

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

**ÇOKLU HAREKETLİ PLATFORM GEOLOKASYON TEKNİĞİNİN
MODELLENMESİ VE OPTİMUM UÇUŞ ROTASININ BELİRLENMESİ**

HAZIRLAYAN

UMUT SALANTUROĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA – 2024

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

**ÇOKLU HAREKETLİ PLATFORM GEOLOKASYON TEKNİĞİNİN
MODELLENMESİ VE OPTİMUM UÇUŞ ROTASININ BELİRLENMESİ**

HAZIRLAYAN

UMUT SALANTUROĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. AHMET GÜNGÖR PAKFİLİZ

ANKARA – 2024

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Umut SALANTUROĞLU tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 22 / 05 / 2024

Tez Adı: Çoklu Hareketli Platform Geolokasyon Tekniğinin Modellenmesi ve Optimum Uçuş Rotasının Belirlenmesi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)	İmza
Doç. Dr. Ahmet Güngör PAKFİLİZ, OSTİM Teknik Üniversitesi	
Dr. Öğr. Üyesi Murat ÜÇÜNCÜ, Başkent Üniversitesi	
Dr. Öğr. Üyesi Şenol GÜLGÖNÜL, OSTİM Teknik Üniversitesi	

ONAY

Prof. Dr. Faruk ELALDI
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 31 / 05 / 2024

Öğrencinin Adı, Soyadı : Umut SALANTUROĞLU

Öğrencinin Numarası : 22110373

Anabilim Dalı : Elektrik Elektronik Mühendisliği

Programı : Elektrik Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Doç. Dr. Ahmet Güngör PAKFİLİZ

Tez Başlığı : Çoklu Hareketli Platform Geolokasyon Tekniğinin Modellenmesi ve Optimum Uçuş Rotasının Belirlenmesi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 64 sayfalık kısmına ilişkin, 31 / 05 / 2024 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %2'dir. Uygulanan filtrelemeler:

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

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

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

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

Öğrenci Danışmanı

Doç. Dr. Ahmet Güngör PAKFİLİZ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana yol gösteren tez danışmanım Doç. Dr. Ahmet Güngör PAKF L Z'e değerli katkılarından dolayı saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman çalışmalarımda bana destek olan Busem'e, aileme ve çalışma arkadaşlarıma sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Umut SALANTUROĞLU

ÇOKLU HAREKETLİ PLATFORM GEOLOKASYON TEKNİĞİNİN MODELLENMESİ VE OPTİMUM UÇUŞ ROTASININ BELİRLENMESİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2024

Bu tez çalışması, hava platformlarının yer yüzeyindeki Radyo Frekansı (RF) tehditlerin konumlarını tespit etmek için askeri uygulamalarda kullanılan geolokasyon tekniğinin performansını iyileştirmek için gerekli uçuş manevralarının planlanmasına odaklanır. Coğrafi konum hesaplama hatalarını azaltmak için tehdidin daha geniş açılardan gözlemlenmesinin gerekliliği vurgulanmaktadır. Yapılan analizlerle geolokasyon tekniğinin hassasiyetini artıran optimum başlık açısı değerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Optimum baş açısı değerlerinin belirlenmesiyle RF sinyal kaynaklarının konumlarını daha doğru bulunmasını sağlayacak optimize bir rotanın kurulabileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu çalışmada, geolokasyon performansı ve süresi üzerinde birden fazla platformun kullanımının etkilerini incelemektedir. Rota optimizasyonu olmadan iki platform kullanılarak yapılan geolokasyonun, geolokasyon süresinin kısalması ve konum hesaplama hatalarının azalmasıyla sonuçlandığı gözlemlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Geolokasyon, Üçgenleme, Çoklu Platform, Rota Optimizasyonu.

ABSTRACT

Umut SALANTUROĞLU

**MODELING OF MULTI-PLATFORM GEOLOCATION TECHNIQUE AND
DETERMINATION OF OPTIMUM FLIGHT ROUTE**

Başkent University Institute of Science and Engineering

Department of Electrical and Electronics Engineering

2024

This thesis presents using geolocation techniques in military applications, specifically focusing on planning flight maneuvers for aerial platforms to locate ground Radio Frequency (RF) threats accurately. The necessity of observing the threat from wider angles to mitigate geographical positioning errors is emphasized. Through the analysis, the aim is to determine the optimum heading angle value that enhances the precision of the geolocation technique. It has been noted that determining optimal heading angle values enables the establishment of an optimized route, ultimately facilitating more accurate localization of RF signal sources. Moreover, this thesis examines the effects of using multiple platforms on geolocation performance and duration. It has been observed that geolocation duration is reduced and location calculation errors are decreased with geolocation using two platforms without route optimization.

KEYWORDS: Geolocation, Triangulation, Multi-Platform, Route Optimization.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Problem Tanımı	2
1.2. Çözüm Metodu.....	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. YÖN BULMA VE GEOLOKASYON	7
3.1. Yön Bulma Teknikleri.....	8
3.1.1. Genlik karşılaştırma	8
3.1.2. Faz karşılaştırma	12
3.1.3. Geliş zamanı farkı	14
3.2. Yön Bulma Hataları	16
3.2.1. Anten yerleşimi.....	16
3.2.2. Ölçüm hassasiyeti.....	16
3.2.3. Çoklu yol (multi path) etkisi	17
3.3. Geolokasyon	18
4. GEOLOKASYON ALGORİTMASI.....	20
4.1. Algoritmada Kullanılan Parametreler	20
4.2. Üçgenleme Methodu	21
5. SİMÜLASYON MODELİ	27
5.1. Platform Hareketinin ve Sinyal Yön Ölçümünün Modellenmesi	27
5.2. Yön Ölçüm Hataların Modellenmesi	29
5.3. Hata Elipslerinin Hesaplanması.....	32
6. PLATFORM HAREKETİNİN İNCELENMESİ.....	36
7. ROTA OPTİMİZASYONU	40
7.1. Bir Tehditte Göre Rota Optimizasyonu	40

7.1.1. Problemin analitik çözümü	42
7.1.2. Problemin doğrusal olmayan çözümü.....	45
7.2. Çoklu Tehditlere Göre Rota Optimizasyonu	51
8. ÇOKLU PLATFORM GEOLOKASYON MODELİ.....	56
8.1. Çoklu Platform Üçgenleme Methodu	57
8.2. Bir Tehdide Göre Çoklu Platform Geolokasyon	61
9. SONUÇLAR	63
KAYNAKLAR.....	65

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Geolokasyon Parametreleri ve Gerekli Donanımlar	20
Tablo 4.2. Üçgenlemede Kullanılan Veriler	22
Tablo 5.1. Güven Seviyesine Göre C Değerleri.....	33
Tablo 5.2. Geolokasyon Hata Elipsi ve CEP değerleri	35
Tablo 6.1. Senaryo 1 Hata Elipsi Değerleri.....	37
Tablo 6.2. Senaryo 2 Hata Elipsi Değerleri.....	38
Tablo 7.1. fmincon Parametreleri.....	46
Tablo 7.2. Bir Tehdit Rota Optimizasyonu Senaryosu Hata Elipsi Değerleri	49
Tablo 7.3. Bir Tehdit Uzun Süreli Rota Optimizasyonu Senaryosu Hata Elipsi Değerleri	51
Tablo 7.4. Çoklu Tehditler Rota Optimizasyonu Senaryosu Hata Elipsi Değerleri	55
Tablo 8.1. Çoklu Platform Geolokasyonda Kullanılan Veriler.....	56
Tablo 8.2. Çoklu Platform Senaryosu Hata Elipsi Değerleri	62

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Savaş Uçağının 360° ED Kapsama Alanı	8
Şekil 3.2. Genlik Karşılaştırma Anten Yerleşimi	9
Şekil 3.3. Genlik Karşılaştırma	10
Şekil 3.4. Faz Karşılaştırma Anten Yerleşimi	12
Şekil 3.5. Faz Karşılaştırma Geometrisi	13
Şekil 3.6. Geliş Zamanı Farkı Yöntemi Anten Yerleşimi	14
Şekil 3.7. Geliş Zamanı Farkı Yöntemi Geometrisi	15
Şekil 3.8. Çoklu Yol Etkisi	17
Şekil 3.9. Geolokasyon Senaryosu	18
Şekil 3.10. Çoklu Platform Geolokasyon Senaryosu	19
Şekil 4.1. RF Sinyal Ayrıştırma ve Kimliklendirme	21
Şekil 4.2. Üçgenleme Methodu Geometrisi	21
Şekil 4.3. Farklı Baş Açılı Üçgenleme Geometrisi	23
Şekil 4.4. Baş Açısı Değişikliğinin Düzeltmesi Geometrisi	24
Şekil 5.1. Platform Hareketi ve Sinyal Geliş Yönleri	28
Şekil 5.2. İdeal Durumda Tehdit Konumu Ölçümü	29
Şekil 5.3. Gerçek Durumda Tehdit Konum Ölçümü	30
Şekil 5.4. Konum Ölçümü Hata Elipsi	30
Şekil 5.5. Rastgele Yön Ölçüm Hataları	31
Şekil 5.6. Rastgele Yön Ölçüm Hatalarını Dağılımı	32
Şekil 5.7. Hata Elipsi Geometrisi	32
Şekil 6.1. Senaryo 1	36
Şekil 6.2. Senaryo 2	36

Şekil 6.3. Senaryo 1 Hata Elipsi.....	37
Şekil 6.4. Senaryo 2 Hata Elipsi.....	38
Şekil 7.1. Bir Tehdit için Optimizasyon Geometrisi	40
Şekil 7.2. M_i Mesafesi Bulma Geometrisi.....	41
Şekil 7.3. Bir Tehdit İçin Örnek Senaryo	43
Şekil 7.4. α_i 'nin Δh 'ye Göre Değişimi Grafiği.....	43
Şekil 7.5. Analitik Çözümle Optimum Uçuş Rotası	45
Şekil 7.6. Rota Optimizasyonu Akış Diyagramı	47
Şekil 7.7. Bir Tehdit İçin Oluşturulan Rota (NE Düzlemi).....	48
Şekil 7.8. Bir Tehdit İçin Oluşturulan Rota (NED Düzlemi).....	48
Şekil 7.9. Bir Tehdit Rota Optimizasyonu Senaryosu Hata Elipsi.....	49
Şekil 7.10. Bir Tehdit Uzun Süreli Rota Optimizasyonu (NE Düzlemi)	50
Şekil 7.11. Bir Tehdit Uzun Süreli Rota Optimizasyonu (NED Düzlemi)	50
Şekil 7.12. Bir Tehdit Uzun Süreli Rota Optimizasyonu Senaryosu Hata Elipsi	51
Şekil 7.13. Çoklu Tehditler İçin Oluşturulan Rota (NE Düzlemi).....	52
Şekil 7.14 Çoklu Tehditler İçin Oluşturulan Rota (NED Düzlemi)	53
Şekil 7.15. Çoklu Tehditler Rota Optimizasyonu Senaryosu Hata Elipsi (1. Tehdit).....	53
Şekil 7.16. Çoklu Tehditler Rota Optimizasyonu Senaryosu Hata Elipsi (2. Tehdit).....	54
Şekil 7.17. Çoklu Tehditler Rota Optimizasyonu Senaryosu Hata Elipsi (3. Tehdit).....	54
Şekil 8.1. Çoklu Platform Geolokasyon Senaryosu	57
Şekil 8.2. Farklı Baş Açılı Çoklu Platform Üçgenleme Geometrisi	58
Şekil 8.3. Çoklu Platform Geolokasyon Akış Diyagramı	60
Şekil 8.4. Çoklu Platform Geolokasyon Senaryosu (NE Düzlemi)	61
Şekil 8.5. Çoklu Platform Geolokasyon Senaryosu (NED Düzlemi)	61
Şekil 8.6. Çoklu Platform Geolokasyon Senaryosu Hata Elipsi	62

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	Elipsin uzun kenarı
AoA	Angle of Arrival (ing.)
B	Elipsin kısa kenarı
C	Güven Seviyesi
CEP	Circular Error Probable (ing.)
d	Sinyalin kuzeye göre geliş yönü
DD	Differentail Doppler (ing.)
DOA	Direction of Arrival (ing.)
DOA _{az}	Sinyalin geliş yönünün azimut bileşeni
DOA _{el}	Sinyalin geliş yönünün elevasyon bileşeni
DOA _{er}	Yön ölçüm hatası
e	Geliş açısı düzeltme faktörü
ED	Elektronik Destek
FDOA	Frequency Difference of Arrival (ing.)
GPS	Global Positioning System (ing.)
h	Platformun baş açısı
h _{az}	Baş açısının azimut bileşeni
h _{el}	Baş açısının elevasyon bileşeni
INS	Inertial Navigation System (ing.)
İHA	İnsansız Hava Aracı
KR	Kinematic Ranging (ing.)
LOB	Line of Bearing (ing.)
LOB	Line of Bearing
m	Platformun yer değiştirme mesafesi
M _i	Yer değiştirme mesafesi
NE	North East (ing.)
NED	North East Down (ing.)
NED	North-East-Down
PDOA	Phase Difference of Arrival
PRI	Pulse Repetition Interval (ing.)
R	Platform ile tehdit arasındaki mesafe
r	Platform ile tehdit arasındaki mesafenin xy düzlemindeki bileşeni
RF	Radio Frekansı
RF	Radio Frequency (ing.)
RIA	Radar İkaz Alıcısı
Rx _i	Bir sonraki optimizasyon noktada tehdiye olan mesafe
t	Zaman
TDOA	Time Difference of Arrival (ing.)
v	Platform hızı [m/s]
x _{pl}	Platform konumunun x bileşeni

x_t	Tehdit konumunun x bileşeni
y_{pl}	Platform konumunun y bileşeni
y_t	Tehdit konumunun y bileşeni
z_{pl}	Platform konumunun z bileşeni
z_t	Tehdit konumunun z bileşeni
α_i	Tehdidin iki farklı konumdan gözlemlendiğinde oluşan açı
Δh	Baş açısı değişikliği
Δop	Optimizasyon aralığı
Δt	Zaman Aralığı
θ	Sinyalin platforma göre geliş açısı
θ'	Düzeltilmiş geliş açısı
φ	İki geliş açısı arasındaki fark

1. GİRİŞ

Geolokasyon, elektromanyetik sinyal kaynaklarının coğrafi konumlarını tespit etmek için kullanılan bir tekniktir. Bu teknik birçok alanda kullanılmaktadır. Örneğin, askeri uygulamalarda, tehdidin radyo iletişimini ya da radar sinyallerinin konumu tespit etmek için geolokasyon tekniği kullanılmaktadır. Bu sayede tehditlerin konumunu pasif olarak bulunabilir. Bir diğer uygulama alanı ise sivil haberleşmedir. Telekomünikasyon şirketleri, radyo frekansı kullanan cihazların konumlarını belirlemek ya da kendi sinyallerine girişim yapan parazit yayın kaynaklarını bulmak için geolokasyon tekniği kullanabilir.

Geolokasyon tekniği, yayın kaynaklarından gelen sinyallerin yön bilgilerini kullanarak yayın kaynağının konumunun bulunması işlemidir. Gelen sinyallerin yönü; Genlik Karşılaştırma (Amplitude Comparison – AC), Geliş Zaman Farkı (Time Difference of Arrival – TDOA), Faz Karşılaştırma (Phase Comparison – PC) ve Diferansiyel Doppler (Differential Doppler – DD), gibi birçok farklı yöntemle yapılabilmektedir. Temel yön bulma tekniklerine Bölüm 3.1’de yer verilmiştir. Her yöntemin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bazı uygulamalarda birden fazla yöntemden elde edilen verilerin füzyonu ile doğruluğu yüksek konum tahminleri elde edilmektedir. Yön ölçüm verilerini doğruluğu, yayın kaynaklarının konum tahminindeki hataları azaltmaktadır. Yön bulma doğruluğunu etkileyen faktörlere, yön bulma hatalarının modellenmesi ve hesaplanmasına Bölüm 5.2 ve Bölüm 5.3’te yer verilmiştir.

Konum tahminlerini elde etmek için kullanılan yöntemlerden biri üçgenlemedir. Bu yöntemde, hava, kara ya da deniz platformları tarafından elde edilen gelen RF sinyale ait yön verisinden tehdit konum kestiriminin trigonometrik olarak yapılmasıdır. Üçgenleme geometrisine ait hesaplamalar Bölüm 4.2’de verilmiştir.

Bu tez çalışmasında, askeri uygulamalarda kullanılan bir hava platformu ile kısa sürede ve yüksek doğrulukla yer tehditlerinin coğrafi konumlarını enlem ve boylamda belirlenmesi ve konum ölçüm performansının iyileştirilmesi için gerekli uçuş manevra planlamasının yapılması amaçlanmaktadır. Kısıtlı harekât koşullarında, geolokasyon fonksiyonunun gerçekleştirilmesi için zaman ve performans açısından optimize bir uçuş manevrasını pilota önerilerek operasyonel verimliliğin artırılması hedeflenmektedir. Uçuş manevraların geolokasyon performansına etkileri Bölüm 6’da incelenmiştir. Rota optimizasyonu ile ilgili hesaplamalar Bölüm 7.1 ve Bölüm 7.2’de verilmiştir.

Çoklu platform geolokasyon tekniği, farklı özelliklere ve ölçüm yöntemlerine sahip çeşitli hava platformlardan gelen yön verileri birleştirerek geolokasyon fonksiyonu gerçekleştirilmesidir. Farklı platformlardan gelen verilerin zaman açısından senkronize olduğundan emin olmak, doğru veri füzyonunun önemli bir parçasıdır. Bu çalışmada yön ölçüm hatalarının yanında, iki platformlar arası senkronizasyon hatalarını da göz önüne alınarak yapılan çoklu platform geolokasyon tekniğinin modellenmesi ve bu tekniğin geolokasyon performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Çoklu platform geolokasyon ile elde edilen tehdit konumu hesaplamalarının doğruluğu ve geolokasyon süresi ile ilgili çalışmalara Bölüm 8’de yer verilmiştir.

1.1. Problem Tanımı

Geolokasyon, yerde RF yayın yapan sabit tehditlerin konumunun pasif olarak bulunmasıdır. Bu fonksiyonun istenilen doğrulukta gerçekleştirilebilmesi için çok sayıda yön verisine ihtiyaç vardır. Bu verileri toplamak için uçuş süresine arttırılması gerekmektedir. Operasyonel şartlar düşünüldüğünde bu sürenin fazla olması platformlar için tehlike oluşturabilmektedir. Bu çalışmada, kısa sürede ve yüksek doğrulukta geolokasyon fonksiyonunun gerçekleştirilebilmesi için rota optimizasyonu ve çoklu platform kullanımının getirebileceği iyileştirmeler araştırılmıştır.

1.2. Çözüm Metodu

Rota optimizasyonu için oluşturulan matematiksel problem Bölüm 7.1’de verilmiştir. Rota optimizasyonu için önce analitik ve grafiksel yöntemler ile amaç fonksiyonun çözümü yapılmıştır. Simülasyonlarda, amaç fonksiyonunun çözümü için sayısal bir konveks optimizasyon çözüm yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan yöntemlerin birbiri ile tutarlılığı incelenmiştir. Çoklu platform geolokasyon tekniği Bölüm 8’de geometrik ve analitik olarak modellenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Nickens Okello'nun yapmış olduğu çalışmada, birden fazla İnsansız Hava Aracı (İHA) kullanarak sinyal kaynaklarının konumunu tespit etmek için bir yöntem önermektedir. Bu yöntem, farklı İHA platformlarından elde edilen kaynak sinyallerinin faz farklarını ölçerek kaynak konularının tahmin edilmesine dayanmaktadır. Birden fazla İHA kullanılmasının sinyal kaynaklarının konumunu tespit etmek için doğru ve etkili bir yöntem olduğu önerilmiştir [1].

Alexander Mikhalev and Richard Ormondroyd'un yapmış olduğu çalışmada, çoklu platformlarla ilgili olarak birden fazla anten veya sensör kümesinin kullanımı ele alınmaktadır. Bu kümeleme işlemi, bir cihazın konumunun tespit edilmesi için birden fazla veri kaynağından gelen verilerin bir araya getirilmesini sağlamaktadır. Makalede, çok sayıda platform kullanmanın, tek bir platform kullanmaktan daha fazla veri toplama ve daha doğru sonuçlar elde etme açısından daha iyi bir olanak sağladığı ifade edilmektedir. Ayrıca, çoklu platformların kullanımı ile elde edilen verilerin bir araya getirilmesi için çeşitli algoritmalar da tartışılmaktadır. Bu algoritmalar, verileri filtrelemek, birleştirmek ve sonuçları analiz etmek için kullanılmıştır. Özellikle, Hough Transform algoritması kullanılarak verilerin bir araya getirilmesi ve cihazların konumunun belirlenmesi sağlanmaktadır [2].

Huai-Jing Du ve Jim P.Y. Lee'nin yapmış olduğu çalışmada, çok platformlu bir geolokasyon sistemini simüle etmektir. Bu amaç doğrultusunda, farklı noktalardaki birden fazla platformun, hedefin zaman farkıyla varış (TDOA) ve açı tahmini (AOA) yöntemlerini kullanarak konumunu belirleme kabiliyeti araştırılmıştır. Ayrıca, TDOA ve AOA yöntemlerinin birleşiminden oluşan hibrit bir yaklaşım önerilmiş ve bu yaklaşımın performansı, farklı senaryolarda simülasyonlar kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu simülasyonlar, farklı senaryolarda platformların konumlarının ve hedefin hareketinin değiştiği durumları içermektedir. TDOA ve AOA yöntemlerinin bir arada kullanılmasıyla elde edilen hibrit yaklaşımın, çok platformlu geolokasyon sistemleri için daha doğru ve güvenilir sonuçlar sağlayabileceğini göstermektedir [3].

Sondre Andreas'ın yapmış olduğu çalışmada, kaynak sinyallerini konumlarını tespit etmek için Phase Difference of Arrival (PDOA) algoritmasının çok sayıda İHA ile nasıl kullanılabileceği incelemiştir. Çalışmada, birden fazla İHA'nın kullanımı ile ilgili olarak iki farklı senaryo ele alınmaktadır. İlk senaryoda, İHA'lardan biri sinyal konumlandırmasını yapacak platform olarak seçilerek diğer İHA'lar ona bağlanarak bir ağ oluştururlar. Bu

sayede, seçilen İHA kendi yerini kaynak sinyalinin konumunu hesaplamak için diğer İHA'lerden verilerini kullanabilir. İkinci senaryoda ise, her İHA ayrı ayrı hareket ederek RF yayıcıları tespit eder ve bu bilgileri toplamak için bir merkezi kontrol birimi tarafından yönetilirler. Bu senaryoda, her İHA kendi başına hareket eder ve kaynak sinyallerin konumunu tespit eder. Daha sonra, merkezi kontrol birimi bu verileri toplar ve en doğru konum bilgisine karar verir. Her iki senaryoda da birden fazla İHA kullanılması, RF yayıcıların konumunun daha doğru bir şekilde tespit edilmesine ve geniş bir alanın daha hızlı bir şekilde taranmasına olanak tanıdığı gözlemlenmiştir [4].

Luke Marsh ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, çok sayıda İHA kullanarak sinyal yayıcıların yer tespitine odaklanmıştır. Çalışmada, bir grup İHA'nın sinyal kaynağının tam konumunu tespit etmek için etkili bir şekilde nasıl bir araya getirilebileceğini incelenmiştir. Bu amaçla, farklı tür ve frekanstaki sinyalleri tespit edebilen ve farklı işlevlere sahip olan bir dizi İHA'yı kullanarak, bir takım oluşturma stratejisi önerilmiştir. Bu strateji, sinyal kaynağının konumunu belirlemede daha yüksek doğruluk sağlamak için birbirleriyle iş birliği yapan İHA'ların kullanımına dayanmaktadır [5].

Kutluyıl Doğançay'ın yapmış olduğu çalışmada, tarama yapan yayıcıların konumunu tahmin etmek için kullanılan bir tahmin yöntemi olan "pseudolinear estimatoru"nın geliştirilmesi üzerine odaklanmaktadır. Bu yöntem, birden fazla sabit alıcı ve/veya hareketli platformun kullanımıyla bir tarama vericisinin konumunu hesaplamaktadır. Böylece, verilerin birden fazla platformdan elde edilmesi ile tahminin doğruluğunu arttığını ve hataları azaldığını öne sürmektedir [6].

Sean R. Semper ve John L. Crassidis'in yapmış olduğu çalışmada, belirli sayıda İHA'nın kullanıldı, merkezi olmayan dağıtık bir sistemle sinyal kaynağının konumunun belirlenmesi ve düşük konum ölçüm hatası için en uygun rota planlaması konularını ele almıştır. İHA'ların bir ağ oluşturarak birbirleriyle veri paylaştığı ve sinyal kaynağının konumunu belirlemek için iş birliği yaptıkları senaryolarda kullanımını ele almaktadır [7].

Nickens Okello ve Darko Musicli'nin yapmış olduğu çalışmada, iki insansız hava aracının kullanımıyla bir sinyal kaynağın konumunun belirlenmesi konusunu ele alınmıştır. İki İHA'nın elde ettiği radyo sinyallerini ile kaynağın konumunu tespit etmek için bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntem, iki İHA'nın kaynağı farklı açılardan gözlemlemesi ve gözlemler arasındaki zaman farklarını kullanarak kaynağın konumunu hesaplaması üzerine kuruludur [8].

Derek Elsaesser'ın yapmış olduğu çalışmada, düşük doğruluklu yön bulma sensörleri kullanarak sinyal kaynaklarının coğrafi konumunun belirlenmesini incelemiştir. Düşük

doğruluk seviyesine sahip sensörleri kullanarak konum ölçüm doğruluğunu artırmak için kullanılabilecek teknikleri ele almıştır. Bu yöntemler, düşük doğruluk seviyesine sahip sensörlerle daha yüksek doğrulukta konum tahmini sağlamak için kullanılmıştır [9].

Jakub Stencek'in yapmış olduğu çalışmada, Elektronik Destek (ED) sensörleri tarafından sağlanan veriler kullanılarak birden fazla sinyal kaynağının konumlandırılmasına değinilmiştir. Çoklu ED sensörlerinin, birden fazla sinyal kaynağı tespit edildiğinde daha doğru bir konum tespiti yapmak için kullanılabileceği öne sürülmüştür. Bu sensörlerin kullanımı, sinyallerin kaynaklarından farklı açılardan algılanmasına ve daha doğru bir konumlandırma yapılmasına olanak tanımaktadır [10].

Ran Ren ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, TDOA/FDOA yer belirleme sensörleri için optimal bir rota bulma problemi üzerine odaklanmışlardır. TDOA/FDOA yer belirleme sensörlerinin optimum konumlarını ve sensörler arasındaki mesafeleri hesaplayarak, hedefin konumunu belirlemek için en uygun rota noktalarını belirlenmesi ve ölçüm hatalarının düşürülmesi amaçlanmıştır [11].

Robert J. Bamberger ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, çok sayıda insansız hava aracı (İHA) kullanarak RF yayıcıların konumunu tespit etmek edilmiştir. Birden fazla İHA kullanıldığında, her İHA'nın topladığı veriler, birden fazla kaynaktan gelen bilgilerle birleştirilerek daha yüksek doğrulukta konum tespitinin elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, çok sayıda İHA kullanımı ile daha geniş bir alanın kapsanmasına ve daha fazla RF yayıcısı tespitinin mümkün olduğunu ifade edilmiştir [12].

Kutluyıl Doğançay'ın yapmış olduğu bir diğer çalışmada, insansız hava araçları kullanarak sinyal kaynaklarının yerini tespit etmek için bir rota planlama yöntemi sunmaktadır. Buradaki amaç, yüksek doğrulukla sinyal kaynaklarının yerlerini tespit etmek için bir yol planlama algoritması geliştirmektir. Çalışmada, yayın kaynağını tespit etmek için iki temel yöntem olan yön bulma ve sinyal gücü ölçümünü kullanılmıştır. Yön bulma yöntemi, sinyalin farklı açılardan ölçülmesine dayanırken, sinyal gücü ölçümü, sinyalin gücünün farklı noktalarda ölçülmesine dayanır. Yol planlama algoritmasıyla, bu iki yöntemi birleştirerek daha doğru sonuçlar elde etmek için optimum rota oluşturulmuştur [13].

Seyyed Ali Asghar Shahidian ve Hadi Soltanizadeh'in yapmış olduğu çalışmada, birden fazla RF yayın kaynağının yerinin belirlenmesi için iki insansız hava aracının optimal hareket yolunu belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, önerilen algoritma, tüm RF yayın kaynaklarının yerini tespit etmek için minimum hareket ve minimum zaman gerektiren bir yol haritası sunmaktadır. Bu yol haritası, iki İHA'nın hareketlerini koordine

etmek için tasarlanmıştır ve bu sayede RF kaynaklarının yerlerinin hızlı ve doğru bir şekilde belirlenmesi sağlanmıştır [14].

Elad Tzoreff ve Anthony J. Weiss'in yapmış olduğu çalışmada, tek bir algılayıcı platformun kullanıldığı durumlarda, doğru bir şekilde sinyal kaynağının konumunu belirleyebilmek için gelen sinyallerin en iyi şekilde toplanacağı bir yol tasarlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, convex optimizasyon yöntemleri kullanılarak, tek bir algılayıcının hareket edeceği yolu optimize eden bir matematiksel model oluşturulmuştur. Bu model, doğru bir şekilde ayarlandığında, sinyallerin en iyi şekilde toplandığı yolu belirleyerek sinyal kaynağı konumunun doğru bir şekilde tespit edilmesini sağlanmıştır [15].

3. YÖN BULMA VE GEOLOKASYON

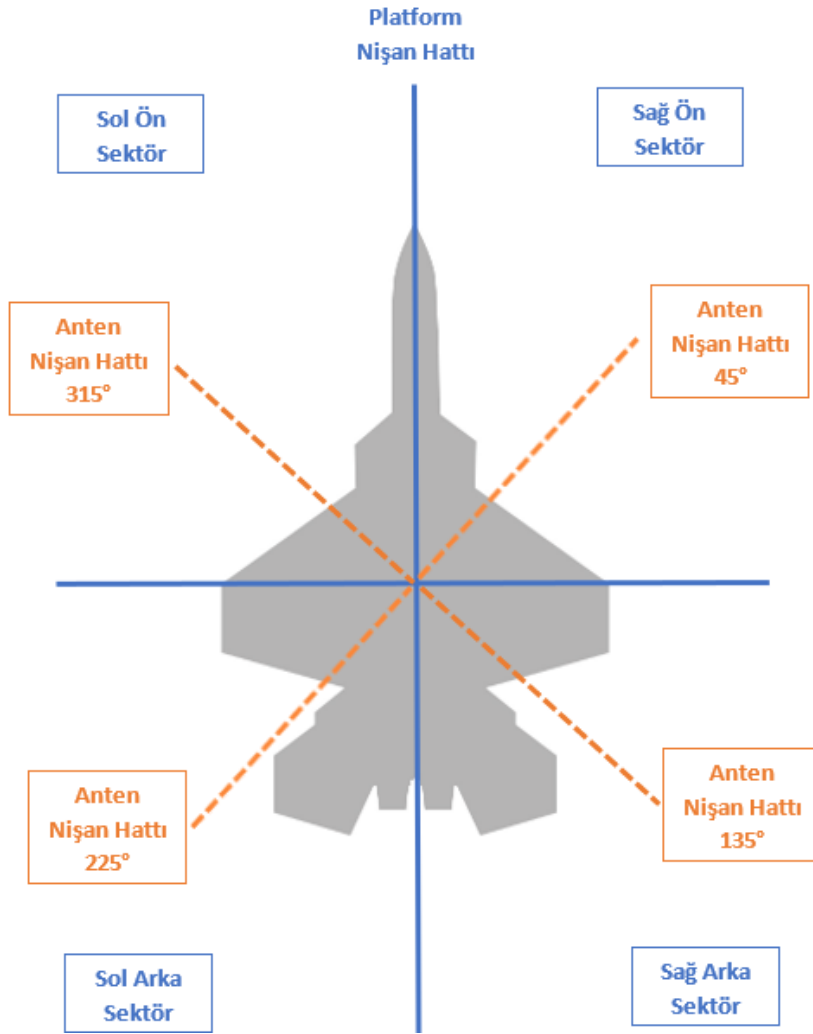
Askeri uygulamalarda kullanılan yön bulma (Direction Finding-DF) ve geolokasyon fonksiyonları kullanım amacı olarak birbirlerine benzemektedir. Yön bulmanın amacı, belirli bir yönden gelen sinyalin açısını belirli bir referansa göre, örneğin uçağın nişan hattına (boresight) göre belirlemektir. Askeri platformlarda bu ölçüm genellikle azimut eksenini ile sınırlıdır. Geolokasyonun amacı ise elde edilen yön verilerinden yayın kaynağının konumunu enlemde ve boylamda tahmin etmektir. Geolokasyon fonksiyonu, yön bulma fonksiyonun çıktılarını kullandığı için, hatalı yön ölçümü sonuçları geolokasyon tahmin hatalarına yol açmaktadır.

Gelen sinyallerin yönünü bulmak için Elektronik Destek (ED) sensörleri kullanılmaktadır. ED sensörleri, Elektronik Harp (EH) operasyonları için tasarlanmış askeri platformlarda kullanılmaktadır. ED sensörlerinin temel amacı, radarlar ve iletişim sistemleri gibi kaynaklardan yayılan elektromanyetik sinyalleri tespit etmek, tanımlamak, konumlandırmak ve analiz etmektir. Bu sensörler, potansiyel tehditlerden gelen sinyalleri izleyerek durumsal farkındalık sağlarlar.

Radar İkaz Alıcısı (RIA), askeri uçaklarda kullanılan önemli bir ED cihazıdır. Temel olarak, tehdit radarlarının yaydığı elektromanyetik sinyalleri tespit etmek, analiz etmek ve pilotu olası tehditlere karşı uyarmak için tasarlanmıştır. RIA'nın ED sensörü olarak görevleri; darbe parametre ölçümü ve Darbe Tanımlayıcı Kelime (DTK)'nin üretilmesi, parametre kümelenme, Görev Veri Dosyası (GVD)'nda yer alan tehdit kimliklerine göre tehdit eşleştirmesinin yapılmasıdır.

Geolokasyon için gerekli kimliklendirilmiş yön verileri RIA tarafından üretilir. RIA, algılanan sinyallerin geliş yönünü belirlemek için çeşitli teknikler kullanır. Bu teknikler arasında sinyal gücü ve faz farkı ölçümleri ve çoklu anten dizileriyle gelen sinyalin geliş açısının hesaplanması gibi yöntemler bulunur.

RIA'lar farklı konfigürasyonlarda çoklu antenlere sahiptir. Bu antenler, platformun farklı sektörlerine bakarak 360° durumsal farkındalık sağlar. Örneğin, bir platformda sol ön, sol arka, sağ ön ve sağ arka gibi farklı yönlerde antenler olabilir. Bu antenler, sinyallerin tüm yönlerden algılanmasını sağlar ve sinyallerin geliş yönünü daha doğru bir şekilde belirlemeye yardımcı olur. Şekil 3.1'de bir savaş uçağının dört sektörüne yerleştirilen antenlerin kapsama alanları ve nişan hatları gösterilmiştir.



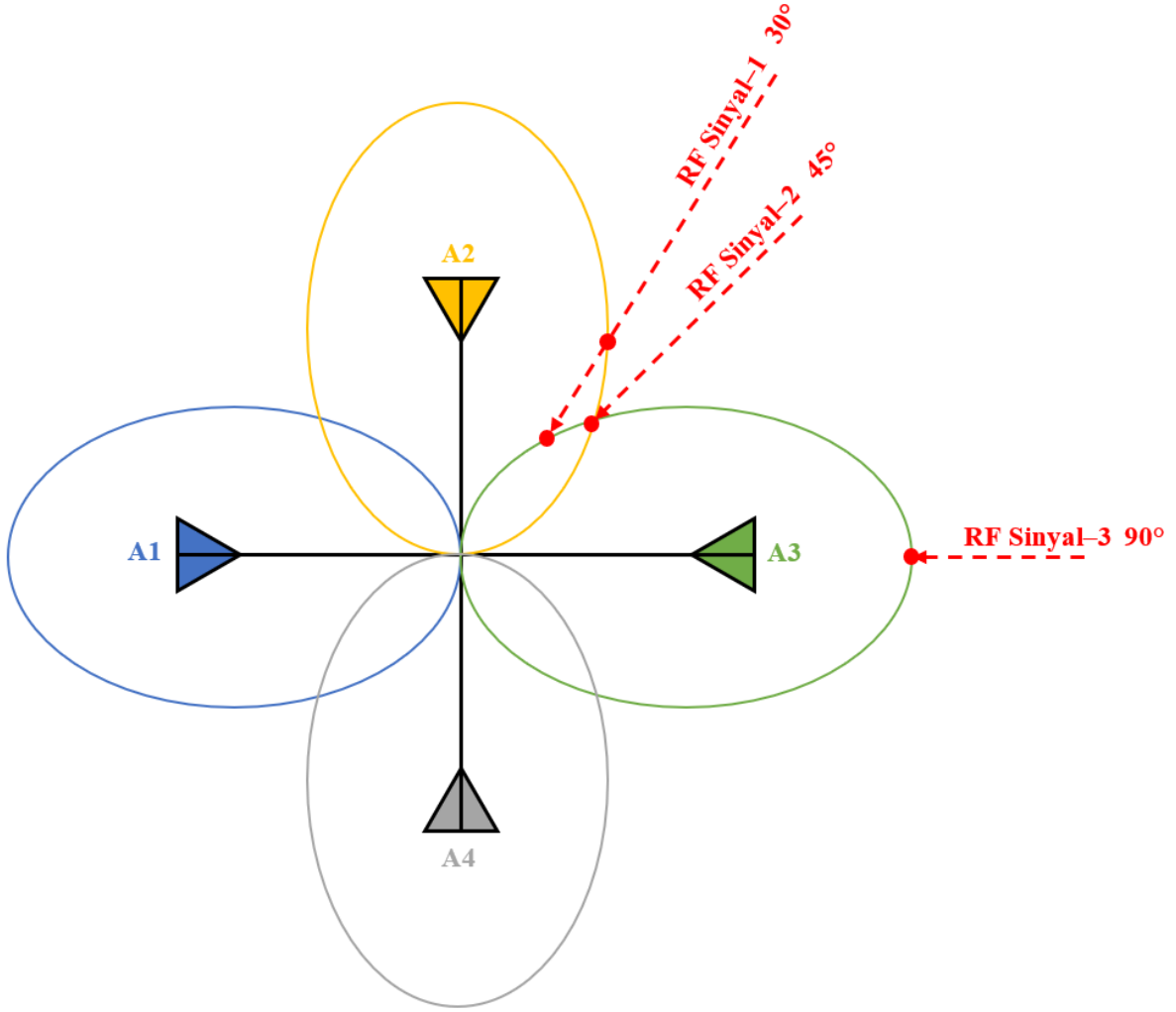
Şekil 3.1. Savaş Uçağının 360° ED Kapsama Alanı

3.1. Yön Bulma Teknikleri

Yön bulmak için çeşitli yöntemler birlikte kullanılmaktadır. Bazı yöntemler sadece sinyalin geldiği sektörü kabaca bulmak için kullanılır. Gelen sinyalin sektörü bulunduğundan sonra hassas olarak sinyalin yönü bulunur.

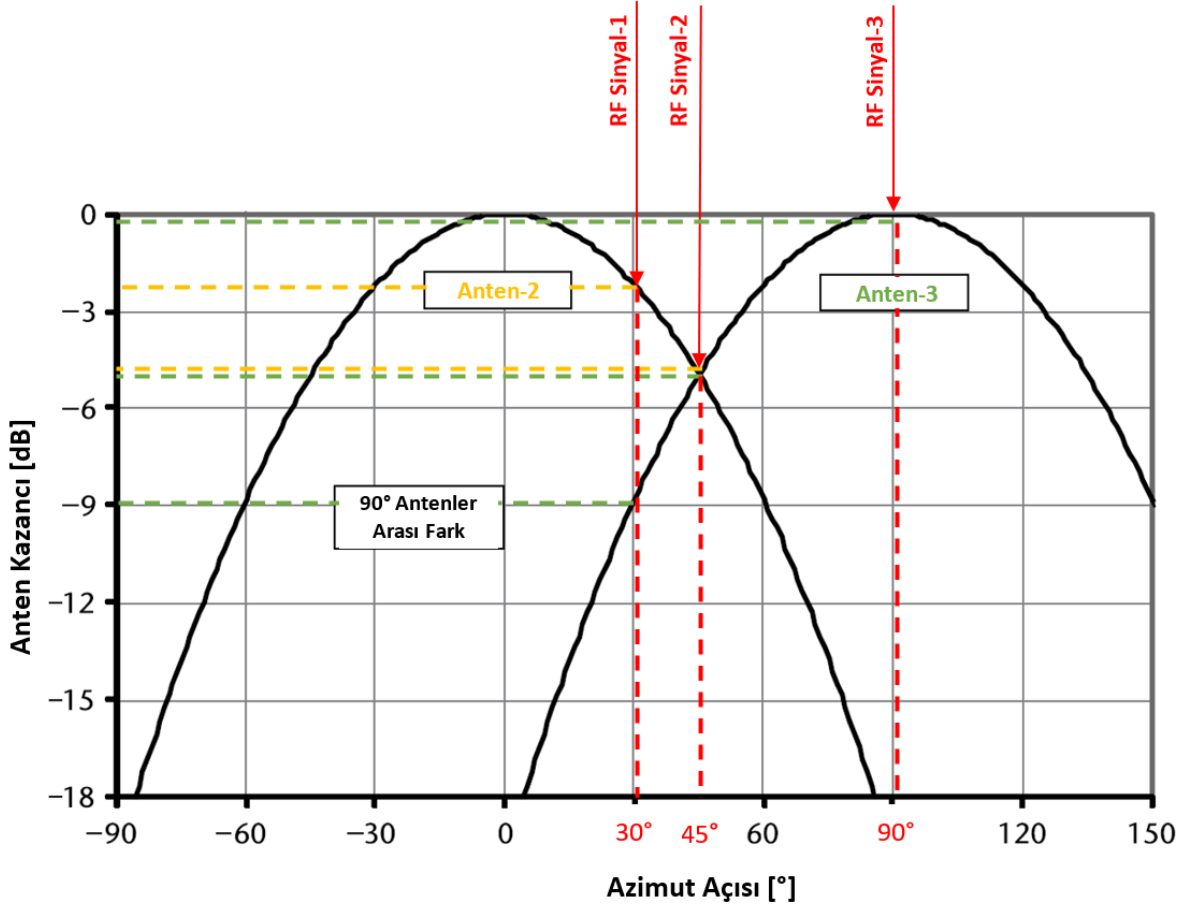
3.1.1. Genlik karşılaştırma

Genlik karşılaştırma tekniği, farklı konumda bulunan antenler tarafından alınan sinyal genliklerinin karşılaştırılmasıyla sinyalin geliş yönünün belirlenmesidir. Bu yöntemde, antenler arasındaki mesafe gözletilmeden her bir antene eşit sinyal ulaştığı varsayılır. Alıcıya ulaşan sinyal seviyeleri, sinyalin geldiği yöndeki anten kazancına bağlıdır. Genlik karşılaştırma antenlerinin nişan hatları birbirlerinden belirli bir açıyla ayrılmıştır. Şekil 3.2’de bu antenlerin yerleşimleri, nişan hatları ve hüzmeye genişlikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Genlik Karşılaştırma Anten Yerleşimi

Şekil 3.3'te gösterildiği gibi RF Sinyal-2, A2 ve A3 antenleri tarafından aynı genlik seviyesinde alınmıştır. İki antende aynı seviyede sinyal aldığı için gelen sinyalin açısı iki antenin nişan hatları arasındaki açını tam ortasıdır. Antenlerin nişan hatları arasındaki fark 90° olduğu için ikinci sinyal 45° 'den gelmektedir. RF Sinyal-3 sadece A3 anteninden güçlü olarak alındığı için sinyal geliş yönü A3 anteninin nişan hattıdır. RF Sinyal-1, hem A2 hem de A3 anteni tarafından alınmıştır. Ancak A2'den alınan sinyalin seviyesi daha yüksek olduğu için gelen sinyalin yönü A2 antenin nişan hattına A3 anteninden daha yakındır. Şekil 3.3'te gösterilen sinyal seviyelerine göre gelen sinyalin yönü 30° olarak belirtilmiştir. Sinyalin geliş açısı ile ilgili matematiksel ifade denklem (3.7)'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Genlik Karşılaştırma

Genlik karşılaştırma yönteminde, anten yerleşiminden bağımsız olarak her bir antene ulaşan gücün aynı olduğu kabul edilir. Şekil 3.3'te aralarında 90° derece fark bulunan Gaussian hüzmeye sahip olan iki antenin kazanç grafiği verilmiştir. Bu antenlere ulaşan RF sinyalin gücü P_0 olarak belirtilmiştir. Alıcıya ulaşan güç, antene gelen güç ve anten kazancının toplamı olarak denklem (3.1) ile ifade edilir. Denklem (3.1)'de, m'inci alıcıya ulaşan güç P_m , m'inci anten kazancı G_m ile gösterilmiştir.

$$P_m [\text{dBm}] = P_0 [\text{dBm}] + G_m [\text{dB}] \quad (3.1)$$

Şekil 3.3'te görüldü gibi anten kazancı açıya göre değişmektedir. Bu nedenle anten kazancı açıya bağlı olarak denklem (3.2) ile bulunur.

$$G_m = k (\theta_m - \theta)^2 \quad (3.2)$$

Denklem (3.2)'de, anten kazancının açıya göre değişim eğimi k , antenlerin nişan hattı θ_m ve sinyalin geliş açısı θ ile gösterilmiştir. Gaussian anten kazancını açıya bağlı ifade

etmek için kullanılan k değeri denklem (3.3) ile bulunur. Gaussian hüzme şekline ait 3 dB hüzme genişliği θ_b olarak ifade edilmiştir.

$$k [\text{db/derece}^2] = \frac{-12}{\theta_b^2} \quad (3.3)$$

Genlik karşılaştırma ile yön bulma yönteminde, iki ayrı alıcıya ulaşan güçler arasındaki farka bakılmaktadır. A2 ve A3 alıcısına ulaşan güçler arasındaki fark denklem (3.6)'da verilmiştir.

$$P_2 = P_0 + k (\theta_2 - \theta)^2 \quad (3.4)$$

$$P_3 = P_0 + k (\theta_3 - \theta)^2 \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{23} [\text{dB}] &= P_3 - P_2 = k [(\theta_3 - \theta)^2 - (\theta_2 - \theta)^2] \\ &= k [2\theta(\theta_2 - \theta_3) + \theta_3^2 - \theta_2^2] \end{aligned} \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)'da verilen ifade θ için yeniden düzenlenirse denklem (3.7) elde edilir. Denklem (3.7) ile genlik karşılaştırma ile gelen sinyalin yönü tespit edilir.

$$\theta = \frac{1}{2(\theta_2 - \theta_3)} \left[\frac{\Delta P_{23}}{k} + \theta_2^2 - \theta_3^2 \right] \quad (3.7)$$

Örneğin, Şekil 3.3'te verilen grafiğe göre RF Sinyal-1'in yönünü bulmak için (3.7) numaralı denklemde değişkenler;

$$\Delta P_{23} = (-9) - (-2) = -7 \text{ dB}$$

$$\theta_b = 70^\circ$$

$$k = \frac{-12}{70^2} = -2.45 \times 10^{-3} \text{ db/derece}^2$$

$$\theta_2 = 0^\circ$$

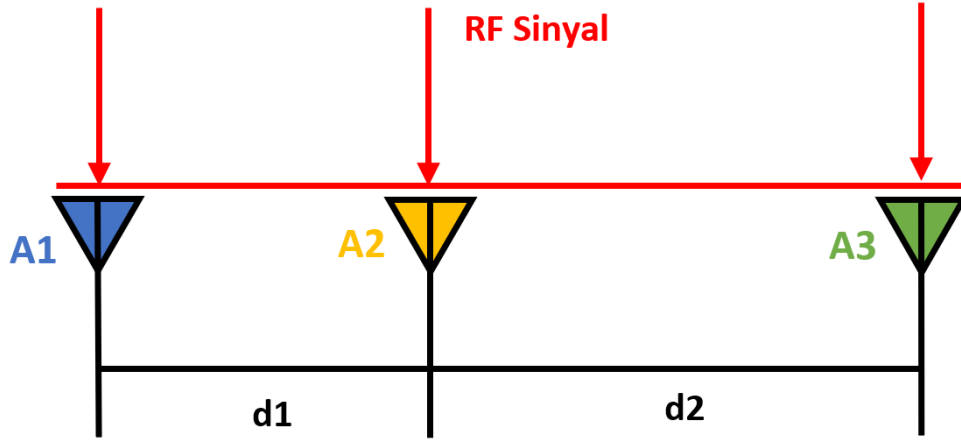
$$\theta_3 = 90^\circ$$

olarak alınırsa RF Siygal-1'in yönü yaklaşık olarak 30° bulunur.

3.1.2. Faz karşılaştırma

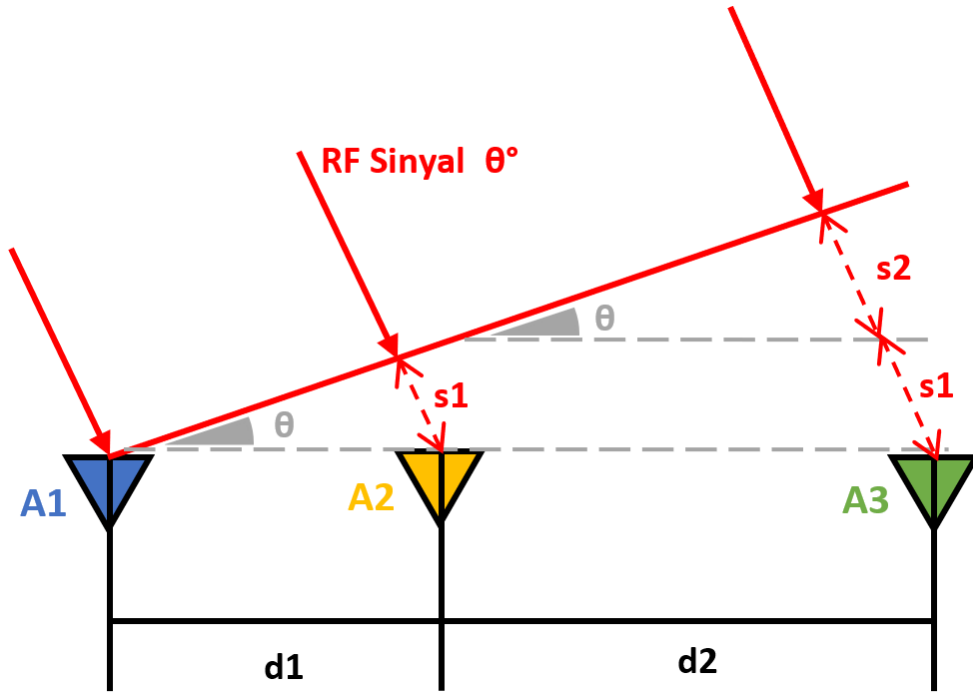
Faz karşılaştırma, elektromanyetik sinyallerin yönünü belirleme amacıyla kullanılan bir diğer tekniktir. Yön ölçümü, aralarında belirli bir mesafe bulunan faz dizili antenlerle alınan sinyallerin faz farklarını karşılaştırmaya dayanmaktadır. Antenler genellikle belirli bir geometrik yapıda, örneğin bir doğrusal dizi veya bir düzlemsel dizi şeklinde düzenlenmiş olarak birbirinden ayrı olarak yerleştirilir. Antenler arasındaki boşluk, doğru faz karşılaştırması için önemlidir. Antenler arası mesafe kapsanan frekans bandına ve istenen ölçüm hassasiyetine bağlıdır.

Faz karşılaştırma yöntemi ile yön bulmada, dizideki her antene aynı sinyal ulaşır. Ancak her antene giden yayılma yolunun uzunluğundaki farklılıklar nedeniyle antenlere ulaşan sinyalin fazları farklıdır. Faz farkları analiz edilerek sinyalin geliş yönü belirlenir. Örneğin, Şekil 3.4'te üç antene de aynı zamanda ulaşan bir RF sinyal gösterilmiştir. Sinyal antenlere aynı zamanda ulaştığı için sinyaller arasında faz farkı yoktur. Bu nedenle sinyalin antenlerin nişan hattından geldiği anlaşılabilir. Sinyal farklı bir açıdan geldiği durumda sinyaller arasında faz farkı oluşur.



Şekil 3.4. Faz Karşılaştırma Anten Yerleşimi

Sinyallerin antenlere farklı zamanlarda ulaşmasıyla ilgili faz karşılaştırma geometrisi Şekil 3.5'te verilmiştir. RF sinyalin A1 antenine ulaştığı anda, sinyalin A2 antenine ulaşması için gereken mesafe s_1 , A3 antenine ulaşması için gereken mesafe $(s_1 + s_2)$ olarak verilmiştir. Antenler arası uzaklık d_1 ve d_2 olarak verilmiştir. s_1 ve s_2 mesafe farkları denklem (3.8) ve denklem (3.9) ile bulunur.



Şekil 3.5. Faz Karşılaştırma Geometrisi

$$s_1 = d_1 \sin(\theta) \quad (3.8)$$

$$s_2 = d_2 \sin(\theta) \quad (3.9)$$

Mesafe farkından faz farkına geçmek için RF sinyalin dalga boyu kullanılır. A2 ve A3 antenlerine ulaşan sinyallerin faz farkları ($\Delta\phi$), denklem (3.10) ve denklem (3.11) ile bulunur. λ , RF sinyalin dalga boyunu ifade etmektedir.

$$\Delta\phi_1 = 2\pi \frac{d_1}{\lambda} \sin(\theta) \quad (3.10)$$

$$\Delta\phi_2 = 2\pi \frac{d_1 + d_2}{\lambda} \sin(\theta) \quad (3.11)$$

Sinyalin geliş yönü θ , alıcı tarafında ölçülen $\Delta\phi_1$ ve $\Delta\phi_2$ faz farkları ile denklem (3.12) ya da denklem (3.13) ile bulunur.

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{\lambda \Delta\phi_1}{2\pi d_1} \right] \quad (3.12)$$

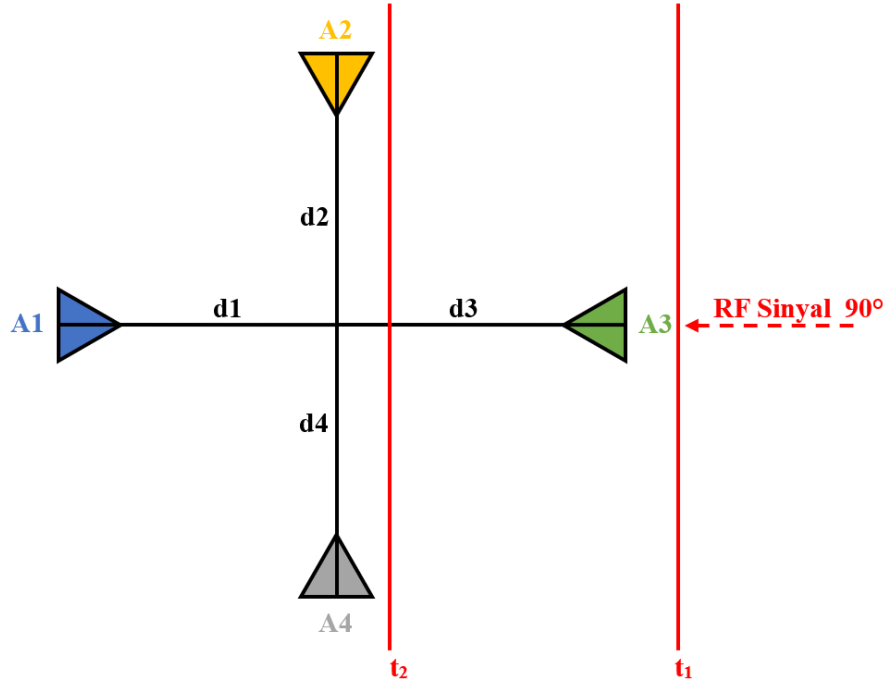
$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{\lambda \Delta\phi_2}{2\pi (d_1 + d_2)} \right] \quad (3.13)$$

3.1.3. Geliş zamanı farkı

Geliş zaman farkı ile yön bulma, bir RF sinyalin birden fazla konumsal olarak ayrılmış antene varış zamanındaki farka dayanarak sinyalin varış açısını belirlemek için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem çeşitli yönlerden faz karşılaştırma ile yön bulmaya benzemektedir. Faz karşılaştırmada antenler arası mesafe, geliş zamanı farkı ölçümü için yerleştirilen antenler arası mesafelerden oldukça azdır. Faz karşılaştırmada sinyaller arasındaki faz farkı ölçümünden yola çıkılarak yön bulunur. Geliş zamanı farkı ile yön bulma metodunda ise sinyallerin geliş zamanı farkı ölçümünden yararlanılarak yön bulunur.

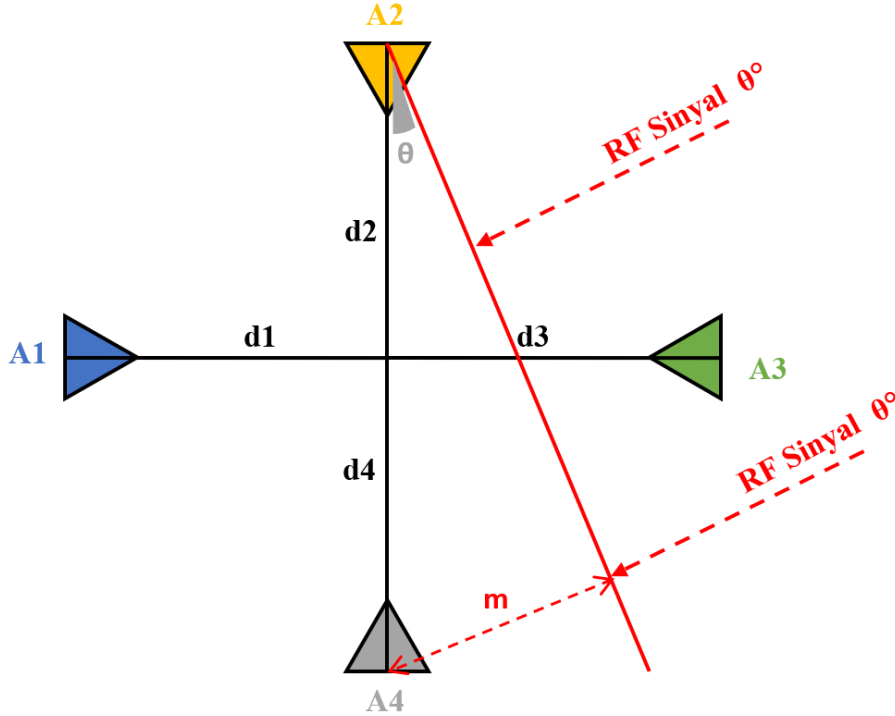
Bir RF sinyalin her bir antene ulaşma süresi, antenler arası mesafelere bağlı olarak farklılık gösterir. Her anten, sinyalin kendi konumuna ulaştığı zamanı ölçer. Bu zaman ölçümü, hassas zamanlama mekanizmaları ile ortak bir referans zaman kaynağı senkron olacak şekilde yapılır. Sinyalin her bir anten çiftine varış zamanları arasındaki farklar hesaplanır. Anten konumlarının bilinen geometrisi ve ölçülen zaman farkları kullanılarak sinyalin geliş açısı hesaplanır.

Şekil 3.6’da geliş zamanı farkıyla yön ölçümü için yerleştirilen antenler ve 90°’den gelen bir RF sinyal gösterilmiştir. RF sinyal, ilk olarak t_1 anında A3 antenine ulaşmıştır. Sonra t_2 anında, aynı anda hem A2 hem de A4 antenine ulaşmıştır. Bu sonuçlara göre, RF sinyalin A2 ve A4 antenlerinin ortasından ve A3 anteni yönünden geldiği anlaşılmıştır.



Şekil 3.6. Geliş Zamanı Farkı Yöntemi Anten Yerleşimi

Şekil 3.7’de belirli bir açı ile gelen RF sinyalin yönünü geliş zaman farkı yöntemi ile bulma geometrisi verilmiştir. Antenler arası uzaklık d ile ifade edilmiştir. RF sinyalin A2 antenine ulaştığı anda, sinyalin A4 antenine olan uzaklığı m ile gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Geliş Zamanı Farkı Yöntemi Geometrisi

A2 ve A4 antenlerine ulaşan sinyaller arasındaki zaman farkı Δt olarak gösterilmiştir. Bu zaman farkı alıcı tarafından hassas olarak ölçülür. RF sinyal Δt süresi boyunca m mesafesini ışık hızında ($c = 3 \times 10^8$ m/s) alarak A4 antenine ulaşır. m mesafesi denklem (3.14) ile bulunur. m mesafesi, denklem (3.15) ile antenler arası mesafe ve geliş açısı cinsinden yazılabilir.

$$m = c \Delta t \quad (3.14)$$

$$m = (d_2 + d_4) \sin(\theta) \quad (3.15)$$

Sinyalin geliş açısı, antenler arası uzaklık ve ölçülen geliş zamanı farkı ile denklem (3.16) ile bulunur.

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{c \Delta t}{d_2 + d_4} \right) \quad (3.16)$$

3.2. Yön Bulma Hataları

Bölüm 3.1’de verilen yöntemlerle hesaplanan yön verilerinin doğruluğu çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörlerden bazıları anten yerleşimi, ölçüm hassasiyeti ve çoklu yol (multi path) etkisidir.

3.2.1. Anten yerleşimi

Yön bulma hesaplamalarında anten konumları önemli bir parametredir. Antenlerin uzaysal konumları ve nişan hatları bütün yön bulma yöntemlerinin kullanılmaktadır. Antenlerin doğru bir şekilde hizalanması, doğru bir yön tespiti için kritiktir. Antenler arasındaki konumsal ve açısal hata, yön ölçümlerinde sapmalara neden olur.

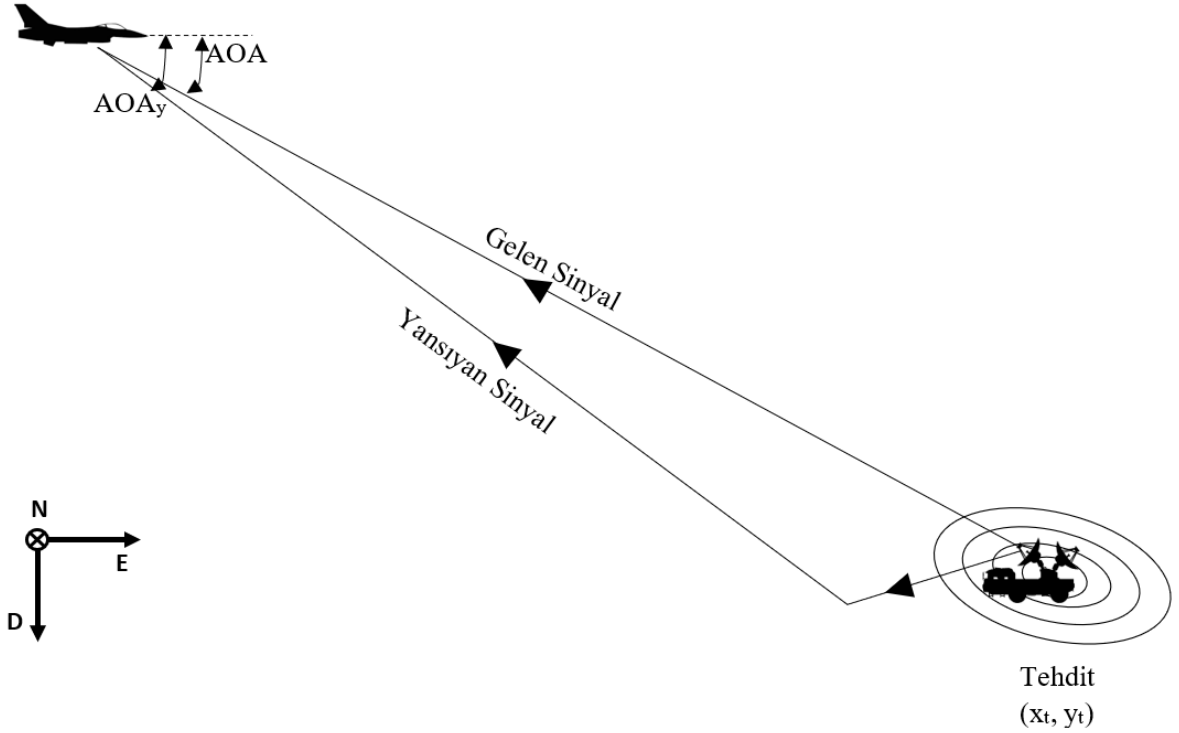
Anten yerleşiminde, antenler arası uzaklık kullanılan yön bulma tekniğine göre farklılık göstermektedir. Örneğin faz karşılaştırma yönteminde antenler arası uzaklık kapsanan frekans bandına göre seçilmelidir. Sinyalin frekansı arttıkça, dalga boyu kısalır. Dalga boyu, sinyalin bir tam dalga periyodunu tamamlaması için gereken mesafeyi temsil eder. Yüksek frekanslı sinyaller için antenler arası uzaklık daha küçük olabilirken, düşük frekanslı sinyaller için daha büyük olabilir. Daha kısa antenler arası uzaklık, yön tespiti için daha yüksek doğruluk sağlayabilir. Daha küçük bir anten aralığı, faz farklarının daha hassas bir şekilde ölçülmesini sağlar. Ancak, sistemin faz ölçüm hassasiyeti çok küçük bir anten aralığı kullanımını sınırlayabilir. Bu durumda, antenler arası uzaklığın optimum değeri, doğruluk ve uygulanabilirlik arasında bir optimizasyon oluşturmalıdır. Genlik karşılaştırma yönteminde ise antenler arası uzaklığın fazla olması antenlere ulaşan gücün farklı olmasına yol açmaktadır. Antenlere ulaşan gücün farklı olması genlik karşılaştırma ile yön bulma hatalarını arttırmaktadır.

3.2.2. Ölçüm hassasiyeti

Yön ölçüm hesaplamalarında, RF sinyal parametrelerinin doğru ölçümü önemli bir yere sahiptir. Darbe parametrelerinin hatalı ölçümü yön bulma hatalarını arttırmaktadır. Örneğin genlik karşılaştırma yönteminde alıcının genlik ölçüm hassasiyeti fazla ise genlik farkını daha hassas olarak ölçebilir ve daha hassas yön ölçüm verileri elde edilebilir. Geliş zamanı farkı ile yön bulma yönteminde, alıcının zaman ölçme hassasiyeti yön bulma doğruluğunu etkilemektedir. Benzer şekilde, faz karşılaştırma yönteminde alıcının faz farkı ölçme hassasiyeti yön bulma doğruluğunu etkilemektedir.

3.2.3. Çoklu yol (multi path) etkisi

Çoklu yol etkisi, RF sinyalin çevredeki nesnelerden, alıcı platformun yüzeyinden veya yer yüzeylerden yansımalar, difraksiyonlar veya saçılmalar gibi birden fazla yol alması durumunda meydana gelir. Yön bulma (DF) sistemlerinde, çoklu yol etkileri, sinyallerin geliş yönünün belirlenmesinde üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Şekil 3.8’de tehditten yayılan gerçek sinyal ve yer yüzeyinden yansıyarak alıcı platforma ulaşan sinyaller gösterilmiştir.



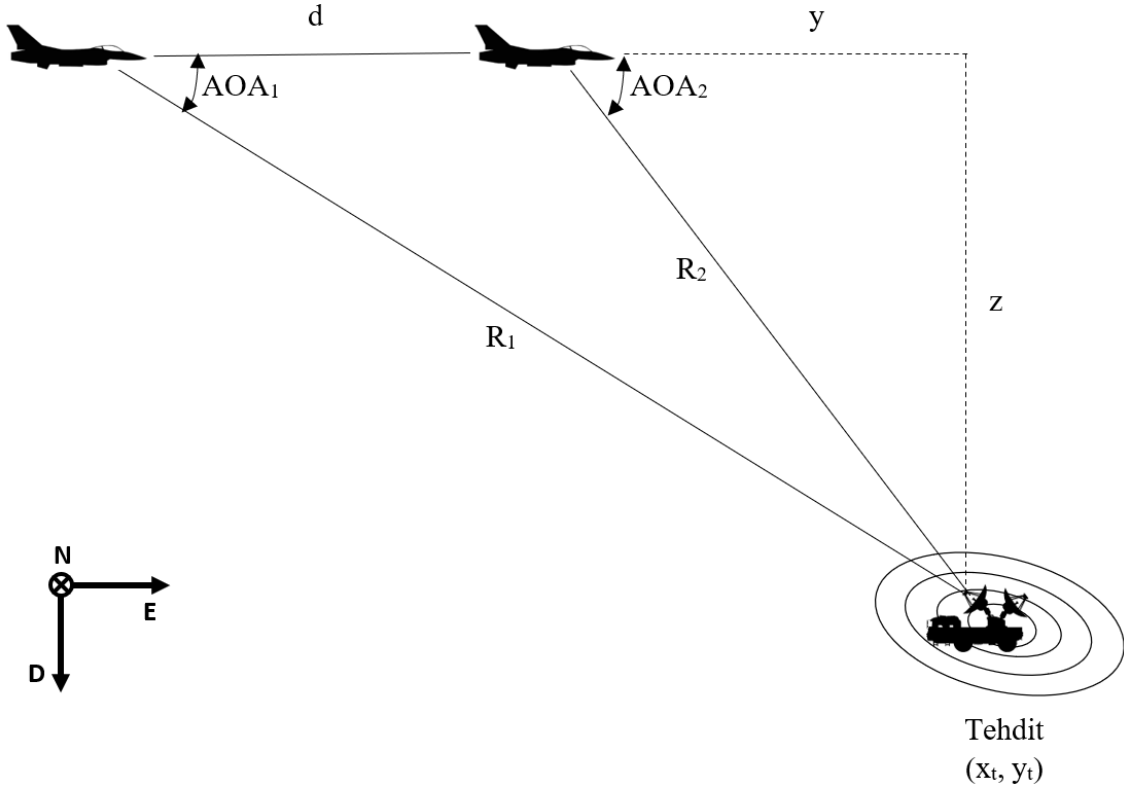
Şekil 3.8. Çoklu Yol Etkisi

Doğrudan gelen sinyal ile yansıyan sinyaller arasındaki geliş zamanlarındaki ve yönündeki farklar, yön bulma hatalarına neden olur. Yansımalar ve yüzeylerden saçılma, alınan sinyallerde gecikmelere, faz kaymalarına ve genlik değişimlerine neden olabilir. Bu bozulmalar, alınan sinyallerin tutarlılığını etkileyebilir ve geliş zamanı farkı veya faz karşılaştırma gibi geliş zamanı ya da faz farkına dayalı yön bulma tekniklerinde hatalara neden olur. Faz farklı gelen sinyallerin girişimi ile alıcıya ulaşan sinyalin genliğinde değişimler yaşanabileceği için genlik karşılaştırma ile yön bulma yöntemi de çoklu yol etkisinden etkilenir.

3.3. Geolokasyon

Bölüm 3.1’de geolokasyon fonksiyonu için gereken RF sinyallerin geliş yönünün bulunması ile ilgili yöntemler verilmiştir. Geolokasyon, hareketli ya da sabit platformlar tarafından elde edilen yön verilerinden tehdit konumunun pasif olarak kestirilmesidir. Pasif sistemler, başka bir kaynaktan gelen sinyalleri algılayarak çalışırlar. Bu sistemler, sinyali algılamak için radar gibi kendi sinyalini yayma ihtiyacı duymazlar.

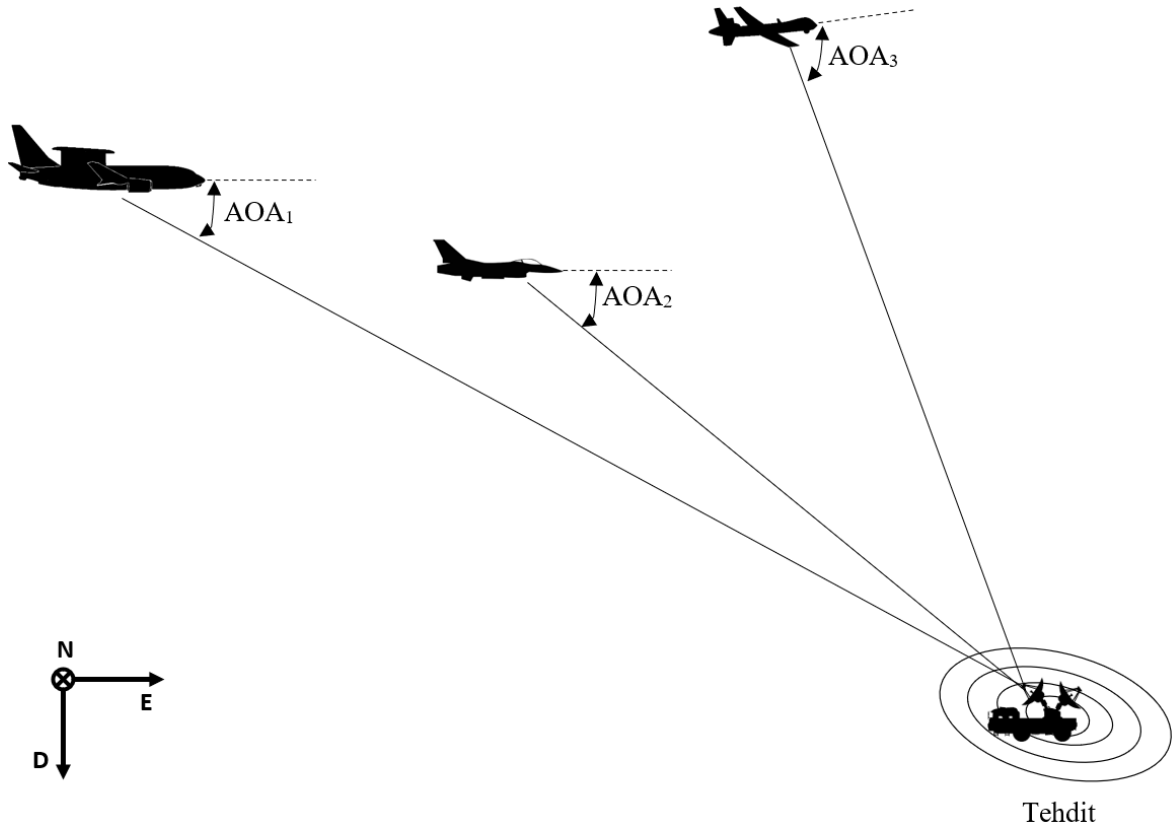
Elektronik Harp (EH) ve Haberleşme İstihbaratı (SIGINT) gibi alanlarda geolokasyon, iletişim sinyallerinin veya elektromanyetik emisyonların kaynağını tespit etmek için önemli bir tekniktir. Bu teknik, düşmanın iletişim sinyallerini, radar pozisyonlarını veya diğer elektronik emisyon kaynaklarını belirleme yeteneği sağlar. Şekil 3.8’de bir geolokasyon senaryosu verilmiştir. Bu senaryoda bir hava platformu ile RF yayın yapan bir yer tehdidinin konumunun enlem ve boylamda pasif olarak kestirilmesi gösterilmiştir. Senaryoda platform, d ile gösterilen rotada düz uçuş yapmaktadır. Platform uçuş boyunca yerde bulunan tehditten yayılan RF sinyallerin yönünü hesaplamaktadır. Hesaplanan yön verileri (AOA) ile tehdide olan mesafe pasif olarak bulunabilir. Hesaplanan pasif mesafeler ve yön verileri ile yer tehdidinin konumu kestirilebilir. Bu yöntemle üçgenleme (triangulation) denir. Bölüm 4’te üçgenleme yöntemi ve geolokasyon hesaplamaları detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 3.9. Geolokasyon Senaryosu

Çoklu platform geolokasyon, bir tehdidin coğrafik konumunu birden çok kaynaktan veya platformdan gelen verileri birleştirerek belirleme yöntemidir. Bu platformlar, radar, GPS, iletişim sistemleri, elektronik harp ve daha fazlası gibi çeşitli türde sensörleri içerebilir. Amaç, çeşitli kaynaklardan gelen bilgilerin entegrasyonu ile geolokasyon hassasiyetini, güvenilirliğini ve kapsamını artırmaktır.

Çoklu platform geolokasyon senaryosu Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Bu senaryoda üç farklı platformdan elde edilen veriler ile tehdit konumu hesaplanmaktadır. Bu hesaplamamanın matematiksel modeli Bölüm 8’de verilmiştir.



Şekil 3.10. Çoklu Platform Geolokasyon Senaryosu

4. GEOLOKASYON ALGORİTMASI

4.1. Algoritmada Kullanılan Parametreler

Elektromanyetik yayın yapan bir sinyal kaynağının konumunun belirlenmesi için kullanılan yöntemlerden biri üçgenleme metodudur. Bu metodun amacı, alıcı platformun, farklı konumlardan sinyal kaynağına ait elde ettiği yön bilgileri ile sinyal kaynağının konumunu enlem ve boylamda trigonometrik olarak bulunmaktır.

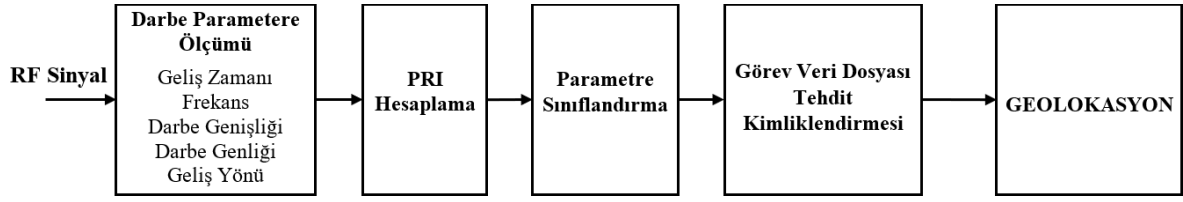
Üçgenleme metodu ile yapılan geolokasyon algoritması ile sinyal kaynaklarının konumunun bulunabilmesi için çeşitli verilere ihtiyacı vardır. Bir platformun geolokasyon yapabilmesi için bu verileri elde edebilecek ve elde edilen verileri işleyebilecek donanımlara sahip olması gerekmektedir. Donanım özellikleri geolokasyon fonksiyonun amacına göre belirlenebilmektedir. Özellikle askeri uygulamalarda en az hata ile tehdit konumlandırması yapılması gerektiği için askeri platformlarda kullanılan donanımların ölçüm hassasiyeti oldukça yüksek seçilir. Bu tez çalışmasında standart donanıma sahip hava platformları ele alınmıştır.

Tablo 4.1’de geolokasyon algoritması için gerekli parametreler, bu parametrelerin hangi donanımlar ile ölçülebileceği ve ölçüm hassasiyetleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Geolokasyon Parametreleri ve Gerekli Donanımlar

Parametre	Donanım	Ölçüm Hatası
Zaman	GPS	20 – 30 nanosaniye
Sinyalin Geliş Yönü	Radar İkaz Alıcısı (RİA)	1 – 2 derece
Platformun Baş Açısı	Manyetik Pusula	0.5 – 1 derece
	İstikamet Cayrosu	0.1 – 0.5 derece
	INS/GPS	<0.1 derece
Platformun Konumu	INS/GPS	1- 5 metre

RİA’nın yön ölçme hatası kullanılan antenlerin yerleşimi, frekans aralığı, çoklu yol (multipath) etki ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebilir. Bu faktörlere Bölüm 3.2’de yer verilmiştir.



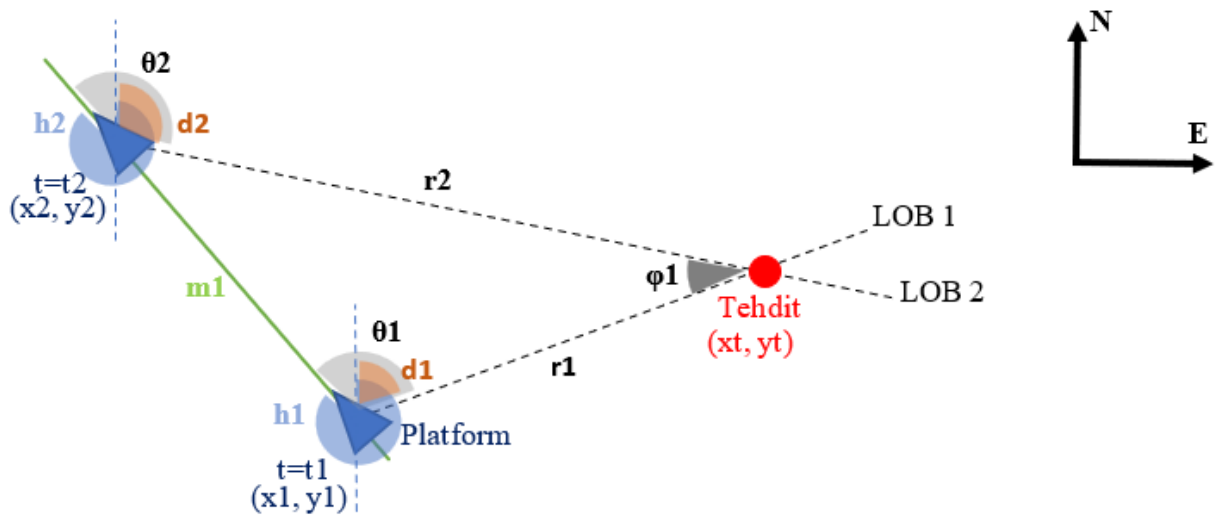
Şekil 4.1. RF Sinyal Ayırıştırma ve Kimliklendirme

Geolokasyon fonksiyonu kimliklendirilmiş tehdit parametreleri ile yapılmaktadır. Gelen RF sinyallerin ayrıştırılması ve kimliklendirilmesi ile ilgili akış Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu tez çalışmasında, gerekli parametrelerin platform tarafından ölçüldüğü varsayımı ile ilerlenecektir. Gerekli parametrelerin ve ölçüm hatalarının modellenmesi Bölüm 5.2’de verilmiştir.

Yön verisi, askeri platformda üzerinde bulunan elektronik destek sistemi olan radar ikaz alıcısı ya da sivil platformlara entegre edilmiş olan faz dizili anten yapısı ve çok kanallı bir alıcı ile elde edilmektedir. Bu veri, alındığı konum, baş açısı ve zaman bilgileriyle birlikte platform tarafından kaydedilir.

4.2. Üçgenleme Methodu

Şekil 4.2’de gösterildiği gibi, platform t_1 ve t_2 aralığı boyunca baş açısını değiştirmeden hareket etmektedir. t_1 anı, platformun ilk yön bilgisini elde ettiği andır. t_2 anında platform ikinci yön verisini elde eder ve ilk yön bilgisinde olduğu gibi zaman ve konum bilgisiyle birlikte kaydeder. t_1 ve t_2 anında kaydedilen veriler Tablo 4.2’dir.



Şekil 4.2. Üçgenleme Methodu Geometrisi

Tablo 4.2. Üçgenlemede Kullanılan Veriler

Zaman	Sinyalin Geliş Yönü (Direction of Arrival – DoA)	Sinyalin Geliş Açısı (Angle of Arrival – AoA)	Platformun Baş Açısı (Heading)	Platform Konumu
t_1	d_1	θ_1	h_1	(x_1, y_1)
t_2	d_2	θ_2	h_2	(x_2, y_2)

Sinyalin yönü, farklı referanslara göre verilebilir. Örneğin, platformun baş açısının kuzeye göre verilmesi gibi sinyalin geliş yönü de kuzeyi referans alan NED (North-East-Down) koordinat sistemine göre verilebilir. Buna sinyalin geliş yönü (Direction of Arrival – DoA) denir. Diğer bir gösterim ise platformunu burnuna (boresight) göre sinyalin yönünün verilmesidir. Buna sinyalin geliş açısı (Angle of Arrival – AoA) denir.

Bu iki gösterim şekli, platformun baş açısını hesaba katarak birbirine dönüştürülebilir. Bu iki gösterim arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

EĞER (Geliş Yönü (DoA) > Baş Açısı) Geliş Açısı (AoA) = Geliş Yönü (DoA) – Baş Açısı DEĞİLSE Geliş Açısı (AoA) = 360 – Baş Açısı – Geliş Yönü (DoA)
--

Tablo 4.2’deki verilere göre platformun katettiği mesafe (m_1) denklem (4.1) ile bulunabilir.

$$m_1 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (4.1)$$

Tehdidin, t_1 ve t_2 anında platforma göre uzaklığı r_1 ve r_2 , denklem (4.2)’de verilen sinüs teoremi ile bulunabilir.

$$\frac{\sin \theta_1}{r_2} = \frac{\sin(180 - \theta_2)}{r_1} = \frac{\sin \varphi_1}{m_1} \quad (4.2)$$

$$(180 - \theta_2) + \theta_1 + \varphi_1 = 180 \Rightarrow \varphi_1 = \theta_2 - \theta_1 \quad (4.3)$$

$$r_1 = \frac{m_1 \sin(180 - \theta_2)}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (4.4)$$

$$r_2 = \frac{m_1 \sin \theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (4.5)$$

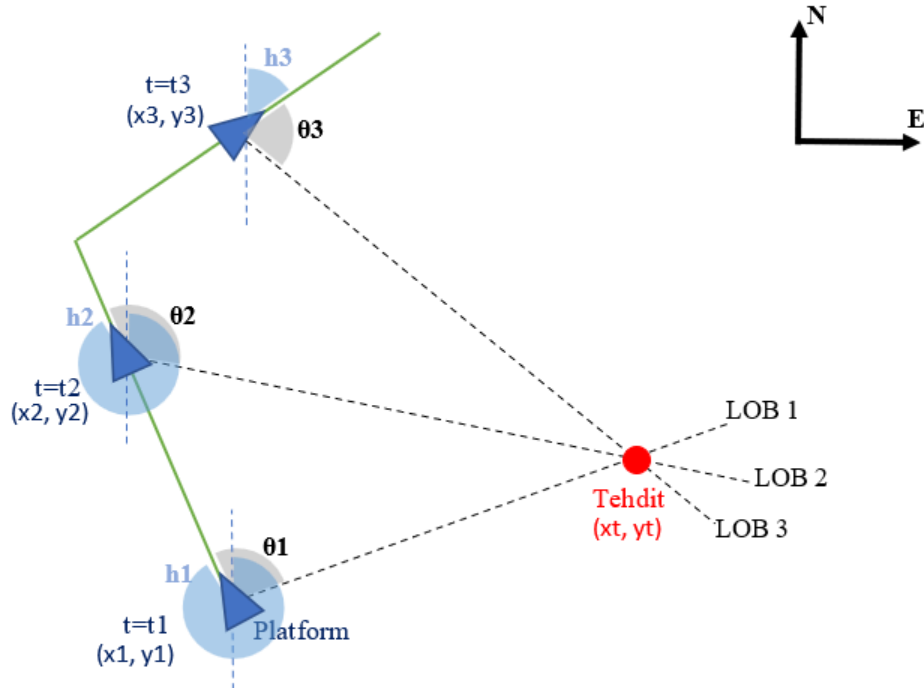
Tehdidin konumu (x_{te} ve y_{te}), sinyalin geliş yönü (d_1 ve d_2) ve hesaplanan r_1 ve r_2 mesafeleri denklem (4.6) ve (4.7) aşağıdaki denklemlerle bulunabilir.

$$x_{te} = r_1 \sin d_1 \quad \text{ya da} \quad x_{te} = r_2 \sin d_2 \quad (4.6)$$

$$y_{te} = r_1 \cos d_1 \quad \text{ya da} \quad y_{te} = r_2 \cos d_2 \quad (4.7)$$

Yukarıdaki trigonometrik denklemler, platform baş açısının sabit olduğu durumlarda uygulanabilir. Baş açısı değişikliğinin getirdiği değişiklikleri gidermek için ölçülen yön verilerine bazı düzeltmelerin uygulanması gerekmektedir.

Şekil 4.3’de verilen senaryoda, t_2 ve t_3 anındaki baş açıları birbirinden farklıdır. Bu nedenle ölçülen geliş açılarında düzeltme gerekmektedir. Düzeltme faktörü uygulandıktan sonra, Şekil 4.4’te verilen figürdeki birinci üçgende sinüs teoremi uygulanarak r_1 ve r_2 değerleri bulunabilir.



Şekil 4.3. Farklı Baş Açılı Üçgenleme Geometrisi

Şekil 4.3’deki senaryoda, platform t_3 anında t_2 ’den farklı bir baş açısına sahiptir. Bu nedenle t_2 ve t_3 anında ölçülen geliş açılarında (θ_2 ve θ_3) düzeltme yapılması gerekmektedir.

$$\theta_2 = \theta'_2 + e + (360 - h_2) \quad (4.8)$$

Trigonometrik değerler kendini 2π (360°) tekrarladığı için denklemdeki 360 derece, 0 derece olarak alınabilir. Bu durumda düzeltilmiş yeni geliş açısı değeri:

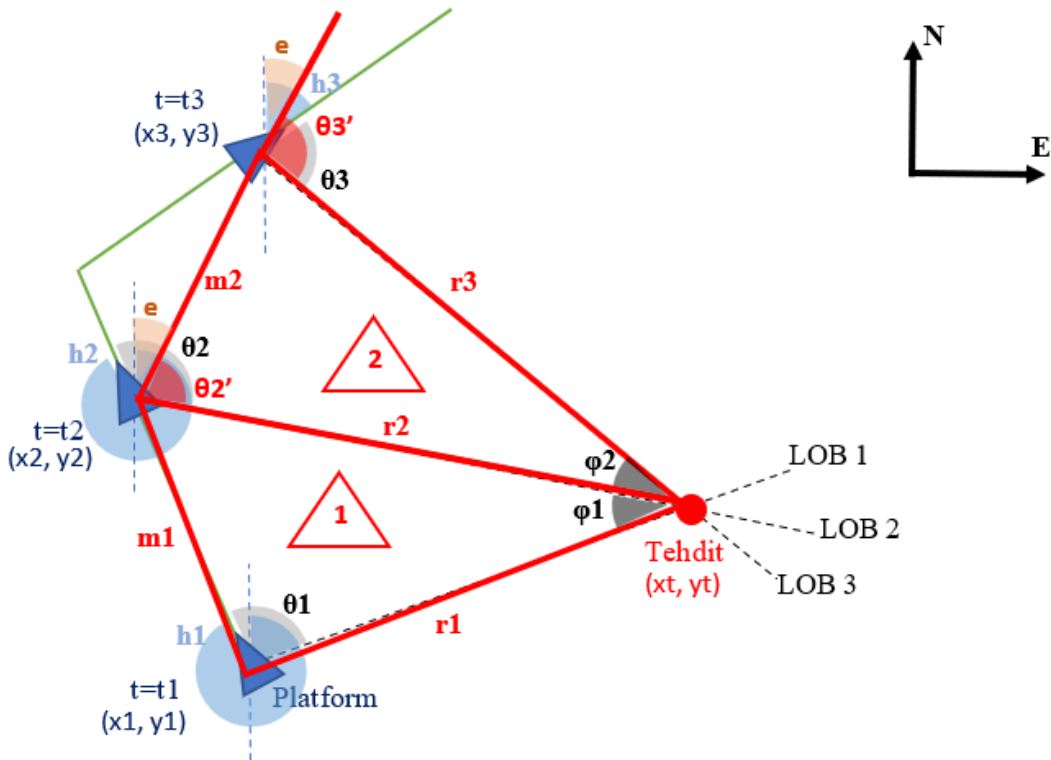
$$\theta'_2 = \theta_2 + h_2 - e \quad (4.9)$$

Yer değiştirme açısı olarak adlandırılan “e” açısı t_2 ve t_3 anındaki konumların açısal farkını göstermektedir ve denklem (4.10) ile hesaplanmaktadır.

$$e = \tan^{-1} \left(\frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} \right) \quad (4.10)$$

Aynı düzeltme işlemi θ_3 için de yapılmalıdır.

$$\theta'_3 = \theta_3 + h_3 - e \quad (4.11)$$



Şekil 4.4. Baş Açısı Değişikliğinin Düzeltmesi Geometrisi

Düzeltilmiş geliş açıları elde edildikten sonra platform ve tehdit arasındaki mesafeleri bulmak için denklem (4.15)'teki sinüs teoremi uygulanabilir.

1. Üçgen için;

$$m_1 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (4.12)$$

$$\frac{\sin 180 - \theta_2}{r_1} = \frac{\sin \varphi_1}{m_1} \quad (4.13)$$

$$\varphi_1 = \theta_2 - \theta_1 \quad (4.14)$$

$$r_1 = \frac{m_1 \sin(180 - \theta_2)}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (4.15)$$

İlk üçgende platformun baş açısı değişmediği için düzeltme uygulanmamıştır. Ancak (4.9) numaralı düzelme denklemi uygulansa bile yer değiştirme açısı ve baş açısı birbirini götürmektedir. Bu nedenle bütün hesaplamalarda düzeltme faktörü uygulanmıştır. Baş açısında değişiklik yoksa düzeltme faktörü sıfır olup geliş açısında değişiklik yaratmamaktadır. Bu nedenle mesafe bulma fonksiyonundaki (4.15) geliş açı değerleri, düzeltilmiş geliş açısı değeriyle değiştirilebilir. Bu durumda r_1 mesafesi denklem (4.16) ile bulunabilir.

$$r_1 = \frac{m_1 \sin(180 - \theta'_2)}{\sin(\theta'_2 - \theta'_1)} \quad (4.16)$$

2. Üçgen için;

$$m_2 = \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2} \quad (4.17)$$

$$\frac{\sin 180 - \theta'_2}{r_2} = \frac{\sin \varphi_2}{m_2} \quad (4.18)$$

$$\varphi_2 = \theta'_3 - \theta'_2 \quad (4.19)$$

$$r_2 = \frac{m_2 \sin(180 - \theta'_3)}{\sin(\theta'_3 - \theta'_2)} \quad (4.20)$$

(4.16) ve (4.20) numaralı denklemler göz önüne alındığında hesaplamaların iteratif olarak devam ettiği görülmektedir. Bu sayede birden fazla geliş açısı ölçüm sonuçlarından çok sayıda tehdit konumu elde edilebilmektedir. Algoritma denklem (4.21)'deki gibi her bir konum için tekrarlanabilir.

$$r_i = \frac{m_i \sin(180 - \theta'_{i+1})}{\sin(\theta'_{i+1} - \theta'_i)} \quad (4.21)$$

5. SİMÜLASYON MODELİ

Simülasyonun ortamının oluşturulması için MATLAB ve Microsoft Office Excel programları kullanılmıştır. Simülasyon zaman aralığı 0.1 saniye olarak belirlenmiştir. Platform 0.1 saniyede bir, belirli bir hız ve baş açısıyla yer değiştirmektedir. Sinyal kaynağının konumu simülasyon boyunca sabittir.

5.1. Platform Hareketinin ve Sinyal Yön Ölçümünün Modellenmesi

Koordinat düzlemi olarak kartezyen ve kutupsal koordinat düzlemi dönüşümlü olarak kullanılmıştır. Platform, hareketini kartezyen koordinat düzleminde yapmaktadır. Platformun 0.1 saniye (Δt) sonraki konumu, kartezyen düzlemde hızı ve baş açısı değerleriyle denklem (5.1), (5.2) ve (5.3)'teki gibi hesaplanabilir.

$$x_{t+1} = x_t + \Delta t \cdot v_{t+1} \cdot \cos(h_{az(t+1)}) \cdot \cos(h_{el(t+1)}) \quad (5.1)$$

$$y_{t+1} = y_t + \Delta t \cdot v_{t+1} \cdot \sin(h_{az(t+1)}) \cdot \cos(h_{el(t+1)}) \quad (5.2)$$

$$z_{t+1} = z_t + \Delta t \cdot v_{t+1} \cdot \sin(h_{el(t+1)}) \quad (5.3)$$

Yukarıdaki denklemde Δt , 0.1 saniyelik zaman farkını ifade etmektedir. x_t , t anındaki konumu, x_{t+1} ise $t + \Delta t$ anındaki konumu ifade etmektedir. Platformun hızı “v” ile gösterilmiş olup birimi m/s’dir. Baş açısının azimut bileşeni “ h_{az} ”, elevasyon bileşeni “ h_{el} ” ile gösterilmiş olup birini derecedir.

Sinyal yön verileri kutupsal koordinat düzleminde modellenmiştir. Sinyalin geliş yönü sinyal kaynağına göre denklem (5.4) ve (5.5)’te hesaplanmıştır.

$$DOA_{az} = \tan^{-1} \left(\frac{y_{te} - y_{pl}}{x_{te} - x_{pl}} \right) \quad (5.4)$$

$$DOA_{el} = \tan^{-1} \left(\frac{z_{te} - z_{pl}}{\sqrt{(x_{te} - x_{pl})^2 + (y_{te} - y_{pl})^2}} \right) \quad (5.5)$$

$$R = \sqrt{(x_{te} - x_{pl})^2 + (y_{te} - y_{pl})^2 + (z_{te} - z_{pl})^2} \quad (5.6)$$

$$r = \sqrt{(x_{te} - x_{pl})^2 + (y_{te} - y_{pl})^2} \quad (5.7)$$

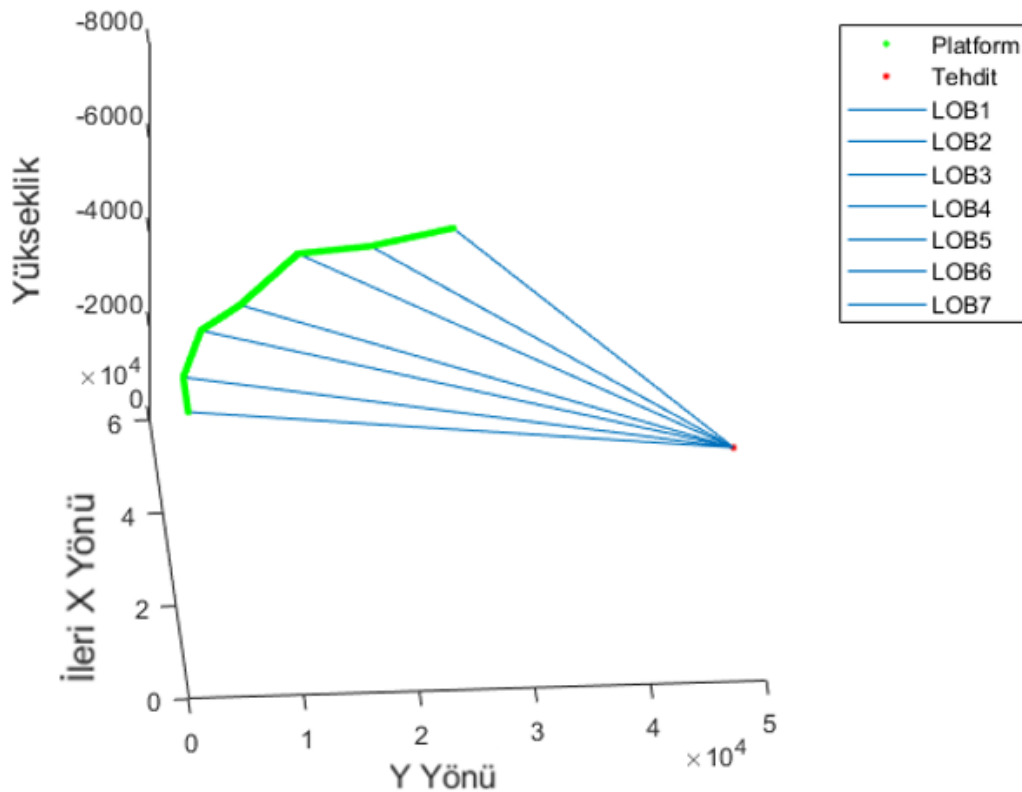
DOA_{az} sinyalin geliş yönünün azimut bileşenini, DOA_{el} ise elevasyon bileşenini göstermektedir. Tehdit ile platform arasındaki mesafe “R” ile gösterilmiştir. Bu mesafenin x-y düzlemindeki bileşeni “r” ile gösterilmiştir. Hesaplanan geliş yönü ve menzil değerleri ile tehdidin konumu denklem (5.8), (5.9), ve (5.10) ile bulunabilir.

$$x_{te} = x_{pl} + r \cdot \cos(DOA_{az}) \quad (5.8)$$

$$y_{te} = y_{pl} + r \cdot \sin(DOA_{az}) \quad (5.9)$$

$$z_{te} = z_{pl} + r \cdot \tan(DOA_{el}) \quad (5.10)$$

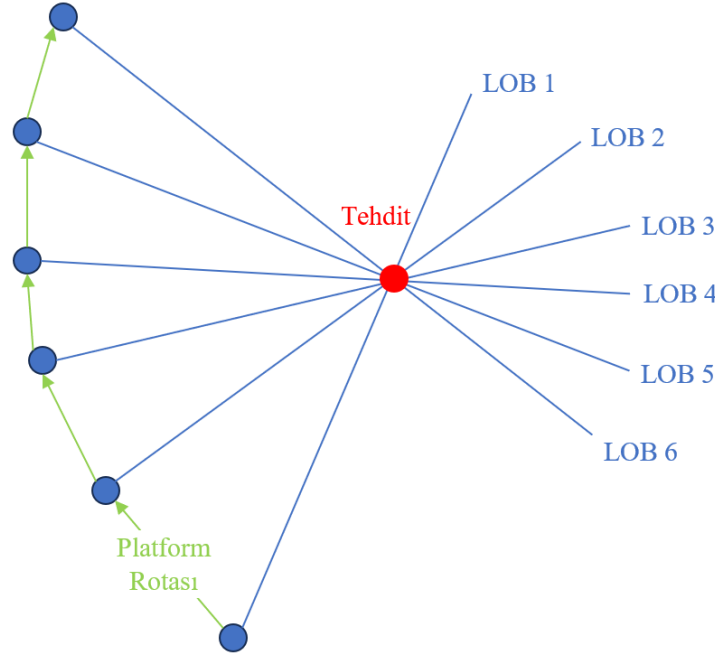
Simülasyon 180 saniye boyunca sürmektedir. Bu süre boyunca platform çeşitli manevralar yaparak ilerlemektedir. Platform hareketi ve toplanan geliş yönü çizgileri Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Platform Hareketi ve Sinyal Geliş Yönleri

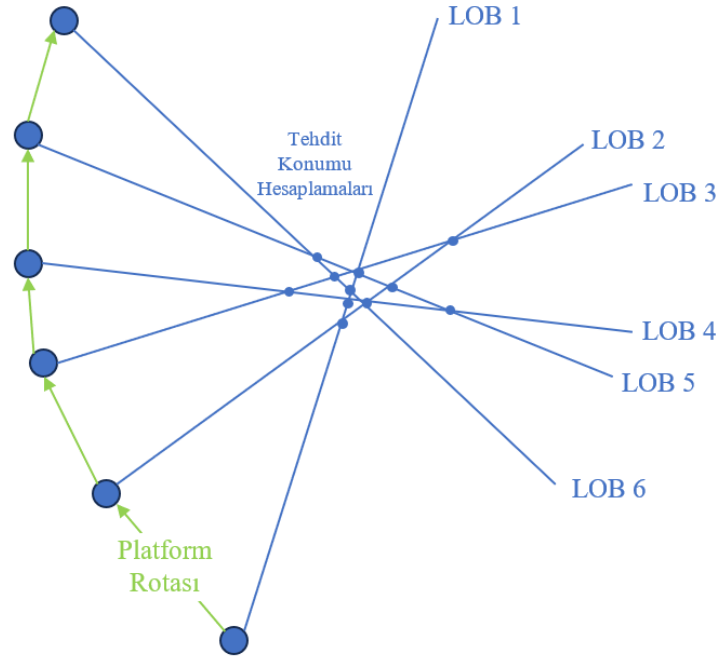
5.2. Yön Ölçüm Hatalarının Modellenmesi

Yön ölçüm hatalarının olmadığı bir durumda, yani yön bilgisinin kesin ve hatasız olduğu bir ortamda, geolokasyon tehdit konum kestirimleri oldukça doğru ve güvenilir olurdu. İdeal bir durumda, herhangi bir yön ölçüm hatası olmaksızın, bir tehdidin konumu belirlenirken kullanılan diğer parametreler (örneğin, mesafe, zaman, hız vb.) dikkate alındığında, tehdidin konumu daha doğru bir şekilde tahmin edilebilir. İdeal durumda platform tarafından ölçülen bütün parametreler doğrudur ve geolokasyon algoritması sonucu elde edilen bütün konum verileri Şekil 5.2’de gösterildiği gibi bir noktada kesişmektedir.



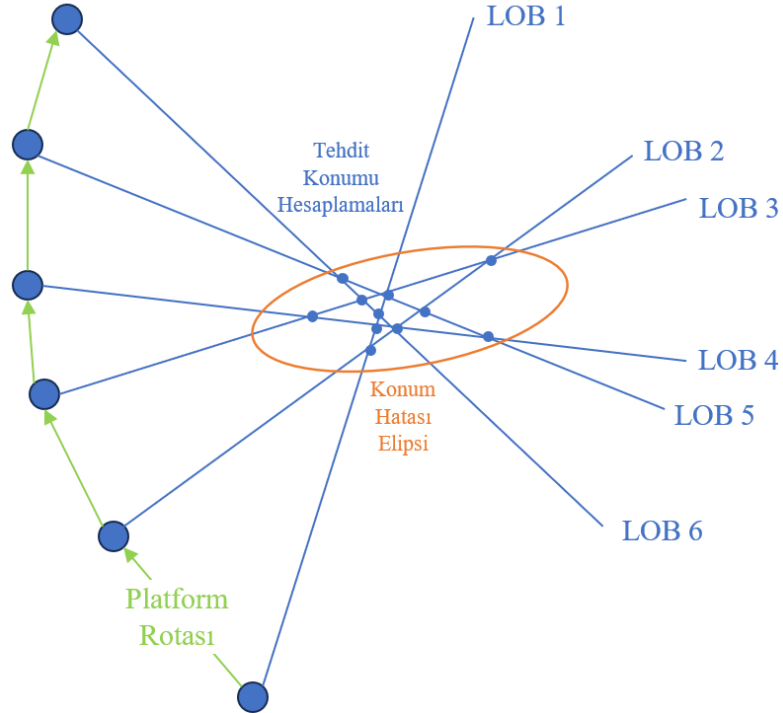
Şekil 5.2. İdeal Durumda Tehdit Konumu Ölçümü

Ancak gerçekte, yön ölçümünde bazı hatalar ve belirsizlikler her zaman mevcuttur. Bu hatalar, tehdidin konumunun belirlenmesini etkileyebilir ve sonuçları doğruluk açısından sınırlayabilir. İdeal olmayan durumda yön ölçüm verilerinde hatalar bulunmaktadır. Bu hatalar; anten yerleşimi, alıcıdaki gürültü, çoklu yol etkisi ya da platformun konum ve zaman ölçüm hatalarından kaynaklanıyor olabilir. Bölüm 3.2’de yön bulma hata kaynakları verilmiştir. Bu durumda, ölçülen tehdit konumları bir noktada kesişmek yerine Şekil 5.3’te görüldüğü gibi tehdit konumları belirli bölgeye dağılır.



Şekil 5.3. Gerçek Durumda Tehdit Konum Ölçümü

Bir bölgeye dağılmış tehdit konumları belirli bir yüzde ile Şekil 5.4'te görüldüğü gibi bir elips tarafından kapsanabilir. Bu elipse hata elipsi denir. Hata elipslerinin hesaplanması ile ilgili kısım Bölüm 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Konum Ölçümü Hata Elipsi

Yön ölçüm hatalarının, sadece yön ölçümü ile tehdit pozisyon kestirimi üzerine etkileri Gavish, Fogel [21] tarafından incelenmiştir. Bu sonuca göre, yön ölçüm verisi hataları ortalama değeri sıfır olan Gaussian Dağılımı ile modellenmiştir. Standart sapma değeri için sistemde kullanılan yön ölçüm cihazının ölçüm hata değeri referans alınmıştır. 3σ yön ölçüm hata değeri Tablo 4.1’de yaklaşık 2 olarak verilmiştir. Buna göre Gaussian Dağılımı, denklem (5.13) ile ifade edilebilir.

$$\mu = 0 \quad (5.11)$$

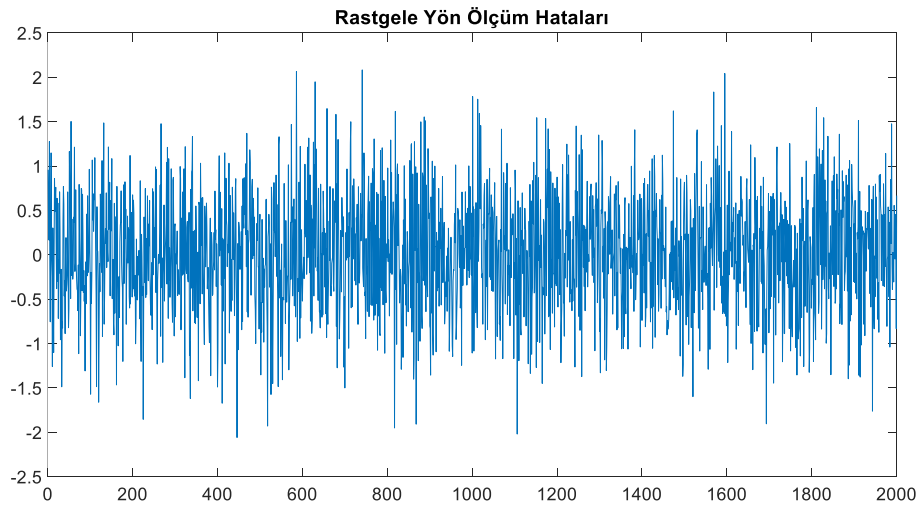
$$3\sigma = 2 \Rightarrow \sigma = 0.666 \quad (5.12)$$

$$N(\mu, \sigma^2) \Rightarrow N(0, 0.666^2) \quad (5.13)$$

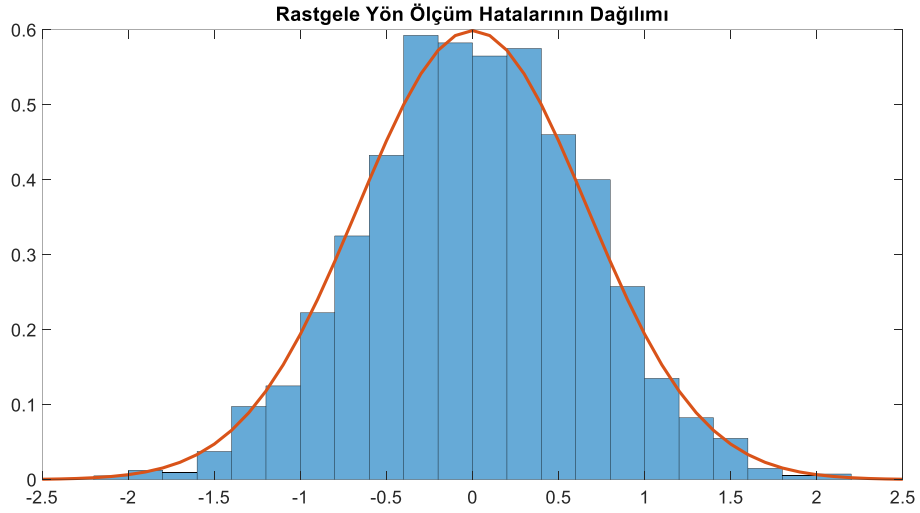
$N(0, 0.6662)$ dağılımı sağlayan yön ölçüm hatalarını oluşturmak için MATLAB’ın “normrnd(μ, σ)” fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon ile üretilen yön ölçüm hataları denklem (5.4)’te hesaplanan hatasız yön ölçüm değerlerine denklem (5.14)’teki gibi eklenerek hatalı yön ölçüm sonuçları elde edilmiştir.

$$DOA_{az} = \tan^{-1} \left(\frac{y_{te} - y_{pl}}{x_{te} - x_{pl}} \right) + N(\mu, \sigma^2) \quad (5.14)$$

Simülasyon boyunca her bir tehdit için 2000 adet yön ölçüm verisi elde edilmektedir. Bu ölçüm verilerine eklenen hatalar Şekil 5.5’te verilmiştir. Bu hataların $N(0, 0.6662)$ ile ifade edilen Gauss Dağılımları Şekil 5.6’da gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Rastgele Yön Ölçüm Hataları

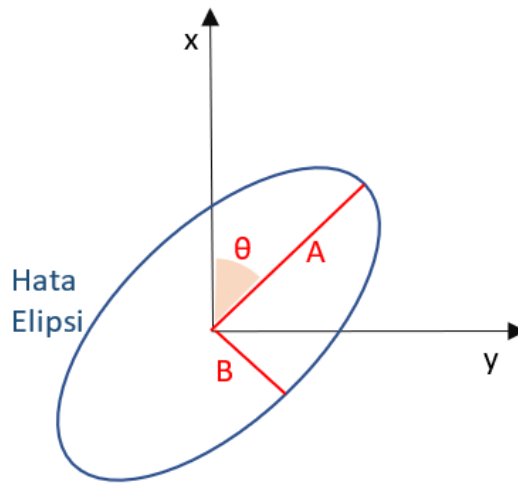


Şekil 5.6. Rastgele Yön Ölçüm Hatalarını Dağılımı

5.3. Hata Elipslerinin Hesaplanması

Hata elipsi, bir ölçümün gerçek değerinden ne kadar uzak olduğunu gösteren bir ölçüttür. Geolokasyon gibi coğrafi konum belirleme uygulamalarında bulunan konumun doğruluğunu belirlemek için kullanılır.

Hata elipsi çizmek için gereken parametreler, elipsin büyük ve küçük eksenleri, elipsin yönelimi ve konum verileri için gereken güven düzeyidir. Güven düzeyi, büyük ve küçük eksenlerin boyutlarının hesaplanmasında kullanılır. Hata elipsleri genellikle iki boyutlu bir grafikte gösterilir. Şekil 5.7’de verilen hata elipsinin uzun (A), kısa (B) eksenleri ve dönüklük açısı (θ), ölçümün doğruluğunu ve güvenilirliğini belirler.



Şekil 5.7. Hata Elipsi Geometrisi

2A uzunluğunda bir büyük eksen ve 2B uzunluğunda bir küçük eksen olan, merkezi orijinde bulunan bir elipsin denklem (5.15)'te verilmiştir. Burada x ve y parametreleri enlem ve boylam değerlerini ifade etmektedir.

$$\left(\frac{x}{A}\right)^2 + \left(\frac{y}{B}\right)^2 = 1 \quad (5.15)$$

A ve B eksenleri, verilerin standart sapmaları tarafından tanımlanır. x veri noktaları için σ_x ve y veri noktaları için σ_y olarak gösterilir. Standart sapma ile ölçülen değerlerin ortalama değerden ne kadar saptıklarını bulunur. “n” tane veri noktası kümesinin standart sapması aşağıdaki denklem (5.16)'daki gibi verilir. x veri noktalarının ortalama değeri μ_x ve y veri noktalarının ortalama değeri μ_y ile ifade edilir.

$$\sigma_x = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2}{(n - 1)} \right]} \quad (5.16)$$

Bu durumda (5.15) numaralı denklem (5.17)'ye dönüşür.

$$\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2 = C \quad (5.17)$$

C'nin değeri, elipsi çizmek gereken güven düzeyine göre seçilir. Örneğin, tüm konum tahminlerini kapsayan %95 güven düzeyine sahip bir elipsin C değeri 5.991'dir. Tablo 5.1'de, konum hatası elipsinde kullanılması gereken güven düzeyi değerleri gösterilmektedir.

Tablo 5.1. Güven Seviyesine Göre C Değerleri

Güven Seviyesi	C
%65	2.447
%90	4.605
%95	5.991
%99	11.210

x ve y'deki ölçüm sonuçları birbirinden bağımsız değilse ve aralarında bir korelasyon varsa, hata elipsi Şekil 5.7'de gösterildiği gibi θ açısıyla yönlendirilir. θ açısı denklem (5.18) ile hesaplanır.

$$\tan 2\theta = \frac{2\sigma_{xy}}{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)} \quad (5.18)$$

Denklem (5.18)'deki σ_x ve σ_y sırasıyla x ve y değerlerindeki standart sapmayı, σ_{xy} ise bu iki veri kümesinin kovaryansını ifade eder ve denklem (5.19) ile hesaplanır.

$$\sigma_{xy} = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)]}{(n - 1)} \quad (5.19)$$

Hata elipsinin uzun (A) ve kısa (B) eksenlerini bulmak için kovaryans matrisi kullanılır. Kovaryans matrisi, denklem (5.20) ile hesaplanabilir.

$$K = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

Kovaryans matrisinin özdeğerleri en büyüğü ile güven seviyesi C'nin çarpımı denklem (5.21)'deki gibi hata elipsinin uzun eksenini vermektedir. Kovaryans matrisinin özdeğerleri en küçüğü ile güven seviyesi C'nin çarpımı denklem (5.22)'deki gibi hata elipsinin kısa eksenini vermektedir.

$$A = C\sqrt{\max(\text{özdeğer}(K))} \quad (5.21)$$

$$B = C\sqrt{\min(\text{özdeğer}(K))} \quad (5.22)$$

Son olarak, elipsin merkezi belirlenir. Elipsin merkezi, ölçüm değerlerinin ortalamasıdır. Bu nedenle, elipsin merkezi, ölçüm değerlerinin x ve y bileşenlerinin ortalaması ile denklem (5.23)'teki gibi hesaplanabilir.

$$\text{merkez} = [\mu_x, \mu_y] \quad (5.23)$$

Dairesel Hata Olasılığı (Circular Error Probable – CEP), hata elipsi ile benzer kavramlardır. Geolokasyon uygulamasında CEP değeri, tehdidin belirli bir olasılıkla içinde

bulunduğu bir alanı temsil eden bir dairedir. CEP değeri hata elipsi parametrelerinden yararlanılarak denklem (5.24)'teki gibi yaklaşık olarak hesaplanabilir [22].

$$CEP \approx 0.75 \sqrt{A^2 + B^2} \quad (5.24)$$

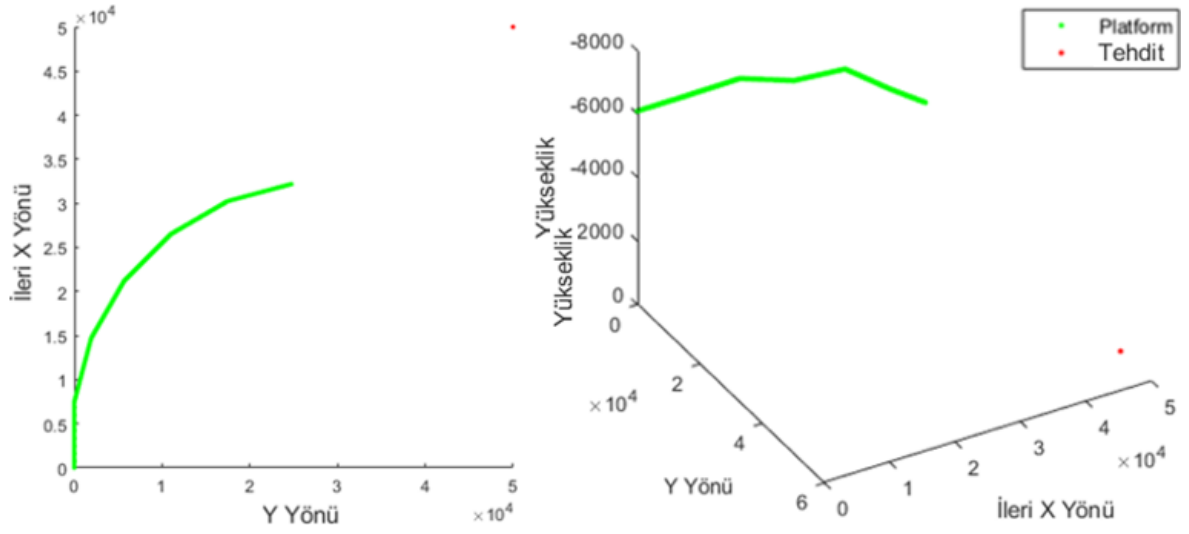
Farklı senaryolar ait geolokasyon performanslarını karşılaştırmak için hata elipsi ve CEP değeri kullanılmıştır. Tablo 5.2'de verilen parametreler ile her bir senaryonun geolokasyon performansları belirlenmiştir.

Tablo 5.2. Geolokasyon Hata Elipsi ve CEP değeri

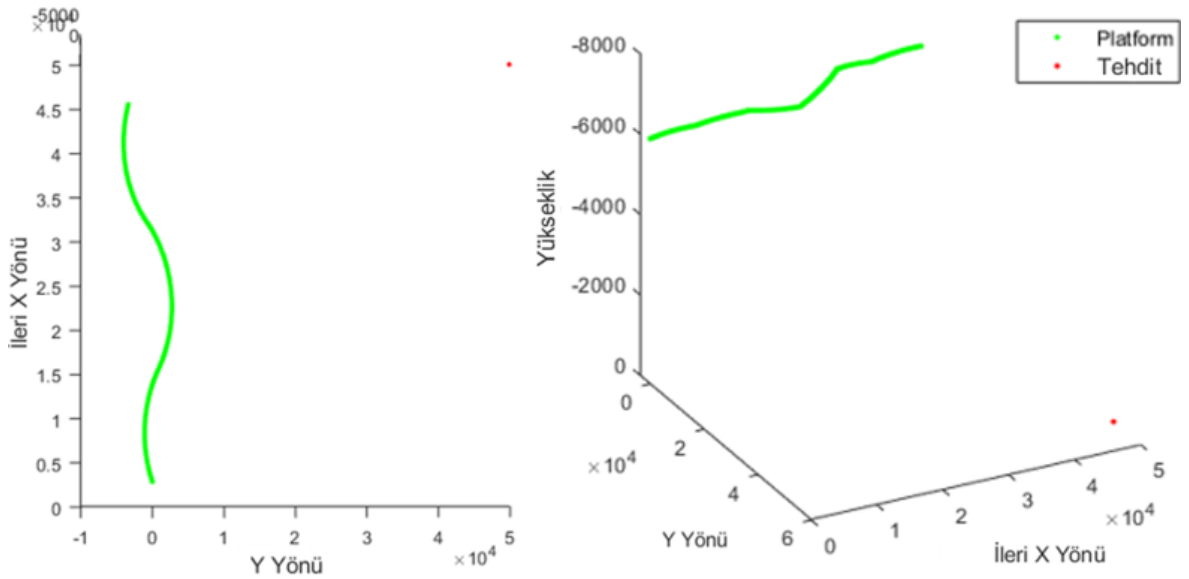
Uzun Kenar [km]	Kısa Kenar [km]	Yönelim [°]	CEP [km]

6. PLATFORM HAREKETİNİN İNCELENMESİ

Platform hareketinin geolokasyon performansına etkisini incelemek için iki farklı uçuş rotası oluşturulmuştur. Her iki rotada, platform başlangıç noktası (0, 0, -6096) ve tehdit konumu (50000, 50000, 0) aynıdır. İlk rotada uçak, her 20 saniyede bir 15 derecelik baş açısıyla tehditte yaklaşmaktadır. Uçuş rotası Şekil 6.1’de verilmiştir. İkinci senaryoda uçak, S manevrası yaparak ilerlemektedir. İkinci senaryoya ait uçuş rotası Şekil 6.2’de verilmiştir. İki senaryoda da platform uçuş boyunca elevasyonda hareket etmektedir. Simülasyon 180 saniye sürmektedir. Hesaplamalar 0.1 saniye aralıklarla yapılmaktadır.

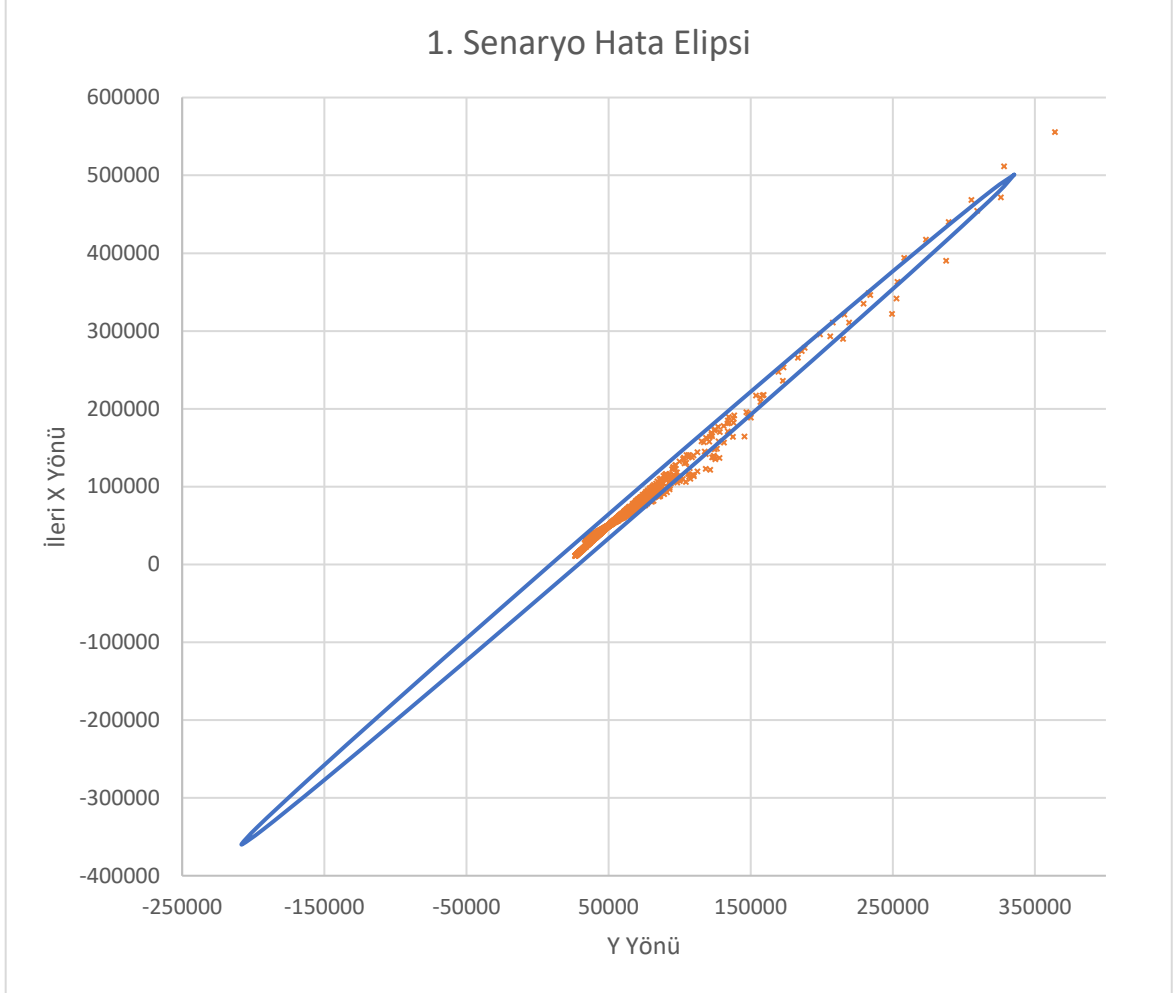


Şekil 6.1. Senaryo 1



Şekil 6.2. Senaryo 2

İlk senaryoya ait hata elipsi ve hesaplanan tehdit konumlarının dağılımı Şekil 6.3'te verilmiştir. Ölçülen konum verilerinin %95'ini kapsamaları için gerekli hata elipsinin uzun kenarı, kısa kenarı, yönelim ve CEP değeri yaklaşık olarak Tablo 6.1'de verilmiştir.

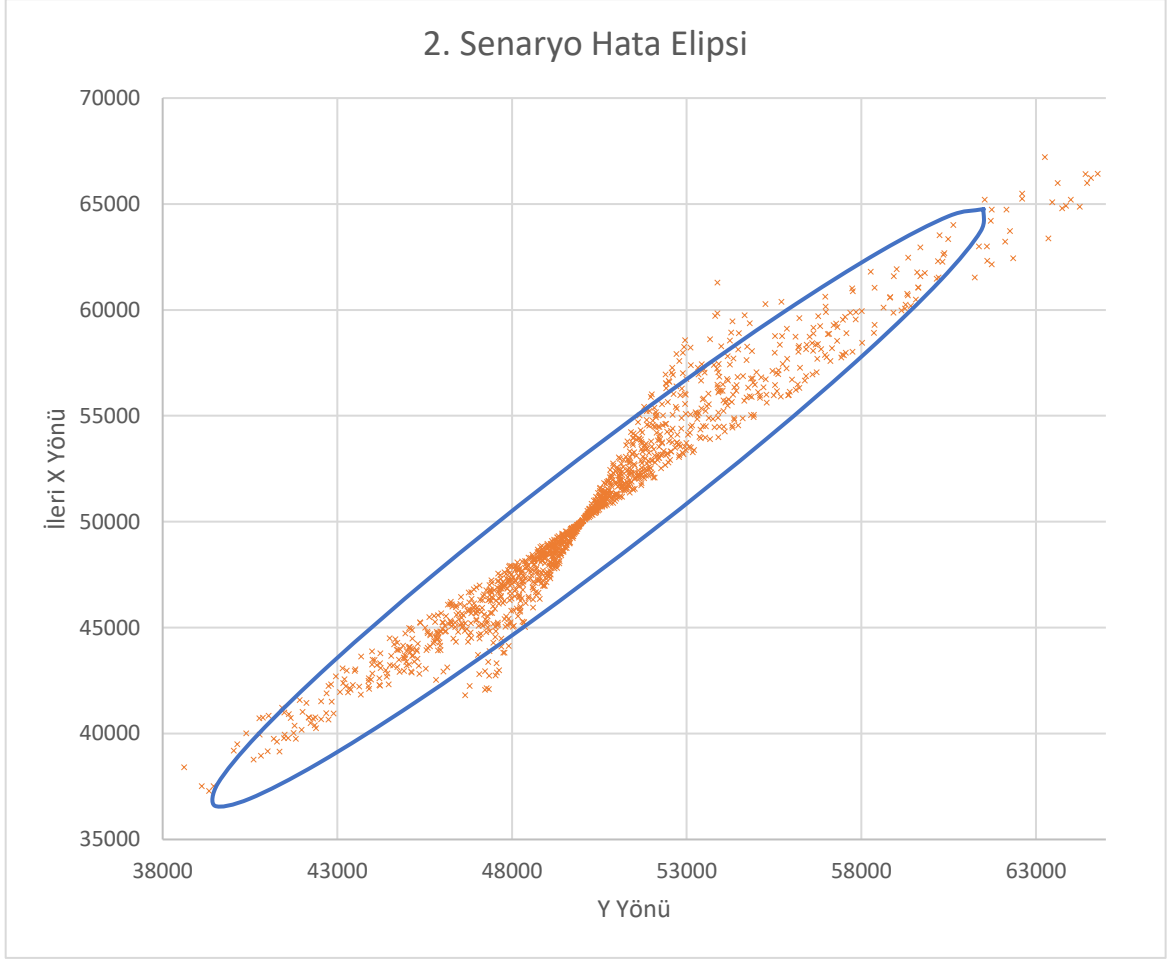


Şekil 6.3. Senaryo 1 Hata Elipsi

Tablo 6.1. Senaryo 1 Hata Elipsi Değerleri

Uzun Kenar [km]	Kısa Kenar [km]	Yönelim [°]	CEP [km]
500	8	57	375

İkinci senaryoya ait hata elipsi Şekil 6.4'te verilmiştir. Ölçülen konum verilerinin %95'ini kapsamaları için gerekli hata elipsinin uzun kenarı, kısa kenarı, yönelimi ve CEP değeri yaklaşık olarak Tablo 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.4. Senaryo 2 Hata Elipsi

Tablo 6.2. Senaryo 2 Hata Elipsi Değerleri

Uzun Kenar [km]	Kısa Kenar [km]	Yönelim [°]	CEP [km]
17	2	52	13

Her iki senaryoda da tehdidin konumunun hesaplanmasında, platforma 20 saniye farkla gelen iki sinyalin geliş yönü kullanılmıştır. Tablo 6.1’de görüldüğü gibi ilk senaryoda hesaplanan tehdit konumlarında yüksek oranda sapma vardır. Platformun yaptığı manevradan dolayı, platformun tehditte göre x ekseninde yaptığı açı değişimi düşüktür. Gürültünün getirmiş olduğu yön ölçüm hataları bu açı değişimine yakın olduğu durumda konum hesaplamalarında yüksek oranda sapma görülmektedir. Bu nedenle x koordinatındaki hatayı gösteren hata elipsinin uzun kenarı yüksek çıkmıştır. Eğer platform, doğrudan tehditte doğru uçarsa herhangi bir açı değişimi gözlemleyemeyeceği için geolokasyon fonksiyonunu gerçekleştiremeyecektir.

Tablo 6.2’de görüldüğü gibi, ikinci senaryoda platform farklı açılardan tehdidi gördüğü için ve 20 saniyede bir ölçülen yön verileri arasındaki açı farkı daha büyük olduğu için tehdit konumu ölçümündeki sapma ilk senaryoda olduğu gibi yüksek değildir.

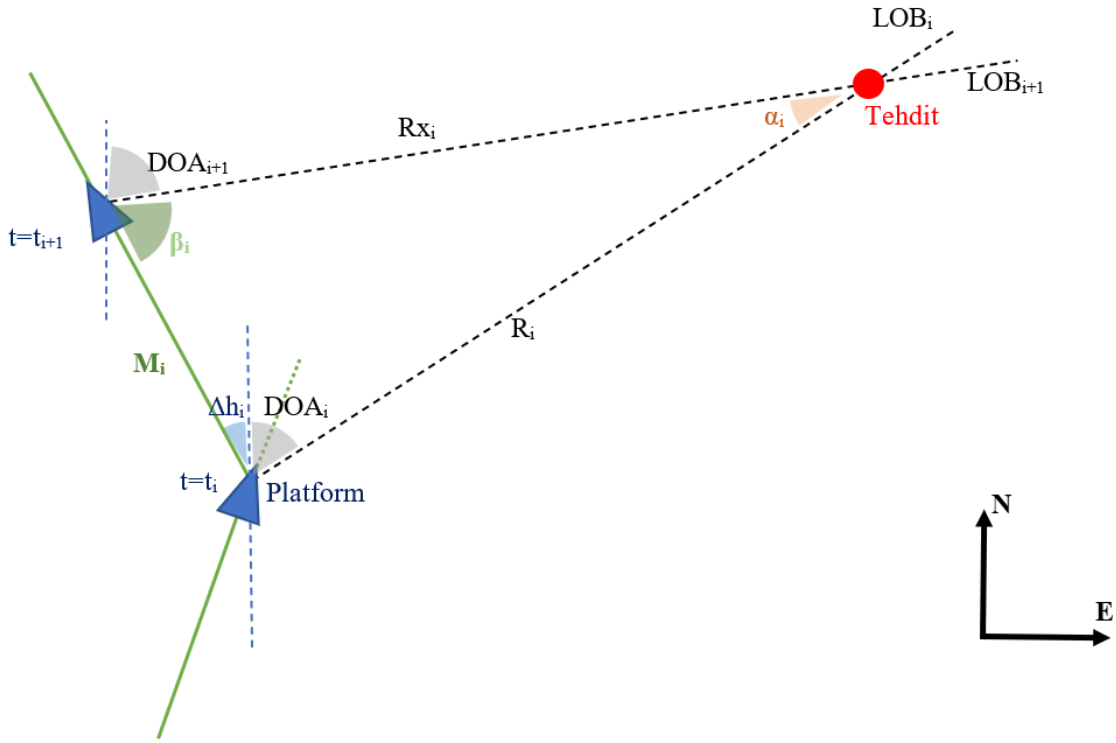
Senaryo 1 ve Senaryo 2’de elde edilen geolokasyon hata elipsi ve CEP değerleri karşılaştırıldığında platform hareketinin geolokasyon performansını oldukça etkilediği gözlemlenmiştir.

7. ROTA OPTİMİZASYONU

Bölüm 6’te geolokasyon hatasını azaltmak için tehdidin, platformun yön ölçüm hatasından daha geniş açılarda gözlemlenmesi gerekti sonucuna ulaşılmıştı. Bu çıkarımla, optimum rotayı oluşturmak için açı değişimini maksimize edecek baş açısı değerinin bulunması gerekmektedir.

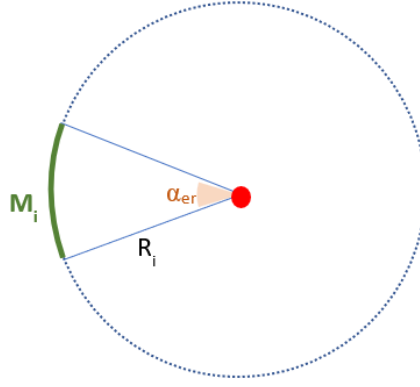
7.1. Bir Tehditte Göre Rota Optimizasyonu

Bir tehdit için oluşturulan senaryo Şekil 7.1’de verilmiştir.



Şekil 7.1. Bir Tehdit için Optimizasyon Geometrisi

α_i değeri, Şekil 7.1’de gösterildiği gibi tehdidin iki farklı konumdan gözlemlendiğinde oluşan açıdır. Maksimum α_i değerine ulaşmak için t_i andında hesaplanan menzil değeri R_i ve bir sonraki optimizasyon noktasına kadar gidilmesi gereken mesafe M_i değeri kullanılmaktadır. Tehdidi, sinyal yön ölçüm hatasından daha yüksek açılarda gözlemlemek için platformun katetmesi gereken mesafe M_i değeri, platformun tehditte olan uzaklığı ve yön ölçüm hatasına bağlıdır. M_i ’nin en küçük değeri yaklaşık olarak denklem (7.1) ile bulunabilir.



Şekil 7.2. M_i Mesafesi Bulma Geometrisi

$$M_i = 2\pi R_i \frac{\alpha_{er}}{360} \quad (7.1)$$

Hesaplanan M_i değeri ile platformun sürati ve optimizasyon aralığına karar verilebilir. (7.2) numaralı denklemde gösterildiği gibi platform sürati (v) ve optimizasyon aralığının (Δop) çarpımı bir sonraki optimizasyon noktasına kadar olan yer değiştirme mesafesi M_i 'yi vermektedir. M_i değerinin hesaplanandan daha fazla seçilebilir.

$$M_i = v_i * \Delta op \quad (7.2)$$

α_i değeri Şekil 7.1'de gösterilen üçgende sinüs teoremi uygulanarak bulunabilir. (7.3) numaralı denklemde, sinüs teoremi uygulandıktan sonra sinüsün tersi alınarak α_i değeri bulunmuştur. R_{x_i} değeri, gelecek optimizasyon noktasının tehditte olan uzaklığını ifade etmektedir. Bu değer, Şekil 7.1'de verilen üçgende kosinüs teoremi uygulayarak bulunabilir. Denklem (7.4)'te kosinüs teoremi uygulandıktan sonra bulunan R_{x_i} parametresi verilmiştir.

$$\alpha_i = \sin^{-1} \left[\frac{M_i}{R_{x_i}} \sin(DOA_i + \Delta h) \right] \quad (7.3)$$

$$R_{x_i} = \sqrt{R_i^2 + M_i^2 - 2R_i M_i \cos(DOA_i + \Delta h)} \quad (7.4)$$

Platformun baş açısı değişikliği sınırlamak için optimizasyona denklem (7.7)'de verilen kısıtlama eklenmiştir. Buna göre platforma en çok 60° 'lik baş açısı değişikliği önerilebilecektir. Ayrıca en küçük α_i değerinin yön ölçme hata değeri DOA_{er} 'den büyük olması sağlayan kısıt denklem (7.8)'de verilmiştir.

Bir tehdit için oluşturulan optimizasyon amaç fonksiyonu denklem (7.5)'te, kısıtlar denklem (7.7) ve (7.8)'de verilmiştir.

$$\begin{array}{ll} \text{Amaç} & \\ \text{Fonksiyonu:} & \text{Max } \alpha_i = f(\Delta h) = \sin^{-1} \left[\frac{M_i}{R_{x_i}} \sin(\text{DOA}_i + \Delta h) \right] \end{array} \quad (7.5)$$

$$R_{x_i} = \sqrt{R_i^2 + M_i^2 - 2R_i M_i \cos(\text{DOA}_i + \Delta h)} \quad (7.6)$$

$$\text{Kısıtlar: } \Delta h \in [-60, 60^\circ] \quad (7.7)$$

$$\alpha_i \geq \text{DOA}_{\text{er}} \Rightarrow \text{DOA}_{\text{er}} - \sin^{-1} \left[\frac{M_i}{R_{x_i}} \sin(\text{DOA}_i + \Delta h) \right] \leq 0 \quad (7.8)$$

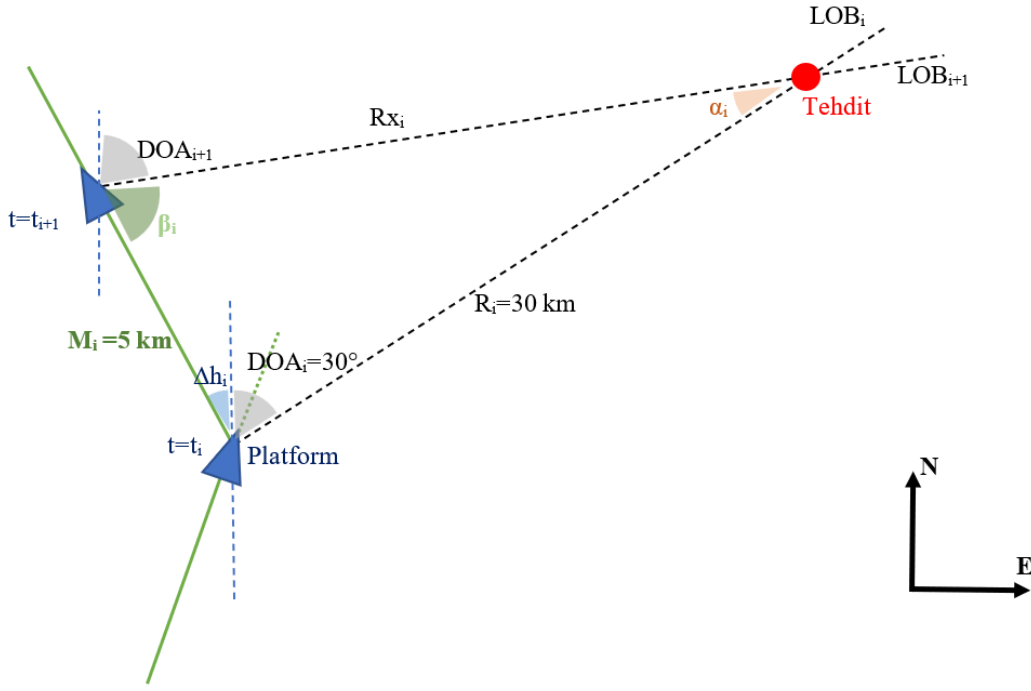
Denklem (7.5)'de verilen doğrusal olmayan optimizasyon problemi, denklem (7.7) ve (7.8)'de verilen doğrusal olmayan kısıtlamalar ile çözümlenince optimum rota için gerekli baş açısı değişikliği Δh değeri elde edilir. Yeni baş açısı değeri h_{i+1} denklem (7.9) ile gibi bulunabilir. Hesaplamalar, sinyalin geliş yönü (DOA) ile hesaplandığı için platformun optimizasyon anındaki baş açısı dikkate alınmamıştır. Aynı işlemler sinyalin uçağa göre geliş açısı (AOA) ile de yapılabilir. Bu durumda platformun baş açısı da ilgili hesaplamalarda kullanılması gerekir.

$$h_{i+1} = -\Delta h_i \quad (7.9)$$

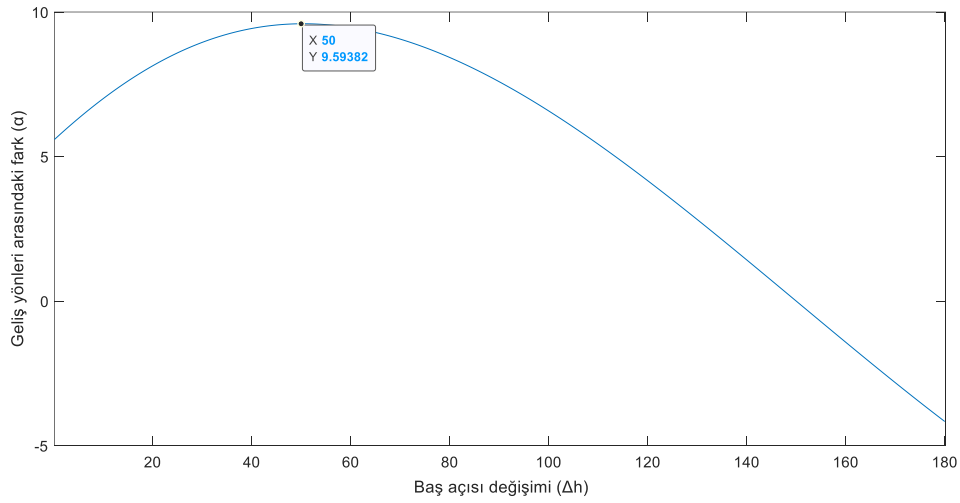
7.1.1. Problemin analitik çözümü

Problemi, doğrusal olmayan optimizasyon algoritmaları gibi sayısal çözüm yöntemlerini kullanarak çözmeden önce, problemin analitik olarak çözümü yapılmıştır.

Tek bir tehdide göre verilen örnek bir senaryo Şekil 7.3'te verilmiştir. Tehdidi en geniş açı ile görmek için gerekli baş açısı değeri Şekil 7.4'de gösterilmiştir. Şekil 7.4'deki grafiğe göre verilen senaryo için, platform 5 km yol katederek elde edebileceği geliş yönleri arasındaki farkın en büyük değeri yaklaşık olarak 10 derecedir. Platformun bu açı değerine ulaşması için 50 derecelik bir baş açısı değişikliğine ihtiyacı bulunmaktadır. Bu durumda β_i değeri 90° olarak bulunur.



Şekil 7.3. Bir Tehdit İçin Örnek Senaryo



Şekil 7.4. α_i 'nin Δh 'ye Göre Değişimi Grafiği

Bir önceki çözümde en geniş geliş açısı grafiksel yöntemler ile bulundu. Bu işlemin matematiksel olarak bulunması için (7.5) numaralı denkleminde α_i maksimum yapacak Δh_i ya da β_i değerinin bulunması gerekmektedir. Şekil 7.3'teki üçgen göre sinüs teoremi uygulayıp α_i 'yi β_i cinsinde yazılırsa:

$$\frac{\sin(\alpha_i)}{M_i} = \frac{\sin(\beta_i)}{R_i} \quad (7.10)$$

$$\alpha_i = \sin^{-1} \left[\frac{M_i}{R_i} \sin(\beta_i) \right] \quad (7.11)$$

(7.11) denklemi bulunur. Bu denklemin β_i 'ye göre birinci türevinin kökleri, α_i 'nin ekstremum noktalarını verir. (7.11) numaralı denklemin türevi analitik olarak (7.12) numaralı denklem ile bulunabilir.

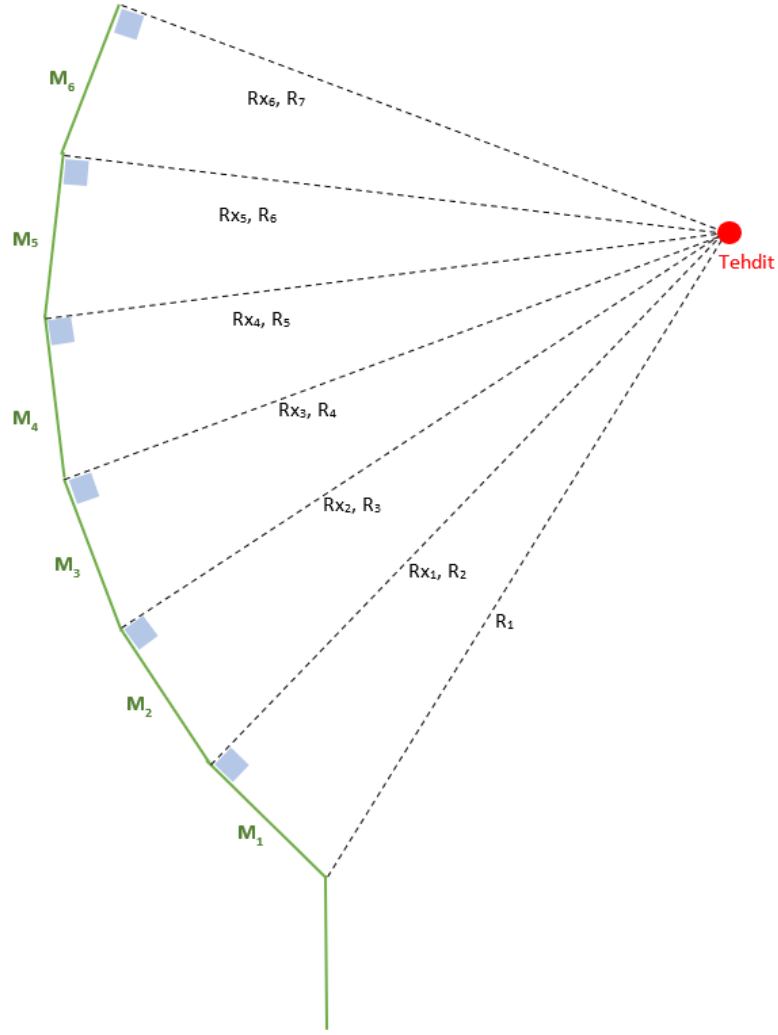
$$f(x) = \sin^{-1} g(x) \Rightarrow f'(x) = \frac{g'(x)}{\sqrt{1 - g^2(x)}} \quad (7.12)$$

Buna göre:

$$\frac{d\alpha_i}{d\beta_i} = \frac{\frac{M_i}{R_i} \cos(\beta_i)}{\sqrt{1 - \left[\frac{M_i}{R_i} \sin(\beta_i) \right]^2}} \quad (7.13)$$

$$\frac{d\alpha_i}{d\beta_i} = 0 \Rightarrow \cos(\beta_i) = 0 \Rightarrow \beta_i = 90^\circ \quad \beta_i \in [0, 180^\circ] \quad (7.14)$$

β_i değeri 90 derece olarak bulunur. Tek bir tehdit için geolokasyon yapıldığı durumda, platformun izlemesi gereken yol her zaman Rx_i 'ye dik olmalıdır. Rx_i değeri, platformun belirli bir M_i mesafesi katederek ulaştığı son konum ile tehdit arasındaki tahmini mesafedir. Bu durum Şekil 7.5'te gösterilmiştir. Şekil 7.3'te verilen sayısal örnekte de β_i değeri 90° olarak bulunmuştu. Grafik yardımıyla bulunan sonuç ile analitik yöntemleri kullanarak bulunan sonucun birbirini sağladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 7.5. Analitik Çözümle Optimum Uçuş Rotası

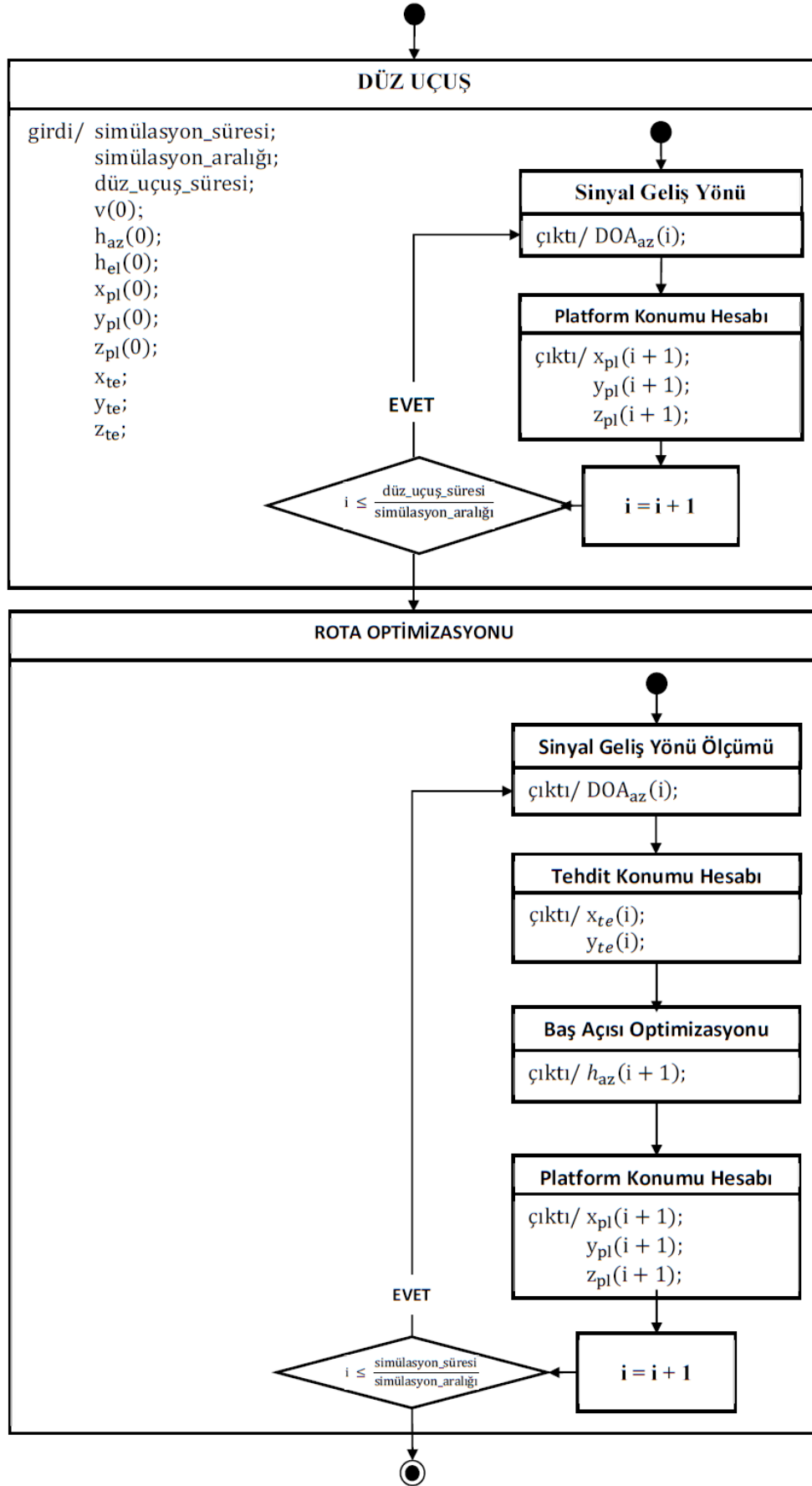
7.1.2. Problemin doğrusal olmayan çözümü

Bir tehdit için oluşturulan ve denklem (7.5)'te verilen amaç fonksiyonunun, denklem (7.7) ve (7.8)'de verilen kısıt fonksiyonlarının doğrusal olmayan çözümü, bir diğer ifadeyle sayısal yöntemlerle çözümü için MATLAB'ın "fmincon" fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon, kısıtlamalı en küçük ya da en büyük değer problemlerini çözmek için kullanılan bir optimize edici fonksiyondur. Bu fonksiyon, farklı kısıt fonksiyonları ile belirtilen bir amaç fonksiyonunu minimize etmeyi amaçlar. Bu fonksiyonun aldığı parametreler Tablo 7.1'de verilmiştir.

Tablo 7.1. fmincon Parametreleri

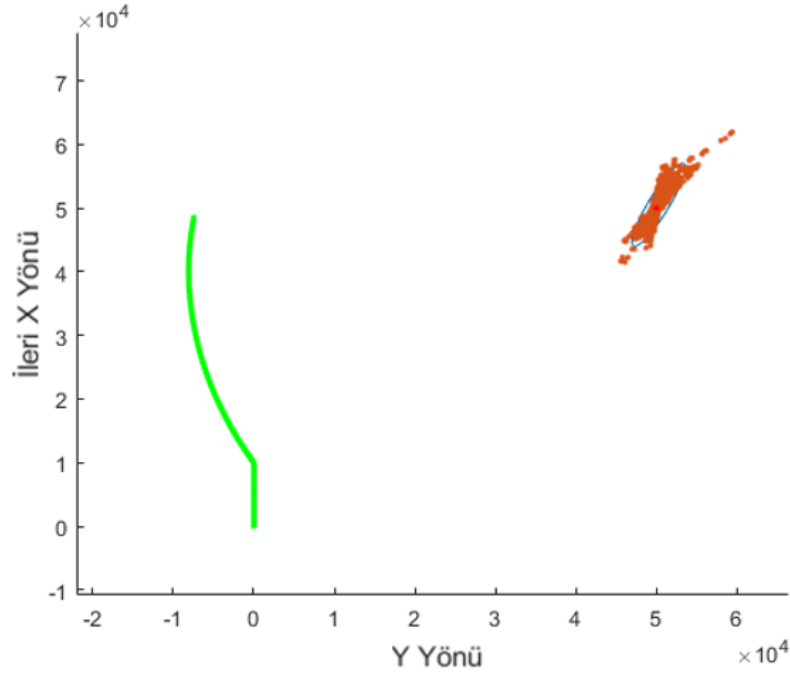
fmincon Parametreleri	Parametrelerin Anlamı	Geolokasyon Algoritması Karşılıkları
fun	Minimize edilmek istenen amaç fonksiyonu	Denklem (7.5)
x0	Optimizasyon başlangıç noktası	h_i (Anlık baş açısı değeri)
A, b	Lineer eşitsizlik kısıtları matrisi ($Ax \leq b$)	[]
A_{eq} , b_{eq}	Lineer eşitlik kısıtları matrisi ($A_{eq}x = b_{eq}$)	[]
lb, ub	Değişkenlerin alt ve üst kısıtları	Denklem (7.7)
nonlcon	Doğrusal olmayan kısıt fonksiyonları	Denklem (7.8)

Rota optimizasyona başlamadan önce, platform belirli bir süre düz uçuş yaparak tehditten veri toplamaktadır. Toplanan veriler ile tehditte ait tahmini menzil bilgisi R_i elde edilir. Tehditte ait ilk menzil bilgileri hesaplandıktan sonra rota optimizasyonuna başlanır. Rota optimizasyonuna ait akış diyagramı Şekil 7.6’da verilmiştir.

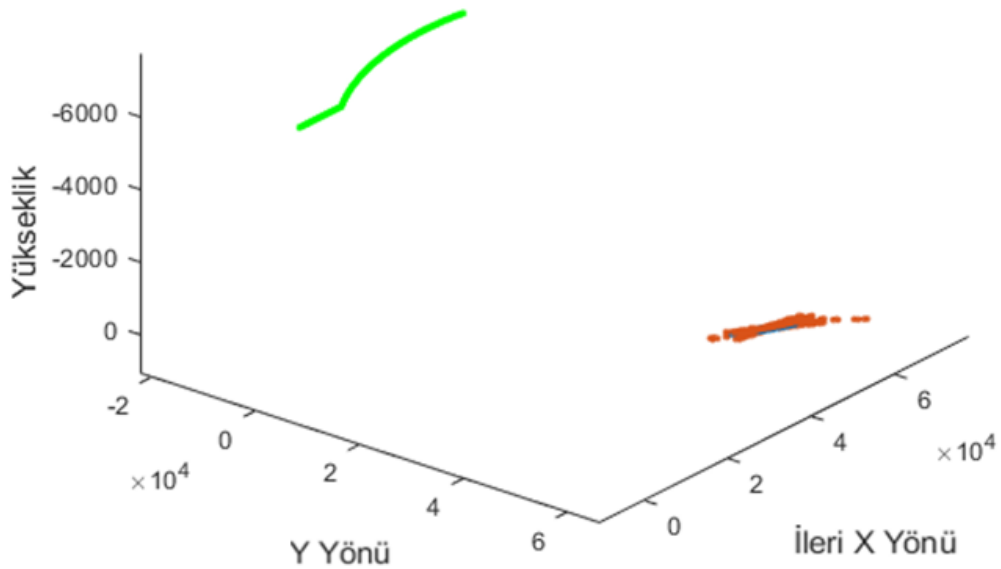


Şekil 7.6. Rota Optimizasyonu Akış Diyagramı

Doğrusal olmayan optimizasyon çözümü için kullanılan senaryoda, Bölüm 6’te verilen senaryoda olduğu gibi, platform başlangıç noktası (0, 0, -6096) ve tehdit konumu (50000, 50000, 0)’dır. Problemin doğrusal olmayan çözümü ile elde edilen yeni baş açısı değeri ile oluşturulan rota Şekil 7.7 ve Şekil 7.8’de gösterilmiştir.

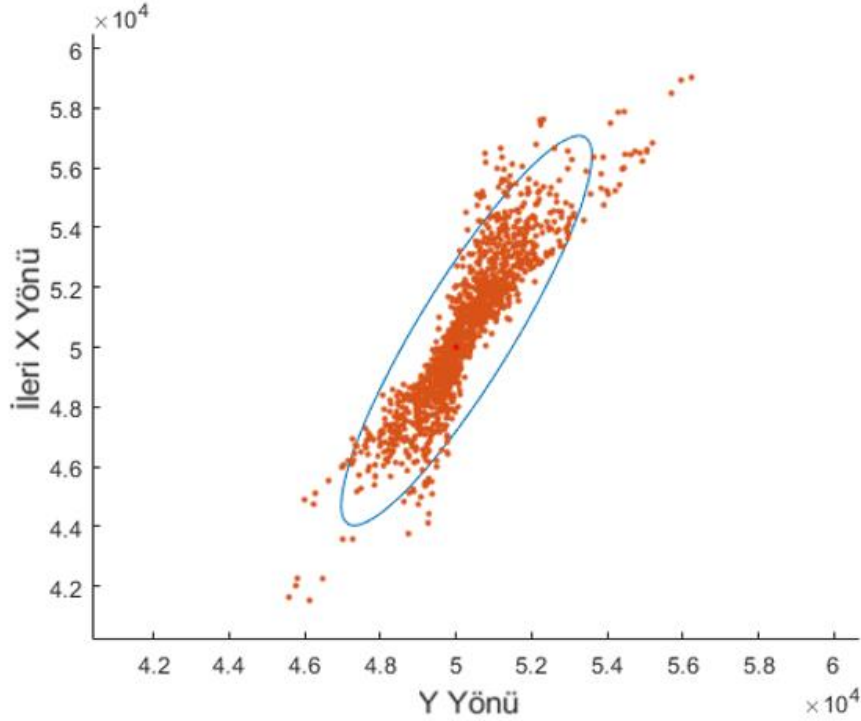


Şekil 7.7. Bir Tehdit İçin Oluşturulan Rota (NE Düzlemi)



Şekil 7.8. Bir Tehdit İçin Oluşturulan Rota (NED Düzlemi)

Rota optimizasyonu yapılan senaryoya ait hata elipsi Şekil 7.9’da verilmiştir. Ölçülen konum verilerinin %95’ini kapsamaları için gerekli hata elipsinin uzun kenarı, kısa kenarı, yönelimi ve CEP değeri Tablo 7.2’de verilmiştir.



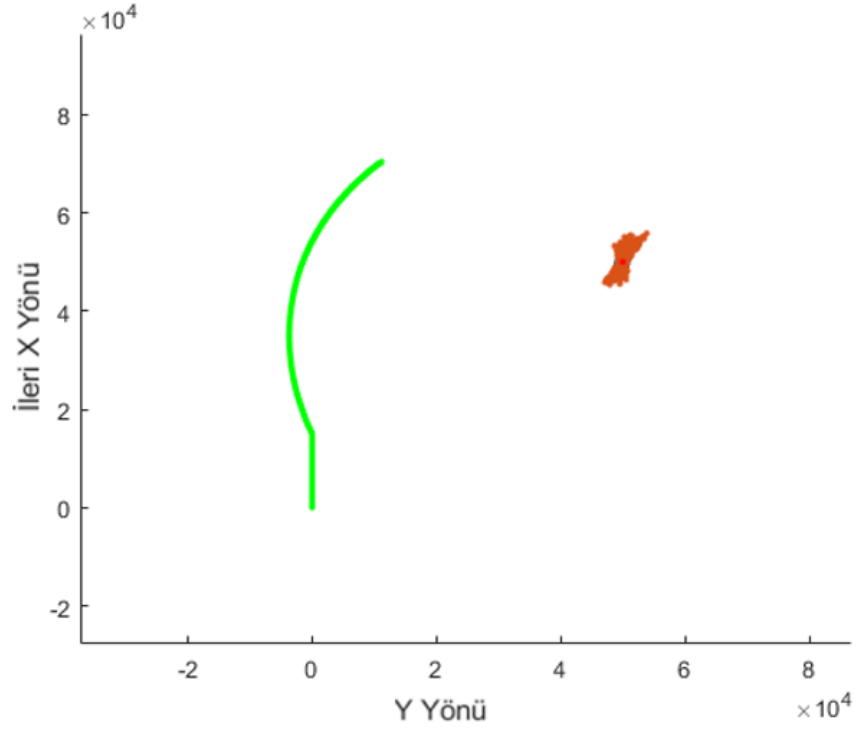
Şekil 7.9. Bir Tehdit Rota Optimizasyonu Senaryosu Hata Elipsi

Tablo 7.2. Bir Tehdit Rota Optimizasyonu Senaryosu Hata Elipsi Değerleri

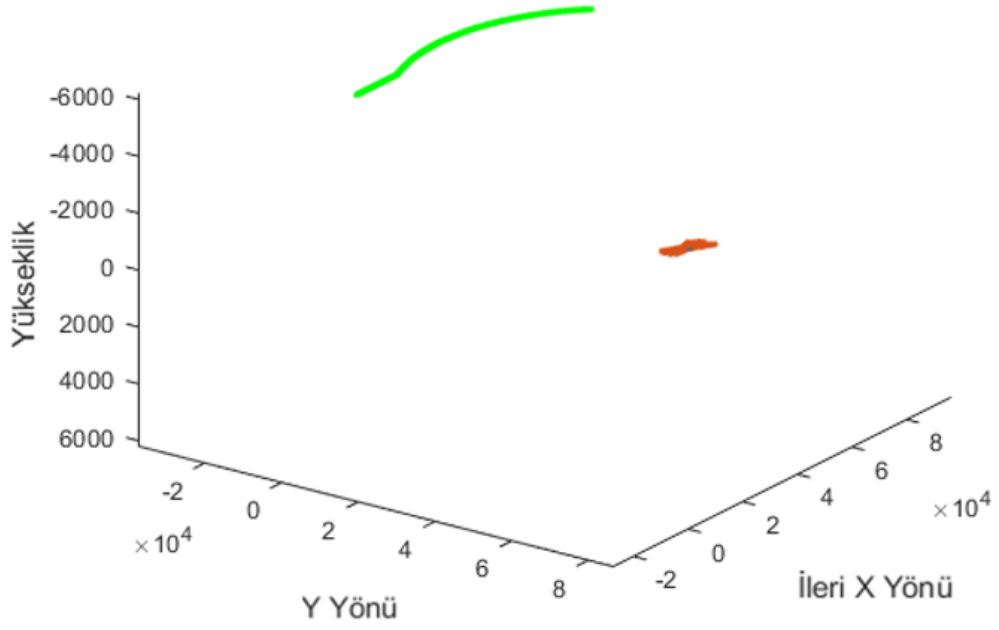
Uzun Kenar [km]	Kısa Kenar [km]	Yönelim [°]	CEP [km]
7.2	1.3	65	5.5

Platformun S manevrası yaparak ilerlediği Şekil 6.2’deki senaryo ile Şekil 7.7’de verilen rota optimizasyonlu senaryonun sonuçları karşılaştırıldığında, platform tarafından toplanan yön verileri arasındaki farkı maksimize edecek şekilde rota optimizasyonu yapılması geolokasyon hatalarını azaltmıştır.

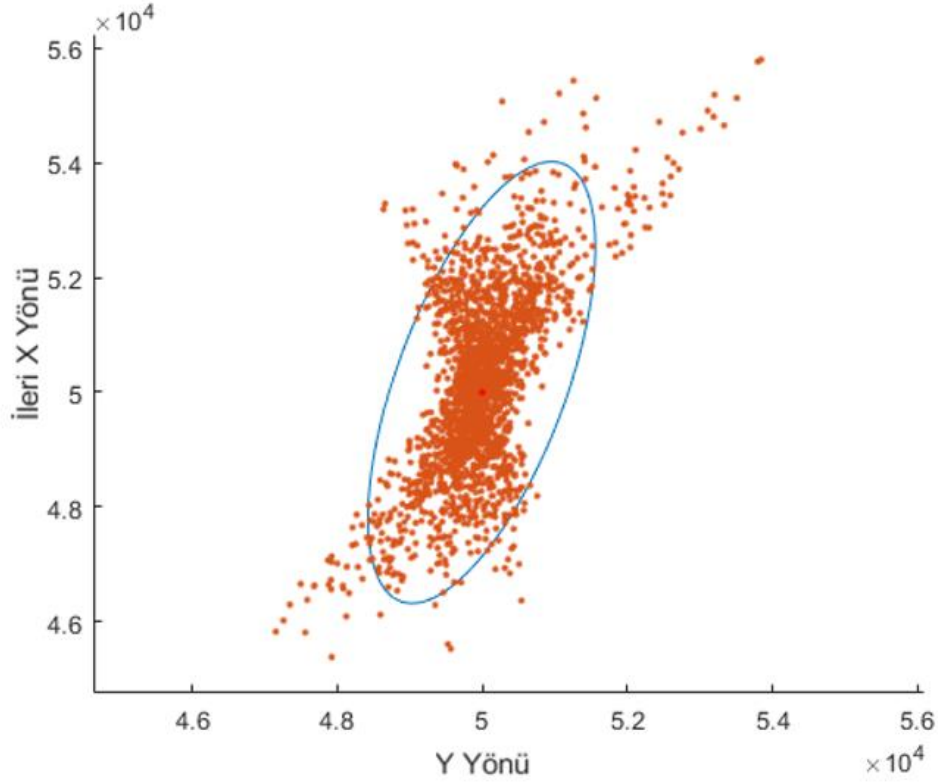
Ayrıca, daha fazla yön verisi ile geolokasyon yapmanın konum belirleme hataları etkisini incelemek için uçuş süresini artırarak yeni bir senaryo oluşturulmuştur. Simülasyon süresinin %30 artırıldığı durumda elde edilen rota ve konum hataları Şekil 7.10, Şekil 7.11, Şekil 7.12 ve Tablo 7.3’te verilmiştir.



Şekil 7.10. Bir Tehdit Uzun Süreli Rota Optimizasyonu (NE Düzlemi)



Şekil 7.11. Bir Tehdit Uzun Süreli Rota Optimizasyonu (NED Düzlemi)



Şekil 7.12. Bir Tehdit Uzun Süreli Rota Optimizasyonu Senaryosu Hata Elipsi

Tablo 7.3. Bir Tehdit Uzun Süreli Rota Optimizasyonu Senaryosu Hata Elipsi Değerleri

Uzun Kenar [km]	Kısa Kenar [km]	Yönelim [°]	CEP [km]
3.7	1.16	74.5	2.9

Tablo 7.2 ve Tablo 7.3 karşılaştırıldığında, uçuş süresinin artmasının konum belirleme hatalarını azalttığı gözlemlenmiştir. Buradaki temel sebep, platform daha uzun süre uçuş yaparak tehdidi farklı ve daha geniş açılarda gözlemleyebilmiştir.

7.2. Çoklu Tehditlere Göre Rota Optimizasyonu

Bir tehdit için rota optimizasyon probleminde (7.5), bir tehditte göre maksimum açı değişimi dikkate alınmıştır. Çoklu tehdit durumunda her bir tehditte göre açı değişiminin toplamının maksimize edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle çoklu tehdit senaryosu için optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu denklem (7.15) ile güncellenmiştir. Kısıtlama fonksiyonları değişmemiştir.

Amaç
Fonksiyonu:
$$\text{Max } z = \sum_{j=1}^n \alpha_{i,j} \quad (7.15)$$

$$\alpha_{i,j} = f(\Delta h) = \sin^{-1} \left[\frac{M_{i,j}}{R_{x_{i,j}}} \sin(\text{DOA}_{i,j} + \Delta h) \right] \quad (7.16)$$

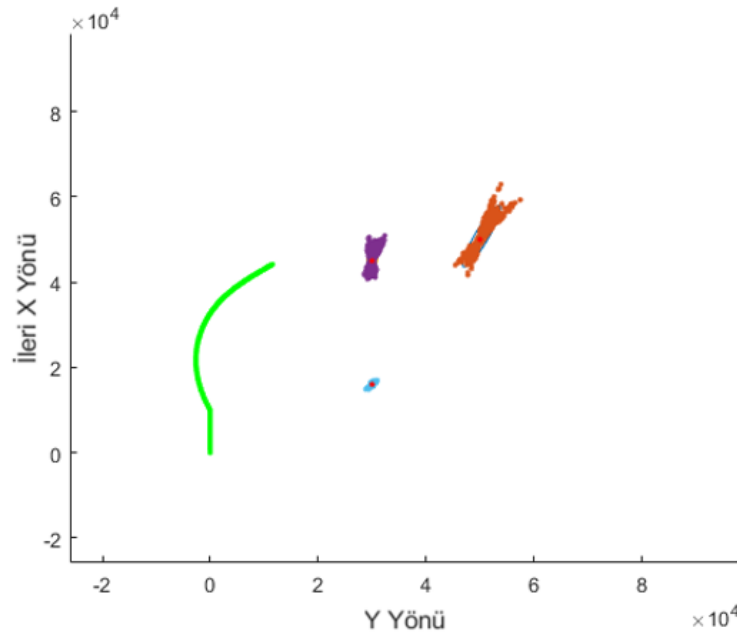
$$R_{x_i} = \sqrt{R_{i,j}^2 + M_{i,j}^2 - 2R_{i,j}M_{i,j} \cos(\text{DOA}_{i,j} + \Delta h)} \quad (7.17)$$

Kısıtlar: $\Delta h \in [-60, 60^\circ]$ (7.18)

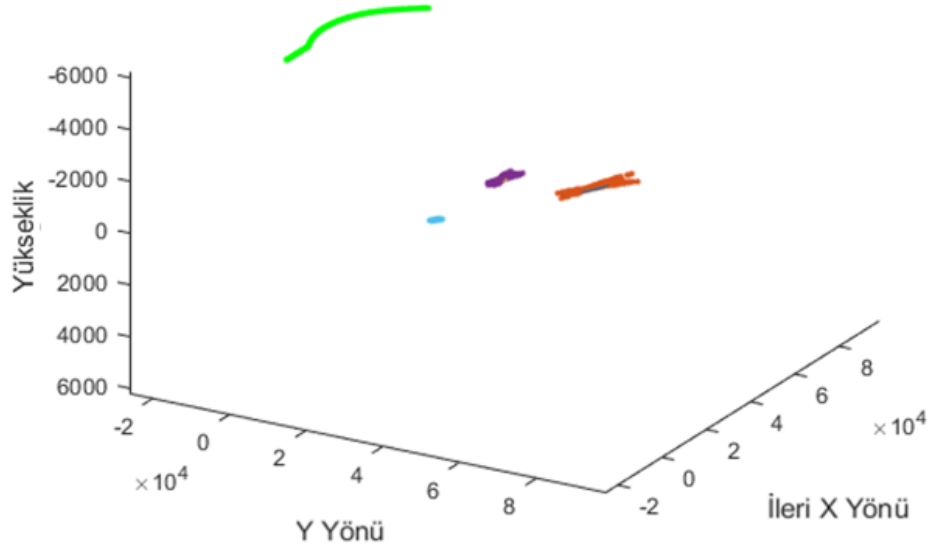
$$\alpha_{i,j} \geq \alpha_{er} \Rightarrow \alpha_{er} - \sin^{-1} \left[\frac{M_{i,j}}{R_{x_{i,j}}} \sin(\text{DOA}_{i,j} + \Delta h) \right] \leq 0 \quad (7.19)$$

Amaç ve kısıtlama fonksiyonlarında verilen “j” ifadesi tehdidin numarasını temsil etmektedir. “n” ise toplam tehdit sayısıdır.

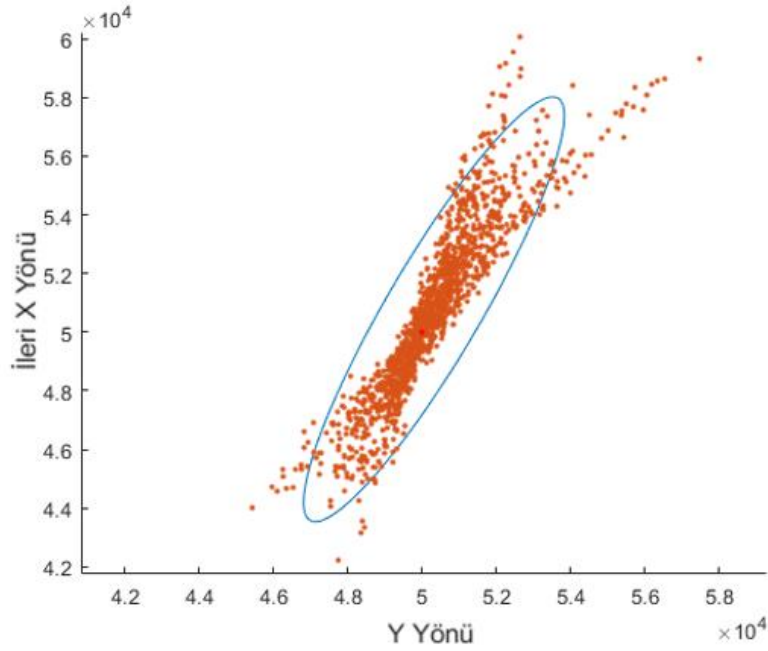
Şekil 7.13’teki senaryoda çoklu tehditlerin olduğu durumda rota optimizasyonu yapılmıştır. Platform, bütün tehditleri maksimum açı ile gözlemleyebilecek şekilde baş açısını optimize etmektedir. Çoklu tehdit durumunda oluşan rota Şekil 7.13 ve Şekil 7.14’te verilmiştir. Her bir tehditte ait hata elipsleri Şekil 7.15, Şekil 7.16, Şekil 7.17 ve hata elipsi değerleri Tablo 7.4’te verilmiştir.



Şekil 7.13. Çoklu Tehditler İçin Oluşturulan Rota (NE Düzlemi)

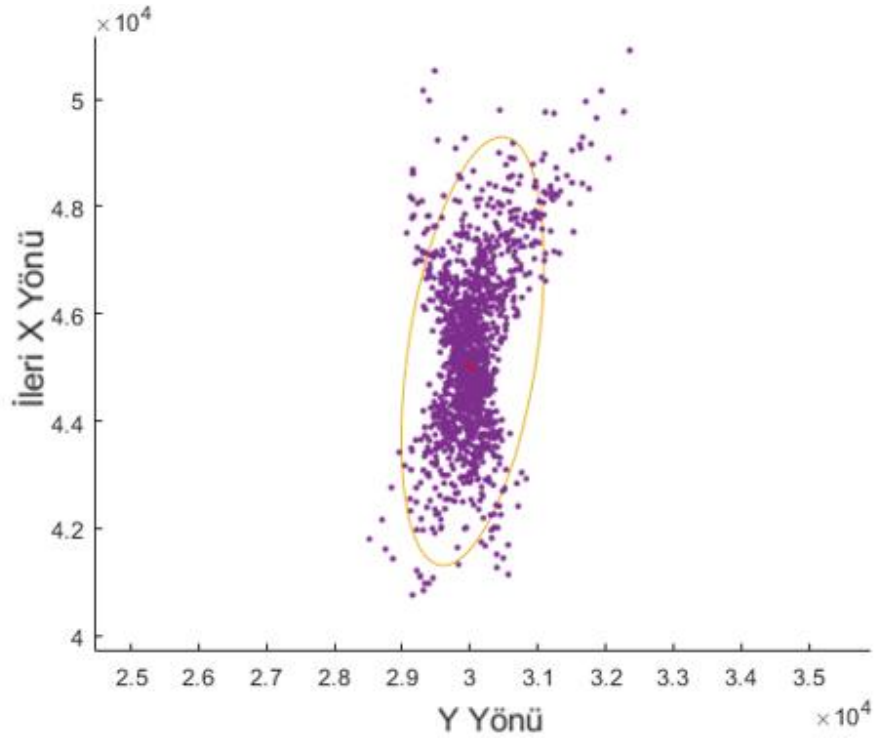


Şekil 7.14 Çoklu Tehditler İçin Oluşturulan Rota (NED Düzlemi)

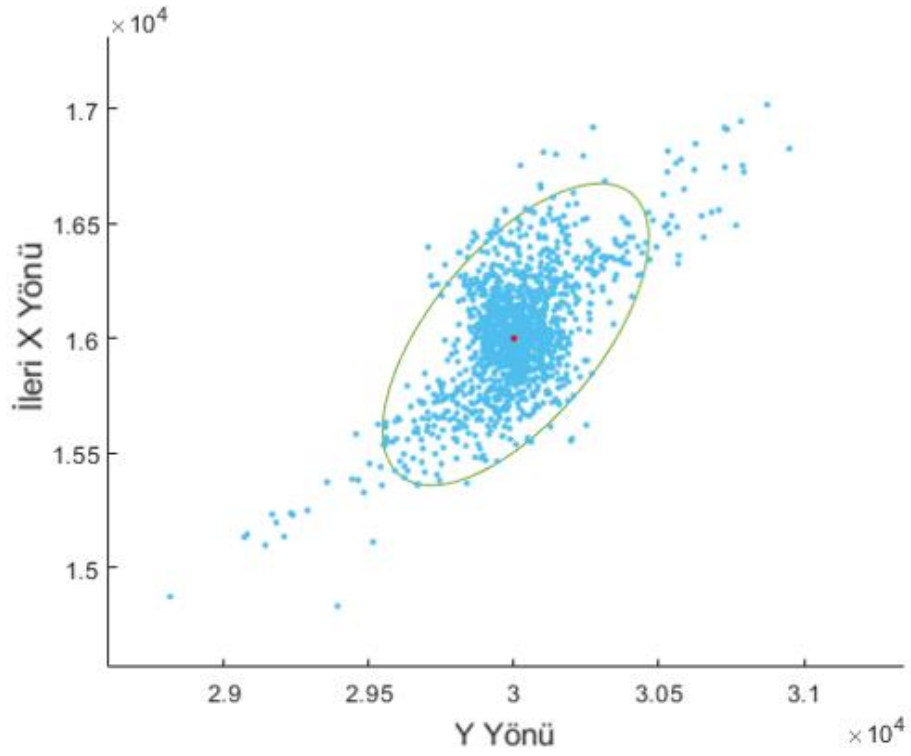


Şekil 7.15. Çoklu Tehditler Rota Optimizasyonu Senaryosu Hata Elipsi (1. Tehdit)

Şekil 7.9’da (50000, 50000, 0)’da bulunan bir tehdide göre rota optimizasyonu yapıldığında elde edilen hata elipsi ile, Şekil 7.15’te çoklu tehdide göre rota optimizasyonu yapıldığında (50000, 50000, 0)’daki Tehdit-1’in hata elipsi değeri karşılaştırıldığında, çoklu tehditte göre optimizasyon yapıldığında aynı tehdidin konumu daha yüksek hata oranları ile bulunmuştur. Hatadaki artışın sebebi, çoklu tehdit senaryosunda, platformun diğer tehditlerine de olabildiğince yüksek açıda gözlemleyecek şekilde bir rota çıkarmasıdır.



Şekil 7.16. Çoklu Tehditler Rota Optimizasyonu Senaryosu Hata Elipsi (2. Tehdit)



Şekil 7.17. Çoklu Tehditler Rota Optimizasyonu Senaryosu Hata Elipsi (3. Tehdit)

Tablo 7.4. Çoklu Tehditler Rota Optimizasyonu Senaryosu Hata Elipsi Değerleri

Tehdit	Uzun Kenar [km]	Kısa Kenar [km]	Yönelim [°]	CEP [km]
1.	8.6	1.3	64.3	6.5
2.	4.2	0.97	86	3.2
3.	0.77	0.34	62.6	0.63

Şekil 7.15’te verilen Tehdit-1’e ait hata elipsi değeri ile, sırasıyla Şekil 7.16 ve Şekil 7.17’de verilen Tehdit-2 ve Tehdit-3’e ait hata elipsi değerleri karşılaştırıldığında, Tehdit-2 ve Tehdit-3 için yapılan konum ölçüm hataların daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Buradaki temel sebep, Tehdit-2 ve Tehdit-3’ün platforma daha yakın olmasından dolayı uçuş boyunca platform, Tehdit-2 ve Tehdit-3’ten daha geniş açılarda veri toplayabilmiştir. Şekil 7.13’teki rota incelendiğinde, en geniş açıda Tehdit-3’ten veri toplanmıştır. Buna bağlı olarak Tehdit-3’ün konum ölçüm hatası en düşüktür.

8. ÇOKLU PLATFORM GEOLOKASYON MODELİ

Geolokasyon süresini kısaltmak ve tehdidin konumu daha yüksek doğrulukta bulabilmek için birden fazla hareketli platform kullanılabilir. Bu yöntemin temel amacı, ortamdaki sinyal verilerini aralarında belirli uzaklık bulunan farklı hareketli platformlar kullanarak toplamak ve bu veriler ile tehdidin konumu hesaplamaktır. Geolokasyon performansını arttırmak için olabildiğince geniş açılarda sinyal verisi toplamak gereklidir. Bunu tek bir platform ile yapılması durumunda ilgili platformun farklı konumlara hareket ederek bu verileri toplaması gerekmektedir. Farklı konumlarda bulunan hareketli platformlar geniş açılarda tehdidi görebildiği için tek platformun elde edebileceği farklı sinyal geliş yönü verilerini daha kısa sürede birden fazla platform ile toplayabilmektedir.

Tablo 8.1. Çoklu Platform Geolokasyonda Kullanılan Veriler

Platform	Zaman	Sinyalin Geliş Yönü (Direction of Arrival – DoA)	Sinyalin Geliş Açısı (Angle of Arrival – AoA)	Platformun Baş Açısı (Heading)	Platform Konumu
Platform-1	t_i	d_i	θ_1	h_1	(x_1, y_1)
Platform-2	t_k	d_k	θ_2	h_2	(x_2, y_2)

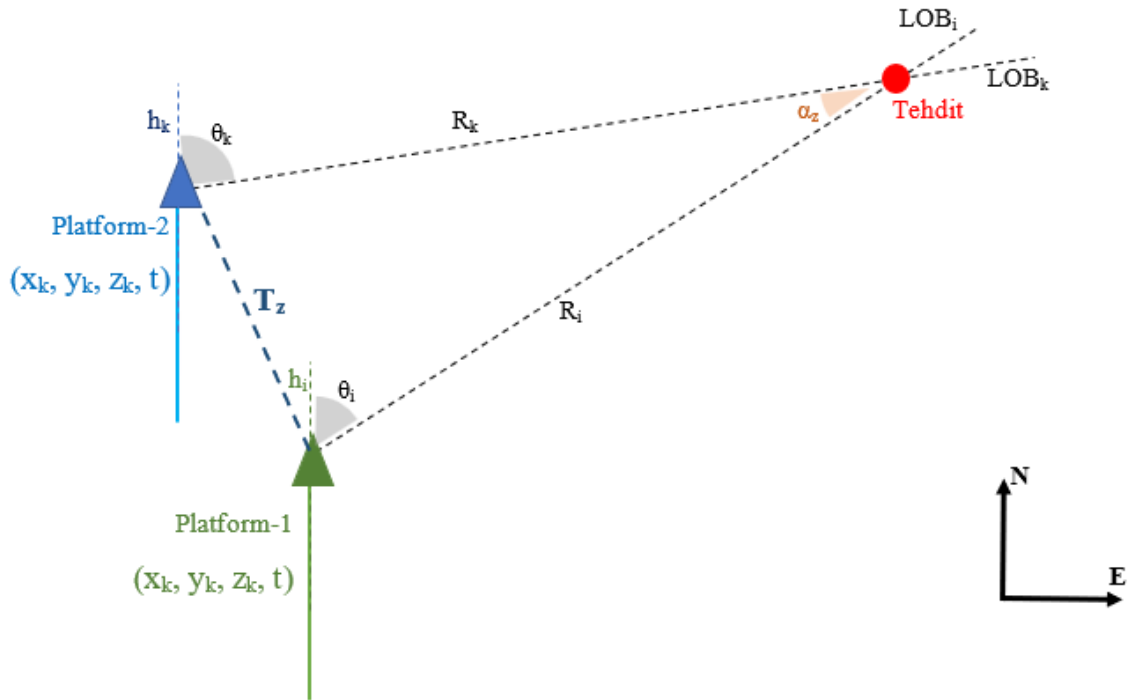
Çoklu platform geolokasyon tekniğinin amacı kısa sürede doğruluğu yüksek sonuçlar elde etmektir. Ancak çoklu platform kullanmanın getirdiği bazı zorluklar bulunmaktadır. Bunlardan ilki zaman senkronizasyonudur. Farklı platformlardan elde edilen yön verilerinin doğru bir şekilde birleştirilmesi için, elde edilen verilerin zaman bilgilerinin yüksek hassasiyette olması gerekmektedir. Farklı platformlardan alınan sinyallerin zaman bilgisinin yüksek doğruluk ve hassasiyette olması, tehdit konumunun doğru bir şekilde belirlenmesi için gereklidir. İyi bir zaman senkronizasyonu, tehdidin gerçek konumuna daha yakın tahminler yapılmasını sağlamaktadır.

Diğer bir zorluk ise farklı platformlarda kullanılan sensör farklılıklarıdır. Farklı platformlar genellikle farklı hassasiyette sensörler veya algılayıcılar kullanır. Bu sensörlerin farklı özelliklere sahip olması, verilerin farklı doğrulukta olmasına neden olabilir. Bu sensörlerin ölçüm hataları, kümülatif olarak geolokasyon doğruluğunu etkileyebilmektedir.

Ayrıca, birden fazla platformun koordineli bir şekilde çalışması gereklidir. Platformlar arasındaki haberleşme performansı eksikliği, geolokasyon performansını olumsuz etkileyebilir. Birden fazla platformdan gelen verilerin toplanması, iletilmesi ve işlenmesi karmaşık olabilir. Veri iletimi ve işleme algoritmalarının etkili bir şekilde çalışması gereklidir. Büyük miktarda verinin işlenmesi ve farklı platformlardan gelen verilerin entegrasyonu, sistem performansını etkilemektedir.

8.1. Çoklu Platform Üçgenleme Methodu

Şekil 8.1’de çoklu platform ile yapılan bir geolokasyon senaryosu verilmiştir. Bu senaryoda t anında Platform-1 ve Platform-2 baş açısı değiştirmeden hareket etmektedir. Bu platformlar uçuşları boyunca tehditten yayılan sinyalleri, sinyal geliş zamanını ve platform konumunu kaydetmektedir. Platformlar tarafından kaydedilen veriler Tablo 8.1’de verilmiştir.



Şekil 8.1. Çoklu Platform Geolokasyon Senaryosu

Çoklu platform geolokasyon modelinde geolokasyon hesaplamaları, tek platform ile yapılan geolokasyon hesaplamalarına benzerdir. Ardaki fark, tek platformun belirli bir süre yol aldıktan sonra elde ettiği sinyal verisini çoklu platform geolokasyon tekniğinde başka bir platform elde etmektedir. Bu nedenle tek platform için verilen denklemlerde $t+1$

zamanında elde edilen verinin yeri, çoklu platformlar için yazılan denklemlerde, t anında diğer platformdan elde edilen veri almaktadır. Şekil 8.2’de verilen senaryoda, farklı baş açıları ile hareket eden ve aralarında belirli bir mesafe olan iki tane hareketli platform bulunmaktadır.

Şekil 8.2. Farklı Baş Açılı Çoklu Platform Üçgenleme Geometrisi

$$\theta'_k = \theta_k + h_k - e \quad (8.1)$$

$$e = \tan^{-1} \left(\frac{y_k - y_i}{x_k - x_i} \right) \quad (8.2)$$

Düzeltilmiş geliş açıları elde edildikten sonra platformlar arası uzaklığı bulmak için denklem (8.3) ve platformlar ile tehdit arasındaki mesafeleri bulmak için Şekil 8.2’de verilen 1. üçgende sinüs teoremi uygulanabilir.

$$P_z = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} \quad (8.3)$$

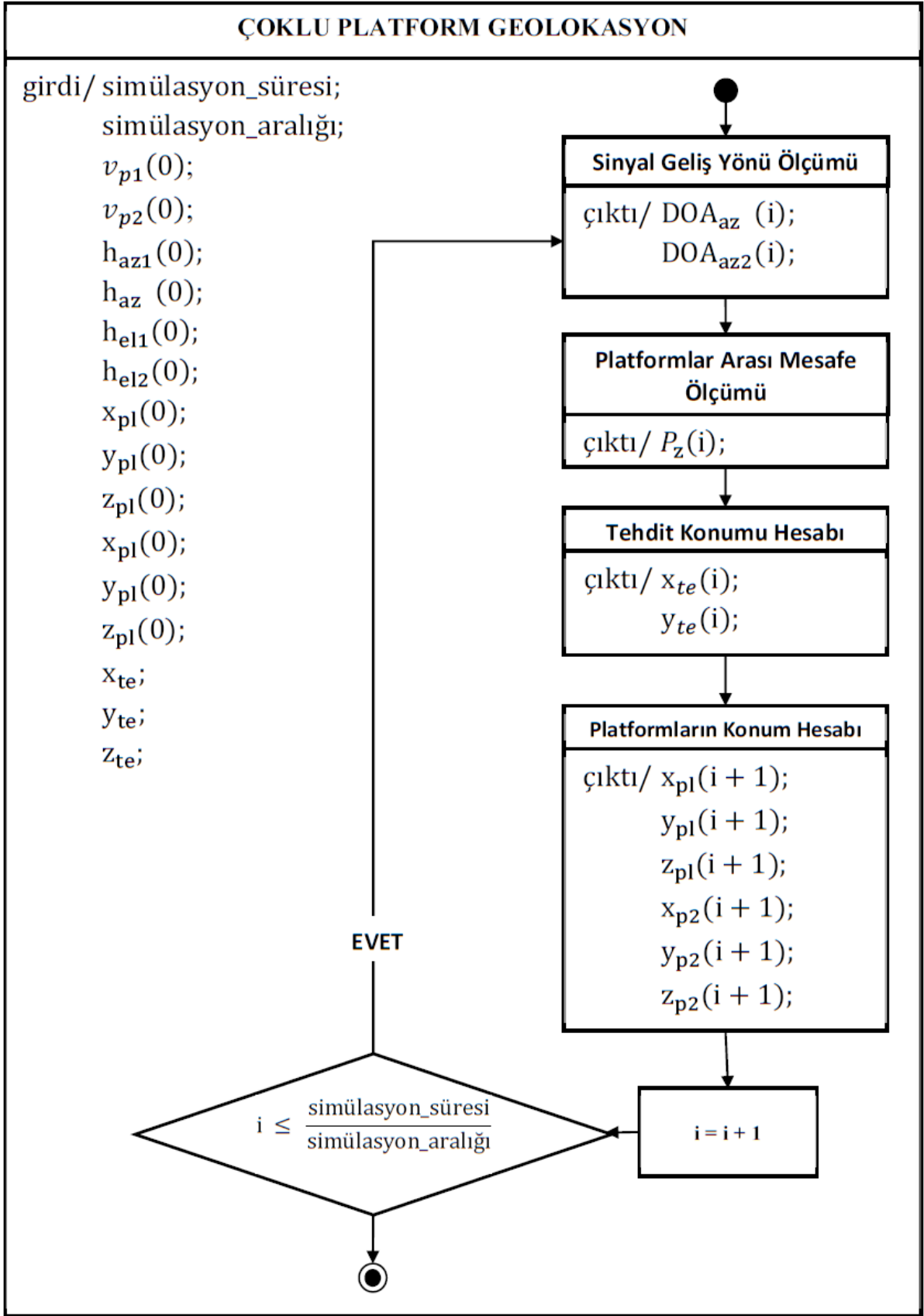
$$\frac{\sin 180 - \theta'_k}{R_i} = \frac{\sin \alpha_z}{P_z} = \frac{\sin \theta'_i}{R_k} \quad (8.4)$$

$$\alpha_z = \theta'_k - \theta'_i \quad (8.5)$$

$$R_i = \frac{P_z \sin(180 - \theta'_k)}{\sin(\theta'_k - \theta'_i)} \quad (8.6)$$

$$R_k = \frac{P_z \sin(\theta'_i)}{\sin(\theta'_k - \theta'_i)} \quad (8.7)$$

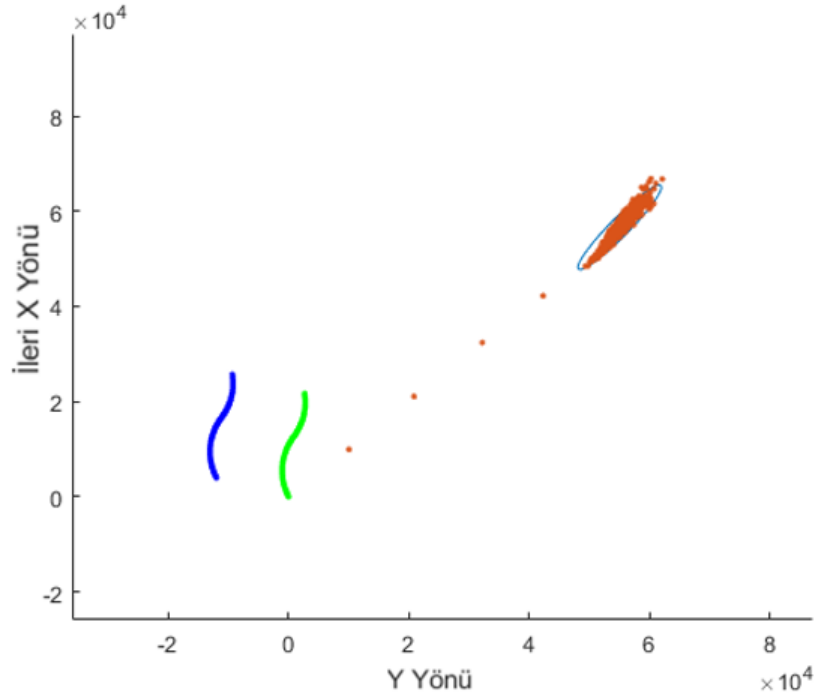
Tek platform ile yapılan geolokasyonda, ilk menzil tahminini yapabilmek için platformun belirli bir süre düz uçuş yaparak tehditten sinyal yön verisi toplaması gerekmektedir. Çoklu platformlar arasındaki belirli mesafede uzaklık olduğu için tehdit mesafesi tahmini ilk yön verisinden itibaren elde edilebilmektedir. O nedenle çoklu platform geolokasyon için veri toplamak için düz uçuşa ihtiyaç bulunmamaktadır. Çoklu platform geolokasyon senaryosuna ait akış diyagramı Şekil 8.3’te verilmiştir.



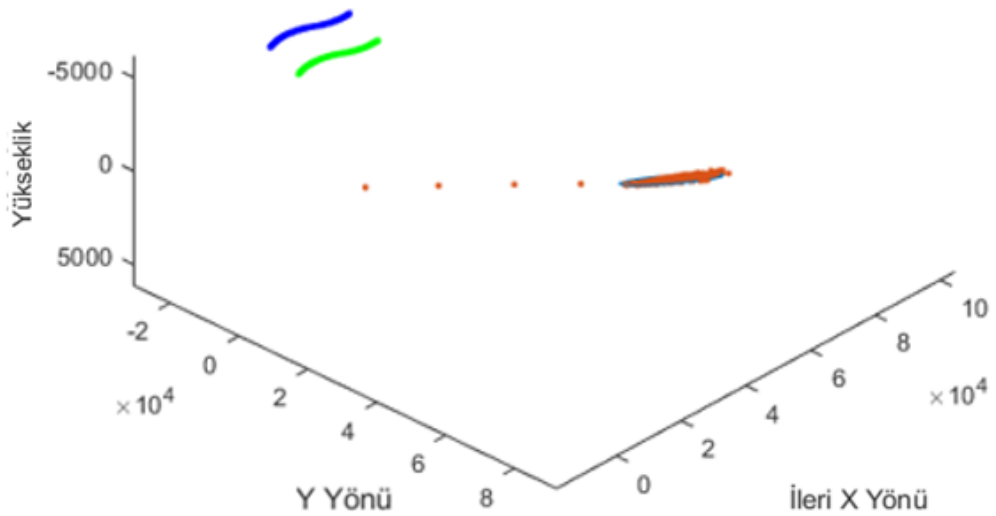
Şekil 8.3. Çoklu Platform Geolokasyon Akış Diyagramı

8.2. Bir Tehdide Göre Çoklu Platform Geolokasyon

S manevrası yaparak 180 saniye boyunca ilerleyen tek bir platform ile gerçekleştiren geolokasyon Şekil 6.2’de verilmiştir. Bu senaryo ile karşılaştırmak için aynı manevraları yapan iki platformlu bir senaryo oluşturulmuştur. Aralarında belirli bir mesafe bulunan S manevrası yaparak ilerleyen iki platform Şekil 8.4 ve Şekil 8.5’te verilmiştir. İki platform 90 saniye boyunca geolokasyon yapmaktadır.

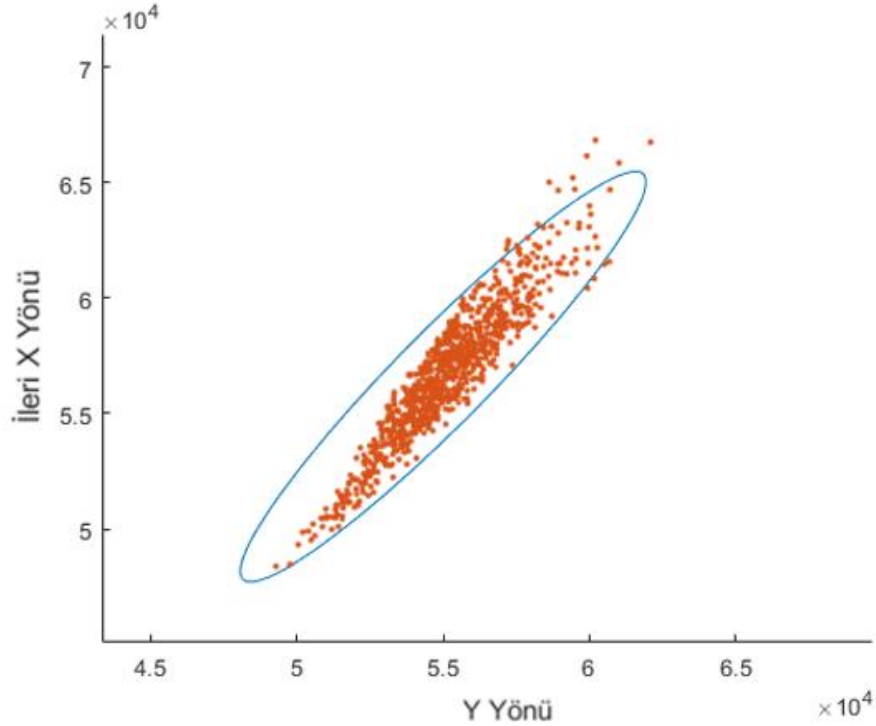


Şekil 8.4. Çoklu Platform Geolokasyon Senaryosu (NE Düzlemi)



Şekil 8.5. Çoklu Platform Geolokasyon Senaryosu (NED Düzlemi)

Çoklu platform geolokasyon senaryosuna ait hata elipsi Şekil 8.6’da verilmiştir. Ölçülen konum verilerinin %95’ini kapsamasi için gerekli hata elipsinin uzun kenarı, kısa kenarı, yönelimi ve CEP değeri yaklaşık olarak Tablo 6.2’de verilmiştir.



Şekil 8.6. Çoklu Platform Geolokasyon Senaryosu Hata Elipsi

Tablo 8.2. Çoklu Platform Senaryosu Hata Elipsi Değerleri

Uzun Kenar [km]	Kısa Kenar [km]	Yönelim [°]	CEP [km]
10.7	1.8	52	8.2

Tablo 8.2’de verilen çoklu platform geolokasyon sonuçları ile Tablo 6.2’de verilen tek platformla yapılan geolokasyon sonuçları karşılaştırıldığında, çoklu platform geolokasyon ile daha kısa sürede daha az CEP değerinde sonuçlar elde edilmiştir.

9. SONUÇLAR

Bu çalışmada, askeri uygulamalarda tehditlerin coğrafi konumu belirleme tekniklerinden geolokasyon incelenmiş olup, özellikle yer yüzeyindeki RF tehditlerini doğru bir şekilde konumlarını tespit etmek için uçuş manevrası planlamasına odaklanılmıştır. Coğrafi konum ölçüm hatalarını azaltmak için daha geniş gözlem açılarının gerekliliği üzerinde durulmuş, bu açıları elde etmek için gereken optimum platform baş açısı değerlerinin belirlenmesinin gerektiği belirtilmiştir.

Optimal baş açısı değeri ile oluşturulan rota ile önemli ölçüde yer belirleme doğruluğu artırılmıştır. Bir tehdit için rota optimizasyonu yapılan bir geolokasyon senaryosu ile aynı uçuş süresine sahip rota optimizasyonu olmadan yapılan bir geolokasyon senaryosu karşılaştırıldığında CEP değerinin %57 azaldığı gözlemlenmiştir.

Farklı uçuş rotaları, manevralar ve optimize edilmiş yolları içeren senaryolar arasında sonuçlar karşılaştırılarak, rota optimizasyon stratejileriyle yer belirleme hatalarında dikkate değer azalmalar gözlemlenmiştir. Daha uzun uçuş süreleri ile daha iyi konum hesaplama değerleri elde edilmiştir. Rota optimizasyonu yapılan iki senaryoda uçuş süresinin %30 arttırılması ile CEP değerinin %47 azaldığı gözlemlenmiştir.

Çok sayıda tehdidin doğru şekilde konumlandırması için gerekli rota planlanmıştır. Bu rota planlamasının, bir tehdit için yapılan rota planlaması ile farkları karşılaştırılmıştır. Aynı tehdidin bulunduğu iki farklı senaryoda, çoklu tehdit için yapılan rota optimizasyonu ile elde edilen CEP değerinin %18 arttığı gözlemlenmiştir. Tehdit önceliklendirmesi yapılarak rota optimizasyonu tekrar yapılabilir. Optimizasyon ağırlığı, önceliği yüksek tehdide göre belirlenebilir. Bu sayede önceliği yüksek tehdidin konum ölçüm doğruluğu arttırılabilir.

Çoklu platformlar geolokasyon tekniğinin getirebileceği avantajlar üzerinde durulmuştur. Daha kısa zamanda, daha geniş bir alan taranarak doğruluğu yüksek konum hesaplamaları elde edilmiştir. İki hareketli platform ile rota optimizasyonu olmadan daha kısa sürede doğruluğu yüksek konum hesaplama değerlerinin elde edilebileceği belirtilmiştir. Uçuş süresinin yarıya düştüğü bir senaryoda, iki platform ile geolokasyon yapıldığında CEP değerinin %12 azaldığı gözlemlenmiştir.

Bu bulgularla, kapsamlı gözlem stratejileri ve rota planlama algoritmalarının askeri uygulamalarda yer belirleme tekniklerinin etkinliğini artırmada kritik bir rol oynadığını ve nihayetinde tehdit algılama ve konumlandırma yeteneklerini geliştirmede katkı sağladığını vurgulamıştır.

Bu çalışmanın devamı olarak, hareketli yer ve hava tehditlerin konum kestirimi ile ilgili çalışmalar planlanmaktadır. Kinematik menzil (kinematic ranging) belirleme gibi tehditler arasındaki mesafeyi, nesnelerin konumları, hızları veya ivmeleri gibi kinematik parametrelerini kullanarak hesaplayan yöntemler üzerinde çalışılacaktır. Bu gibi yöntemlerle, pasif tespit ve takip algoritmalarına yönelik çalışmalara odaklanılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] N. Okello, "Emitter Geolocation with Multiple UAVs," in *2006 9th International Conference on Information Fusion*, Florence, Italy, 2006, pp. 1-8, DOI: 10.1109/ICIF.2006.301587.
- [2] A. Mikhalev and R. Ormondroyd, "Multi-Cluster Agent-Based Emitter Geolocation Using Hough Transform Data Fusion," in *2008 11th International Conference on Information Fusion*, Cologne, Germany, 2008, pp. 1-6.
- [3] H.-J. Du ve J. P. Lee, "Simulation of Multi-Platform Geolocation Using a Hybrid TDOA/AOA Method," Defence Research and Development Canada, Ottawa, 2004.
- [4] S. A. Engebråten, "RF Emitter Geolocation Using PDOA Algorithms and UAVs," Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norwegian, 2015.
- [5] L. Marsh, D. Gossink, S. P. Drake and G. Calbert, "UAV Team Formation for Emitter Geolocation," in *2007 Information, Decision and Control*, Adelaide, SA, Australia, 2007, pp. 176-181, DOI: 10.1109/IDC.2007.374545.
- [6] K. Doğancay, "A Closed-Form Pseudolinear Estimator for Geolocation of Scanning Emitters," in *2010 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Dallas, TX, USA, 2010, pp. 3546-3549, DOI: 10.1109/ICASSP.2010.5495942.
- [7] S. R. Semper and J. L. Crassidis, "Decentralized Geolocation and Optimal Path Planning Using Limited UAVs," in *2009 12th International Conference on Information Fusion*, Seattle, WA, USA, 2009, pp. 355-362.
- [8] N. Okello and D. Musicki, "Emitter Geolocation with Two UAVs," in *2007 Information, Decision and Control*, Adelaide, SA, Australia, 2007, pp. 254-259, DOI: 10.1109/IDC.2007.374559.

- [9] D. Elsaesser, "Emitter Geolocation Using Low-Accuracy Direction-Finding Sensors," in *2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications*, Ottawa, ON, Canada, 2009, pp. 1-7, DOI: 10.1109/CISDA.2009.5356549.
- [10] J. Štencek, "Geolocation of Multiple Emitters on Data Provided by ESM Sensors," in *2019 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, Brno, Czech Republic, 2019, pp. 1-5, DOI: 10.1109/MILTECHS.2019.8870029.
- [11] R. Ren, M. L. Fowler and E. N. Wu, "Finding Optimal Trajectory Points for TDOA/FDOA Geo-Location Sensors," in *2009 43rd Annual Conference on Information Sciences and Systems*, Baltimore, MD, USA, 2009, pp. 817-822, DOI: 10.1109/CISS.2009.5054830.
- [12] R. J. Bamberger, J. G. Moore, R. P. Goonasekeram and D. H. Scheidt, "Autonomous Geolocation of RF Emitters Using Small, Unmanned Platforms," *Johns Hopkins APL Technical Digest*, vol. 32, no. 3, pp. 636-646, Dec. 2013.
- [13] K. Doğancay, "UAV Path Planning for Passive Emitter Localization," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, no. 2, pp. 1150-1166, Apr. 2012, DOI: 10.1109/TAES.2012.6178054.
- [14] S. A. A. Shahidian and H. Soltanizadeh, "Optimal Trajectories for Two UAVs In Localization of Multiple RF Sources," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 38, no. 8, pp. 908-916, 2016, DOI: 10.1177/0142331214566026.
- [15] E. Tzoreff and A. J. Weiss, "Single Sensor Path Design for Best Emitter Localization via Convex Optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 2, pp. 939-951, Feb. 2017, DOI: 10.1109/TWC.2016.2635123.
- [16] R. Nandalike, N. Sharma, K. Ranganatha, S. I. Shekar, R. A. Cherian and A. R. Sachin, "Performance Characterization of High-Accuracy Direction-Finding in Electronic-Warfare Systems," in *2022 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON)*, Bangalore, India, 2022, pp. 23-27, DOI: 10.1109/MAPCON56011.2022.10047012.

- [17] J. H. Lee, J. K. Kim, H. K. Ryu and Y. J. Park, "Multiple Array Spacings for an Interferometer Direction Finder With High Direction-Finding Accuracy in a Wide Range of Frequencies," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 4, pp. 563-566, Apr. 2018, DOI: 10.1109/LAWP.2018.2803107.
- [18] J. Falk, P. Handel and M. Jansson, "Effects of Frequency and Phase Errors in Electronic Warfare TDOA Direction-Finding Systems," in *IEEE Military Communications Conference*, Boston, MA, USA, 2003, pp. 118-123, DOI: 10.1109/MILCOM.2003.1290088.
- [19] J. H. Lee and J. M. Woo, "Interferometer Direction-Finding System With Improved DF Accuracy Using Two Different Array Configurations," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 719-722, 2015, DOI: 10.1109/LAWP.2014.2377291.
- [20] G. Huang, L. Yang and Z. He, "Time-Delay Direction Finding Based on Canonical Correlation Analysis [Electronic Warfare Applications]," in *2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Kobe, Japan, 2005, pp. 5409-5412, DOI: 10.1109/ISCAS.2005.1465859.
- [21] M. Gavish and E. Fogel, "Effect of Bias on Bearing-Only Target Location," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 22-26, Jan. 1990, DOI: 10.1109/7.53410.
- [22] R. A. Poisel, *Electronic Warfare Target Location Methods*, 2nd ed. Norwood, USA: Artech House, 2012, ISBN: 978-1-60807-523-2.
- [23] S. Robertson, *Practical ESM Analysis*, Norwood, USA: Artech House, 2019, ISBN: 978-1-63081-528-8.
- [24] D. L. Adamy, *EW 101: A First Course in Electronic Warfare*, Norwood, USA: Artech House, 2001, ISBN: 1-58053-169-5.
- [25] D. L. Adamy, *EW 102: A Second Course in Electronic Warfare*, Norwood, USA: Artech House, 2004, ISBN: 1-58053-686-7.

- [26] N. A. O'Donoghue, *Emitter Detection and Geolocation for Electronic Warfare*, Norwood, USA: Artech House, 2020, ISBN: 1-58053-686-7.
- [27] N. Kim, "Optimized Flight Path For Localization Using Line Of Bearing," M.S. thesis, Dept. of The Air Force, Air University, Korea, 2015.
- [28] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004, ISBN: 978-1-63081-564-6.
- [29] A. Ruszczyński, *Nonlinear Optimization*, Oxfordshire, UK: Princeton University Press, 2006, ISBN: 978-0-691-11915-1.