedefin x ve y Kartezyen koordinat düzleminde gerçek hareketi ve pozisyon kestirimleri görülmektedir. Zamanla gerçek ve kestirim pozisyonları arasındaki fark azaldığı görülmektedir. Bu da kestirim için kullanılan GKF’nin düzgün çalıştığını göstermektedir.



Şekil 5.12 Karışık hareket radar tarama sayısına göre RMSE değerleri

Şekil 5.12’de ise karışık hareket senaryosu için radar tarama sayısına göre değişen x ve y pozisyonundaki RMS hata değerleri görülmektedir. Hedef izleminin doğası gereği tarama sayısı arttıkça ve her tarama periyodunda zaman ile ölçüm güncellemeleri yapıldıkça gerçek pozisyon ile kestirim arasındaki hata azalmaktadır. Çizelge 5.14’de karışık hareket senaryosu için değişen ölçüm gürültülerine göre x ve y pozisyonlarının RMS hata değerlerinin zaman ortalamaları görülmektedir. Görüldüğü gibi ölçüm gürültüsü arttığında zaman ortalamalı pozisyonundaki RMS hata değerleri de artmaktadır.

Çizelge 5.14 Karışık hareket değişen ölçüm gürültülerine göre 100 Monte Carlo Simülasyonu sonucunda iki boyuttaki pozisyonlardaki \overline{RMSE}_ξ değerleri

\overline{RMSE}_ξ	$\sigma_{f_d}^2= 10$ $\sigma_\theta^2= 10^{-4}$ $\sigma_{R_b}^2= 400$	$\sigma_{f_d}^2= 10$ $\sigma_\theta^2= 10^{-4}$ $\sigma_{R_b}^2= 2000$	$\sigma_{f_d}^2= 30$ $\sigma_\theta^2= 10^{-3}$ $\sigma_{R_b}^2= 400$	$\sigma_{f_d}^2= 30$ $\sigma_\theta^2= 10^{-3}$ $\sigma_{R_b}^2= 900$
X pozisyon hatası(m)	245.44	1078	260.12	320.2
Y pozisyon hatası(m)	94.6	449.5	105.4	138.65

Çizelge 5.15’de dönüş hareket senaryosunda değişen ölçüm veri tipi sayısına göre pozisyonundaki RMS hatası değerlerinin zaman ortalamaları verilmiştir. Ölçüm veri tipinin artması dolayısıyla yapılan ölçüm sayısının artmasıyla hedef kestirimindeki

başarım artarak iki veri tipi ile yapılan ölçümlerle yapılan hedef izlemeye oluşan iraksama sorunu çözülmüş ve pozisyon hatası azalmıştır

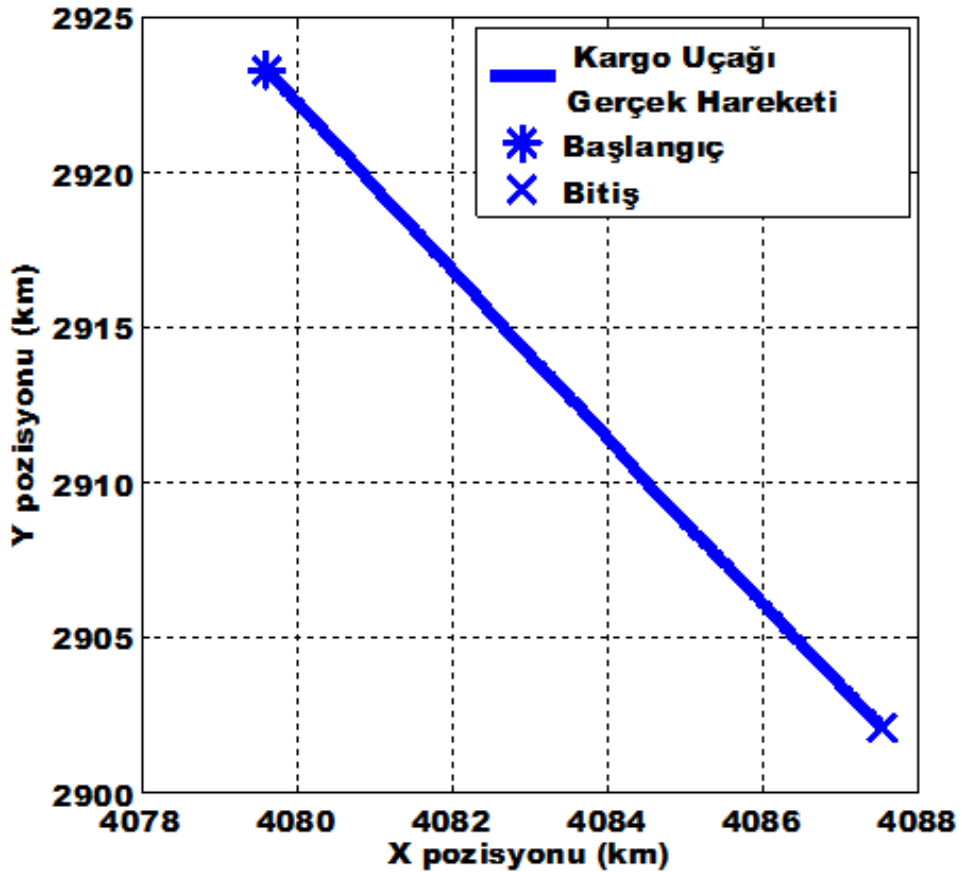
Çizelge 5.15 Karışık hareket için değişen ölçüm veri tipi sayılarına göre iki boyuttaki pozisyonlardaki \overline{RMSE}_ξ değerleri

\overline{RMSE}_ξ	Doppler ve yanca açısı	Bistatik mesafe, Doppler ve yanca açısı
X pozisyon hatası(m)	2171.8	306.7
Y pozisyon hatası(m)	2036.4	99.1

5.3. Multistatik Pasif Radar Modellenmesi ile Gerçek Uçakların İzlenmesi

5.3.1. Kargo Uçağı Senaryosu

Gerçek kargo uçağı uçuş kayıtları kullanılarak üç boyuttan Kartezyen koordinatta iki boyuta indirilen hareket Şekil 5.13’de verilmiştir.

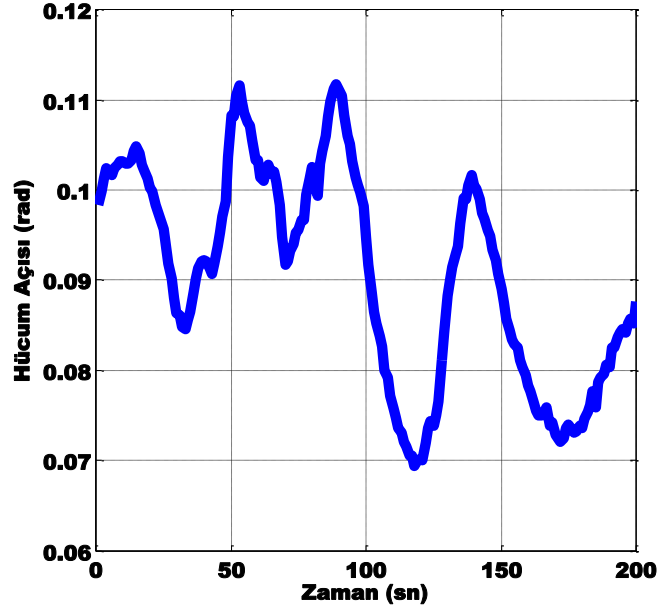


Şekil 5.13 Kargo uçağının iki boyuttaki hareketi

Gerçek kargo uçağı hareketinin izlenmesi için üç alıcı-bir vericili pasif multistatik radar sistemi oluşturulmuştur. Alıcı ve verici istasyonları iki boyutta Kartezyen koordinat düzlemine yerleştirilmiştir. Çizelge 5.16'da gerçek kargo uçağı hedefini izlemek için oluşturulan senaryo değişkenleri verilmiştir. Kargo uçağının başlangıçta pozisyon ve hızı bilinmemektedir. Bu yüzden başlangıç durum vektörü ve kovaryans matrisi kestirimleri izlenmek istenen uçağın bir kargo uçağı olduğu ve hangi konumda olabileceği tahmin edilerek belirlenmiştir.

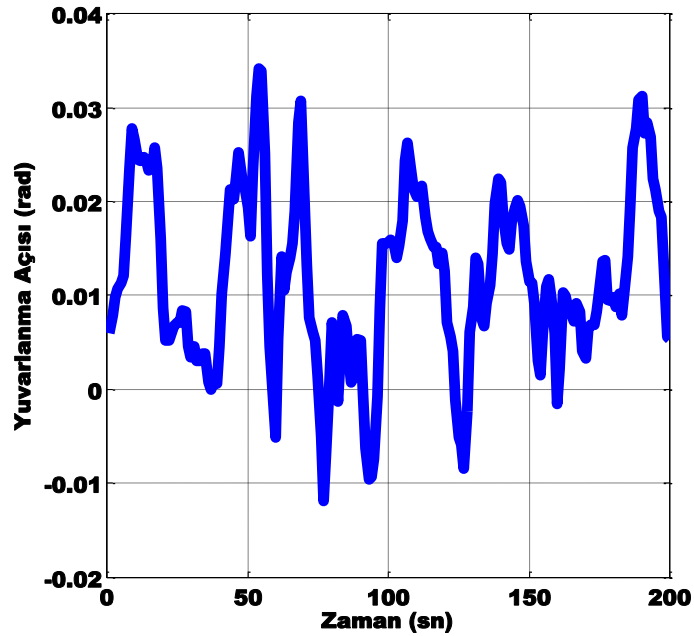
Çizelge 5.16 Kargo uçağı senaryo değişkenleri

Kullanılan Değişkenler	Kargo Uçağı Senaryosu
Alıcı koordinatları (x_i, y_i)	$A_1 = (3000km, 4000km)$ $A_2 = (3000km, 2000km)$ $A_3 = (5000km, 4000km)$
Verici koordinatları(x_i, y_i)	$V_1 = (5000km, 2000km)$
Verici frekansı (f_T)	100 MHz
Ölçüm gürültüsü varyansı	$\sigma_{f_d}^2 = 1 \text{ Hz}^2$ $\sigma_{\theta}^2 = 10^{-4} \text{ rad}^2$ $\sigma_{R_b}^2 = 400 \text{ m}^2$
Sistem gürültüsü varyansı	$\sigma_{\dot{x}^2} = 1 \text{ m}^2/\text{s}^4$ $\sigma_{\dot{y}^2} = 1 \text{ m}^2/\text{s}^4$
Başlangıç durum vektörü kestirimi $\hat{x}_0 = [x \quad \dot{x} \quad y \quad \dot{y}]^T$	$x = 4180km, \dot{x} = 100 \text{ m/s}$ $y = 2820km, \dot{y} = 100 \text{ m/s}$
Başlangıç kovaryans matrisi kestirimi (P_0) standart sapma değerleri	$\sigma_{\hat{x}_0} = 150km, \sigma_{\dot{x}_0} = 150 \text{ m/s}$ $\sigma_{\hat{y}_0} = 150km, \sigma_{\dot{y}_0} = 150 \text{ m/s}$
Hedef Hareket süresi	200 saniye
Radar tarama periyodu	1 saniye



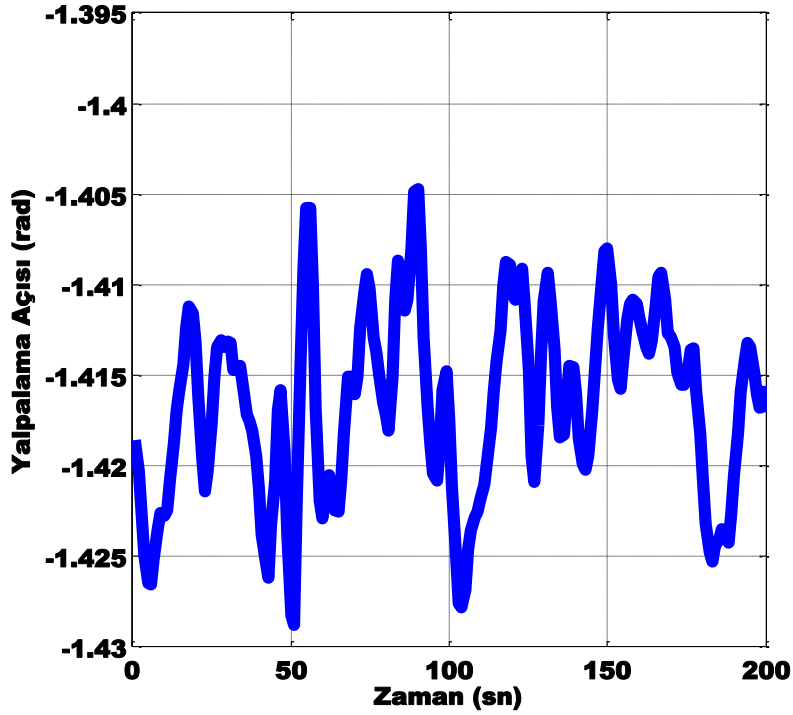
Şekil 5.14 Kargo uçağı hücum açısı

Şekil 5.14'de kargo uçağı hücum açısının 200 saniyelik hareket süresindeki değişimi görülmektedir. Hücum açısı hep pozitif değerlerdedir ve 0'dan fazladır. Bu da uçağın burnunun hep yukarıda olduğunu yani irtifasının 200 saniye boyunca arttığını göstermektedir.



Şekil 5.15 Kargo uçağı yuvarlanma açısı

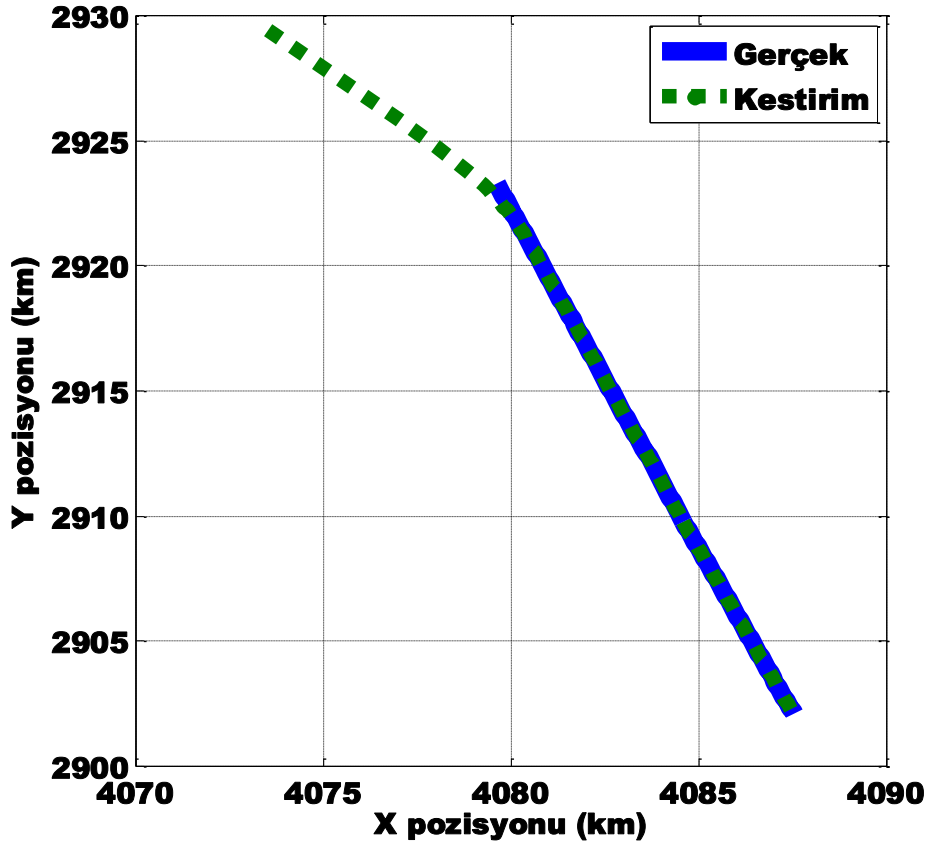
Şekil 5.15’de ise kargo uçağının yuvarlanma açısının değişimi verilmiştir. Burada uçağın yuvarlanma açısının -0.01 rad ile 0.03 rad arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 5.16 Kargo uçağı yalpalanma açısı

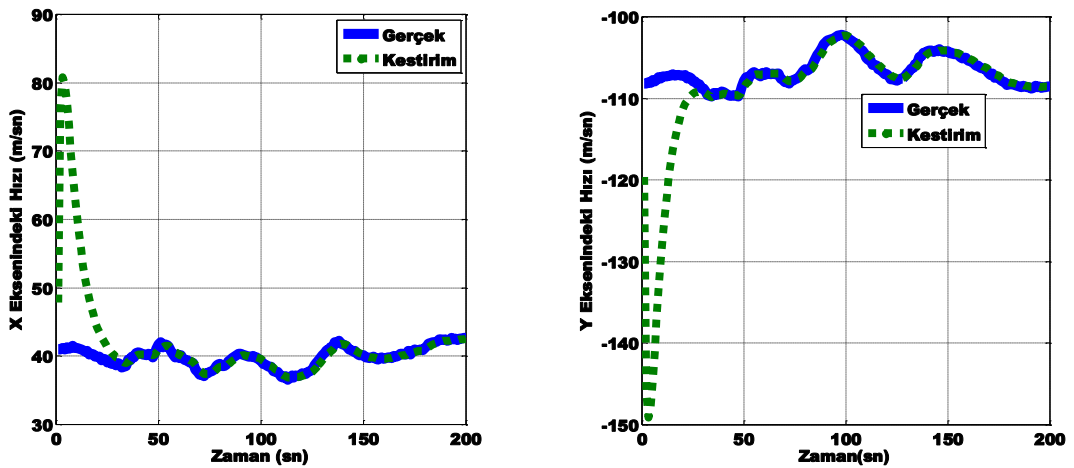
Şekil 5.16’da ise kargo uçağı yalpalanma açısı değişimi verilmiştir. Uçağın baş açısında çok değişme olmadığı ve yaklaşık olarak -1.4 rad seviyesinde kaldığı görülmektedir.

Şekil 5.17’de kargo uçağının iki boyutta gerçek hareketi ve pozisyon kestirimi verilmiştir. Başlangıçta hedefin konumu bilinmediğinden gerçek ve kestirim pozisyonlar arasında fark vardır. Fakat zaman ilerledikçe ve tarama sayısı arttıkça pozisyon hatası azalmıştır. 25. taramada x pozisyonundaki gerçek ve pozisyon hata 0.8 metre, y pozisyonundaki hata ise -0.4 metreye düşmüştür. Kovaryans kestirim matrisinin diyagonalindeki elemanlar ile gerçek ve kestirim değerleri arasındaki farkın karesinin uyumlu olduğu yapılan analizler sonucu tespit edilmiştir. Yapılan bu tespit ve pozisyon hatasının azalması GKF’nin istenildiği gibi düzgün şekilde çalıştığını göstermektedir. Daha kısa sürede daha az hataya ulaşmak için farklı filtre kullanılabilir veya tarama periyodu arttırılabilir.



Şekil 5.17 Kargo uçağı hedef takibi

Şekil 5.18'de kargo uçağının iki boyuttaki gerçek ve kestirim hızlarının karşılaştırılması verilmiştir. Başlangıçtaki kestirim ile gerçek hız değerleri arasındaki fark zamanla azalmış ve eşitlenmiştir.



Şekil 5.18 Kargo uçağı iki boyutta gerçek ve kestirim hızları

5.3.2. Jet Savaş Uçağı Senaryosu

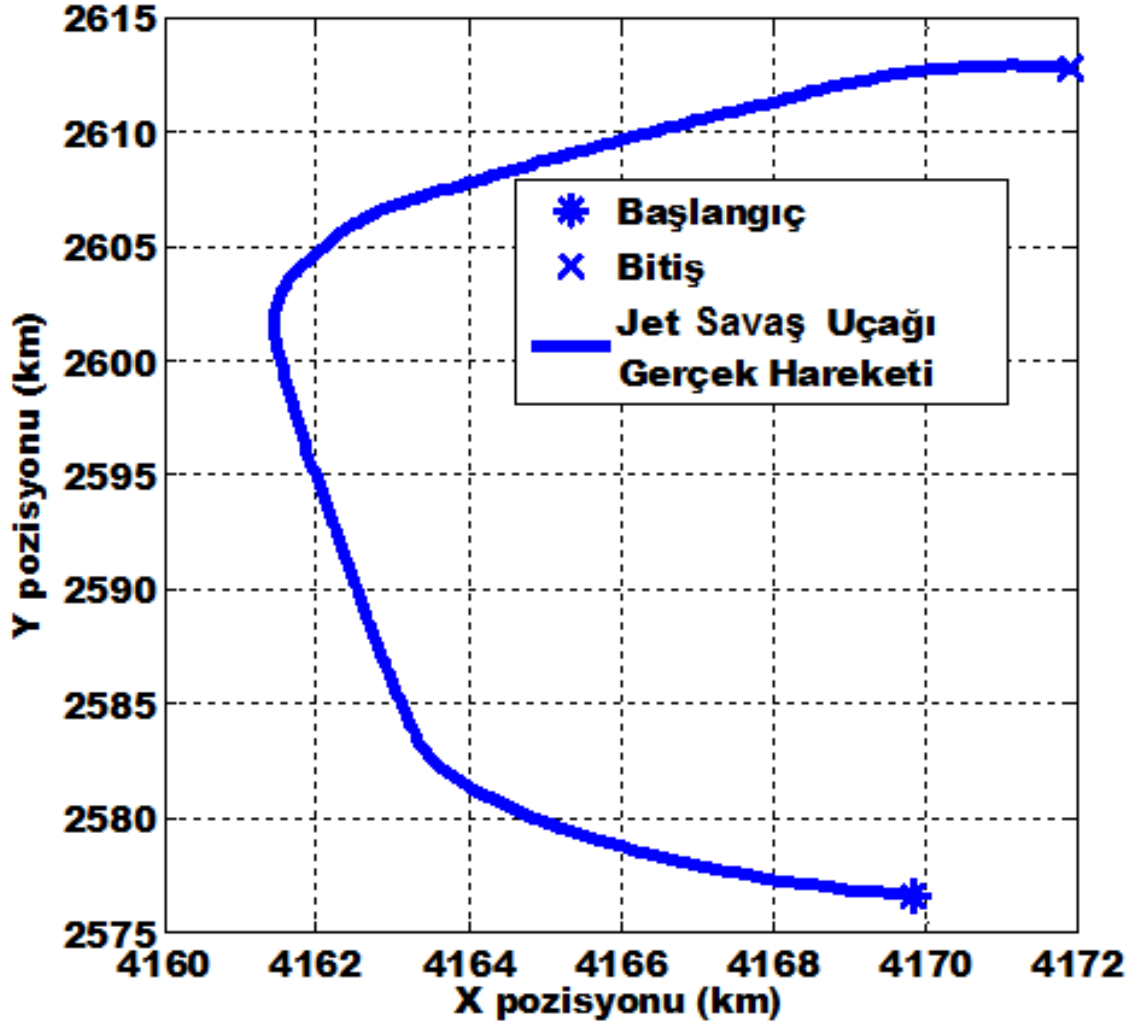
Gerçek jet savaş uçağı uçuş kayıtları kullanılarak üç boyuttan Kartezyen koordinatta iki boyuta indirgenen hareketin izleme işlemi için aşağıda bulunan Çizelge 5.17'de yer alan değişken değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 5.17 Jet savaş uçağı senaryo değişkenleri

Simülasyon değişkenleri	Jet savaş uçağı senaryosu
Alıcı koordinatları (x_i, y_i)	$A_1 = (4000km, 3000km)$ $A_2 = (4000km, 2500km)$ $A_3 = (5000km, 3000km)$ $A_4 = (4500km, 2500km)$
Verici koordinatları(x_i, y_i)	$V_1 = (5000km, 2500km)$
Verici frekansı (f_T)	100 MHz
Ölçüm gürültüsü varyansı	$\sigma_{f_d}^2 = 1 \text{ Hz}^2$ $\sigma_{\theta}^2 = 10^{-4} \text{ rad}^2$ $\sigma_{R_b}^2 = 400 \text{ m}^2$
Sistem gürültüsü varyansı	$\sigma_{\ddot{x}}^2 = 10 \text{ m}^2/\text{s}^4$ $\sigma_{\ddot{y}}^2 = 100 \text{ m}^2/\text{s}^4$
Başlangıç durum vektörü kestirimi $\hat{x}_0 = [x \quad \dot{x} \quad y \quad \dot{y}]^T$	$x = 4260km, \dot{x} = 250 \text{ m/s}$ $y = 2670km, \dot{y} = 250 \text{ m/s}$
Başlangıç kovaryans matrisi kestirimi (P_0)standart sapma değerleri	$\sigma_{\hat{x}_0} = 150km, \sigma_{\dot{x}_0} = 150 \text{ m/s}$ $\sigma_{\hat{y}_0} = 150km, \sigma_{\dot{y}_0} = 150 \text{ m/s}$
Hedef Hareket süresi	200 saniye
Radar tarama periyodu	1 saniye

Hedef takibi için dört alıcı ve FM bantta 100 MHz'de yayın yapan bir verici kullanılmıştır. Daha gerçekçi bir çalışma için ölçüm gürültüsü olduğu düşünülmüş ve buna göre ölçüm gürültüsü varyans değerleri verilmiştir. Sistem gürültüsünün uçağın hızının sabit olmadığı düşünülerek ivme süreci olduğu kabul edilmiştir. Bir saniye olarak alınan radar periyodu sırasında her iki güncelleme arasında uçağın

konumunun değişebileceği ve durum vektörü üzerinde belirsizlik oluşabileceği düşünölmüştür. Başlangıç durum vektörü ve kovaryans matrisi kestirimleri ise izlenmek istenen hedef bir jet uçağı olduğundan ve hangi konumdan geleceği tahmin edildiğinden, bu bilgiler kapsamında verilmiştir. Toplam hedef takibi 200 saniye süresince yapılmış ve radar tarama periyodu 1 saniye olarak alınmıştır.

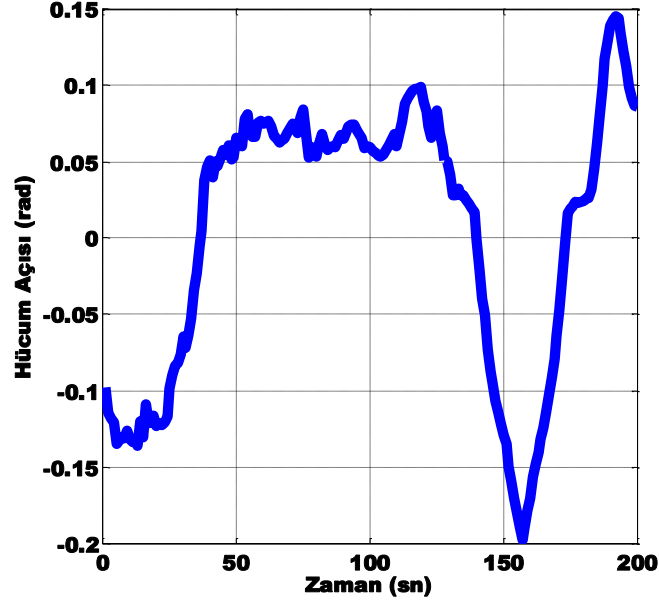


Şekil 5.19 Jet savaş uçağının 2 boyuttaki hareketi

İzlenmek istenen gerçek jet savaş uçağının iki boyuttaki hareketi Şekil 5.19'da verilmiştir. Uçağın ani bir manevra ile dönüş yapıldığı görölmektedir.

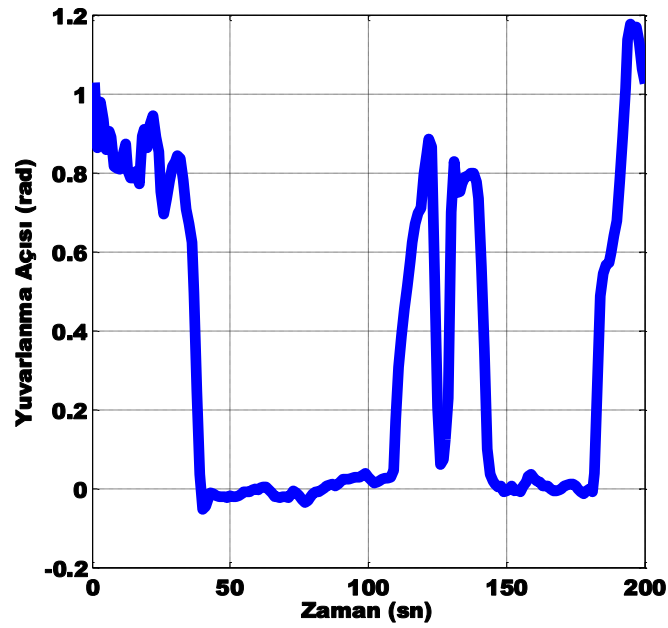
Uçuş kayıtlarından elde edilen verilerden uçağın üç ekseninde yaptığı hareketi daha yakından görmek için hedef izlemesinin gerçekleştirildiği 200 saniye boyunca uçağın hücum açısı, yuvarlanma açısı ve yalpalanma açılarının(pitch, roll, yaw) değişimi Şekil 5.20, 5.21 ve 5.22'de verilmiştir.

Uçak Şekil 5.20'de görüldüğü gibi 40.saniyelere kadar alçalmakta sonrasında bir süre neredeyse irtifasını korumuştur. 140. ve 170. saniyeler arasında uçak irtifa kaybetmektedir. 170 ve 200. saniye arasında ise uçağın irtifası artmaktadır.

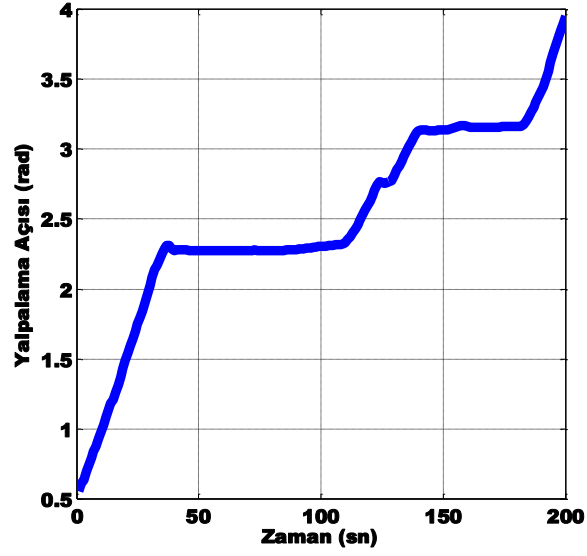


Şekil 5.20 Jet savaş uçağı hücum açısı değişimi

Şekil 5.21'de ise uçağın yuvarlanma açısının belirli sürelerde sabit kaldığı buna ek olarak 0-1.2 radyan aralığında iniş çıkışlar yaptığı görülmektedir.

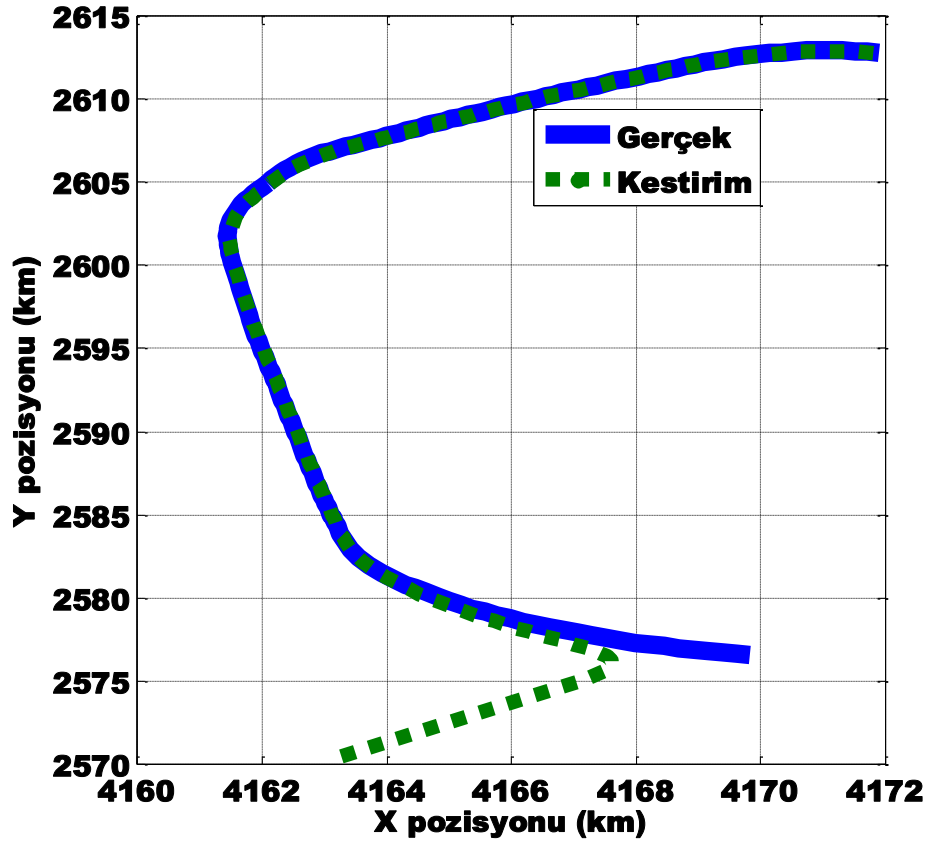


Şekil 5.21 Jet savaş uçağı yuvarlanma açısı değişimi



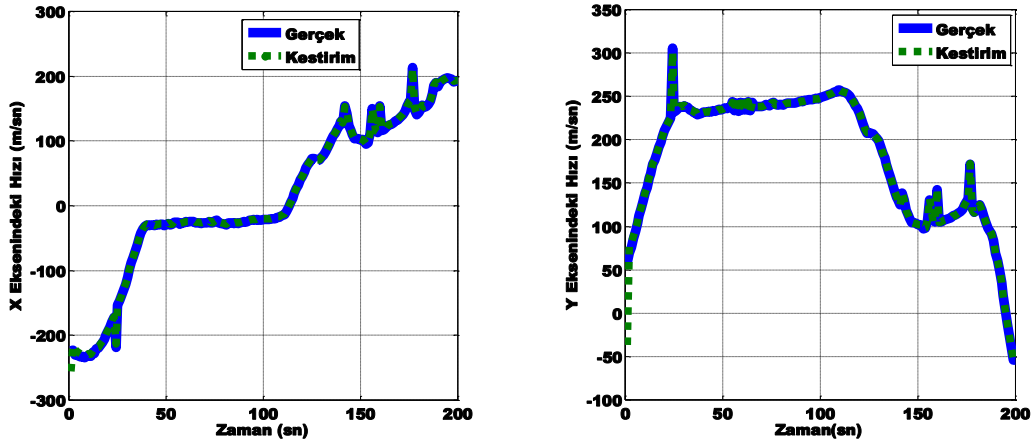
Şekil 5.22 Jet savaş uçağı yalpalanma açısı değişimi

Şekil 5.22’de ise uçağın yalpalanma açısının başlangıçta 0.5 radyan değerinden 4 radyana kadar çıktığı görülebilir. Uçağın baş açısının tamamen değişmiştir.



Şekil 5.23 Jet savaş uçağı hedef takibi

Şekil 5.23'de jet savaş uçağının gerçek hareketi ve iki boyuttaki pozisyon kestiriminin karşılaştırılması verilmiştir. Yapılan gerçek uygulamada 20 taramada x ve y eksenlerindeki pozisyon hatasının 20 metre altına kadar düştüğü görülmüştür. Burada savaş uçağının izlenmesinde daha etkili ve başarılı sonuç alabilmek için farklı filtrelerin kullanımı yapılabilir. Ayrıca bir saniye olarak alınan tarama periyodunu arttırıp gerçek uygulamalarda kullanılacak işlemci gücünün arttırılması daha başarılı sonuç alınmasını sağlayabilir.



Şekil 5.24 Jet savaş uçağı iki boyutta gerçek ve kestirim hızları

Şekil 5.24'de ise jet savaş uçağının iki boyutta gerçek ve kestirim hızlarının karşılaştırılması yer almaktadır. X ekseninde -200 m/s olan hız 200 saniye sonunda 200 m/s'ye çıkmıştır ve kestirimi başarılı bir şekilde yapılmıştır. Y ekseninde ise uçak yaklaşık 50 m/s'lik bir hızla başlamış bu yönde hızını 300 m/s'ye kadar yükseltmiştir. 200 saniye sonunda hızı -50 m/s'ye kadar düşmüştür. Yine kestirim hızındaki başlangıçtaki hataya rağmen kısa sürede radar tarama sayısı arttıkça gerçek ve kestirim hızları eşitlenmiştir.

5.3.3.SNR Değerinin Jet Savaş Uçağının İzlenmesindeki Başarımına Katkısının Uygulamada Gösterilmesi

Yapılan çalışmada jet savaş uçağının pasif multistatik senaryoda FM bantta 100MHz'de yayın yapan bir verici ve dört alıcıdan oluşan radar sistemiyle hedef izleme çalışması yapılmıştır. Burada SNR değerinin hedef izlemedeki başarıma katkısını göstermek için 4 ayrı alıcı istasyondaki alıcı çıkışlarındaki hedefin tespit edildiği ilk andaki SNR değerleri incelenmiş ve bu değerlerin kullanılan tek vericinin menzilinün böylece SNR değerlerinin azalmasının hedef izleme

başarımına nasıl etki edeceği uygulamada gösterilmiştir. Bu analiz için Bölüm-2'deki Eşitlik 2.10 kullanılmıştır. Genel olarak FM banttaki yayın yapan vericinin bastığı güç tipik olarak bilinmektedir ve $P_t G_t$ çarpımı bu yüzden 250 kW olarak aşağıdaki tablodaki gibi alınmıştır. Alıcı kazancı G_r 10 olarak alınmıştır. Ayrıca verici 100MHz'de yayın yaptığı için verici dalga boyu λ , 3 metre olarak alınmıştır. Hedef bir jet savaş uçağı olduğu için bistatik radar kesit alanı 10m^2 kadar olduğu varsayılmaktadır. Verici-hedef ve verici-hedef yayılım faktörü serbest uzayda 1 kabul edilmektedir ve bu yüzden SNR oranını etkilemediği kabul edilmiştir. Boltzman sabiti k $1.38 \cdot 10^{-23}$ olarak, T_s gürültü referans sıcaklığı 290 Kelvin ve alıcı efektif bant genişliği 20 MHz olarak alınmıştır. Ayrıca alıcı-verici kayıpları (L_T, L_R) da ihmal edilmiştir. Bu şekilde aşağıdaki Çizelge 5.18 ve 5.19'daki hedef-alıcı ile hedef-verici arasındaki menzil değerleri kullanılarak Çizelge-5.19'da görülen 4 alıcı çıkışındaki SNR değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 5.18 Pasif multistatik radar sisteminin alıcılarındaki alıcı çıkışlarındaki SNR değerlerinin bulunması için kullanılan değerler

Parametreler	Normal değeri	dB değeri
$P_t G_t$	250kWatt	53.97
G_r	10	10
σ_b	10m^2	10
$kT_s B$	$4.65 \cdot 10^{-15}$	-143.32
$(4\pi)^3$	6234.18	32.97
λ_T	3m	4.77

İzlenmek istenen hedefin konumu, kullanılan 3 alıcı ve 1 vericinin iki boyutta konumları bilindiği için 4 verici istasyonda alıcı çıkışında oluşacak SNR oranı hesaplanabilmektedir. Verici istasyonun konumu değiştirilerek verici-hedef arasındaki menzil arttırılarak SNR azalmış ve SNR değerinin azalmasının hedef izleme başarımına nasıl etki edeceği incelenmiştir.

Çizelge 5.15'den de görüldüğü gibi 4 alıcı istasyon için ilk durumda hedef-verici arasındaki menzil ikinci durumdaki hedef-verici arasındaki menzil değerine göre düşüktür. İkinci senaryoda 4 alıcı istasyondaki alıcı çıkışlarındaki hedefin izlendiği ilk andaki SNR değerlerinin gözle görülür şekilde düştüğü görülmektedir. Bu da izlenmek istenen hedefin daha başarısız ve daha fazla pozisyon hatasıyla

izlenmesine neden olmuştur. Bu uygulamadan da görülebileceği gibi alıcı çıkışıdaki SNR değerlerinin artması durumunda izlenmek istenen hedef daha az hata ve daha başarılı bir şekilde takip edilebilmektedir.

Çizelge 5.19 SNR değerlerinin bulunması için kullanılan alıcı-verici menzil-konum bilgileri, SNR ve \overline{RMSE}_ξ değerleri

Verici ve Alıcı konumları (x, y)	Hedef-Alıcılar ve Hedef-Verici Arasındaki menzil	SNR (dB)	X ve Y pozisyonundaki \overline{RMSE}_ξ değerleri
T=(5000km,2500km) A ₁ =(4000km,3000km) A ₂ =(4000km,2500km) A ₃ =(5000km,3000km) A ₄ =(4500km,2500km)	$R_{R_1} = 456km$ $R_{R_2} = 186km$ $R_{R_3} = 931km$ $R_{R_4} = 338km$ $R_T = 406km$	$SNR_{R_1} = 161$ $SNR_{R_2} = 170$ $SNR_{R_3} = 154$ $SNR_{R_4} = 164$	$X_{\overline{RMSE}_\xi} = 99.72m$ $Y_{\overline{RMSE}_\xi} = 63m$
T=(7000km,5500km) A ₁ =(4000km,3000km) A ₂ =(4000km,2500km) A ₃ =(5000km,3000km) A ₄ =(4500km,2500km)	$R_{R_1} = 456km$ $R_{R_2} = 186km$ $R_{R_3} = 931km$ $R_{R_4} = 338km$ $R_T = 833km$	$SNR_{R_1} = 146$ $SNR_{R_2} = 154$ $SNR_{R_3} = 138$ $SNR_{R_4} = 148$	$X_{\overline{RMSE}_\xi} = 115.1m$ $Y_{\overline{RMSE}_\xi} = 180.2m$

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışması kapsamında, pasif radar sistemlerinin tarihsel gelişimi, çeşitleri, geometrisi ve çalışma prensipleri incelenmiştir. FM ve televizyon bantlarında yayın yapan bir verici ile değişik sayıda alıcılar kullanılarak Pasif Radar modellemesi yapılmış, iki boyutta oluşturulmuş farklı hedef hareket modelleri ve gerçek uçuş hareketleri için hedef izleme algoritmaları geliştirilmiştir. Literatürde genelde ölçüm olarak Doppler, yanca açısı ve bistatik mesafe verilerinden iki veri tipi kullanılarak yapılan pasif hedef izleme çalışmalardan farklı olarak bu üç ölçüm verisi de kullanılarak pasif hedef izleme yapılmıştır. Bu şekilde ölçüm sayısı artırılmış, pozisyon ve hız kestirim hatalarında iyileşme görülmüş ve daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca bistatik ve multistatik senaryoda pasif hedef izleme çalışmaları yapılmış, verici sayısı sabit tutularak alıcı sayısının artırılmasıyla elde edilen ölçüm sayısının artırıldığı multistatik senaryoda başarımlı analizinde kullanılan zaman ortalamalı RMS pozisyon ve hız hatalarının azalması nedeniyle daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bistatik senaryoda yetersiz ölçüm olması nedeniyle GKF'nin ölçüm doğrusallaştırması sırasında ıraksadığı ve filtrenin gerçek ve kestirim arasındaki hatayı filtreleyememesi nedeniyle durum kestirimi için GKF yerine farklı filtreler kullanılması gerekliliği anlaşılmıştır.

Ölçüm hatasının artması durumunda hedef takibi sırasında x ve y pozisyonlarında RMS hatasının zaman ortalaması değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Hedef takibinin başarısının ölçüm bilgisinin kalitesi ile değişkenlik gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Hedef takip filtresinin yüksek hata ile başlatılmasının benzetiminin yapıldığı durumlarda zaman ortalamalı RMS hedef takip hatası büyümüş ve hedef takibi başarısız bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Kestirim başarımının, ölçüm sayısı (sistemdeki verici ve alıcı sayısı) ile ilgili olduğu kadar benzetimdeki hedefin manevra senaryosu ve sistem geometrisi ile de ilgili olduğu gözlenmiştir.

Sonuç olarak yapılan tez çalışması gerçek pasif radar sisteminin hedef izleme uygulamaları için yol gösterici olmuştur. İleride yapılacak çalışmalarda iki boyuttan üç boyutta hedef izlemeye geçiş ve gerçek uygulamalarda izlenen platformun yaptığı hareket bilinmediği için farklı sistem gürültü matrisleri arasında geçiş yapmayı sağlayan, yapılan hareketi algılayarak harekete göre kullanılan filtrenin

düzenlenebildiği Etkileşimli Çoklu Model'in(IMM) analiz edilerek yapılacak uygulamada kullanılması düşünölmektedir. Filtre olaraksa gerçek uçuş veri kayıtlarının izletilmesi sırasında alınan sonuçların daha hassas olması (yani kestirim hatasının daha az olması) ve daha kısa sürede gerçek durum vektörüne yakın kestirimler vermeleri nedeniyle literatürde Genişletilmiş Kalman Filtre'ye göre daha başarılı sonuçlar verdiği bilinen unscented ve parçacık(particle) filtrelerinin kullanılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York, **1980**.
- [2] IEEE Standard Radar Definitions, *IEEE Std 686-1997*, September 16, New York, **1997**.
- [3] Christian Wolff <http://www.radartutorial.eu/index.tr.html> (Eylül, **2013**)
- [4] Willis, N.C., *Bistatic radar*, Artech House, **1991**.
- [5] Willis, N.J., Bistatic radars and their third resurgence: passive coherent location, *IEEE Radar Conference*, Long Beach, USA, April **2002**.
- [6] Skolnik, M.I., *Radar handbook*, McGraw-Hill, 2nd edn, Chap. 25, **1990**.
- [7] Taylor, A. H., L. C. Young, and L. A. Hyland: U.S. Patent 1,981,884, *System for Detecting Objects by Radio*, Nov. 27, **1934**.
- [8] D. K. Barton, S. A. Leonov. , *Radar Technology Encyclopedia*, Artech House, **1998**.
- [9] Prof. Chris J. Baker CE 5194.01: An Introduction to Radar Systems LectureNotes, <http://esl.eng.ohio-state.edu/~cbaker/notes.html>(Eylül,**2013**)
- [10] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using Matlab*, Chapman &Hall, London, **2000**.
- [11] N. Willis and H. D. Griffiths, Eds., *Advances in Bistatic Radar*, Scitech Publnc, **2007**.
- [12] Karl Erik Olsen, *Investigation of Bandwidth Utilisation Methods to Optimise Performance in Passive Bistatic Radar*, Thesis for Doctor of Philosophy of the University of London, **2011**.
- [13] Watson-Watt, R., *Three Steps to Victory*, Oldhams Press, Ltd., London, **1957**.
- [14] Swords, S.S., Technical History of the Beginnings of RADAR, *IEE History of Technology Series*, Vol. 6, Peter Peregrinus, London, **1986**.
- [15] Johnson, B., *The Secret War*, Methuen, Inc., New York, **1978**.
- [16] Baniak, J., Baker, G., Cunningham, A.M., and Martin, L., Silent Sentry passive surveillance, *Aviat. Space Technol.*, 7 June **1999**.
- [17] P. G. Lloyd, G. L. Harris, B. P. Stothard, *Passive moving object detection system and method using signals transmitted*, Patent Number: 6930638 Roke Manor Research Limited, 25 July **2002**.
- [18] Sahr, J.D., and Lind, F.D.: The Manastash Ridge radar: a passive bistatic radar for upper atmospheric radio science, *Radio Sci.*, **1997**.
- [19] Zoeller, C.L., Budge, Jr., M.C., and Moody, M.: Passive coherent location radar demonstration. Proc. Thirty-Fourth *Southeastern Symp. on System Theory*, 18–19 March, pp. 358–362, **2002**.
- [20] Griffiths, H.D., and Long, N.R.W.: Television based bistatic radar, *IEE Proc. F, Commun. Radar Signal Process.*, 133, (7),pp. 649–657, **1986**.

- [21] Griffiths, H.D.: From a different perspective: principles, practice and potential of bistatic radar, *Proc. Int. Conf. RADAR 2003*, Adelaide, Australia, 3–5 September, pp. 1–7, **2003**.
- [22] Trizna, D., and Gordon, J., Results of a bistatic HF radar surface wave sea scatter experiment, *Proc. IGARSS*, Vol. 3, 24–28, pp. 1902–1904, June **2002**.
- [23] Cherniakov, M., Nezlin, D. and Kubik, K., Air target detection via bistatic radar based on LEOS communication signals, *IEE Proc. Radar Sonar and Navigation*, Vol. 149, No. 1, pp33-38, February **2002**.
- [24] P.E. Howland, D. Maksimiuk and G. Reitsma, FM radio based bistatic radar, *IEE Proceedings on Radar Sonar Navigation*, vol. 152, no. 3, June **2005**.
- [25] Howland, P.E., Target tracking using television-based bistatic radar, *IEE Proc., Radar Sonar Navig.*, 146, (3), pp. 166–174, **1999**.
- [26] Howland, P., Passive tracking of airborne targets using only Doppler and DOA information, *IEE Colloquium on Algorithms for Target Tracking*, pp. 37–39, **1995**.
- [27] Ratnasingham Tharmarasa, Thia Kirubarajan and Mike McDonald, Passive Multitarget Tracking Using Transmitters of Opportunity, *Proceedings of the 2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Security and Defense Applications*, **2009**.
- [28] M. Daun, and W. Koch, Multistatic target tracking for non-cooperative illumination by DAB/DVB-T, *IEEE Radar Conference*, Rome **2008**.
- [29] Koch, V., and Westphal, R., New approach to a multistatic passive radar sensor for air/space defence, *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, **1995**.
- [30] Elirman, L.M., and Lanterman, A.D., A robust algorithm for automatic target recognition using passive radar, *Proc. Thirty-Sixth Southeastern Symp. on System Theory*, 14–16 March, pp. 102–106, **2004**.
- [31] Griffiths, H. D., Bistatic and Multistatic Radar, *IEE Military Radar Seminar*, Shrivenham, UK., **2004** .
- [32] Steffen Marquard, Suitability of Multi-Static Surveillance Systems For Aeronautical Use (Passive Radar), *AERONAUTICAL SURVEILLANCE PANEL 12 th Meeting of The Working Group*, Montreal, April **2012**.
- [33] Dr Carlo Kopp, *Warsaw Pact / Russian / PLA Emitter Locating Systems / ELINT Systems Technical Report APA-TR-2008-0503* May, 2008 Last Updated April, **2012**.
- [34] SELEX, Aulos Passive Covert Location Radar, <http://www.selex-si-uk.com/pdf/Aulos.pdf>(Eylül, **2013**)
- [35] THALES, HA100 Passive Radar, http://www.thalesgroup.com/Press_Releases/Group/2010/The_HA100_passive_radar_from_Thales_to_play_a_role_in_protecting_the_flypast_on_14th_July_in_Paris/ (Eylül, **2013**)

- [36] S. Kingsley and S. Quegan, *Understanding Radar Systems*, McGraw-Hill Book Company Europe, Amsterdam, The Netherlands, **1992**.
- [37] G. W. Stimson, *Introduction to Aireborne Radar*, SciTech Publishing Inc., second edition, **1998**.
- [38] Griffiths, H.D., Baker, C.J., Passive coherent location radar systems.Part 1: performance prediction, *IEE Proc. Radar Sonar Navig.*, 152, (3), pp. 153–159, **2005**.
- [39] J. Ferrier, M. Klein, and S. Allam, Frequency and Waveform Complementarities for Passive Radar Applications, in *International Radar Symposium 2009*, September **2009**.
- [40] Y. Bar-Shalom, X. R. Li, *Estimation and Tracking: Principles, Techniques, and Software*, Artech House, **1993**.
- [41] Yaakov Bar-Shalom, X. Rong Li, Thiagalingam Kirubarajan, *Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software*, **2001**.
- [42] Hall, D.L, Llinas, J., *Handbook of Multisensor Data Fusion*, CRC Press, 537, USA, **2001**.
- [43] Dean A. Wilson, *Analysis of Tracking and Identification Characteristics of Diverse Systems and Data Sources for Sensor Fusion*, Naval Postgraduate school Thesis, June **2001**.
- [44] Esteban, J. Starr, A. Willets, R. Hannah, P. Cross, P., A Review of DataFusion Models and Architectures: Towards Engineering Guidelines, *Neural Computing&Applications*, 273-281, London, **2005**.
- [45] Kalman R. E., A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering*, Vol.82 pp. 35-45. Kalman, **1960**.
- [46] Grewal M. S., Andrews A. P., *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*, Second Edition, John Wiley & Sons, New York., **2001**.
- [47] Blackman S., Popoli R., *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*, Artech House, Norwood., **1999**.
- [48] S. S. Haykin, *Kalman Filtering and Neural Networks*, John Wiley & Sons, Inc., **2001**.
- [49] P. D. Moral, Non-linear filtering: Interacting particle solution, ser. Markov Processes Related Field, vol. 2, no. 4., **1996**.
- [50] E. A. Wan and R. V. der Merwe, The unscented kalman filter for Nonlinear estimation, *Proc. Symp. Adaptive Syst. Signal Process., Commun. Contr.*, Oct **2000**.
- [51] Conversions of latitude types, xyz-lat, lon, height –Equations, James R. Clynch, <http://clynchg3c.com/Technote/Tnotes.htm> (Ocak, **2014**)
- [52] Jackson, M.C., The geometry of bistatic radar systems; *IEE Proc.*, Vol.133 Pt.F, No.7, pp604-612, December **1986**.

- [53] A. Doucet, N. De Freitas, N. Gordon, *Sequential Monte Carlo Methods in Practice*, Springer, **2001**.
- [54] <http://www.lockheedmartin.com/us/products/f16/F-16Specifications.html>
(Kasim, **2013**)

EK

A. Kalman Filtre

Eşitlik A.1'de doğrusal bir rasgele sürecin kesikli zamandaki değişimini gösteren model verilmiştir. Burada sistemin zaman içinde değişen durum parametresi gösterilmiştir. Sistem durum parametresinin kestirimini bulmak için kesikli zamanda yapılan ölçümler ise Eşitlik A.2'de gösterilmektedir.

$$x_k = f(x_{k-1}, w_k) \quad (\text{A.1})$$

$$z_k = h(x_k, v_k) \quad (\text{A.2})$$

w_k, v_k sırasıyla süreç ve ölçüm gürültüleridir. w_k ve v_k belirsizlikleri Gauss dağılımlı, kovaryans matrisleri bilinen(Eşitlik 3.5, 3.6), sıfır ortalamalı(Eşitlik A.3) ve ilintisizdir (Eşitlik A.4).

$$E[w_k] = E[v_k] = 0 \text{ tüm } k \text{ değerleri için} \quad (\text{A.3})$$

$$E[w_k v_i^T] = 0 \text{ tüm } k, i \text{ değerleri için} \quad (\text{A.4})$$

$$E[w_k w_k^T] = Q_k \quad (\text{A.5})$$

$$E[v_k v_k^T] = R_k \quad (\text{A.6})$$

Süreç gürültüsünün (w_k) ortalaması ve kovaryans matrisi (Q_k) aşağıdaki Eşitlik A.7'de ifade edilmiştir.

$$E[w_k] = 0, \quad Q_k = E[w_k w_k^T] = \begin{bmatrix} E[w_{1k}^2] & 0 & \dots & 0 \\ 0 & E[w_{2k}^2] & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & E[w_{n_k}^2] \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

Ölçüm gürültüsünün v_k ortalaması ve kovaryans matrisi R_k ise Eşitlik A.8'de gösterilmiştir.

$$E[v_k] = 0, \quad R_k = E[v_k v_k^T] = \begin{bmatrix} E[v_{1k}^2] & 0 & \dots & 0 \\ 0 & E[v_{2k}^2] & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & E[v_{n_k}^2] \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

f ve h fonksiyonlarının doğrusal ve gürültülerin sıfır ortalamalı Gauss dağılımlı olduğu kabul edildiğinde, buna göre modellenen $x(k)$ durumunun Kalman Filtresi

ile kestirimini ifade eden eşitlikler Eşitlik [(A.9)- (A.15)]’de verilmiştir. Eşitlik A.9 ve A.10 ‘da ön tahmin işlemi yani model güncelleme eşitlikleri verilmiştir. Eşitlik A-9’daki $\hat{x}_{k|k}$ başlangıç durum kestirimi, $\hat{x}_{k+1|k}$ ise ilk durum kestirimidir. Bunlar sırasıyla t_k ve t_{k+1} anlarındaki x_k durum vektörünün kestirim değerlerini ifade etmektedir. F_k bunlar arasındaki ilişkilendirme işlemi yapan geçiş matrisini, u_k sistem gürültüsünü, son olarak G_k sistem gürültü geçiş matrisini ifade etmektedir. Eşitlik A.10’da ilk kovaryans matrisi $P_{k+1|k}$ ifade edilmektedir. $P_{k|k}$ ise başlangıç kovaryans matrisidir. Q_k süreç gürültüsü kovaryans matrisi, Γ_k ise süreç gürültüsü geçiş matrisini ifade eder.

$$\hat{x}_{k+1|k} = F_k \hat{x}_{k|k} + G_k u_k \quad (\text{A.9})$$

$$P_{k+1|k} = F_k P_{k|k} F_k^T + \Gamma_k Q_k \Gamma_k^T \quad (\text{A.10})$$

Bir sonraki adım ölçüm güncellemelerinin yapıldığı doğrulama adımıdır. En başta Eşitlik A.11’de ölçüm artanı V_{k+1} hesaplanır. Burada z_{k+1} , t_{k+1} anındaki ölçümleri ifade eder. H_{k+1} ise ölçüm ilk kestiriminin ($H_{k+1} \hat{x}_{k+1|k}$) elde edilmesinde kullanılan ölçüm matrisidir. Eşitlik A.12’de S_{k+1} artık kovaryanstır. Hesaplanması sırasında ölçüm gürültüsü kovaryans matrisi R_{k+1} ’de kullanılmaktadır.

$$V_{k+1} = z_{k+1} - H_{k+1} \hat{x}_{k+1|k} \quad (\text{A.11})$$

$$S_{k+1} = H_{k+1} P_{k+1|k} H_{k+1}^T + R_{k+1} \quad (\text{A.12})$$

Sonrasında ilk kovaryans matrisi, ölçüm matrisi ve artık kovaryans kullanılarak Eşitlik A.13’deki Kalman kazancının K_{k+1} hesaplama işlemi yapılır.

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} H_{k+1}^T S_{k+1}^{-1} \quad (\text{A.13})$$

En son aşamada doğrulama adımları vardır. Hesaplanan kalman kazancına göre Eşitlik A.14’deki sonsal durum kestirimi $\hat{x}_{k+1|k+1}$ ve Eşitlik A.15’deki kovaryans matrisi $P_{k+1|k+1}$ hesaplanarak filtre sonlandırılır.

$$\hat{x}_{k+1|k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1} V_{k+1} \quad (\text{A.14})$$

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1} H_{k+1}) P_{k+1|k} \quad (\text{A.15})$$

B. Monte Carlo Simülasyonu

Durum kestiriminde hedef takibi başarım analizi yapılırken Monte Carlo Simülasyonu [53] kullanılmıştır. Simülasyon değişen ölçüm gürültülerine göre N_S bağımsız örnek için çalıştırılmıştır. Performans hesaplamasında kullanılan metrik durum kestirimi sırasındaki hatadır. $\xi(t)$ t anındaki durum vektöründeki gerçek değer, $\hat{\xi}_i(t)$ ise i . Monte Carlo örneğindeki kestirimdir. Hesaplanan metrik kare ortalamasının karekökü hatasıdır.

$$RMSE_{\xi}(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_S} \frac{(\hat{\xi}_i(t) - \xi(t))^2}{N_S}} \quad (B.1)$$

$$\overline{RMSE}_{\xi} = \frac{1}{N_{scan}} \sum_{t=1}^{N_{scan}} RMSE_{\xi}(t) \quad (B.2)$$

Yukarıda Eşitlik B.1'deki $RMSE_{\xi}(t)$ metriği t anındaki kestirim hatasının standart sapmasını, Eşitlik B.2'deki \overline{RMSE}_{ξ} ise N_{scan} sayıda radar taraması boyunca ortalama değeri göstermektedir. Başarım analizinde değişen ölçüm gürültüleri sonucunda çalıştırılan simülasyonlardan elde edilen değerler kullanılarak hesaplanan \overline{RMSE}_{ξ} değeri kullanılmıştır.

C. Alıcıdaki Sinyal Modeli

R_T, R_R ve L terimleri ile birlikte bistatik radar geometrisi Bölüm-4 ve Şekil 4.2'de verilmiştir. FM vericiden f_c taşıyıcı frekansı ile ϕ_c anlık faz ile yayımlanan sinyal alıcı tarafında aşağıdaki gibi alınmaktadır. Burada herhangi çokyolluluk olmadığı ve elektromanyetik dalganın ideal bir hava yayılımı gerçekleştirdiği varsayılmıştır.

$$U(t) = \Re\{u(t)e^{j2\pi(f_c t + \phi_c)}\} \quad (C.1)$$

Faz değişimi ϕ_L ile ifade edilir. c ışık hızını ifade etmektedir. Vericiden L uzaklıkta bulunan alıcı referans antenine sinyali ulaşması t_L saniye kadar sürer.

$$\phi_L = f_c \frac{L}{c} = f_c t_L \quad (C.2)$$

Alıcı tarafında referans anteni ile alınan ve verici tarafından t_L saniye önce yayımlanan referans sinyali aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$U_{ref}(t) = U(t - t_L) = \Re\{\alpha_{ref} u_{ref}(t - t_L) e^{j2\pi(f_c t - f_c t_L + \phi_c)}\} \quad (C.3)$$

α değeri vericiden alıcıya olan yayılım sırasında hesaba katılan genlik zayıflaması parametresidir. Örnek olarak yukarıda verilen varsayımlardaki serbest uzay parametresi gösterilebilir.

Eşitlik C.1'de FM radyo verici sinyalinin hava hedefinden yukarıdaki şekildeki bilgilere göre yansıdığı varsayılırsa yayım yapılan sinyalin hedefe çarparak alıcı tarafından alınması sırasında $R = R_T + R_R$ yolunu almaktadır. Burada geçen toplam süre elektromanyetik dalganın vericiden hedefe ulaşması ve hedeften yansıyarak alıcıya gelene kadar geçen sürenin toplamı ile bulunur.

$$t_T + t_R = \frac{R_T}{c} + \frac{R_R}{c} \quad (C.4)$$

Daha sonra alıcıdaki sinyalin fazı bundan sonraki iki adıma göre aşağıdaki gibi değişmektedir.

$$\phi_T = f_c t_T \quad (C.5)$$

Elektromanyetik dalga hedeften yansımadan önce f_D 'lik bir Doppler kaymasına maruz kalmaktadır. Hedeften alıcıya Doppler kayması ile birlikte yayılımı olur ve hedeften alıcıya faz değişimi aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\phi_R = (f_c + f_D)t_R \quad (C.6)$$

Bundan sonra alıcıda alınan hedeften yansıyan eko sinyali aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$U_{sur}(t) = \Re\{\alpha_{sur}u_{sur}(t - t_T - t_R)e^{j2\pi((f_c+f_D)t - f_c t_T - (f_c+f_D)t_R + \phi_c)}\} \quad (C.7)$$

α_{sur} verici-hedef-alıcı yayılımı için serbest uzay yayılım faktörüdür. Referans sinyalinin alıcıda olabilmesi için menzil sıfır alındığında t_L ihmal edilir ve $t \rightarrow t + t_L$ olur. Buna göre eşitlik C.3 ve C.7 aşağıdaki şekilde C.8 ve C.9 olarak elde edilir. Aşağıda v değeri $v = t_T + t_R - t_L$ olarak alınmıştır.

$$U_{ref}(t) = \Re\{\alpha_{ref}u_{ref}(t)e^{j2\pi(f_c t + \phi_c)}\} \quad (C.8)$$

$$U_{sur}(t) = \Re\{\alpha_{sur}u_{sur}(t - v)e^{j2\pi((f_c+f_D)t - f_c v - (t_R - t_L)f_D + \phi_c)}\} \quad (C.9)$$

Gerçek uygulamalarda gelen sinyalin genliği ve fazı sabit α değildir ve zamanla değişmektedir. Hedefin vericiden gelen sinyali yansıtma durumu, çokyolluluk, kırınım ve kırılım gibi durumlardan ötürü alıcıya gelen sinyalin genliği ve fazı zamanla değişen kompleks bir fonksiyondur $\alpha(t)$.

$$U_{ref}(t) = \Re\{\alpha_{ref}(t)u_{ref}(t)e^{j2\pi(f_c t + \phi_c)}\} \quad (C.10)$$

$$U_{sur}(t) = \Re\{\alpha_{sur}(t - v)u_{sur}(t - v)e^{j2\pi((f_c+f_D)t - f_c v - (t_R - t_L)f_D + \phi_c)}\} \quad (C.11)$$

Euler formülü $e^{jx} = \cos x + j\sin x$ kullanılarak $\Re\{e^{j2\pi(f_c t + \phi_c)}\} = \cos(2\pi(f_c t + \phi_c))$ elde edilir. Alınan sinyal alta modüle edilmiş ve f_x ile örneklenmiştir. Bu yüzden aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\cos(2\pi(f_c t + \phi_c)) e^{-j2\pi f_x t} = \frac{1}{2} [e^{j2\pi((f_c - f_x)t + \phi_c)} + e^{-j2\pi((f_c + f_x)t + \phi_c)}] \quad (C.12)$$

Yüksek frekans bileşenini filtreleyerek $f = f_c + f_x$ alınan ve alta modüle edilen sinyali aşağıdaki gibi olur [12].

$$U_{ref}(t) = \alpha_{ref}(t)u_{ref}(t)e^{j2\pi((f_c - f_{ref})t + \phi_c)} \quad (C.13)$$

$$U_{sur}(t) = \alpha_{sur}(t - v)u_{sur}(t - v)e^{j2\pi((f_c + f_D - f_{sur})t - f_c v - (t_R - t_L)f_D + \phi_c)} \quad (C.14)$$

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Burak MANAVOĞLU
Doğum Yeri : ANKARA
Medeni Hali : Bekar
E-posta : burakmanavoglu@gmail.com
Adresi : 19.Sokak 103/4 EMEK/ANKARA

Eğitim

Lise : 2000-2003 Dr.Binnaz Rıdvan Ege Anadolu Lisesi, Ankara
Lisans : 2004-2008 Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik
Mühendisliği Bölümü, Ankara
Yüksek Lisans : 2009-2014 Hacettepe Üniversitesi Elektrik-Elektronik
Mühendisliği Bölümü, Ankara

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce – İyi

İş Deneyimi

2008-2010 Yazılım Mühendisi, Adalet Bakanlığı Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı
2010- Aviyonik Sistem Tasarım Mühendisi, TAI -TUSAŞ A.Ş.

Deneyim Alanları

Aviyonik, Sistem Mühendisliği, Yazılım Mühendisliği

Tezden Üretilmiş Yayınlar

USMOS 2013 - Pasif Radarda Hedef İzleme Modellenmesi ve Simülasyonu