

**IFF CEVAPLAYICILARA GPS'TEN BAĞIMSIZ OLARAK
IFF SORGULAYICILARI İLE KONUM BİLGİSİ
SAĞLANMASI**

**PROVIDING GLOBAL POSITION INFORMATION TO IFF
TRANSPONDERS FROM IFF INTERROGATORS WITHOUT
GPS**

MEHMET AKİF ÇELİK

DR. ÖĞR. ÜY. BARIŞ YÜKSEKAYA

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Sınav Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalı için öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Eylül 2024

ÖZET

IFF CEVAPLAYICILARA GPS'TEN BAĞIMSIZ OLARAK IFF SORGULAYICILARI İLE KONUM BİLGİSİ SAĞLANMASI

MEHMET AKİF ÇELİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ, ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Danışman: Dr. Öğr. Üy. Barış YÜKSEKKAYA

Eylül 2024, 93 sayfa

Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) sistemleri hava platformları açısından kritik öneme sahiptir ve hava platformlarında uçuş dinamiklerinin birçoğu bu sistem tarafından sağlanan konum bilgisine dayanmaktadır. Ancak bu sistem düşük RF sinyal seviyeleri ile çalıştığı için karıştırma/aldatma taarruzlarından kolaylıkla etkilenebilmektedir. Bu nedenle bazı bölgelerde platform taarruza maruz kalıp konum bilgisini kaybederek uçuş güvenliği tehlikeye girebilmektedir. Tez kapsamın platforma alternatif küresel konum bilgisini IFF sistemi üzerinden hava platformuna iletimi üzerine yöntem geliştirilmiştir. Yöntem geliştirilirken IFF sisteminin hava trafik kontrol radarlarındaki çalışma dinamikleri analiz edilmiştir. Bu bağlamda hava trafik kontrol radarının IFF işletim senaryoları ters düşmeyecek şekilde ve geriye dönük uyumlu (backward compatible) bir şekilde konum bilgisi transfer yöntemi geliştirilmiştir. Ayrıca bu yöntem içerisinde efektif kodlama yöntemi geliştirilmiş olup sonuçlar analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre küresel konum bilgisini efektif bir şekilde düşük belirsizlik değerleri ve yüksek çözünürlükle transfer edilebileceği gösterilmiştir.

Anahtar sözcükler: Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS), GPS Jamming/Spoofing taarruzları, IFF, Sorgulayıcı, Cevaplayıcı, Mod S

ABSTRACT

PROVIDING GLOBAL POSITION INFORMATION TO IFF TRANSPONDERS FROM IFF INTERROGATORS WITHOUT GPS

MEHMET AKİF ÇELİK

Master of Science, Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Dr. Öğr. Üy. Barış YÜKSEKKAYA

September 2024, 93 pages

Global Positioning System (GPS) systems has critical role on air platforms. This system is flight critical and other system installed in aerial platform are based on the location information provided by this system. However, this system can be easily affected by scattering/spoofing attacks due to low RF signal operating characteristic. The air platform can lose their global position and it can be threatened of flight safety if the presence of such attack some region on the earth. The operating principle of IFF system were analyzed about used from air traffic control radars. In this study, a global position information transfer method has been developed as backward compatible that does not conflict with the IFF operating scenarios of the air traffic control radar. In addition, an effective coding method has been developed within this method and the results have been observed. According to the results, it has been shown that global position information can be transferred effectively with low uncertainty values and high resolution.

Keywords: Global Positioning System (GPS), GPS Jamming/Spoofing Attacks, IFF, Interrogator, Transponder, Mod S

TEŞEKKÜR

Bu tez alıŐmasının hazırlanmasında bana verdikleri sınırsız destek ve sevgiden ötürü sevgili aileme en derin teŐekkürlerimi sunarım. Her an yanımda olarak beni motive eden, sabırla destekleyen ailem sayesinde bu zorlu süreci başarıyla tamamlayabildim. Ayrıca, tez danışmanım Dr. Öğr. Üy. Barış YÜKSEKKAYA hocama, değerli rehberliği, bilgisi ve özverisi için sonsuz teŐekkürlerimi sunarım. Bununla birlikte, ASELSAN’da bana sağlanan çalışma ortamı sayesinde bu alanda kazandığım tecrübe için de ASELSAN’a teŐekkürlerimi sunarım.

İçindekiler

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
TABLolar	vii
ŞEKİLLER	viii
KISALTMALAR	x
1 GİRİŞ	1
1.1 Tezin Katkıları	2
1.2 Organizasyon	3
2 İFF SİSTEMİ	4
2.1 Sorgu ve Cevap Sinyal Yapıları	5
2.1.1 Mark XIIA Sorgu ve SIF Cevap Sinyal yapısı	5
2.1.2 Mod-S Sorgu Sinyal Dalge Şekli ve Veri Yerleşimi	7
2.1.3 Mod S Cevap Sinyali ve Veri Ayrışımı	10
2.2 Sorgulayıcı Sistemi	13
2.3 Sorgulayıcı Konum Belirleme Yöntemleri	17
2.3.1 Kayar Pencere (Sliding Window) Metodu	17
2.3.2 Tek Darbe (Monopulse) Yöntemi	19
2.4 Sorgulayıcı Sahte Hedef Eleme Yöntemleri	20
2.4.1 Sorgulayıcı RSLs tekniği	20
2.4.2 Sorgulayıcı ISLS tekniği	22
2.5 Cevaplayıcı Sistemi	23
2.5.1 Cevaplayıcıda ISLS Desteği	27
2.6 İFF Sisteminde Bazı Kısıtlamalar (Limitations)	28
3 Literatür Taraması	29

3.1	IFF ile İlgili Çalışmalar	29
3.2	IFF Sistemlerinin Garbling Ekilerini Azaltmaya yönelik Çalışmalar	29
3.3	Hava Trafik Gözetiminde Hedef Tespitinin Doğruluğunu Artırmaya Yönelik Çalışmalar	31
3.4	IFF Sistemlerinin Haberleşme Güvenliğini Artırmaya ve Karıştırmaya(Jamming) Karşı Yapılan Çalışmalar	34
3.5	IFF Sistemlerinde Sahte Hedef Ayırıştırma Yönelik Çalışmalar	35
3.6	Jeodezik Hesaplama ile İlgili Çalışmalar	37
4	IFF Mod S Haberleşmesi ve Kullanım Şekli	39
4.1	Mod S Tüm Çağrı(All – Call) Sorgusu ile Adres Edinimi	40
4.1.1	Mod S All - Call Sorgu Yapısı	42
4.1.2	Mod S Tüm Çağrı (All - Call) Cevap Yapısı	44
4.1.3	Mod S Seçici Sorgulama (Roll - Call) Sorgu ve Cevap Formatları	44
4.2	Mod S All - Call ve Roll - Call Sorgu Cevap Döngüleri ile Hava Gözetimi	47
5	IFF Sistemi ile Küresel Konum Bilgisi Sağlanması	53
6	SONUÇ	67

TABLolar

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1 IFF haberleşme Modları ve Kullanım Alanları [1]	5
Tablo 2.2 Squawk Kodlaması [2]	6
Tablo 4.1 ELS EHS Yazmaç Tanım Tablosu [3, 4]	50
Tablo 5.1 Intel Core i9-10900K ve STM32F446RE Karşılaştırması	61

ŞEKİLLER

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1	IFF SIF Sorgu Mod Darbeleri 6
Şekil 2.2	Cevap Sinyali RF Darbeleri [2]..... 7
Şekil 2.3	IFF Mod-S Sorgu Dalga Şekli[2]..... 8
Şekil 2.4	Mod S Sorgu Formatları[2] 9
Şekil 2.5	Mod S Sorgu Format Tablosu[2] 10
Şekil 2.6	Mod S Cevap Formatları[2]..... 12
Şekil 2.7	AMI 2700 Radar Sistemi [5] 14
Şekil 2.8	Örnek IFF Anten Örüntüsü 15
Şekil 2.9	Sorgulayıcı Blok Diyagram [3]..... 16
Şekil 2.10	Kayan Pencere Metodu ile Hedef Açılı Hesabı 18
Şekil 2.11	Tek Darbe Güç-Faz Eğrisi 19
Şekil 2.12	Tek Darbe Yöntemi Hedef Haz Açılı Gösterimi [3] 20
Şekil 2.13	RSLs Örnek Senaryo 21
Şekil 2.14	RSLs ile Belirlenen Hızlı Genişliğinin Tek Darbe Güç-Faz Eğrisinde Gösterimi 22
Şekil 2.15	ISLS Örnek Senaryo 23
Şekil 2.16	Uçak Üzerinde Cevaplayıcı Anten Konumları..... 24
Şekil 2.17	Cevaplayıcı Blok Diyagramı[3, 6] 26
Şekil 2.18	Cevaplayıcı SIF Sorgu Kabul-Ret Eğrisi[3] 27
Şekil 2.19	Cevaplayıcı Mod S Sorgusu Dalga Şekli[2] 28
Şekil 3.1	Garbling Gösterimi [3]..... 29
Şekil 3.2	MLAT Sistemi [3]..... 33
Şekil 3.3	FRUIT [3] 36
Şekil 3.4	Çok Yollu Girişim Gösterimi [3] 37
Şekil 4.1	ALL-CALL Örnek Sorgu Cevap Senaryosu 41
Şekil 4.2	Mod S Tüm Çağrı (All-Call) Sorgu Sinyali Veri Ayrışımı[2] 43

Şekil 4.3	Mod S Tüm Çağrı (All-Call) Cevap Sinyali Veri Ayırışımı[2]	44
Şekil 4.4	Mod S Seçici Sorgu (Roll-Call) Sinyali Veri Ayırışımı[2]	45
Şekil 4.5	MA Alanı [2]	46
Şekil 4.6	Mod S Seçici Cevap (Roll-Call) Sinyali Veri Ayırışımı [2]	46
Şekil 4.7	All-Call Roll-Call Örnek Sorgu Cevap Döngüleri [3]	48
Şekil 4.8	All-Call Roll-cALL ile Gözlem Akış Diyagramı[4].....	52
Şekil 5.1	Referans Pozisyon Bilgisinin All - Call Sorgusu İçerisine Yerleşimi ..	54
Şekil 5.2	All Call-Roll Call ile Konum Bilgisinin İletim Akışı	56
Şekil 5.3	MA Alanı Ofset Enlem ve Boylam Değerlerinin Yerleşimi.....	58
Şekil 5.4	Jeodezik ve Vincenty Algoritmaları Ortalama Çevrim sayıları	61
Şekil 5.5	Tez Kapsamında Hesaplanan Belirsizlik Değerleri	62
Şekil 5.6	Belirsizlik Dağılımı	63
Şekil 5.7	Boylam Verisinin Enleme Göre Çözünürlük Eğrisi	64
Şekil 5.8	Kapsama Alanında 100 adet Platform Olması Durumunda Sağlanabilecek Konum Sayısı	65
Şekil 5.9	Kapsama Alanında 250 adet Platform Olması Durumunda Sağlanabilecek Konum Sayısı	66
Şekil 5.10	Kapsama Alanında 500 adet Platform Olması Durumunda Sağlanabilecek Konum Sayısı	66

KISALTMALAR

ACAS	: Airborne Collision Avoidance System Trafik Uyarı ve Çarpışma Önleyici Sistem
ACP	: Azimuth Change Pulse Yanca Belirtim Darbesi
ARP	: Azimuth Reset Pulse Yanca Sıfırlama Darbesi
BDS	: Comm-B Data Selector Comm-B data adresi
DF	: Downlink Format Downlink formatı
DPSK	: Differential Phase-Shift Keying Diferansiyel Faz Kaydırmalı Kodlama
EHS	: Enhanced Surveillance Gelişmiş Gözlem
ELS	: Elementary Surveillance Temel Gözlem
GICB	: Ground-Initiated Comm-B Yer İstasyonundan Talep Edilen Comm-B
GNSS	: Global Navigation Satellite System Küresel Navigasyon Uydu Sistemi
ICAO	: International Civil Aviation Organization Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü
IFF	: Identification of Friend or Foe Dost Düşman Tanıma Tanıtma Sistemi
II	: Interrogator Identifier Sorgulayıcı Tanım Kodu

I2SLS	: Improved Interrogator Side-Lobe Suppression İleri Sorgu Yan Lob Bastırma
ISLS	: Interrogator Side-Lobe Suppression Sorgu Yan Lob Bastırma
MHz	: Megahertz Megahertz
NATO	: North Atlantic Treaty Organization Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü
PAM	: Pulse-Amplitude Modulation Darbe Genlik Modülasyonu
PPI	: Plan Position Indicator Plan Pozisyon Monitörü
PPM	: Pulse Position Modulation Darbe Pozisyon Modülasyonu
RF	: Radio Frequency Radyo Frekans
RSLS	: Receiver Side-Lobe Suppression Alıcı Yan Lob Bastırma
SI	: Surveillance Identifier Gözetim Tanım Kodu
SIF	: Selective Identification Feature Seçici Özellikli Tanımlama
STANAG	: Standardization Agreement Standardizasyon Anlaşması
TCAS	: Traffic Alert and Collision Avoidance System Trafik Uyarı ve Çarpışma Önleyici Sistem
UF	: Uplink Format Uplink formatı
ARM	: Advanced RISC Machine

	Gelişmiş RISC Makinesi
RISC	: Reduced Instruction Set Computing Azaltılmış Komut Seti Bilgisayarı
CISC	: Complex Instruction Set Computing Karmaşık Komut Seti Bilgisayarı
FRUIT	: False Replies Unsynchronised to Interrogator Transmission Sorgulayıcı İletimini Asenkron Alınan Yanlış Cevaplar

1 GİRİŞ

GPS sistemleri günümüzde yaygın kullanıma sahip olup vazgeçilmez bir sistem haline gelmiştir. Bu sistem iki farklı yapıdan oluşmaktadır. Bunlardan birisi alıcı sistem, diğeri ise uydu verici sistemdir. Alıcı sistemi hava platformları ve uçakların konumlandırılmasından sorumlu olduğu için uçağın navigasyonu açısından kritik öneme sahiptir. Alıcılar belirli bir sayıda verici uydularından aldıkları yayınların veri içeriklerini değerlendirerek kendi konumunu belirler ve zaman bilgisi elde eder [7]. Yer yüzündeki alıcılara ulaşan bu RF yayınlarının gücü ortalama gücü -127.5 dBm civarında olmaktadır. Bu sinyal seviyesinde çalışması nedeni ile platforma mesafe bakımından daha yakın olan elektronik taarruz sistemlerinin karıştırma veya aldatmasına daha müsait hale gelmektedir. Hava platformları özellikle sivil platformlar bu taarruzlardan ötürü konum bilgilerini kaybedebilmektedirler [8]. Öte yandan konumlandırma sistemi çeşitli nedenlerden ötürü arızalanabilir. Bu durumda uçakta bulunan navigasyon sistemi de konumlamada zorluk yaşayacağı için (Traffic/Airborne Collision Avoidance System, TCAS/ACAS) çarpışma önleyici sistemler bir noktadan sonra devre dışı kalabilmektedir. Böyle bu durum ile karşılaşılması halinde uçak ve hava platformunun havada güvenle hareket etmesi tehlikeye girebilmektedir.

Karıştırma ve aldatma günümüzde sıkça karşılan bir durum olup askeri veya istihbarat amaçla gerçekleştirilebilmektedir. Bu tip faaliyetlerden sivil uçak ve hava platformları sıklıkla etkilenebilmektedir. Uçak ve hava platformları iniş ve kalkışları esnasında sıkça bu duruma rastlandığı not edilmiştir. Bu durumda hava trafik kontrol merkezi, uçağı tekrardan güvenle uçuşuna devam etmesi için uçağı kumanda eden personel ile telsiz irtibatına geçip yönlendirmek mecburiyetinde kalmaktadır. Hava trafik kontrol merkezi tekrar yönlendirme ile meşguliyeti arttığı için diğ er uçakların uçuşunu da riske atabilmektedir [9].

Bu tez kapsamında, GPS taarruzu veya Navigasyon sisteminin arızalanması durumunda hava platformuna tekrar küresel konum bilgisi sağlamak için IFF sistemi kullanılarak bir konum elde etme yöntemi amaçlanmıştır. Uçak veya hava platformu herhangi bir sebeple küresel konum bilgisini kaybetmesi durumunda, IFF cevaplayıcı aracılığı ile yer istasyonundan

konum bilgisinin nasıl isteneceğine dair bir akış önerilmiştir. Geliştirilen yöntem, halihazırda hava trafik kontrolünün gözetim(surveillance) için kullandığı all-call roll-call sorgulayıcı sorgu cevap döngüleri olup sorgulayıcının çalışma prensibinin dışına çıkılmadan geriye dönük uyumluluk sağlamaktadır. Bu uyumluluk sayesinde geliştirilen yöntem dijital IFF cihazlarında yazılımsal güncelleme ile uygulanabilir durumdadır.

Tez kapsamında geliştirilen bir diğer yöntem ise konum bilgisinin all-call roll-call sorgu cevap döngülerine efektif bir şekilde yerleştirilmesidir. Bu yöntemde all-call sorgusu sabit merkez sorgulayıcının pozisyon bilgisinin iletiminde, roll-call sorgusu bu referans pozisyon bilgisine göre ofset değeri iletilmektedir. Ofset bilgisi ile referans konumuna göre nerede olduğu hesaplanılarak platformun küresel konum bilgisi elde edilmektedir. Bu ofset bilgisinin tanımlı aralığı sorgulayıcı gözetim menziline göre hesaplanmıştır. Bu sayede daha az veri biti yüksek çözünürlükte küresel konum bilgisi taşınımı sağlanmıştır. Buna ilave olarak bu yöntem ile herhangi bir enlem noktasında dünyanın küresel şeklinden etkilenmeksizin eşit çözünürlükte boylam bilgisi kodlanmıştır.

1.1 Tezin Katkıları

Bu tez çalışması, IFF sistemlerinin çalışma prensibini inceleyerek bu sistemler vasıtası ile hava platformuna küresel konum bilgisi sağlamayı amaçlamaktadır. Çalışmanın önemli katkıları aşağıda belirtildiği gibidir:

- IFF sisteminin çalışma prensibi ve konum belirleme yöntemlerinin incelenmesi
- Küresel konum hesaplamaların literatürde incelenmesi ve karşılaştırmalı olarak incelenmesi
- Küresel konum bilgisinin hava platformuna transferinde yeni bir yöntem geliştirilmesi
- Geliştirilen yöntemin hata ve çözünürlük açısından performans değerlendirilmesi

1.2 Organizasyon

Tez çalışmasının organizasyonu şu şekildedir:

- **Bölüm 1:** Giriş kısmı, çalışmanın amacını, kapsamını ve katkılarını açıklar.
- **Bölüm 2:** IFF Sistemlerinin çalışma prensibi ve bu sistemlerin konum belirlme yöntemleri.
- **Bölüm 3:** Mod S protokolü ile hava trafik kontrol radarının bu hava sahasını gözlem yöntemi açıklanmaktadır.
- **Bölüm 4:** Literatür taramasını içermektedir.
- **Bölüm 5:** Hava platformuna küresel konum bilgisi iletim akış ve bu küresel konum bilgisinin iletilmesinde geliştirilen yeni yöntemi açıklar. Bununla birlikte performans analizleri ve belirsizlik incelemesi sunulmuştur.
- **Bölüm 6:** Sonuçlar sunulmuş ve gelecekte yapılacak çalışmalar hakkında düşünceler paylaşılmıştır.

2 IFF SİSTEMİ

IFF sistemi 1940'lı yıllarda ikinci dünya savaşında askeri kullanım amacı ile çıkmış olup savaş esnasında dost uçakları tanımak için kullanılmıştır. Günümüzde sistem geliştirilmiş olup sivil hava trafiğinin gözetimi için kullanılmaktadır. Bu gözetimde, sabit bir noktadan hava platformlarının konumu ile platforma dair bilgiler elde edilir.

Sistem temelinde sorgulayıcı (Interrogator) ve cevaplayıcı (Transponder) olmak üzere iki tür cihazdan oluşmaktadır. Cevaplayıcılar hava platformuna, sorgulayıcılar ise ikincil gözetim radar sistemlerine entegre cihazlardır. Bu iki cihaz birbiri arasında radyo frekans (RF) sinyalleri ile iletişim sağlamaktadır. Sorgulayıcı cihazı sorgu sinyalini yönlü anten (directional antenna) ile havaya yayınlar. Buna mukabil cevaplayıcı cevap sinyali oluşturur ve yönsüz anten üzerinden yayımlayarak sorgulayıcıya iletir. Yayınlanan bu sinyal içerisinde sorgu ile istenen platforma dair birtakım bilgiler yer almaktadır. Bu cevap sinyali sorgulayıcı tarafından işlenerek platformun kimlik teşhisi sağlanır.

Sorgulayıcı teşhisin yanı sıra platformun konumunu kerteriz ve menzil olarak tespit edebilmektedir. Sorgu yayını ile cevap yayını arasındaki süreden platformun menziline hesaplar. Yönlü anten ile sorgu sinyali yayınlandığı için antenin baktığı açıdan kerterizi hesaplar. Bu konum bilgisi ile teşhis bilgileri hava trafik gözetim sistemine rapor edilir. Bu raporlar belirli bir iz takip algoritmalarında geçirilir ve hava trafik kontrol merkezinin sergileme ekranı üzerinde iz olarak sergilenir [10]. IFF sisteminin sorgu ve cevap haberleşmesinde kullanılan bir dizi modları tanımlıdır. Sorgu sinyalleri Mark XIIA ve Mod S, cevap sinyalleri ise SIF ve Mod S olmak üzere kendi içerisinde sınıflandırılır. Sorgulayıcının Mark XIIA sorgu modlarına karşılık SIF cevap, Mod S sorgularına karşılık Mod S cevap verilir. Mark XIIA sorgu modları Mod 1, Mod 2, Mod 3 ve Mod C olmak üzere dört farklı tiptedir. SIF cevap ise tek tiptir ve bu dört çeşit Mark XIIA sorgu moduna karşılık bu tek tip SIF cevap verilir. Mod S sorgu moduna karşılık Mod S cevap verilir [1, 2, 11–13].

IFF Haberleşme modlarının kullanım amacı ve etkinlik alanı 2.1’de verilmiştir.

MOD	Kullanım Amacı	Etkinlik alanı
Mod 1	Teşhis	Askeri
Mod 2	Teşhis	Askeri
Mod 3/A	Teşhis	Askeri/Sivil
Mod C	Barometrik irtifa bilgisi	Sivil
Mod S	Teşhis,Veri aktarımı	Askeri/Sivil

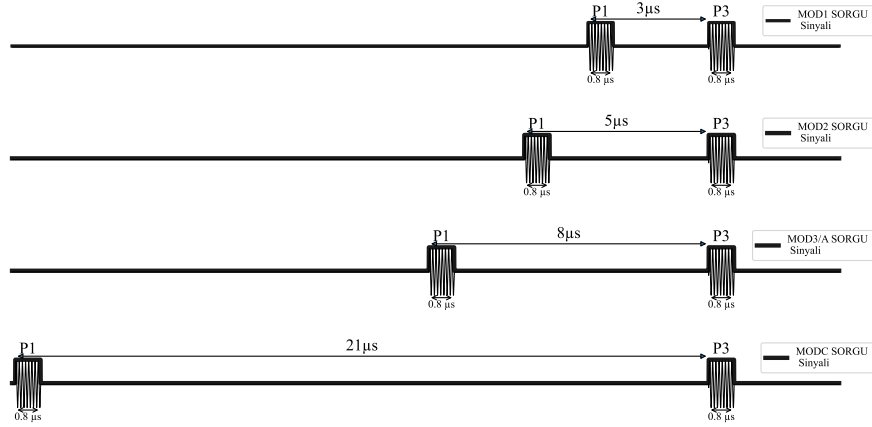
Tablo 2.1 IFF haberleşme Modları ve Kullanım Alanları [1]

IFF sisteminin sivil havacılıkta kullanımına ilişkin haberleşme dalga şekli, çalışma frekansı ve haberleşme protokolleri Ulusal Sivil Havacılık Organizasyonu (International Civil Aviation Organization, ICAO) tarafından düzenlenmektedir [2]. Nato üyesi ülkelerin askeri amaçla kullanımına ilişkin düzenlemeler STANAG (Standard NATO Agreement) tarafından yürütülmektedir [11].

2.1 Sorgu ve Cevap Sinyal Yapıları

2.1.1 Mark XIIIA Sorgu ve SIF Cevap Sinyal yapısı

Mark XIIIA sorgu modlarının sinyali Genlik kaydırmalı anahtarlama (Amplitude Shift Keying, ASK) ile kiplenmektedir. Bu sinyal temelinde iki adet darbeden oluşmaktadır. Bu darbelerden ilki P1 ikinci P3 darbesidir ve her birinin darbe süresi $0.8 \pm 0.1 \mu s$ kadardır. Sorgulama sinyalleri Şekil 2.1’de gösterildiği gibi sorgu sinyalinin çeşidine göre P1 ve P3 darbesinin arasındaki uzaklık değişkenlik göstermektedir. Her bir darbe frekansı 1030 ± 0.2 MHz taşıyıcı sinyal ile iletilmektedir [2, 11, 14].



Şekil 2.1 IFF SIF Sorgu Mod Darbeleri

Darbe Adı \ Kod(Oktal)	A4	A2	A1	B4	B2	B1	C4	C2	C1	D4	D2	D1
0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3512	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
7777	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

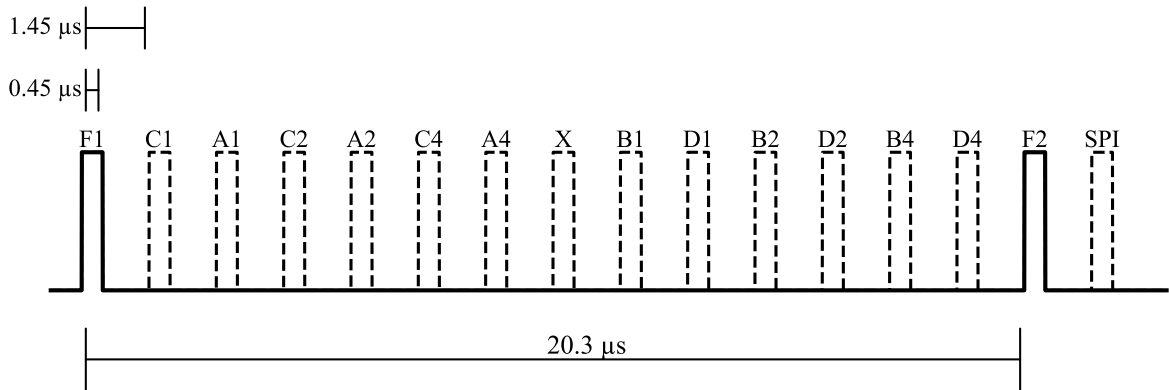
Tablo 2.2 Squawk Kodlaması [2]

SIF mod cevap sinyalleri de sorgu sinyallerinde kullanılan ASK ile modüle edilmektedir. Cevap sinyaline ait her bir darbe 1090 ± 3 MHz taşıyıcı sinyal ile havaya yayınlanmaktadır. Cevap verisinin darbeleri Şekil 2.2’de gösterildiği gibi dizilerek havaya yayımlanır. Her bir darbenin genişliği $0.45 \pm 0.1 \mu s$ kadardır ve on iki bitlik veriyi ileten darbeler F1 ve F2 darbeleri arasına $1 \mu s$ aralıklara yerleştirilir. Bu veri Tablo 2.2’de görüldüğü üzere squawk kodlaması olup toplam 12 bitlik kod şeklindedir. Üçer bitlik grup halinde dört haneli sekizlik (Octal) tabanıdır. Her bir Mark XIIA sorgu moduna karşılık ilgili cevap verisi bu şekilde kodlanarak cevap sinyali içerisinde iletilir.

Şekil 2.2’de gösterilen SPI (Special Purpose Identification) darbesi platformun pilotu

ve kumanda birimi tarafından kontrol edilir. Aktif edilmesi halinde hava trafik kontrol merkezinin sergileme ekranlarında ayrı bir iz şeklinde gösterilir. Bu özelliği sayesinde özel durumlar nedeni ile platformu kolaylıkla ayırt edilmesi sağlanır. X darbesi ise insansız hava araçlarının cevaplayıcı cihazlarında aktif edilmektedir [2, 11]. Ancak bu darbenin olduğu cevap yayınları sivil hava trafik kontrol merkezi tarafından göz ardı edilir. Bu durumda hem platformun hem de diğer platformların uçuş güvenliğini tehlikeye girebilmektedir. Bu darbenin kullanımı günümüz sivil hava trafiğinde olan platformlar uygun değildir [3].

Her bir Mark XIIA sorgu moduna karşılık kod bilgileri cevaplayıcıda yer almaktadır. Bu kod bilgileri Mark XIIA Mod 1, Mod 2 ve Mod 3/A için birbirinden farklı şekilde cevaplayıcı cihazında tutulur. Mod C sorgu moduna karşılık platformun barometrik irtifa bilgisi 100 ft çözünürlük ile SIF cevap içerisinde iletilir. Kod bilgileri uçuş öncesinde uzak komuta sistemleri veya diğer komuta arayüzleri ile cevaplayıcı cihazına atanır. Mod C cevabı için gerekli olan irtifa bilgisi barometrik veya GNSS sensörleri tarafından sürekli olarak güncellenir ve seri haberleşme arayüzleri (ARINC429 vb.) ile belirli bir periyotta cevaplayıcıya sağlanır [2, 13?].



Şekil 2.2 Cevap Sinyali RF Darbeleri [2]

2.1.2 Mod-S Sorgu Sinyal Dalge Şekli ve Veri Yerleşimi

Mod S sorgulama sinyalinin dalga şekli Şekil 2.3'de görüldüğü üzere P1 ,P2 ve P6 darbelerinden oluşmaktadır. Her bir darbe, frekansı 1030 ± 0.01 MHz taşıyıcı sinyal ile taşınmaktadır. P1 ve P2 darbesi ön sembol olup ASK modülasyonu ile kiplenmektedir ve

darbe süreleri $0.8 \pm 0.1 \mu s$ kadardır. Bu darbeler herhangi bir veri taşımamaktadır. P6 darbesi ayrımsal faz kaydırmalı anahtarlama modülasyonu (Differential Phase Shift Keying, DPSK) ile kiplenmekte ve içerisinde veri taşınmaktadır. Bu veriler ile hava trafik gözetim için platform cevaplayıcına iletilen birtakım veriler veya direktif komutlar gönderilmektedir. Bu darbenin süresi, sorgulanan sorgu formatının (Uplink Format) uzun veya kısa format olma durumuna göre değişmektedir. Kısa sorgu formatları 56 bit, uzun sorgu formatları 112 bit uzunluğunda veri içermektedir. Bu durumda kısa ve uzun mod sorguların P6 darbe süreleri

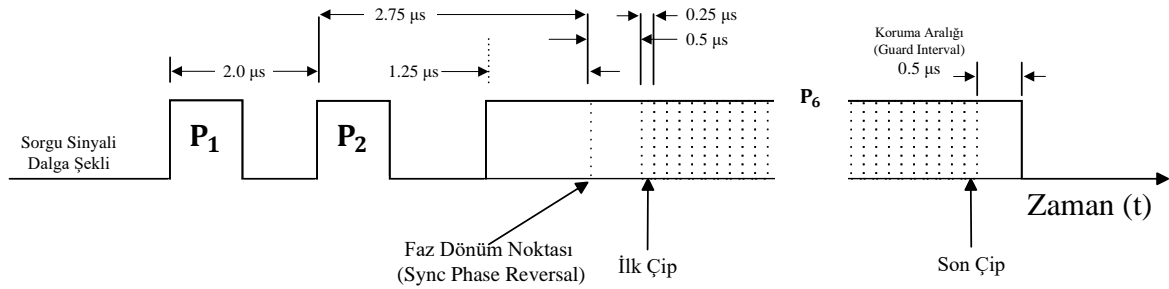
$$t_{P6 \text{ kısa}} = t_{\text{sync phase reversal}} + 2 \times t_{\text{guard gap}} + (\text{Toplam bit sayısı}) \times 0.25 \quad (2.1)$$

$$= 1.25 + 2 \times 0.5 + 56 \times 0.25 = 16.25 \mu s$$

$$t_{P6 \text{ uzun}} = t_{\text{sync phase reversal}} + 2 \times t_{\text{guard gap}} + (\text{Toplam bit sayısı}) \times 0.25 \quad (2.2)$$

$$= 1.25 + 2 \times 0.5 + 112 \times 0.25 = 30.25 \mu s$$

kadardır [2, 13, 15, 16].



Şekil 2.3 IFF Mod-S Sorgu Dalga Şekli[2]

Mod S sorgu formatları Şekil 2.4'de gösterildiği gibi UF 0 ila UF 24'e kadar olabilmektedir. Günümüzde bunlarda UF0, 4, 5, 11, 16, 20, 21 ve 24 formatları kullanılmaktadır. Bu formatlardan UF 0, 4, 5 ve 11 kısa format diğerleri uzun format olarak tanımlıdır. Hava trafik gözetiminde formatlarda UF4, 5, 11, 20 ve 21 formatları kullanılmaktadır. UF0 ve 16 formatları ise çarpışma önleyici sistemleri (ACAS) tarafından havadan havaya gözetim için kullanılmaktadır [2, 13, 15].

Format No.	UF								
0	00000	3	RL:1	4	AQ:1	DS:8	10	AP:24 Short air-air surveillance (ACAS)
1	00001	27 or 83						AP:24	... Reserved
2	00010	27 or 83						AP:24	... Reserved
3	00011	27 or 83						AP:24	... Reserved
4	00100	PC:3	RR:5	DI:3	SD:16	AP:24		 Surveillance, altitude request
5	00101	PC:3	RR:5	DI:3	SD:16	AP:24		 Surveillance, identify request
6	00110	27 or 83						AP:24	... Reserved
7	00111	27 or 83						AP:24	... Reserved
8	01000	27 or 83						AP:24	... Reserved
9	01001	27 or 83						AP:24	... Reserved
10	01010	27 or 83						AP:24	... Reserved
11	01011	PR:4	IC:4	CL:3	16		AP:24 Mode S only all-call	
12	01100	27 or 83						AP:24	... Reserved
13	01101	27 or 83						AP:24	... Reserved
14	01110	27 or 83						AP:24	... Reserved
15	01111	27 or 83						AP:24	... Reserved
16	10000	3	RL:1	4	AQ:1	18	MU:56	AP:24 Long air-air surveillance (ACAS)
17	10001	27 or 83						AP:24	... Reserved
18	10010	27 or 83						AP:24	... Reserved
19	10011	27 or 83						AP:24	... Reserved for military use
20	10100	PC:3	RR:5	DI:3	SD:16	MA:56	AP:24	 Comm-A, altitude request
21	10101	PC:3	RR:5	DI:3	SD:16	MA:56	AP:24	 Comm-A, identify request
22	10110	27 or 83						AP:24	... Reserved for military use
23	10111	27 or 83						AP:24	... Reserved
24	11	RC:2	NC:4	MC:80		AP:24		 Comm-C (ELM)

Şekil 2.4 Mod S Sorgu Formatları[2]

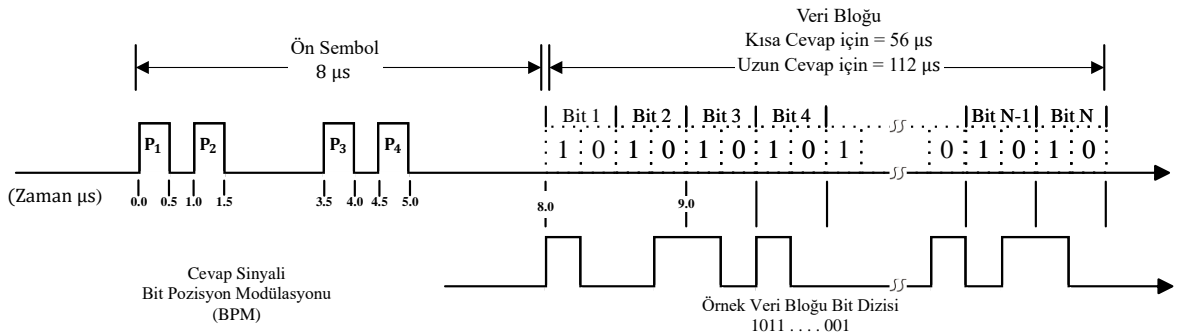
2.1.3 Mod S Cevap Sinyali ve Veri Ayırışımı

Mod S haberleşme protokolüne ait cevap sinyali Şekil 2.5’de görüldüğü gibi darbe pozisyon modülasyonu (Pulse Position Modulation, PPM) ile kiplenmektedir. Cevap sinyalindeki her bir darbe süresi $0.5 \pm 0.1 \mu s$ kadardır. Sorgu sinyalinin dalga şeklinde olduğu gibi dört tane sembol darbesi, peşi sıra gelen darbeler ise PPM modülasyonu ile kiplenmiş veriye aittir. Darbelerinin sayısı ve dalga şeklinin uzunluğu sorgu sinyalinde olduğu gibi cevap formatının kısa ve uzun olmasına göre değişmektedir. Kısa sorgu formatları 56 bit, uzun sorgu formatları 112 bit uzunluğunda veri içermektedir. Buradan hareketle cevap sinyalinin süresi

$$\begin{aligned} t_{\text{cevap kısa}} &= t_{\text{preamble}} + \text{Toplam bit} \times 1 \\ &= 8 + 56 \times 1 \\ &= 64 \mu s \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} t_{\text{cevap uzun}} &= t_{\text{preamble}} + \text{Toplam bit} \times 1 \\ &= 8 + 112 \times 1 \\ &= 120 \mu s \end{aligned} \quad (2.4)$$

kadardır. Cevap sinyaline ait her bir darbe, frekansı $1090 \pm 1 \text{ MHz}$ taşıyıcı sinyal ile taşınmaktadır [2, 13, 15, 16].



Şekil 2.5 Mod S Sorgu Format Tablosu[2]

Mod S cevap formatları Şekil 2.6’de gösterildiği gibi toplam on iki adet kullanılan cevap formatı vardır. DF 4,5,20 ve 21 formatları hava trafik kontrol gözetimi için cevaplayıcıya

tanımlanmış formatlardır. DF 0 ve 16 ise ACAS sistemleri ile cevaplayıcı haberleşmesi için kullanılır. DF 17,18 ve 19 formatları tek yönlü (broadcast) yayın yapılan cevap formatlarıdır [3, 13, 16].

Format No.	DF	
0	00000 VS:1 CC:1 1 SL:3 2 RI:4 2 AC:13 AP:24	... Short air-air surveillance (ACAS)
1	00001 27 or 83 P:24	... Reserved
2	00010 27 or 83 P:24	... Reserved
3	00011 27 or 83 P:24	... Reserved
4	00100 FS:3 DR:5 UM:6 AC:13 AP:24	... Surveillance, altitude reply
5	00101 FS:3 DR:5 UM:6 ID:13 AP:24	... Surveillance, identify reply
6	00110 27 or 83 P:24	... Reserved
7	00111 27 or 83 P:24	... Reserved
8	01000 27 or 83 P:24	... Reserved
9	01001 27 or 83 P:24	... Reserved
10	01010 27 or 83 P:24	... Reserved
11	01011 CA:3 AA:24 PI:24	... All-call reply
12	01100 27 or 83 P:24	... Reserved
13	01101 27 or 83 P:24	... Reserved
14	01110 27 or 83 P:24	... Reserved
15	01111 27 or 83 P:24	... Reserved
16	10000 VS:1 2 SL:3 2 RI:4 2 AC:13 MV:56 AP:24	... Long air-air surveillance (ACAS)
17	10001 CA:3 AA:24 ME:56 PI:24	... Extended squitter
18	10010 CF:3 AA:24 ME:56 PI:24	... Extended squitter/non transponder
19	10011 AF:3 104	... Military extended squitter
20	10100 FS:3 DR:5 UM:6 AC:13 MB:56 AP:24 DP:24	... Comm-B, altitude reply ... (see Note 5)
21	10101 FS:3 DR:5 UM:6 ID:13 MB:56 AP:24 DP:24	... Comm-B, identify reply ... (see Note 5)
22	10110 27 or 83 P:24	... Reserved for military use
23	10111 27 or 83 P:24	... Reserved
24	11 1 KE:1 ND:4 MD:80 AP:24	... Comm-D (ELM)

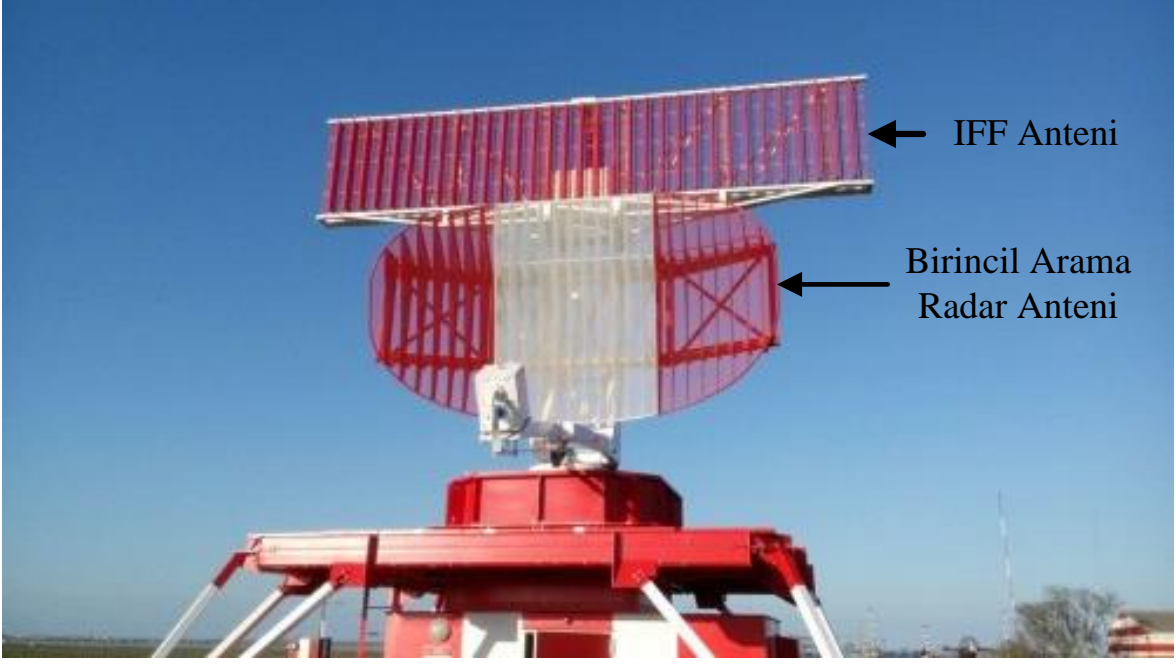
Şekil 2.6 Mod S Cevap Formatları[2]

2.2 Sorgulayıcı Sistemi

Sorgulayıcı cihazları günümüzde hava trafik kontrol radarları ile entegre bir şekilde konfigürasyonda kullanılmaktadır. Hava trafiğindeki platformlarının cevaplayıcıları ile iletişim kurularak gözetim yapılır. Gözetim menziline göre ve kullanım yerine göre sorgulayıcıların RF çıkış güçleri değişmektedir. Sivil hava sahasının gözetimin genellikle yüksek RF çıkış güçlü uzun menzil sorgulayıcı tercih edilmektedir. Genellikle yüksek dağlık yere veya havalimanında piste yakın yerlere konuşlandırılmış konfigürasyonları mevcuttur. Bazı konfigürasyonlarda birincil gözetim radarı (Primary Surveillance Radar, PSR) ile entegre bir şekilde olabilmektedir [3]. Askeri amaçla kullanılan uzun menzil sorgulayıcılar ise genellikle sabit veya mobil sistemler tarafından da kullanılmaktadır. Orta menzil sorgulayıcılar genellikle askeri amaçla kullanılmaktadır ve mobil PSR ile entegre konfigürasyonları mevcuttur. Kısa menzil sorgulayıcılar mobil veya portatif olarak stinger (MANPADS) vb silah sistemleri ile entegre olarak kısa menzil teşhis amaçlı kullanılmaktadır [17].

Sorgulayıcı cihazları hava platformlarının teşhisi ile birlikte hedefin konumu da tespit etmektedir. Tespit edilen konum bilgisi yanca açı ve menzil olmak üzere iki boyuttur. Elevasyondaki konumları ise Mod C ve Mod S sorguları ile elde edilmektedir [3].

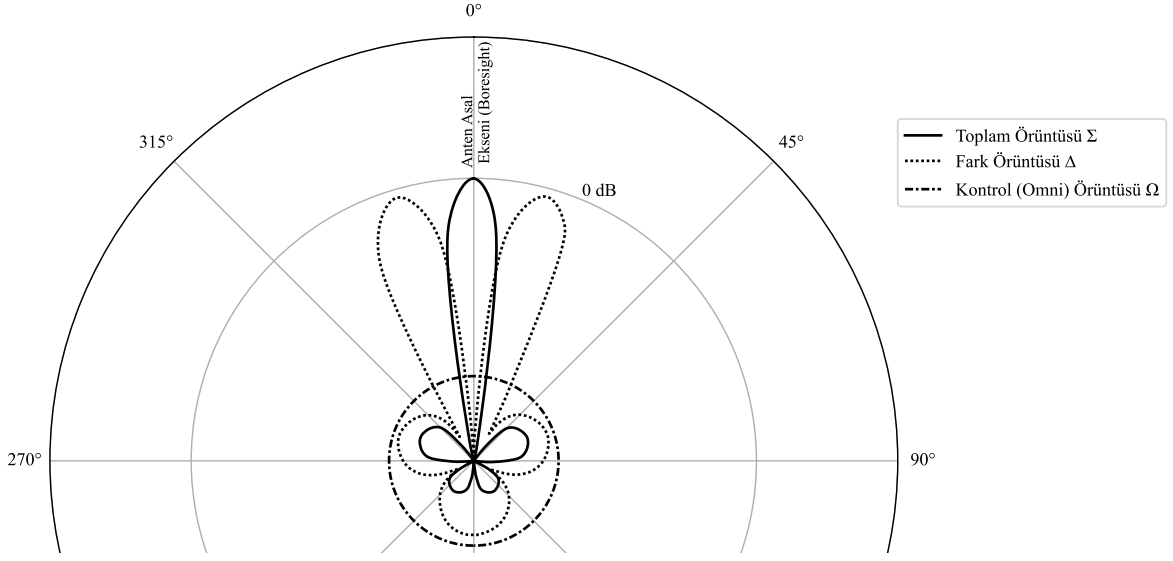
Uzun menzil sorgulayıcı cihazları toplam(Σ), Fark(Δ) ve Kontrol(Ω) kanalı olmak üç adet RF porta sahiptir. Orta ve kısa menzil sorgulayıcılar ise genellikle toplam ve fark kanalı olmak üzere iki RF porta sahiptirler. Bu RF portlar radar sisteminde IFF antenine bağlanmaktadır. IFF anteni Şekil 2.7'de görüldüğü gibi birincil gözetim radarının anteni üzerinde sabitlenmiş bir şekilde konumlandırılmaktadır. Bu iki anten ise bir kayar bilezik (rotary joint) üzerinde devamlı (continious) döndürülerek hava sahasının gözetimi yapılır [18]. Birincil gözetim radarı mevcut olmayan konfigürasyonlarda sadece IFF anteni kayar bilezik üstünde konumlandırılabilir.



Şekil 2.7 AMI 2700 Radar Sistemi [5]

IFF Sorgulayıcı antenin üç farklı örüntüsü (pattern) Şekil 2.8'de kutupsal düzlemde güç eğrisi gösterilmektedir. Bu üç örüntünün adı sırası ile Toplam (Σ), Fark (Δ), Kontrol (Omni, Ω)dur. Toplam örüntüsü yüksek kazançlı tek bir loba ve düşük kazançlı kaçak loblara sahiptir. Yüksek kazançlı lob antenin asal eksenini (boresight) yönünde olmaktadır. Bu hüzmeyin adı toplam hüzmeyi olarak da adlandırılmaktadır. Fark örüntüsü ise iki tane yüksek kazançlı loba sahiptir. Bu loblardan birisi toplam hüzmeyin sağında bir diğeri ise solunda olacak şekildedir. Kontrol (Omni) örüntüsü ise toplam örüntüsünün arka kaçak loblarını örterek uçağın yanlış yerde teşhisini önemli ölçüde azaltmaktadır. Fark örüntüsü de bu arka kaçak lobları örtmektedir ancak bazı durumlarda kontrol örüntüsü kadar örtememektedir [19, 20].

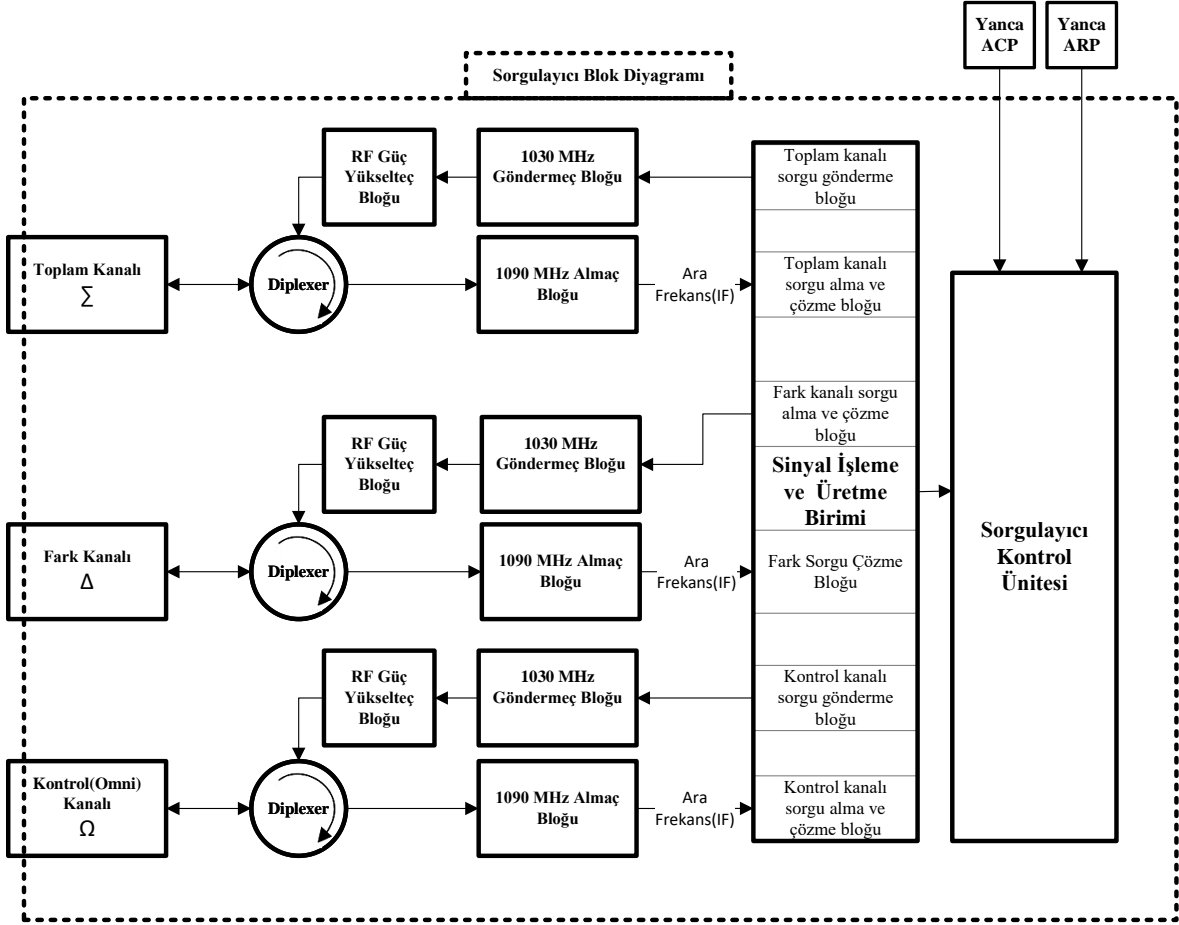
Şekil 2.9'da örnek sorgulayıcı blok diyagramı gösterilmektedir. Blok diyagramda görüldüğü gibi bölücü (duplexer) ile gönderilen sorgu sinyali ile cevap sinyali iki farklı hatta ayrıştırılmaktadır. Sorgu cevap ile bölücü (duplexer) ile anten portundan hem gönderme (Transmit, TX) hem de alma (Receive, RX) yapmaktadır. Sorgulayıcıda sorgu cevap haberleşmesi aşağıdaki sıraya göre bloklar arasındaki akışı yapılmaktadır.



Şekil 2.8 Örnek IFF Anten Örüntüsü

- Sorgulayıcı Kontrol Ünite'si sorgu sinyalini tabanbant (baseband) seviyesinde üretirmek için Sinyal işleme ve Üretim Birimi'ni tetikler.
- Sinyal işleme ve Üretim Birimi sorgu tetik sinyali ile taban bant seviyesinde sinyali üretir.
- Üretilen taban bant sorgu sinyali 1030 MHz göndermeç bloğu ile 1030 MHz taşıyıcı frekansa yükseltilir (Up conversion).
- 1030 MHz frekansına taşınan sorgu sinyali "RF Güç Yükselteç Bloğu" tarafından sinyal gücü güçlendirilir.
- Güçlendirilen sorgu sinyali bölücü (Duplexer) vasıtası ile toplam portu üzerinden IFF anteni ile havaya yayınlanır.
- Sorgu sinyaline karşılık cevaplayıcıdan cevap sinyali alınması durumunda IFF anteni üzerinden Toplam, Fark ve Kontrol portu üzerinden sorgulayıcıya ulaşır.
- Alınan cevap sinyali bölücü (Duplexer) vasıtası ile 1090 MHz Almac Bloğuna iletilir. Sonrasında bu sinyal 1090 MHz Almac Bloğunda 60 MHz ara frekansa indirgenir.

- Sinyal işleme ve Üretme Birimi ara frekansa indirgenen cevap sinyalini işleyerek cevap içeriğine ait kod ,veri veya irtifa bilgisini Sorgulayıcı Kontrol Ünitesine iletir. Toplam ve Fark portu üzerinden alınan sinyali kıyaslayarak tek darbe (monopulse) tekniği ile platformun yanca açığı ve menzilini belirler.



Şekil 2.9 Sorgulayıcı Blok Diyagramı [3]

2.3 Sorgulayıcı Konum Belirme Yöntemleri

Sorgulayıcı cihazı hedefin konumunu yanca ve mesafe olmak üzere iki boyutlu olarak belirlemektedir. Mesafe bilgisi, sorgu ile cevap arasındaki zaman farkından hesaplanmaktadır. Sorgulayıcı bu hesaplamayı yaparken sorgulanan moda göre standartların gerektirdiği cevap gecikme sürelerini hesaba katarak yapmaktadır [2]. Sorgulayıcı hedef menziline

$$t_{\text{menzil}} = \frac{(t_{\text{cevap}} - t_{\text{sorgu}} - t_{\text{cevap gecikmesi}})}{2} \times d_c, \quad (2.5)$$
$$d_c = 0.0003 \text{ s/m}$$

şeklinde hesaplamaktadır. Sorgulayıcılar yanca bilgisini hesaplariken iki farklı metot kullanabilmektedir. Bunlardan birincisi Kayar Pencere (Sliding Window) yöntemi diğeri ise tek darbe (Monopulse) yöntemidir.

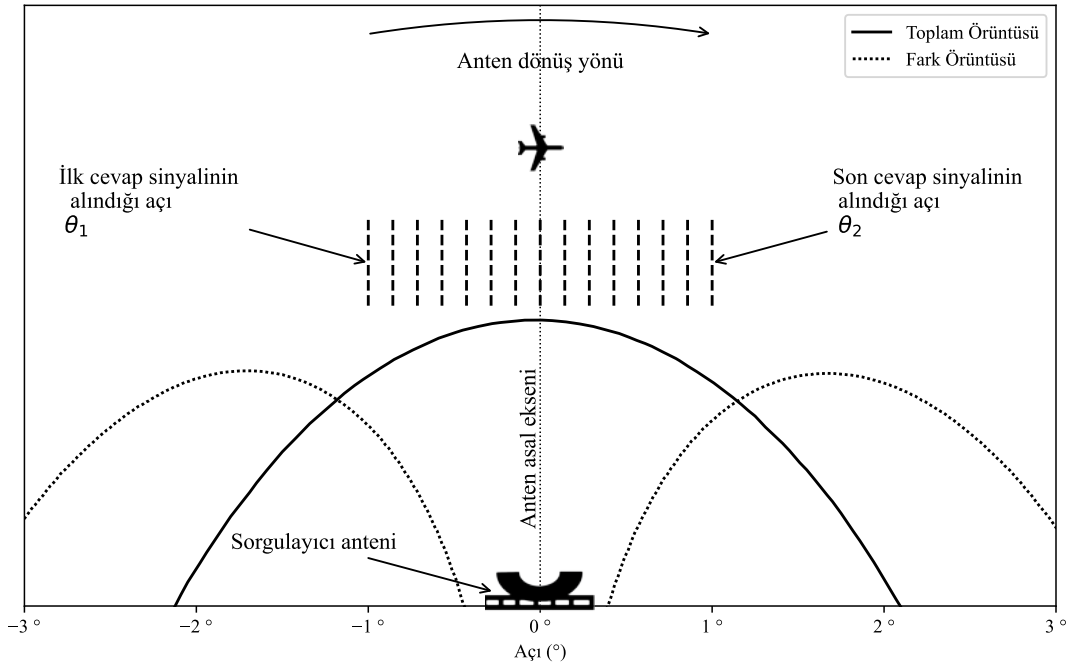
2.3.1 Kayar Pencere (Sliding Window) Metodu

Kayar pencere metodu ilkel bir yöntem olup sadece Mark XIIA Mod sorgu cevap senaryolarında kullanılabilir. Bu yöntemde hava platformun yanca ve menziline belirlenebilmesi için birden fazla sorgu cevap döngüsüne ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca sadece döner (rotating) anten platformlarında kullanılabilir. Bu yöntemde hava platformundan alınan cevap içeriği, hesaplanan menzil ve antenin asal eksenine baktığı açı bir tabloya kaydedilir. Tablodaki cevap içerikleri (kod, irtifa vb.) birbiri içerisinde aynı ve hesaplanan menzil bilgileri birbirlerine kıyasla tolerans içinde ise bu hedef için iz (plot) üretilir. Hava platformunun yanca açısı ise Şekil 2.10'de görüldüğü gibi ilk alınan cevaba ait yanca bilgisi ile son cevaba ait yanca bilgisinin ortalaması alınarak hesaplanır [21].

Hedef yancası

$$\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (2.6)$$

şeklinde hesaplanır.



Şekil 2.10 Kayan Pencere Metodu ile Hedef Açı Hesabı

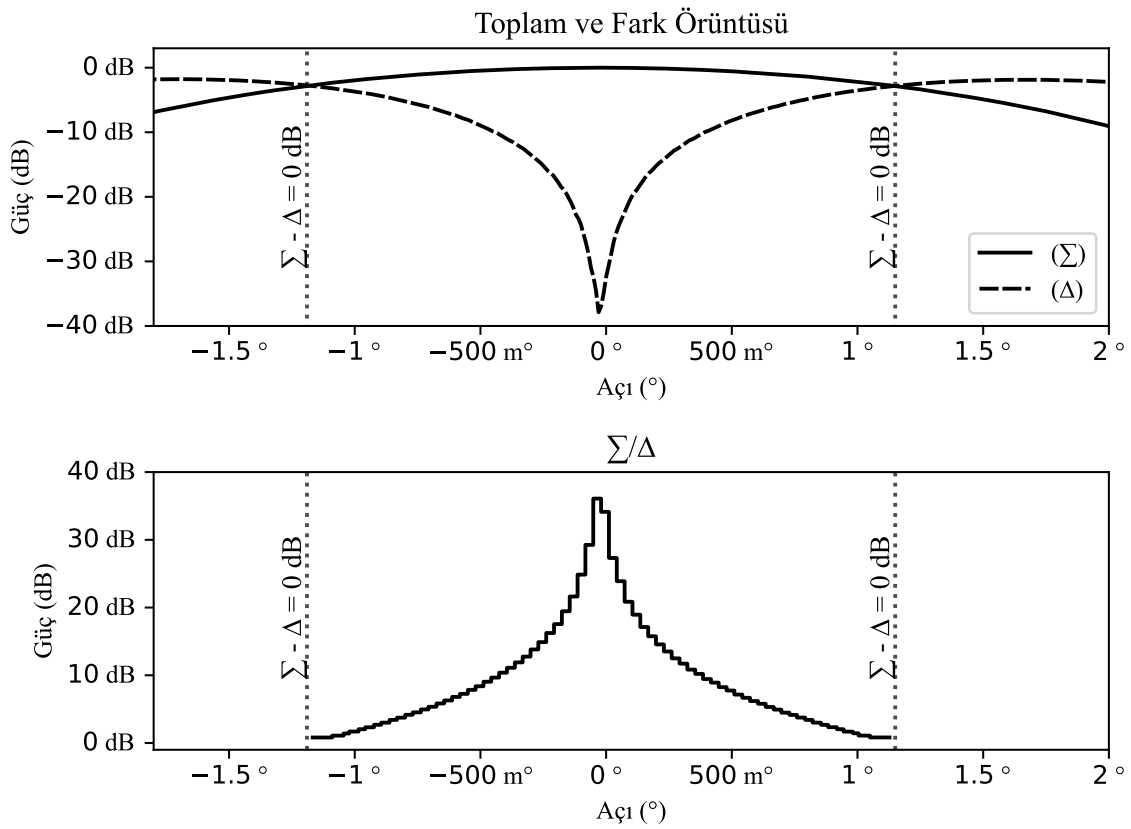
Bu yöntemin yanca doğruluğu tek darbe (monopulse) yöntemine göre daha düşüktür. Bunun bir sebebi hava platformunun cevaplayıcısı diğer RF sistemlerin tarafında susturulduğu için her sorguya cevap verememektedir [22]. Bu durumda ilk alınan cevabın veya son alınan cevabın yanca açıda yüksek belirsizliğe (uncertainty) neden olmaktadır. Başka bir sebebi ise sorgulayıcının sorgu frekans sıklığı (Pulse Repetition Frequency, PRF) standartların belirlediği seviyeyi üzerine çıkamamasıdır [2, 3].

Bu teknik sadece Mark XIIIA mod yetenekli sorgulayıcılar tarafından kullanılmaktadır. Modern Mod S yetenekli sorgulayıcılar bunun yerine tek darbe (Monopulse) tekniğini

kullanmaktadır. Mod -S All - Call ve Roll - Call sorgu cevap senaryolarında, sadece bir sorgu cevap döngüsünde hava platformunun yanca açısı tespit edilmesi gerektiği için Mod S sorgulayıcı cihazlarında kayar pencere yöntemi tercih edilmemektedir [3, 18, 21]

2.3.2 Tek Darbe (Monopulse) Yöntemi

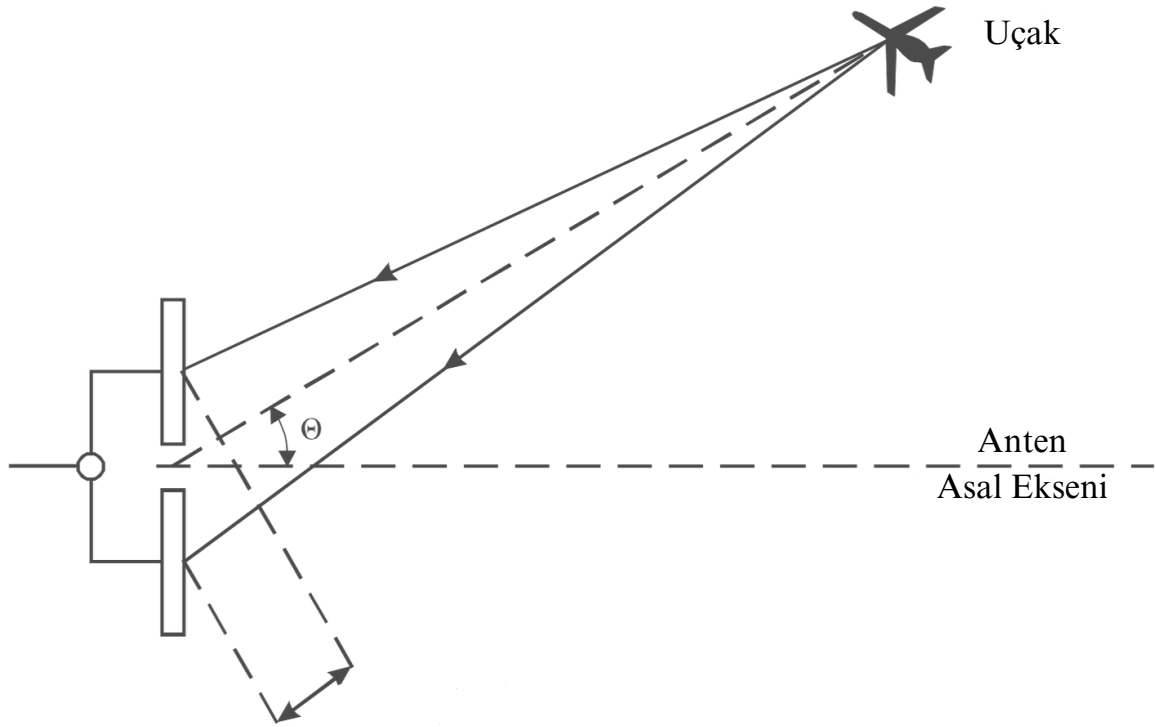
Tek darbe (Monopulse) yönteminde hava platformun yanca açısı sadece bir sorgu cevap döngüsü ile tespit edilmektedir. Yanca açı tespit edilirken toplam ve fark kanallarından alınan cevap sinyalinin güç ve faz bilgisi kullanılmaktadır. Bu işlemin yapılabilmesi için IFF sorgulayıcı anteninin tek darbe karakteristiği sorgulayıcıda yer almaktadır. Şekil 2.11’de jenerik sorgulayıcı anten tek darbe karakteristiği gösterilmektedir. Bu şekilde gösterilen sadece ikinci eğri (Σ/Δ) yanca hesaplamada kullanılmakta ve sorgulayıcı cihazında dijital olarak saklanmaktadır.



Şekil 2.11 Tek Darbe Güç-Faz Eğrisi

Bu yöntemin ilk adımında hava platformundan alınan cevap sinyali RSLs süzgecinden geçirilerek hava platformunun toplam örüntüsünün ana lobu içerisinde olduğu doğrulanır. Ardından sinyalin toplam ve fark almaçlarında oluşturduğu sinyallerin güç ve fazı ölçülür. Ölçülen faz değerlerinin farkını hesaplanır ve Şekil 2.12’de görüldüğü üzere antenin asal eksenine göre uçağın sağ veya sol tarafta olduğu belirlenir. Ölçülen güç değerlerinin farkı da hesaplanır ve tek darbe güç eğrisinde karışık gelen yanca açısı belirlenir [3, 23].

Günümüzde, tek darbe yetenekli IFF sorgulayıcılar maksimum 0.068° hata payı ile yanca tespiti yapacak şekilde tasarlanmaktadır [21, 24].



Şekil 2.12 Tek Darbe Yöntemi Hedef Haz Açısı Gösterimi [3]

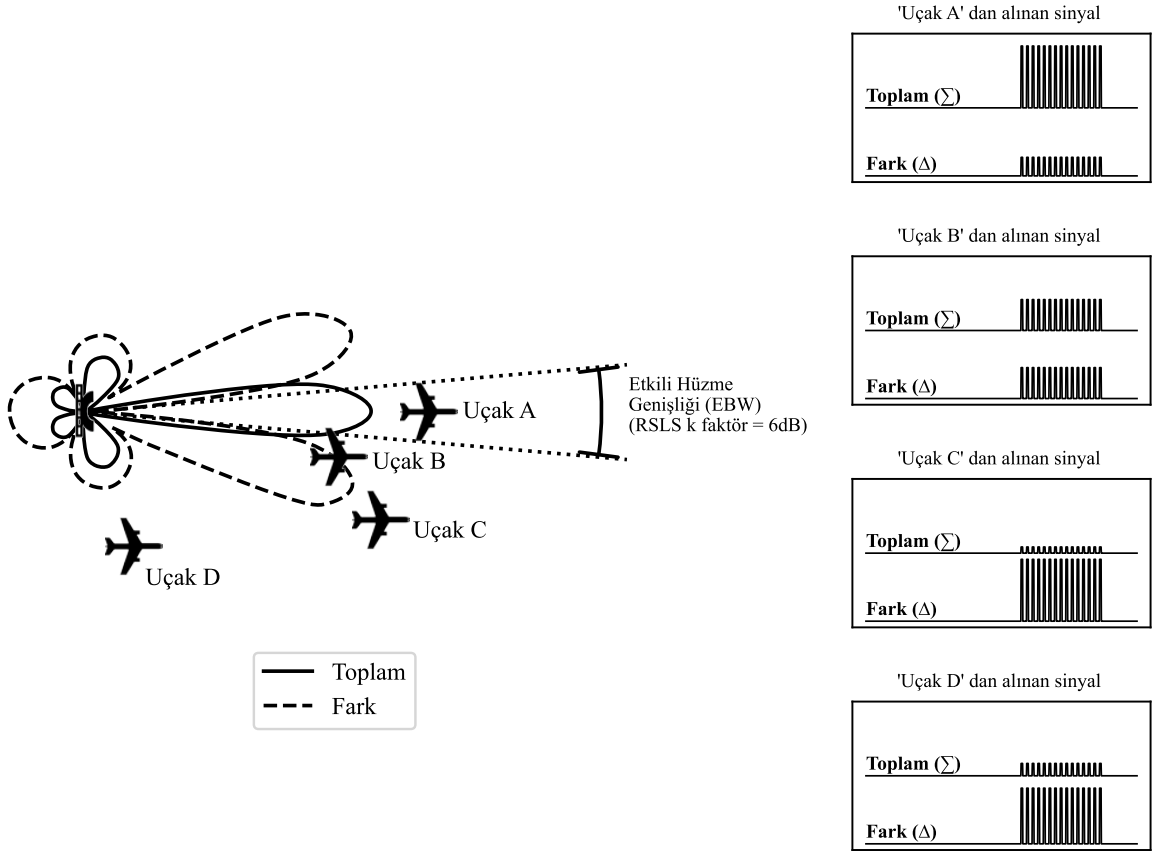
2.4 Sorgulayıcı Sahte Hedef Eleme Yöntemleri

2.4.1 Sorgulayıcı RSLs tekniği

Sorgulayıcının kullandığı bir diğer teknik ise RSLs (Alıcı Yan Lob Bastırma) tekniğidir. Bu teknikte alınan cevap sinyalinin toplam portundaki ortalama gücü ile fark portundaki

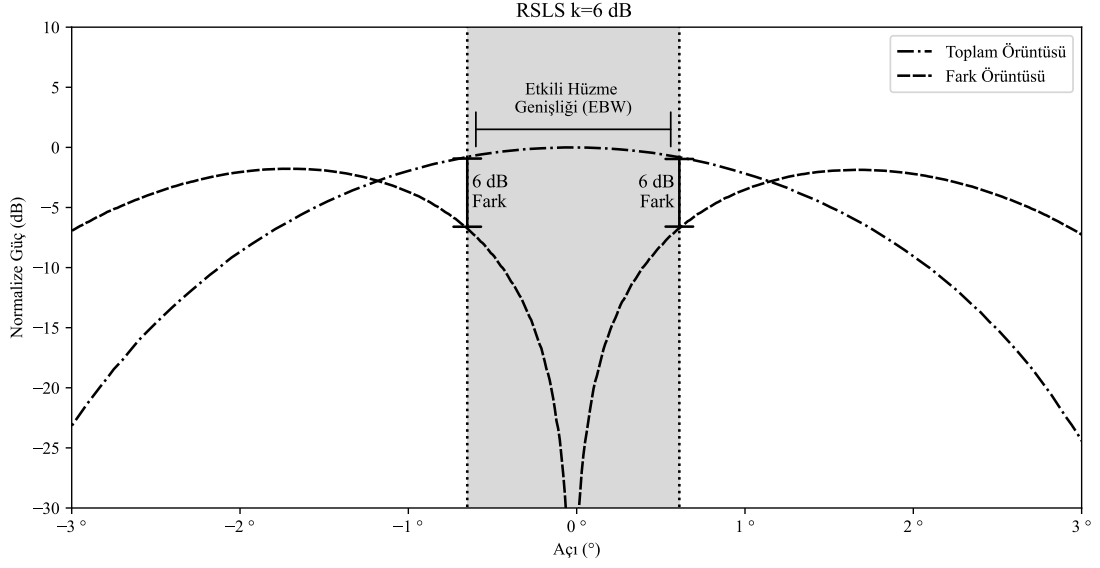
ortalama gücü kıyas edilerek hedefin antenin ana hüzme içerisinde olduğu doğrulanır. Doğrulama kriteri ise toplam port üzerinden alınan sinyal gücünün fark portundan alınan güç seviyesinin belirli bir seviyede olmasını gerektirir. Bu seviye değeri dB cinsinden sorgulayıcı cihazına girdi olarak sağlanmaktadır. Sorgulayıcı hava platformundan gelen yanıtları bu seviye ile kıyaslayarak iz (plot) üretmektedir. Aksi durumda ise sorgulayıcı platformdan aldığı cevapları elemiş olur.

Bu yöntem ile sorgulayıcının sahte iz oluşturmaya engel olunarak büyük avantaj sağlamaktadır. Şekil 2.13'deki örnek bir senaryoda görüldüğü gibi yan loblar ile arka loblardan gelen hedeflere ait cevap darbeleri de elenmiş olur [3, 18, 25].



Şekil 2.13 RSLs Örnek Senaryo

RSLs tekniğinin bir diğer faydası ise sorgulayıcı antenin etkili hüzme genişliğini ayarlayabilmesidir. Şekil 2.14'de görüldüğü sorgulayıcıya atanan K faktör değeri ile orantılı olarak hüzme genişliği ayarlanabilmektedir [25].

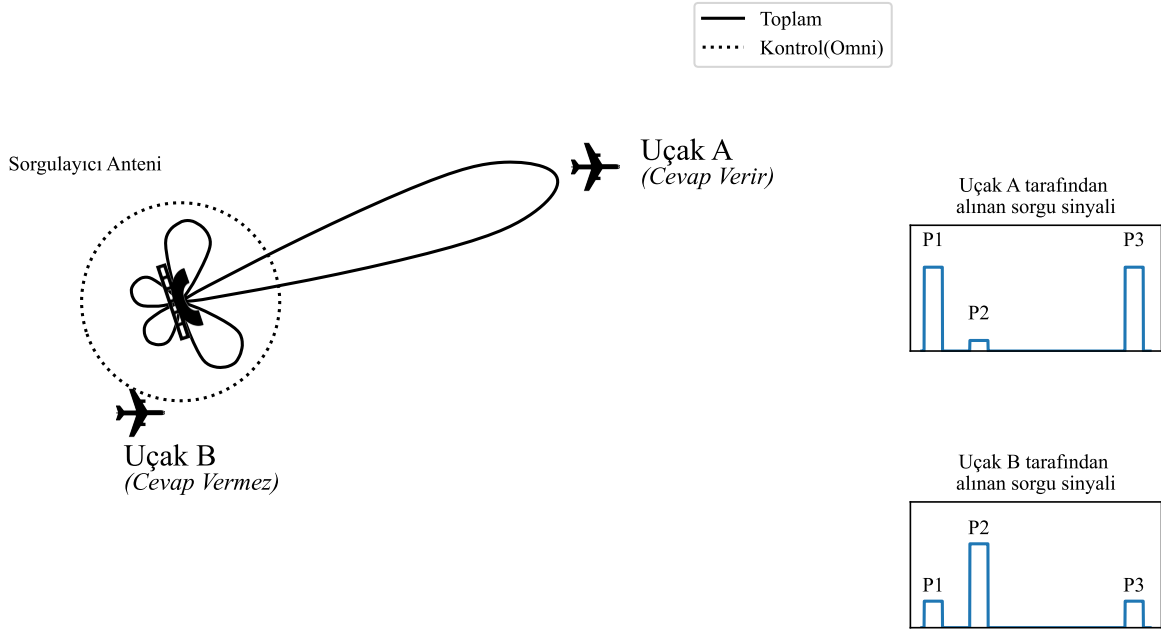


Şekil 2.14 RSLs ile Belirlenen Hüzme Genişliğinin Tek Darbe Güç-Faz Eğrisinde Gösterimi

2.4.2 Sorgulayıcı ISLS tekniği

Sorgulayıcılar hava platformundan alınan cevaplar ile platformun konumunu doğru bir şekilde tespit etmek için Sorgu Yan Lob Bastırma (Interrogation Sidelobe Suppression, ISLS) tekniği kullanırlar. Bu tekniği kullanmak için haberleşme modlarında SLS darbesi tanımlanmıştır. Bu SLS darbesi sorgulayıcının kontrol ve fark portundan yayınlanarak antenin kaçak lobların kapsadığı hava platformların cevaplayıcılarını sorguya karşı susturmaktır. Böylelikle hava platformunun yanlış konumda tespit önüne geçilmektedir. Şekil 2.15’de örnek bir senaryoda görüldüğü gibi Uçak A ‘ya ait cevaplayıcı, sorgu sinyaline ait P1 ve P3 darbelerini P2 SLS darbesine göre 9 dB den daha güçlü aldığı için cevap sinyali üretmektedir. Uçak B ise ‘P2’ SLS darbesini ‘P1’ ve ‘P3’ darbelerine göre eşit veya daha güçlü aldığı için bu uçak bu sorguya cevap vermeyip susmaktadır[2, 3, 15].

Sorgulayıcı, sorguya ait P2 SLS darbesini sorgulayıcı anteninin kontrol ve fark portları üzerinden yayınlamaktadır. Kontrol portu mevcut değilse sadece fark portundan yayınlanır. Çok fazla yansıma olan durumlarda sorguya P1 ve P2 SLS darbesi ile birlikte havaya yayınlanabilmektedir. Bu yöntem literatürde I2SLS (Geliştirilmiş sorgu yan hüzme bastırma) olarak geçmektedir. Bu yöntemde cevaplayıcı P1 ve P2 (P5 Mod S) darbesini alması halinde



Şekil 2.15 ISLS Örnek Senaryo

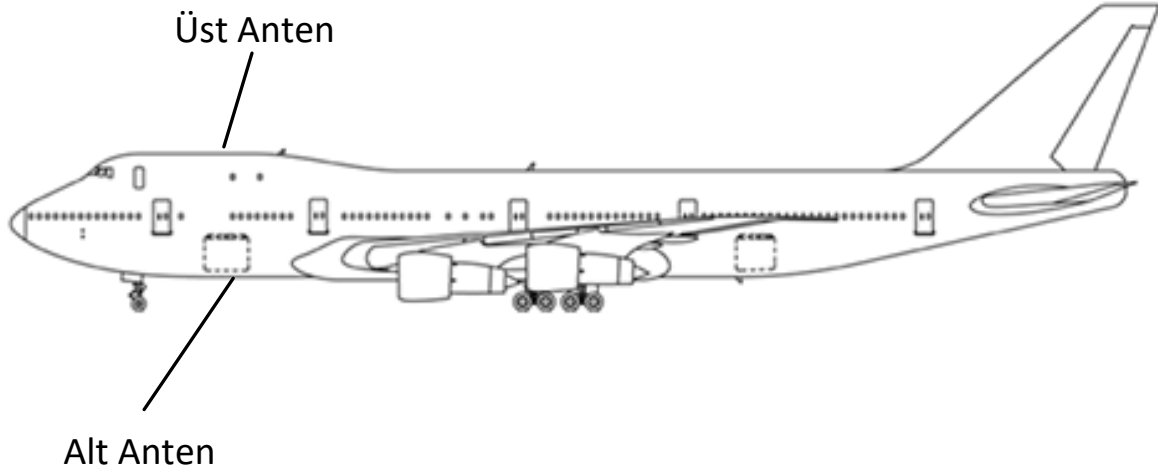
$35 \pm 10 \mu\text{s}$ saniye boyunca sorgulara susturulur. Böylelikle sorgulayıcının yansıma nedeni ile sahte iz üretmesinin önüne geçilmektedir. Bu yöntemin dezavantajı ise cevaplayıcıları susturmasıdır çünkü civar sorgulayıcıların sorgularına da cevaplayıcılar sustuğu için hava platformunun teşhis edilme olasılığını düşürmektedir. Bundan dolayı bu yöntem mecbur kalınmadığı sürece kullanılması tavsiye edilmemektedir[3].

2.5 Cevaplayıcı Sistemi

Cevaplayıcı cihazı sorgu sinyali ile tetiklendiğinde cevap sinyali üretmek için tasarlanmaktadır. Askeri ve sivil cevaplayıcı olmak üzere iki farklı uygulamaya özel tasarlanabilmektedir. Sivil cevaplayıcılar haberleşme modlarından Mod 3/A, Mod C ve Mod S desteklerken, askeri cevaplayıcılar ise bunlara ilave olarak Mod1, Mod2 modlarını da desteklemektedir. Hava platformlarında tek veya yedekli iki adet olarak kullanılabilir. Hava platformunu veya bir uçağı hava trafik kontrol merkezine teşhis etmek amacıyla kullanılmaktadır. Buna ilave olarak TCAS/ACAS çarpışma önleyici sistemi cevaplayıcı ile koordineli bir şekilde çalışmaktadır ve bu nedenle de uçuş güvenliği açısından önemli bir cihazdır.

Cevaplayıcı idamesi hava platformu tarafından gerçekleştirilir ve Mark XIIA sorgularına karşılık SIF cevaplarına ait kod bilgileri ile birlikte Mod S adres bilgisi, Mod S uçuş kimliği gibi parametreler yapılandırılır. Mod S adres bilgisi platforma uçuş veya operasyon öncesinde mutlaka cevaplayıcıya girdi olarak sağlanır.

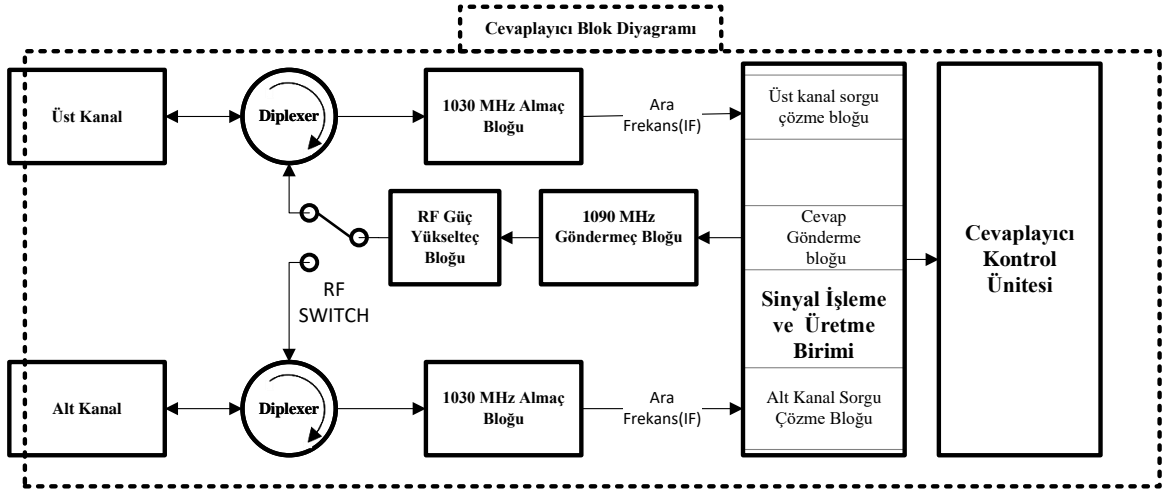
Hava platformunun türünü göre cevaplayıcılar özdeş iki adet veya tek adet RF portuna sahiptirler. Genelde büyük hava platformlarında iki RF portlu cevaplayıcı kullanılırken küçük boyutlardaki hava platformlarında tek RF portuna sahip cevaplayıcılar kullanılmaktadır. İki portlu cevaplayıcılar Şekil 2.16'de görüldüğü gibi alt anten ve üst anten den oluşan konfigürasyon ile platforma entegre olmaktadır. Bu antenler yönsüz anten olup en fazla 2 ila 3 dBi arası kazançta sahiptir. Cevaplayıcı bu antenler üzerinden standartlar tarafından tanımlanmış RF çıkış gücü 57 dBm (500 Watt) ila 53 dBm (200 Watt) arasında havaya yayın yapmaktadır [2, 3].



Şekil 2.16 Uçak Üzerinde Cevaplayıcı Anten Konumları

İki portlu cevaplayıcı blok diyagramı Şekil 2.17’de gösterilmektedir. Sorgulayıcıda olduğu gibi cevaplayıcı cihazları aynı kanal üzerinden haberleşme yeteneğine sahip olup sorgu alma ve cevap gönderme yapabilmektedir. Sorgu sinyaline karşılık cevap sinyalinin gönderimi aşağıdaki akışa göre oluşmaktadır.

- Sorgu sinyali platforma antenler üzerinden cevaplayıcının hem üst kanal ve hem de alt portuna ulaşır.
- Bölücü (Duplexer) vasıtası ile sorgu sinyalini 1030 MHz almaç bloklarına gönderir. Sorgu sinyali sonrasında 1030 MHz almaç blokları tarafından ara frekansa indirgenir.
- Sinyal işleme birimi indirgenen sorgu sinyalini işler ardından geçerli sorgu olup olmadığını ve hangi mod ile sorgulama yapıldığını çözer. Çözümlenen geçerli sorgu sinyali ise cevaplayıcı kontrol ünitesine iletilir.
- Cevaplayıcı kontrol ünitesine raporlanan sorgu mesajı değerlendirilir. Sorgulanan moda cevaplayıcının yeteneği varsa veya o mod için cevap verme aktif ise kontrol ünitesi cevap verme süreci başlatır. Cevap içeriği ile birlikte cevap komutunu sinyal işleme ve üretme birimine iletilir.
- Sinyal işleme ve üretme birimi ara frekans bandında cevap sinyalini oluşturur. Bu sinyal sonrasında 1090 MHz göndermeç bloğu ile 1090 MHz frekansına taşınır.
- Modüle edilen sinyal RF güç yükselteç bloğu ile gücü yükseltilerek RF anahtar (Switch) ile porta gönderilir.
- Yükseltilecek cevap sinyali RF anahtar(switch) ile cevaplayıcının hangi kanaldan daha güçlü bir sinyal aldıysa o kanala anahtarlanarak cevap sinyali havaya yayınlanır.

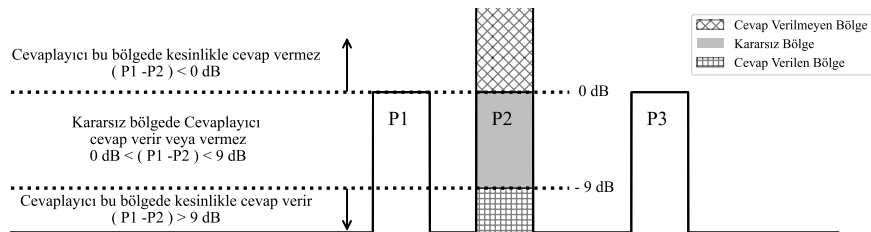


Şekil 2.17 Cevaplayıcı Blok Diyagramı[3, 6]

2.5.1 Cevaplayıcıda ISLS Desteği

SIF Mod sorgulama sinyali havaya yayınlanırken sorgulayıcı antenin toplam örüntüsü Σ ve yan loblarını çevreleyen kontrol örüntüsü Ω kullanılır. Toplam örüntüsünde P1 ve P3 darbeleri, kontrol kanalı örüntüsünde ise P2 SLS darbesini yayınlanır. Bu sorgulama sinyali cevaplayıcı tarafından alınıp sorgu sinyaline ait P1 darbesi ile P2 SLS darbesinin ortalama RF gücünü kıyaslanır. Bu kıyaslama sonucuna göre sorgu cevaplayıcı tarafından ret veya kabul edilir. Ret koşulu, P2 SLS darbesinin P1 darbesinden daha güçlü alındığı durumda gerçekleşir ve bu da platformun sorgulayıcı IFF antenin yan lob veya arka lob bölgesinde olduğu anlamına gelmektedir. Kabul koşulu ise P1 darbesinin P2 SLS darbesinden daha güçlü alındığı durumda gerçekleşir ve platform sorgulayıcı IFF antenin ana hüzm bölgesinde olduğu anlamına gelmektedir. Bu özellik sayesinde cevaplayıcı sorgulayıcının sadece ana hüzmünde iz üretmesine yardımcı olup sahte iz oluşmasının önüne geçilmiş olur.

Cevaplayıcı ISLS sorgu red veya kabul kriterleri Şekil 2.18 de gösterilmektedir. Sorguyu kesinlikle kabul etmesi için $P1_{dB} - P2_{dB} < 0$ dB ,kesinlikle redetmesi için $P1_{dB} - P2_{dB} > 9$ dB olması gerekmektedir. Kararsız bölge ise kesin red ve kesin kabul bölgesi arasında yer almaktadır. Cevaplayıcı bu bölgede cevap vermekte veya vermemektedir[3, 26].

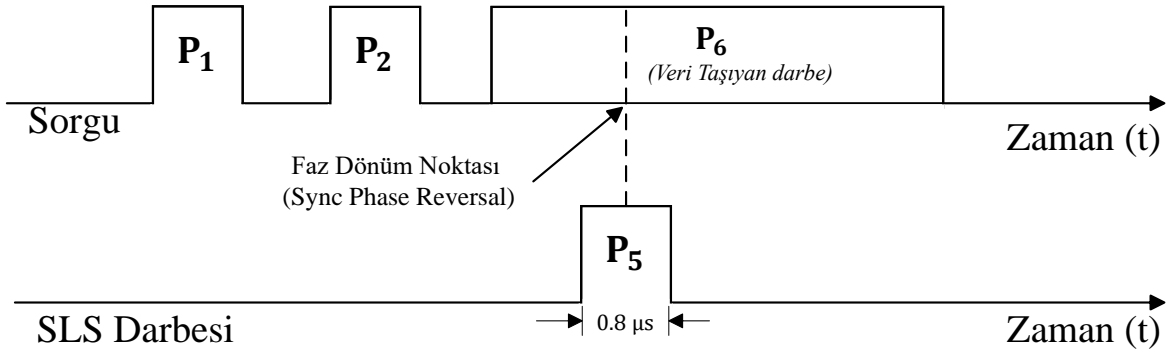


Şekil 2.18 Cevaplayıcı SIF Sorgu Kabul-Ret Eğrisi[3]

Benzer şekilde Mod S sorgu modunda da SLS darbesi havaya fark ve kontrol örüntüsü Σ ile yayınlanır. Şekil 2.19'de görüldüğü gibi Mod S sorgulama sinyali dalga şeklinde P5 SLS

darbesi ile P6 veri darbesi eş zamanlı havaya yayınlanmaktadır. Bu durumda P5 SLS darbesi P6 darbesinin gücüne yakın veya daha güçlü bir güçte alındığı durumda, P6 darbesine ait faz dönüm noktasını (Phase Sync Reversal) bastırmakta ve köreltmektedir. Bu durumda cevaplayıcı faz dönüm noktasını kestiremeyip sorgu sinyali direkt reddedilir. Bu sayede SIS ISLS 'te olduğu gibi faz ve güç ölçüm kıyaslama işlemlerine gerek kalmamaktadır. Cevaplayıcı SLS darbesinin güçlü olduğu yan lob ve arka bölgesinde sorgulara karşı susturulup sorgulayıcının sahte iz üretmesine engel olmaktadır. Cevaplayıcı Mod S ISLS sorgu ret ve kabul kriterleri standartlara göre aşağıdaki gibidir :

- P6 darbe gücü ile P5 darbe gücü arasındaki fark 3 dB ve daha az olduğu durumda cevaplayıcı gelen sorguların en fazla %10 oranda cevap verecektir.
- P6 darbe gücü ile P5 darbe gücü arasındaki fark 12 dB ve daha fazla olduğu durumda cevaplayıcı gelen sorguların en az %99 oranda cevap verecektir.



Şekil 2.19 Cevaplayıcı Mod S Sorgusu Dalga Şekli[2]

2.6 IFF Sisteminde Bazı Kısıtlamalar (Limitations)

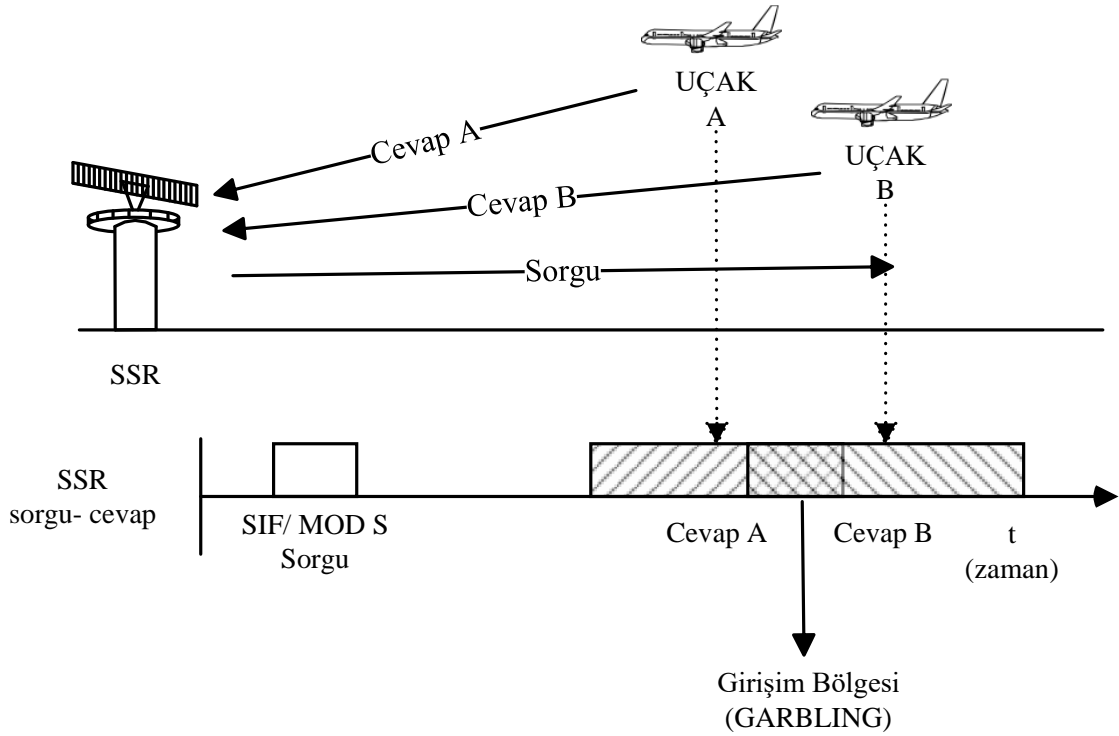
IFF sistemi çalışma prensipleri gereği birtakım limitasyonlar vardır. Bu limitasyonlar özetle platform ile düzgün iletişim sağlanamaması ya da platformun konumunun yanlış teşhis edilmesine sebep olabilmektedir. Bu kısıtlamaları gidermek adına literatürde çalışmalar yer almaktadır. Çalışmalar hakkında detaylı bilgi için literatür taraması kısmına bakınız.

3 Literatür Taraması

3.1 IFF ile İlgili Çalışmalar

Bu kısımda IFF sisteminde olan limitasyonlar üzerine ve hava trafik gözetiminde konum tespitinin iyileştirilmesine yönelik literatürdeki çalışmalar anlatılmaktadır.

3.2 IFF Sistemlerinin Garbling Ekilerini Azaltmaya yönelik Çalışmalar



Şekil 3.1 Garbling Gösterimi [3]

Hava trafiğinin yoğun olduğu bölgelerde mod A/C ve mod S haberleşme modlarının cevap sinyalleri birbirine girişim (garbling) oluşturabilmektedir. Garbling Şekil 3.1’de görüldüğü üzere mesafe bakımından birbirine yakın olan platformların cevap sinyallerinin üst üste örtüşmesi ile meydana gelmektedir. Bu problemi gidermek adına Le Neindre ve ekibi [27], mod A/C ve mod S cevap sinyallerinin birbirine girişim oluşturduğu durumda cevap

sinyallerinin ayrıştırılması üzerine yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem; kod çözme stratejisi, orijinal algılama, kod çözme ve yeniden yapılandırma olarak dört aşamadan oluşturulmuş. Geliştirdiği yöntem saha testleri ile denenmiş ve Mod S haberleşme alt formatı olan ADS-B (otomatik bağıl gözetleme) vasıtası ile doğrulamıştır.

Petr [28] ve ekibi çalışmalarında birbirine girişim sağlayan birden fazla cevaplayıcının yanıt sinyallerinin birbirinden ayrıştırılmasında kullanılacak yöntemleri ele almıştır. Kullandığı klasik korelasyon yöntemi ile birbirine girişim olmuş sinyallerin ayrıştırılabileceğini göstermiştir. Ancak bu yöntemi çok güvenli olmadığı öne sürülmüş sorun basit türev (differentiation) alma yöntemi ile de ele alınmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre türev alma yönteminin sinyali ayrıştırmada daha iyi korelasyon verdiği gözlemlenmiştir. Bu yöntemin gelecek çalışmalar ile ilerletilebileceği öne sürülmüştür.

Petrochilos, 2005 yılındaki çalışmasında [29] birbirine girişim olan iki cevap sinyalinin literatürde tanımlı farklı algoritmalar ile ayrıştırmayı amaçlamıştır. Bu iki algoritma üzerinde benzetimler gerçekleştirmiş elde ettiği sonuçlar neticesinde MS-ZCMA (Multi-Shift Zero Constant Modulus Algorithm) algoritmanın en iyi sonuç verdiğini gözlemlemiştir. Bir diğer çalışmasında [30] farklı bir ikincil gözlem radar modeli önererek girişim ayrıştırma yöntemi üzerine çalışmıştır. Bu çalışmasının devamı olan başka bir çalışmasında [31] yine aynı radar konseptini kullanarak iz düşüm algoritmasını (Projection Algorithm PA) öne sürmüştür. Bu algoritma ile elde ettiği sonuçlar neticesinde ayrıştırılması zor olan girişmiş sinyalleri daha düşük hesaplama maliyetleri ile ayrıştırılabileceğini göstermiştir. Sonraki çalışmasında [32], 2005 yılındaki çalışmasında kullandığı algoritmaları, önerdiği ikincil gözlem radar modeli üzerinde kullanmıştır. Yapılan analizler neticesinde yine MS-ZCMA algoritmasının bu model üzerinde daha iyi sonuç verdiğini gözlemlenmiştir.

Harris'in çalışmasında [33], İkincil Gözetim Radarı (Secondary Surveillance Radar, SSR), Trafik Çarpışma Önleme Sistemi (Traffic Alert and Collision Avoidance System - TCAS) ve Otomatik Bağımlı Gözetim Yayını (Automatic Dependent Surveillance–Broadcast - ADS-B) sistemlerinin kullandığı 1030/1090 MHz frekans bandında yoğunluğu azaltmak için yöntem önermiştir. Geliştirdiği yöntemde artan hava trafik bölgelerinde sorgulayıcının

sorgu sinyalinin güç kontrolü ile ADS-B yayınlarını ele almıştır. Sonuç olarak bu frekans bandında yoğunluk azaltmak ve girişimi önlemek için alternatif yöntemler geliştirmiş. ADS-B verilerini de izleyerek değiştirilebilir sorgulama güç yöntemi önermiştir. Simülasyon sonuçlarına göre IFF bandındaki haberleşme yoğunluğunu %92'ye kadar azaltılabileceğini göstermiştir. Buna ilave olarak, mod S sorgulayıcı tanımlama kodu (II Code) kullanım sayısını yaklaşık %50 oranında azaltılabileceğini göstermiştir.

3.3 Hava Trafik Gözetiminde Hedef Tespitinin Doğruluğunu Artırmaya Yönelik Çalışmalar

Günümüz modern ikincil gözetim radarları hedef yanca açısını belirlemede tek darbe yöntemi kullanmaktadır. Jacovitti çalışmasında [21] bu yöntemi farklı tipte almaç modelleri açısından değerlendirerek SNR ve diğer etkenlerden dolayı oluşan hata analizlerini yapmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde hata modelleri ortaya koyarak gelecek çalışmalar için yol gösterici olmuştur.

H. Leslie ve Robert R. çalışmasında [34] ikincil gözetim radarı diğer adı ile (Monopulse Secondary Surveillance Radar, MSSS) tek darbe ikincil gözlem radarının (SSR) hedef yanca tespitinde oluşan hatanın modelini ortaya koymaya çalışmıştır. Üç farklı ikincil gözetim radarı tarafından tespit edilen konum verileri, uçakların ADS-B raporlarından elde edilen konum verileri ile kıyaslanarak analiz edilmiştir. ADS-B konum bilgisi ile tek darbe yöntemi ile SSR tarafından tespit edilen konum bilgisi kıyas edilip yanca hataları örneklenmiştir. Örneklenen bu veriler çift Gauss (double Gauss) ve tek Gauss (single Gauss) dağılımına uyumlanmıştır. Elde edilen uyumlama sonuçlarına göre %99 oranında çift gauss modeline, %95 oranında tek gauss modeline uyumlanmıştır. Sonuç olarak çift gauss modelinin en uygun olduğunu ortaya konmuştur. Çalışmada elde edilen bu model ikincil gözlem radarları tarafından raporlanan iz takip algoritmalarında kullanılabileceğini öne sürülmüştür.

Mintean [35] çalışmasında tek darbe (monopulse) ikincil gözetleme radarı (MSSR) hakkında kapsamlı bir analiz çalışması sunmuştur. Bu çalışmasında tek darbe anteninin modelleyip analizlerini yapmıştır. Analizlerinde geliştirdiği antenin yükselişte (elevation) ve

yancadaki (azimuth) güç dağılımını modellemiştir. Bu model ile MSSR'ın hava platformunu konum belirlemede etkileyici faktörleri (multipath, link budget) ele almış ve analiz etmiştir. Çalışmanın neticesinde MSSR sistemini matematiksel modellerini ortaya koymuş ve gelecek çalışmalar analiz stratejileri sağlamıştır.

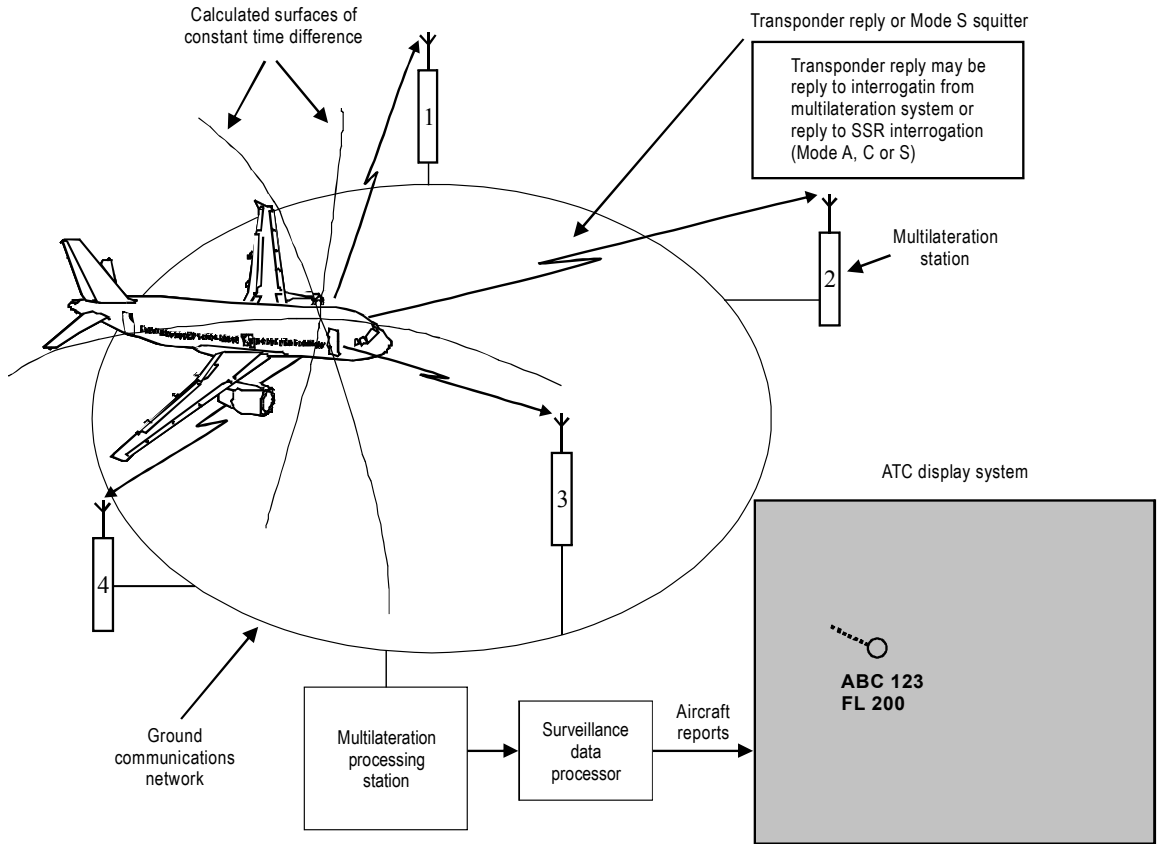
İkincil gözetim radarlarının konum tespiti ile diğer sensörlerden elde edilen konum verileri birleştirilmesine literatürde füzyon (fusion) olarak adlandırılmaktadır. Bu füzyon ile platformun yanca ve menzil tespit doğruluğu artırılmaktadır. Carson çalışmasında [36] birincil gözetim radarı (Primary Surveillance Radar, PSR) tarafından sağlanan veriler ile ikincil gözetim radarı (SSR) tarafından sağlanan verilerinin füzyonu üzerine algoritmaları geliştirmiştir. Algoritmalar, birden fazla radar verisi ile ve birden fazla IFF sensörünü birleştirecek şekilde genişletilebilir olduğunu göstermiştir. Bu iki türden verinin birleştirilmesi ile platformun belirlenen yanca açısında iyileştirme sağlanabildiğini göstermiştir.

Yong çalışmasında [37], ADS-B (Otomatik Bağımlı Gözetim-Yayın) ve SSR'nin karakteristiklerini ve dinamiklerini analiz etmiştir. Bunun üzerinde ADS-B ve SSR konum verilerinin birleştirilmesi üzerine füzyon modeli önermiştir. Füzyon modeli ile farklı aviyonik donanım yapısına sahip her bir platformun (Sadece cevaplayıcı bulunan veya Sadece ADS-B yeteneği olan) hava trafik kontrol monitör sistemlerinde izlenebilirliğini önermiştir. Analiz etmek için ZUUU havalimanı ve çevresinde ADS-B alıcısı ile ve Raytheon SSR istasyonundan ölçümler almıştır. Ölçülen veriler ile doğrulanan sonuçlara göre ADS-B ve SSR konum verilerinin füzyonu ile hava trafik kontrol merkezinin gözetim sisteminin istikrarlı ve güvenilir olabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte SSR 'ın görmediği kör sektördeki platformların da gözetimi sağlayabileceğini göstermiştir.

Iryna çalışmasında [38], birincil gözetim radarı ile ikincil gözetim radarlarının ölçüm belirsizlikleri (uncertainty) aynı olmadığı için birbirine yakın uçan hava platformlarının "Dost" veya "Düşman" tespitinin daha iyi belirlenebilmesi adına yeni bir yöntem önermiştir. Bu yöntemi İkincil gözetim radarı ile birincil gözetim radarının ölçüm belirsizlik değerlerini bayes (Bayesian) modeline uyarlayarak ortaya koymuştur. Bu uyarlama ile

analitik analizler gerçekleştirmiş ve analiz sonuçlarına göre bu yöntem ile daha yüksek doğrulukla hedef ayrışımı yapılabileceğini göstermiştir.

Ni ve ekibi çalışmasında [39], hava platformlarındaki cevaplayıcıların mod S ve ADS-B yayınlarını uydu aracılığı ile konum tespitinin analizi ve uygulaması üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Uyduya yerleştirilen 1090 MHz mod S alması kullanılarak Mod S ve ADS-B yayınlarını toplanmıştır. Bu iki yayının füzyonu üzerine algoritma geliştirmiş ve bu algoritma ile platformların konum tespiti sağlamıştır. Tespit edilen bu konum bilgileri ile PSR ve SSR'ın belirlediği tespit ettiği konum verileri ile kıyaslamıştır. Kıyaslama sonucuna göre konumların %90 eşleştiğini gözlemlemiştir. Sonuç olarak IFF sisteminin haberleşme sinyalleri uydu ile de tespit edilerek konum tespitinin yapılabileceğini öne sürmüştür. Bu konum bilgilerinin füzyon için kullanılabilmesini ortaya koymuştur.



Şekil 3.2 MLAT Sistemi [3]

Şekil 3.2 multilateration (MLAT) sistemi hava platformunun konumu çoklu anten ile belirleyen sistemdir. Bu sistem havalimanına yakın bölgelerde veya ikincil gözetim radarlarının kapsamadığı kör bölgelere (Blind sector) yerleştirilebilmektedir. Çoklu antenler ile uçak tarafından yayınlanan her 1090 MHz cevaplayıcı sinyali birden fazla almaç ile dinlenerek sinyallerin varış zamanına göre uçağın konumu belirlenmektedir. Fränken ve ekibi çalışmasında [40], bu sistemlerin belirlediği konum verileri ve SSR verileri füzyonu ile daha iyi bir konum tespitinde bulunabileceğini öne sürmüşlerdir. Bu bağlamda iki farklı sistemin dinamikleri gereği yeni bir kestirim yöntemi geliştirmiştir. Saha çalışmaları ile elde edilen veriler bu öngörücü ile simüle edildiğinde sonuçların Cramer-Rao alt sınırında (Cramer-Rao lower bound) olduğu gösterilerek füzyon için etkili bir yöntem olduğu öne sürülmüştür.

3.4 IFF Sistemlerinin Haberleşme Güvenliğini Artırmaya ve Karıştırmaya(Jamming) Karşı Yapılan Çalışmalar

IFF sistemi, hava trafiğinin gözetimi (surveillance) ve bu trafiği kullanan hava platformlarının konum, pozisyon vb. bilgilerin edinimi için kullanılmaktadır. Gözetim için kullanılan haberleşme yapılarında herhangi bir kriptolama ve doğrulama mekanizması bulunmadığı için dışarıdan RF müdahale ile saldırılara açık halde olup sahte kimlik teşhislerine mahal bulunmaktadır. Bu tip durumlarda sahte hedef ayırımını sağlamak için Leonardi [41] çalışmasında cevaplayıcı cihazlarının cevap sinyalinin faz bilgisinin ayırıcı özellik olabileceğini ortaya atmıştır. Saha çalışması ile elde ettiği ölçümler neticesinde en az 7 adet platformun %93 oran ile birbirinden ayrıştırılabileceğini ortaya atmıştır.

Otomatik Bağımlı Gözetim Yayını (ADS-B) mod S haberleşme modu olduğu için bu mod için güvenlik açıkları da bu yayınlar için geçeli olduğu söylenebilir. Leonardi ve ekibi [42] çalışmasında, hava trafiğinin kitle iletişim ağlarından ve bu ağların kullanımı ile karıştırmayı (jamming) azaltmaya yönelik farklı çözümleri analiz etmişlerdir. Saulius ve ekibi çalışmalarında [43], ADS-B aldatması (spoof) ile sahte teşhis (false target) oluşması halinde bu aldatmanın tespitine karşı bir yöntem ve sistem mimarisi önererek bu sorunlardan bazılarını ele almıştır. Önerilen yöntem, sinyal kaynağı aralığının ve varış yönünün tahminine

dayanmaktadır. Yöntemin uygulandığı mimaride çok kanallı alıcı tarafından yönlü (anten) anten yer almaktadır. Bu yöntem üzerinde benzetim çalışmaları sağlanmış ve kullanım senaryolarına göre hata sınırları tahmin edilerek ADS-B aldatmasının teşhis edilebileceğini öne sürülmüştür.

IFF sistemi dış etkenlerden ötürü haberleşme sinyallerinde gürültü gözlemlenebilmektedir. Gürültünün sinyal içerisindeki etkisini azaltmak için Du [44] çalışmasında iki kanallı artık sinir ağı (Two Channel Deep Residual Neural Network 2CD-NET) modeli kullanmıştır. Yapay zeka modelini SIF Mod cevap sinyali üzerinde farklı SNR seviyelerinde benzetimlerini gerçekleştirmiştir. Elde ettiği sonuçlar neticesinde bu model 5 dB SNR seviyesinde %94.71, 10 dB SNR seviyesi %99.98 başarımlar göstermiştir.

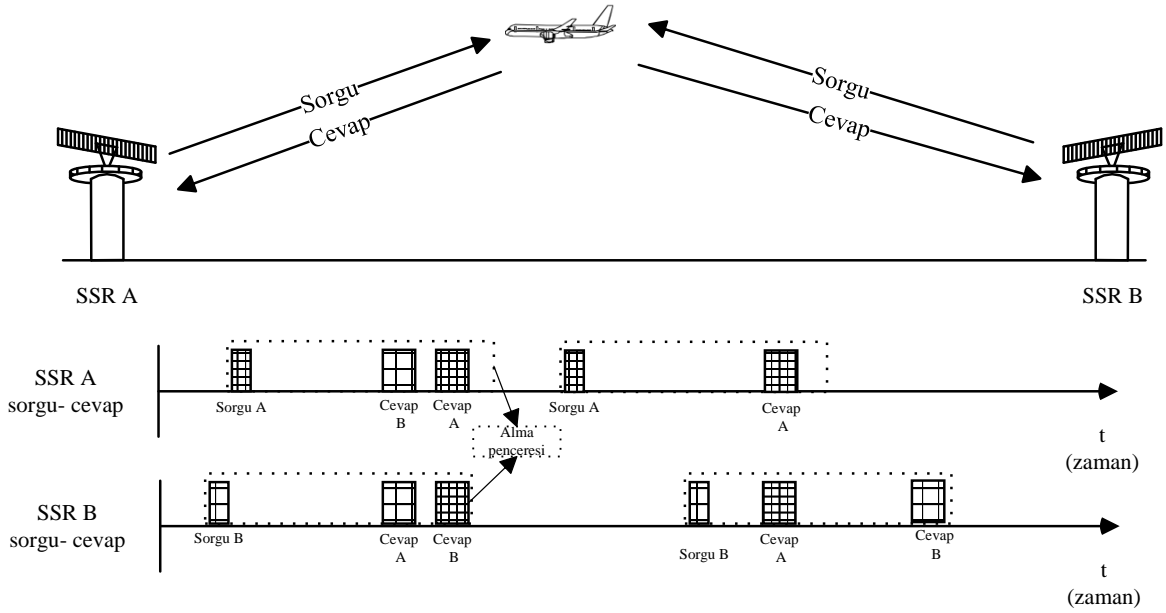
Leonardi [45] çalışmasında, başka bir cevap sinyali veya RF karıştırıcı tarafından cevaplayıcı cihazlarının otomatik bağımlı gözetim (ADS-B) yayınlarına girişim olması durumunda, bu yayınları girişimden arındırmak için kör sinyal ayırma (Blind Source Separation BSS) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemi test etmek için birden fazla almaçlı test düzeneği ile fırsat hedeflerinden sinyalleri toplamıştır. Bu sinyaller üzerinde farklı tipte test karıştırma (jamming) uygulayarak BSS yöntemiyle sinyalleri ayırtmaya çalışmıştır. Elde ettiği sonuçlar neticesinde %25 daha fazla sinyal tespit edip, normale göre dört kat hatasız mesaj elde edilebildiğini göstermiştir.

El-Badawy ve ekibi [46] çalışmasında IFF Mod S haberleşme modu ile taşınan veriyi AES-128 (Advanced Encryption Standard) ile kriptolayarak güvenliğini artırmayı amaçlamıştır. Hem sorgu hem de cevap sinyali içerisinde verinin şifreleme ve kaotik kriptolama yöntemi geliştirilmiştir. Kaotik kriptolama yönteminde tarih ve zaman bazlı 8 bit uzunluğunda kaotik devre üretilerek kriptolanmıştır. Bu yöntem ile haberleşme güvenliği artırılması amaçlanmıştır.

3.5 IFF Sistemlerinde Sahte Hedef Ayırtmaya Yönelik Çalışmalar

Andersson ve ekibi [47], sivil hava trafiği izleme sistemlerinin karıştırma/aldatma ile karşı karşıya kaldığı durumlarda meydana gelen sahte hedef teşhislerini (false target) önlemek

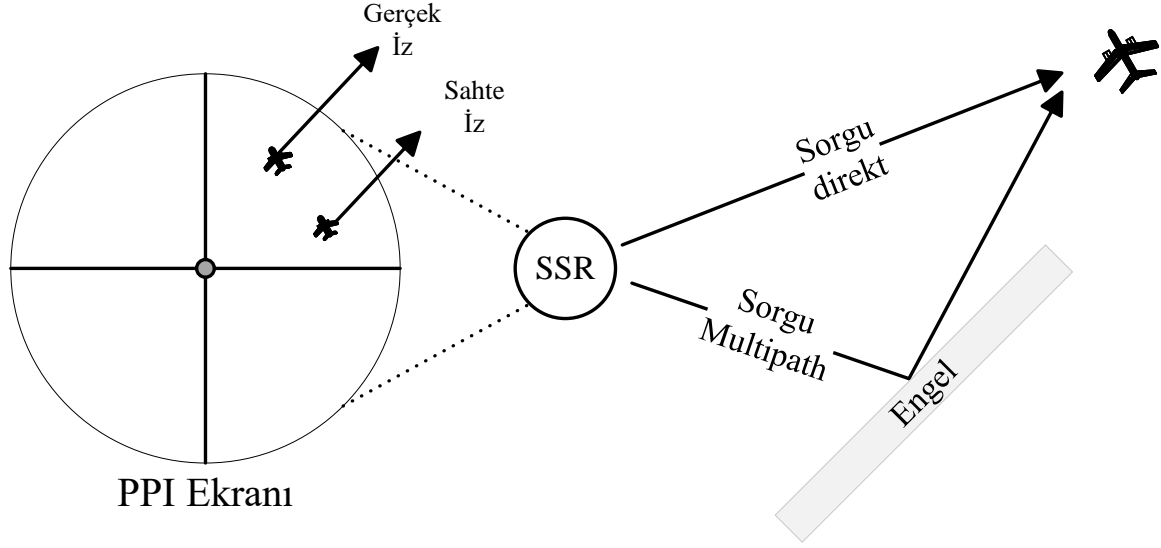
için literatürdeki bazı yöntemleri kullanmıştır. Birden fazla sensörden gelen veriler ile bu yöntemleri uygulayarak sahte hedef ayırımı yapmayı amaçlamıştır. Bu yöntemlerden birisi istatistiksel mesafe yöntemi olup sensörlerden gelen verileri ilişkilendirmek için kullanmıştır. Kullanılan diğer yöntem ise olan gizli markov modelleri (Hidden Markov Models HMM) olup bir uçağın davranışını tanımlamak için kullanmıştır. Benzetim çalışmaları yapılmış ve elde edilen sonuçlar neticesinde istatistiksel mesafe ile sahte hedefin tespit edilebildiğini göstermiştir. Gizli markov model ile de hava aracının konum hareketliliğinde anormal durum tespit edilebildiğini göstermiştir. Bu iki yöntemin çıktılarını birleştirerek sahte hedef ayırımının yapılabileceği öne sürülmüştür.



Şekil 3.3 FRUIT [3]

Sahte izlerin oluşmasına neden olan kısıtlamalardan bir tanesi de literatürde FRUIT (False Replies Unsynchronized with the Interrogation Transmissions) yanıtları olarak adlandırılmaktadır. Bu yanıtlar, ikincil gözetim radarının sorgusuna asenkron bir şekilde cevap verilmesi ile oluşur. Buna çözüm olarak Şekil 3.3’de görüldüğü üzere asenkron cevap oluşumunun en temel sebebi, diğer ikincil gözetim radarlarının sorgusu ile tetiklenmesidir. Bu asenkron cevap nedeni ile hava platformunun menzili yanlış yerde tespit edilmesine neden olabilmektedir. Bu durumun önüne geçmek için Kabakchiev ve Garvanov çalışmasında [48], ABI CFAR (Adaptive Binary Integration Constant False Alarm Rate) sinyal işleme

modelini öne sürmüştür. Bu model adaptif karar eşiği (Adaptive decision threshold ADT) ile FRUIT yanıtları eleme üzerine dayanmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre bu modelin FRUIT kaynaklı sahte iz oluşumuna engel olabileceğini ortaya koymuştur.



Şekil 3.4 Çok Yollu Girişim Gösterimi [3]

IFF sistemlerinde sahte iz oluşmasında etkili olan bir diğer limitasyon ise çok yollu (Multipath) yayılım sinyalleridir. Bu durum hem sorgu hem de cevap verme esnasında oluşabilmektedir. Şekil 3.4'de görüldüğü üzere sorgu sinyali ile oluşması halinde platform iki farklı yanca ve menzilde tespit edilmektedir. Bu durumda sahte olanın tespitini gerçekleştirmek zor olabilmektedir. Bu sahte hedefi tespitini ayırtmak için Khanh'ın çalışmasında [49] çok yollu girişim analizlerini yapmış ve yeni bir yöntem ortaya koymuştur. Çalışmada çok yollu girişim, geometrik ve güç yönü ile ele alınıp analiz edilmiştir. Bu analizler üzerine bastırma penceresi ve bastırma koşullarına dayalı olarak yeni bir ikincil gözetim radarı almaç modeli öne sürülmüştür. Saha çalışmaları ile elde edilen veriler, bu model ile analiz edildiğinde %100 oranında başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

3.6 Jeodezik Hesaplama ile İlgili Çalışmalar

Rainsford çalışmasında [50] ters jeodezik (Geodetic Inverse, iki farklı küresel konum arasındaki mesafe ve yanca) ve direkt jeodezik (Geodetic Direct, referans küresel konuma

göre yanca ve mesafesi bilinen küresel konumun hesaplanması) üzerine algoritmalar geliştirmiştir. Ancak bu algoritmanın ilerletilmesi gerektiğini belirtmiştir çünkü işlemciler tarafından hesaplanması uzun sürmekteydi. Bowring çalışmasında [51] Rainsford 'ın çalışmasında kullandığı algoritmayı test etmiş ve 16 metre hata ile hesapladığını göstermiştir. Bunun üzerine çalışmasında yeni bir yöntem geliştirerek daha düşük hata ile hesaplayan yöntem geliştirmiştir. Ayrıca bu yöntemi hesaplama açısından daha uygun olduğunu belirtmiştir. Thaddeus çalışmasında [52], Bowring çalışmasının 1500 km ye kadar uygulanabilir olduğunu göstermiş bunun üzerine kendisi daha uzun mesafelere kadar uygulanabilir bir yöntem geliştirmiştir. Kullandığı yöntemde, işlemci üzerindeki maliyetini ve yürütüm süresini azaltmak için yeniden şekillendirmiştir. Bu nedenle geliştirdiği yöntem iç içe iteratif (nested iterative) olup eliptik terimleri hesaplamak için sadece sinüs, kosinüs ve ark tanjant kullanmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre cm düzeyinde hata ile hesaplamayı başarmıştır. Bu yöntemin adı literatüre (vincenty's formulae) vincenty formülü olarak geçmiştir.

Karney [53] Thaddeus kendi formülünde ele aldığı gibi elipsoit üzerinde jeodezik (Geodesics on an ellipsoid of revolution) hesaplama yöntemi geliştirmiştir. Geliştirdiği yöntemin analiz sonuçlarına göre mesafe hesaplarını nanometre hassasiyetinde hesaplayabileceğini göstermiştir. Bu çalışmasına ilave olarak geliştirdiği yöntemi bir sonraki çalışmasında [54] algoritma haline getirmiştir. Bu algoritma ile daha hızlı ve yüksek çözünürlükte bir çözüm geliştirmiştir. Bununla birlikte ters jeodezik problemin kesin çözümü ve elipsoit üzerinde geomatik problemleri çözmek için yeni bir araç olan elipsoit Gnomonik projeksiyon kullanımını göstermiştir.

Vissarion çalışmasında [55], literatürde ters jeodezik ve direkt jeodezik hesaplamaların doğruluğu açısından farklı menzilde analizlerini gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Karney'in algoritmasının [54] en düşük oran ile hesaplama yapabildiğini göstermiştir. Benzer bir çalışma [56] Gizem ve ekibi tarafından yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre en düşük hata oranını Karney'in algoritması ve vincenty yönteminin verdiğini öne sürmüştür.

4 IFF Mod S Haberleşmesi ve Kullanım Şekli

Mod S, sivil hava platformların hava trafiğinde gözetimi için geliştirilmiş ve standardize edilmiş haberleşme modudur. Haberleşme yapısı temelinde adresli olmakta ve sivil havacılık işletmeleri tarafından her bir uçak için 24 bit ICAO adresi tanımlanmaktadır. Adres bilgisi cevaplayıcıya uçuş öncesi girdi olarak girilmektedir. Her sorgu ve cevap sinyali için 24 bit eşlik (CRC) üretilmektedir ve haberleşme esnasında eşlik denetimini yapılmaktadır [2].

Mod S sorgu cevap haberleşmesinde adresli protokol kullanılmaktadır. Mod S sorgu sinyali içerisinde sorgulanan seçici adres veya tüm çağrı adresi (Broadcast Address) yer alır. Cevaplayıcıya sorgu sinyali ulaşması halinde sorgu içerisindeki hedef adresi kendisine atanan adres ile eşleşirse veya tüm çağrı adresi ise bu sorguya karşılık cevap verilir. Cevap içerisinde sorgu ile istenen hava platformuna dair birtakım bilgiler cevaplayıcı tarafından yerleştirilir ve platform adresi ile eşlik (CRC) üretilerek havaya yayınlanır. İçerisinde yer alan adres bilgisi sorgulama sinyalinde gönderilen hedef adres ile aynı ise içerisindeki veriler işlenir ve iz olarak hava trafik gözetim ekranında sergilenir. Bu adresli haberleşme özelliği sayesinde girişim (garbling) durumları büyük ölçüde azaltılmaktadır. [2, 3].

Hava trafik gözetiminde (Surveillance), mod S modunun tüm çağrı sorgulaması (All-Call) ve seçici sorgulama (Roll-Call) formatlarının kombinasyonundan oluşan protokol kullanılmaktadır. Tüm çağrı sorgular tüm çağrı adresi (Broadcast Address) ile seçici sorgular sorgulanan platform adresi ile oluşturulur. Sorgulayıcı tarafından gönderilen tüm çağrı sorgulaması ile sorgulayıcı yönlü (directional) anteni hüzmelerinin kapsadığı platformlardan adres bilgileri toplanır. Adres bilgisi edinilen platformların menzildeki yerlerine göre her birine teker teker adrese yönelik seçici sorgulama planlanır. Seçici sorgulama ise birincil gözlem sorgulaması (Elementary Link Surveillance, ELS) ve gelişmiş gözlem sorgulaması (Enhanced Link Surveillance, EHS) olmak üzere iki grupta sınıflandırılır. ELS ile cevaplayıcıdan uçağın çağrı adı (Flight ID -Call sign), veri linki yeteneği ve yerden tetikli Comm-B protokolü (Ground-Initiated Comm-B, GCIB) yeteneği olup olmadığı elde edilir. GCIB raporlama yeteneği göz önünde bulundurularak EHS ile uçağı sorgulamaya devam

edilir. EHS sorgu sınıfı ile uçağın detaylı irtifa bilgisi, burun açısı ve detaylı hız bilgisi elde edilir [2, 3].

4.1 Mod S Tüm Çağrı(All – Call) Sorgusu ile Adres Edinimi

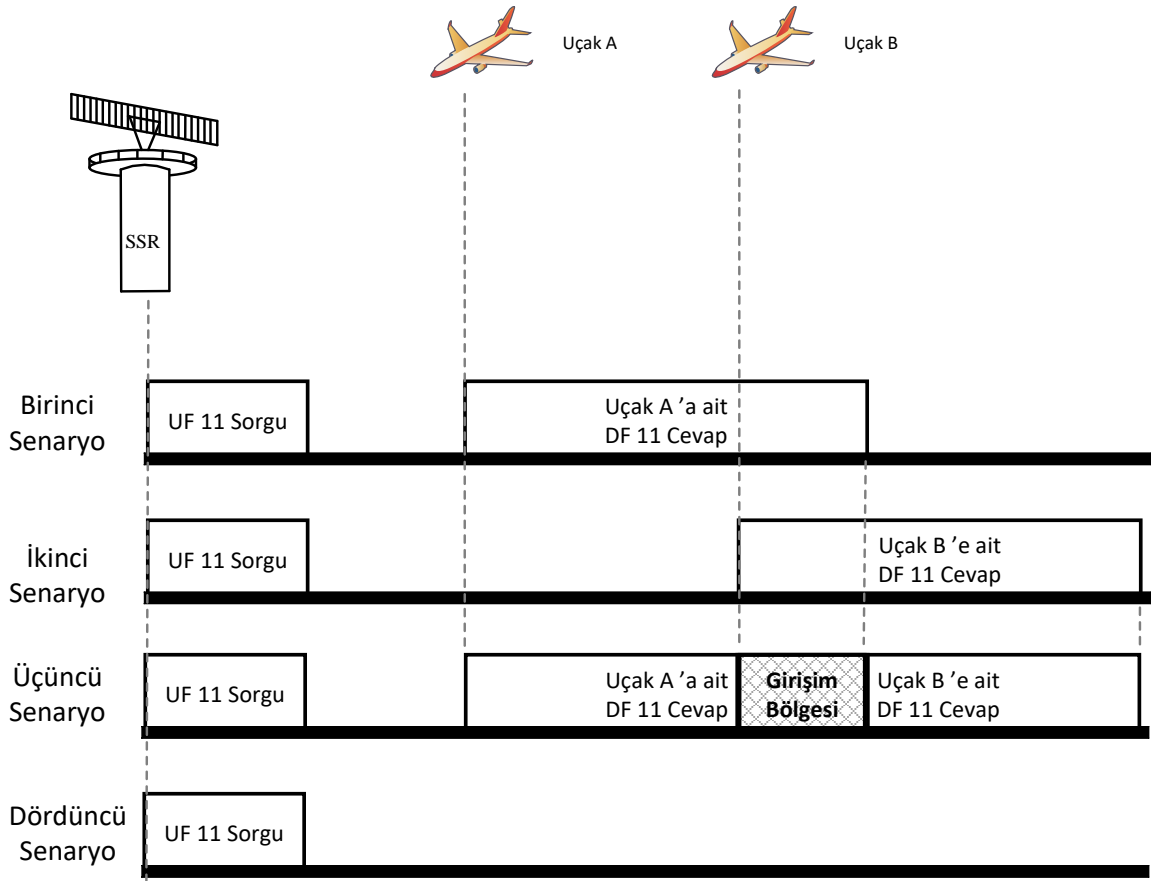
Tüm çağrı sorgusunda mod S UF 11 formatı kullanılmaktadır. Bu sorgu ile anten hüzmesinin kapsadığı hava platformlarının mod S adres bilgilerini toplamak için kullanılmaktadır. Bu sorgunun karşılığında platform cevaplayıcıları tarafından DF 11 formatında cevap verilir. Bu cevap içeriğinde platformlara atanan mod S adres bilgileri elde edilir [2, 3].

Sorgulayıcı anteni hüzmesinin kapsadığı alanda iki veya daha fazla uçağın birbirine olan uzaklığı belirli bir mesafeden az olması halinde DF 11 tüm çağrı cevap sinyalleri birbirine girişim (Garbling) oluşturabilmektedir. Bu durumda cevap verileri düzgün bir şekilde işlenemeyip uçakların mod S adres bilgileri elde edilememektedir. Bu durumun oluşmaması için iki platform arasında gerekli minimum mesafe,

$$d_{\text{garble}} = t_{\text{cevap}} + 0.3 \times \left(\frac{\text{km}}{\mu\text{S}} \right) = (64 \mu\text{S}) \times 0.3 \times \left(\frac{\text{km}}{\mu\text{S}} \right) = 19.2 \text{ km} \quad (4.1)$$

kadardır. Hesaplanan bu mesafe günümüz hava trafiği göz önünde bulundurulduğunda birden fazla uçağın bu mesafe içerisinde olması çok daha muhtemel bir durum olarak görülmektedir. Bu durum itibari ile tüm çağrı cevap sinyallerinin birbirine girişimi de daha sık bir şekilde gerçekleşmektedir. Buna önlem olarak UF 11 sorgusunda tanımlı PR alanı ile cevaplayıcı tarafından belirli bir olasılıkla cevap vermesi istenmektedir. PR alanında belirtilen stokastik bir süreç ile cevap verme kararı belirlenmektedir. Cevap verme durumu rastlantısal olup hava platformlarının cevap sinyallerinin birbirine girişimi azaltılmaktadır [3].

Tüm çağrı sorgu cevap haberleşmesinde stokastik cevap verme durumlarına örnek bir senaryo Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Bu senaryolar, Uçak A ve Uçak B de yer alan cevaplayıcı cihazlarının stokastik cevap vermesi ile oluşmaktadır. Birinci ve ikinci senaryolara göre Uçak A ve Uçak B’den UF 11 tüm çağrı sorgusu ile adres bilgisi elde edilebilmektedir. Üçüncü ve dördüncü senaryoda her iki uçağında cevap vermesi ile cevap girişimi olmakta veya her iki uçakta sorgulamaya karşı cevap vermediği için adres bilgisi elde edilememektedir. Adres bilgisinin elde edilemediği bu iki senaryo problem oluşturmayıp peşi sıra gelen tüm çağrı sorgulamalarda birinci ve ikinci senaryoların gerçekleşme ihtimali beklenip uçak adresleri elde edilebilmektedir [3].



Şekil 4.1 ALL-CALL Örnek Sorgu Cevap Senaryosu

Sorgulayıcı cihazı elde edilen uçak adresine peşi sıra gelen seçici sorgu planlar ve bu sorgu ile cevaplayıcı cihazının UF 11 tüm çağrı sorgulamalarına karşı susturma komutu gönderilir. Bu komut ile cevaplayıcı II/SI sorgulayıcı kodlu UF11 tüm çağrı sorgulamasına

karşı kilitlenip (Lockout) cevap vermemektedir. Böylelikle adresi elde edilen cevaplayıcı tüm çağrı sorgulamalarına kilitlenip cevap vermediği için yakınındaki uçakların tüm çağrı cevaplarına girişimi engellenmiş olur. Bu da hava trafik gözetiminde platformların teşhisindeki performansını artırmaktadır [3].

Cevaplayıcı cihazı UF 11 tüm çağrı sorgulamalarına kilitlendikleri (Lockout) durumda 18 saniyelik zamanlayıcı açılır. Zamanlayıcı zaman aşımına kadar sorgulayıcı cihazının tanımlayıcı II/SI kodunu hafızasında tutar. Bu kilitlenme süresince tanımlayıcı kodu ile kendisine gelen UF 11 tüm çağrı sorgularına cevap vermez. Sorgulayıcıdan gelen her UF4/5/20/21 seçici sorgu içerisinde, susturma komutu ile bu zamanlayıcı sürekli yenilenir. Tüm çağrı sorgularına kilitlenmiş olan platform ikincil gözetim radarının kapsama alanından çıkana kadar UF 11 tüm çağrı sorgularına susturularak diğer platformlarının cevaplarına girişimi (garbling) engellenmiş olur.

Kapsama alanı kesişen iki veya daha fazla ikincil gözetim radarlarına birbirinden farklı II/SSI kodlar atanır. Kapsama alanlarının kesişim bölgesinde kilitlenme duruma göre her bir II/SI kodu için zamanlayıcı başlatır ve idamesi ayrı ayrı yapılır [2, 3].

Sorgulayıcı cihazları için kullanılabilir 15 farklı adet II kod ve 63 adet SI kod yer almaktadır. Belirli bir bölge içerisinde kapsama alanı kesişen 15 ‘ten fazla ikincil gözetim radarı olması halinde SI kod kullanılmaktadır [2].

4.1.1 Mod S All - Call Sorgu Yapısı

UF 11 tüm çağrı sorgulaması kısa sorgu (Short Interrogation) modudur ve Şekil 4.2’da görüldüğü gibi 56 bitlik veriden oluşmaktadır. UF alanı sabit ondalık gösterimle 11 olarak tanımlıdır. PR alanı cevaplayıcı cihazına hangi olasılık ile cevap vermesi gerektiğini bildirmektedir. IC ve CL alanları birlikte kullanılmakta ve II/SI tanımlayıcı kod bilgisi kodlanmaktadır. II/SI tanımlayıcı kodu sorgulayıcı cihazının mod S sorgularında kullanması için atanan her bir cihaza özgü koddur. AP alanı “0xFFFFFFFF” tüm çağrı adresi ile birlikte

sorgu verisinin ilk 33 biti kullanılarak Mod S haberleşme protokolüne ait CRC polinomu ile hesaplanan 24 bitlik pariteyi tanımlamaktadır [2].

UF=11 (1-5 bit)	PR (6-9 bit)	IC (10-13)	CL (14-16 bit)	Ayrılmış (Spare) (17-32 bit)	AP (33-56)
--------------------	-----------------	---------------	-------------------	---------------------------------	---------------

Şekil 4.2 Mod S Tüm Çağrı (All-Call) Sorgu Sinyali Veri Ayırışımı[2]

1. PR alanının kodlanması ve tanımı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

- PR="0000" cevaplayıcının 1/1 olasılıkla cevap ver anlamına gelir.
- PR="0001" cevaplayıcının 1/2 olasılıkla cevap ver anlamına gelir.
- PR="0010" cevaplayıcının 1/4 olasılıkla cevap ver anlamına gelir.
- PR="0011" cevaplayıcının 1/8 olasılıkla cevap ver anlamına gelir.
- PR="0100" cevaplayıcının 1/16 olasılıkla cevap ver anlamına gelir.
- PR="0101 , 0110,0111 " tanımlı değil.
- PR="1000" cevaplayıcının lockout durumuna bakmaksızın 1/1 olasılıkla cevap ver anlamına gelir.
- PR="1001" cevaplayıcının lockout durumuna bakmaksızın 1/2 olasılıkla cevap ver anlamına gelir.
- PR="1010" cevaplayıcının lockout durumuna bakmaksızın 1/4 olasılıkla cevap ver anlamına gelir.
- PR="1011" cevaplayıcının lockout durumuna bakmaksızın 1/8 olasılıkla cevap ver anlamına gelir.
- PR="1100" cevaplayıcının lockout durumuna bakmaksızın 1/16 olasılıkla cevap ver anlamına gelir.
- PR="1101,1110,1111" tanımlı değil.

2. IC ve CL alanının kodlanması ve tanımı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

- CL="000" IC alanı içerisinde 0 ila 15 arasında II kod bilgisi yer aldığı anlamına gelmektedir.
- CL="001" IC alanı içerisinde 1 ila 15 arasında SI kod bilgisi yer aldığı anlamına gelmektedir.
- CL="010" IC alanı içerisinde 16 ila 31 arasında SI kod bilgisi yer aldığı anlamına gelmektedir.
- CL="011" IC alanı içerisinde 32 ila 47 arasında SI kod bilgisi yer aldığı anlamına gelmektedir.
- CL="100" IC alanı içerisinde 48 ila 63 arasında SI kod bilgisi yer aldığı anlamına gelmektedir.

4.1.2 Mod S Tüm Çağrı (All - Call) Cevap Yapısı

Cevap sinyali de sorgulama sinyali gibi kısa cevap (Short Reply) modudur ve 56 bitlik veriden oluşmaktadır. DF alanı sabit ondalık gösterimle 11 olarak tanımlıdır. CA alanı cevaplayıcının Mod S protokolü ile platformun havada/yerde olduğunun bilgisi iletilmektedir. AA(Address Announced) ile cevaplayıcı atanmış ICAO 24 bit Mod S adresi iletilmektedir. PI (parity/interrogator identifier) alanı, cevaplayıcının cevabını vermiş olduğu UF 11 sorgusunda yer alan sorgulayıcı tanımlayıcı (II/SI) kodu ile birlikte cevap verisinin ilk 33 biti kullanılarak hesaplanan 24 bitlik parite yer almaktadır [2].

DF=11 (1-5 bit)	CA (6-8 bit)	AA (9-32)	PI (33-56)
--------------------	-----------------	--------------	---------------

Şekil 4.3 Mod S Tüm Çağrı (All-Call) Cevap Sinyali Veri Ayırışımı[2]

4.1.3 Mod S Seçici Sorgulama (Roll - Call) Sorgu ve Cevap Formatları

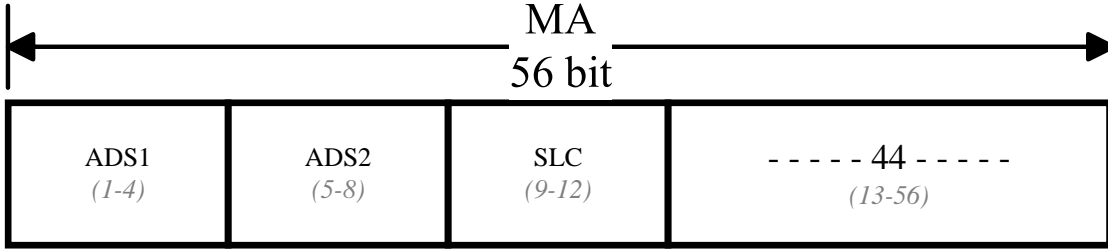
Mod S seçici sorgulama formatları literatürde UF 4,5,20,21 olarak tanımlanmıştır. Mod S UF 4 ve 5 kısa sorgu formatı, UF 20 ve 21 ise uzun sorgu formatıdır. Şekil 4.5’de görüldüğü üzere

uzun sorgu formatında kısa sorgu formatından farklı olarak ekstradan 56 bit MA alanı yer almaktadır.

UF=4/5 (1-5 bit)	PC (6-8 bit)	RR (9 -13 bit)	DI (14-16 bit)	SD (17-32bit)	AP (33-56 bit)	
UF=20/21 (1-5 bit)	PC (6-8 bit)	RR (9 -13 bit)	DI (14-16 bit)	SD (17-32bit)	MA (33-88bit)	AP (89-112 bit)

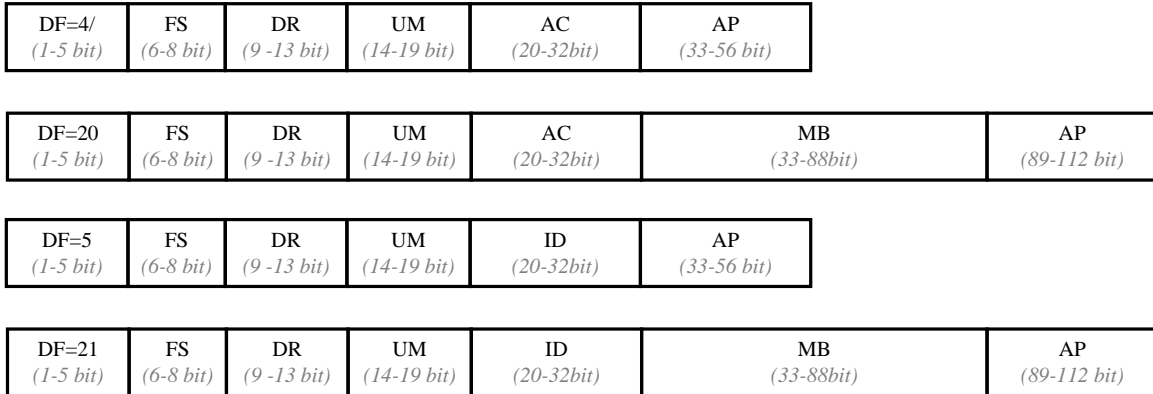
Şekil 4.4 Mod S Seçici Sorgu (Roll-Call) Sinyali Veri Ayrışımı[2]

MA alanı hali hazırda yer istasyonu tarafından çarpışma önleyici sistemlerine direktif komutlar iletmek için kullanılmaktadır. Bu komutlar 'da görüldüğü üzere ADS1, ADS2 ve SLC alanları ile iletilmektedir. Bunların haricinde kalan 44 bitlik alan rezerve olarak ayrılmıştır [2].



Şekil 4.5 MA Alanı [2]

Cevap formatları ise yukarı link uplink formatların karşılığı downlink format 4,5,20 ve 21 olarak tanımlıdır. Bu cevap formatları sorgu formatında olduğu gibi kısa ve uzun formatlardır. Uzun formatların kısa formatlardan tek farkı MB alanının yer almasıdır. Bu alan ile hava trafik gözetimi için gerekli olan veriler sorgulayıcıya iletir. Cevap formatlarının bir diğer kategorisi ise irtifa bilgisi veya hava trafik kimlik bilgisi taşımaya göre ikiye ayrılır. Kimlik bilgisi uçağın Mod 3/A kodu ile aynı değere sahiptir. İrtifa ve kimlik bilgisi Şekil 4.6'de görüldüğü üzere AC alanı ve ID alanı ile iletilmektedir.



Şekil 4.6 Mod S Seçici Cevap (Roll-Call) Sinyali Veri Ayrışımı [2]

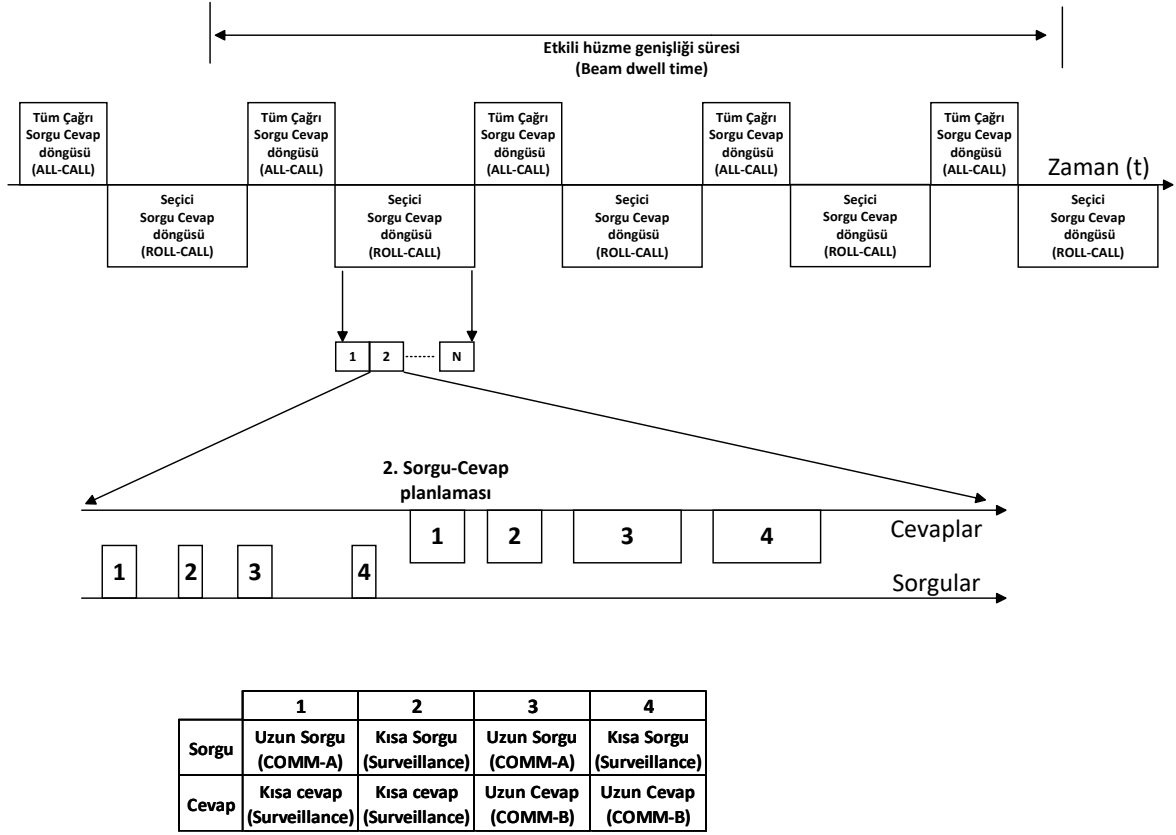
4.2 Mod S All - Call ve Roll - Call Sorgu Cevap Döngüleri ile Hava Gözetimi

Hava platformların takip ve gözetimi için mod S tüm ve seçici çağrı (All – Call Roll – Call) sorgu cevap döngüleri kullanılır. Bu döngülerdeki sorgu formatları ile uçak tarafından birtakım bilgiler elde edilir. Bu bilgileri elde etmek için mod S 'te tanımlı UF 11 tüm çağrı sorgusu ve UF 4,5,20,21 seçici sorgusunun kombinasyonundan oluşan sorgu cevap döngüsü oluşturulur. Bu sorgu cevap döngüleri sorgulayıcı tarafından belirli bir algoritmaya ve kanal yönetim sürecine göre planlanır. Bu süreçte ana amaç mod S tüm çağrı ve seçici sorguların zamanda dağılım planlanmasıdır.

Sorgulayıcının sorguları zamanda dağıtım Şekil 4.7'te gösterilmektedir. Tüm çağrı ve seçici sorgu cevap döngüsüne ayrılan süre, sorgulayıcı anteninin efektif hüzmesinin tarama süresi göz önünde bulundurularak planlanır. Seçici sorgu cevap döngüsü; sorgulama için ayrılan süre, anten hüzmesinin kapsadığı alan, içerisindeki uçakların durumu ve konumu gibi kriterlere göz önünde bulundurularak planlanır [3, 57].

Seçici sorgu cevap döngüsü yalnızca anten hüzme içerisindeki uçaklara planlanır. Sorgulama sinyalleri peşi sıra bir şekilde kanal süresi içerisinde sıralaması platformun bir önceki sorgu cevap döngüsündeki menziline göre yapılır. Kanal süresi tüm platformlar için fazlası ile yeterli olduğu durumda hüzme içerisinde bir platform için birden fazla seçici sorgu döngüsü tekrar tekrar planlanabilmektedir [3, 4].

Tüm çağrı ve seçici sorgu ile elde edilen platformların aktif olarak hedef listesi sorgulayıcı hafızasında tutulur. Bu liste tüm çağrı ve seçici sorgu cevap döngüleri ile sürekli olarak güncellenir. Belirli bir süre boyunca tüm çağrı ve seçici sorgu cevap döngüsü ile yanıt alınamayan platform gözetim kapsama alanından çıkmış sayılır ve listeden çıkartılır. Her bir tüm çağrı ve seçici sorguları platformların cevapları birbirine çakışmayacak veya girişim (garbling) oluşturmayacak şekilde planlanır. Her bir seçici sorgu tek bir platforma yönelik olup o platformun adres bilgisi yer almaktadır. Sorgulama durumunda hiç cevap alınamaması veya herhangi bir cevap çakışması halinde, takip eden sorgu cevap döngüsü ile tekrardan



Şekil 4.7 All-Call Roll-Call Örnek Sorgu Cevap Döngüleri [3]

temas kurmaya çalışılır. Belirli bir tekrardan sonra platform ile olan temas zaman aşımına uğrar ve aktif listeden çıkartılır [3, 58].

Seçici sorgu planlanırken birtakım önceliklendirmeler yapılır. Sorgulayıcı hafızasındaki aktif listenin en başındaki (en uzak mesafedeki) platforma öncelik verilir ardından kanalda o platform için seçici sorgu planlanır çünkü en uzak mesafedeki uçağın kapsama alanından erken ayrılması durumu gözetilmektedir. Buna ilave olarak platformların yanca açısı da göz önünde bulundurulur ve radar dönüşü ile hüzmelerin kapsadığı alandan yakın zamanda çıkacak platform varsa onları da önceliklendirilir. Bu önceliklendirme neticesinde kanalda sorgu dizilimi ilk önce o platformlara olacak şekilde planlanır [3, 58].

Hava trafik gözetim merkezi tarafından seçici sorguları ile platforma dair birtakım veriler elde edilir. Bu verileri elde edilmesi için GCIB protokolü kullanılmaktadır. Seçici sorgular ile platformun uçuş numarası, uçuş durumu gibi aviyonik bilgileri elde edilerek GCIB

protokolü yürütülür. Bu protokol hem UF4/5 kısa sorgu formatları ile hem de UF20/21 uzun sorgu formatları ile yürütülebilmektedir. Her iki tip sorgu formatına karşılık cevaplayıcılar DF20/21 uzun format cevap verir.

GCIB protokolü yürütülürken karşılık gelen sorgu içerisine BDS (Comm-B data selector) numarası yazılır. Cevaplayıcı gelen sorgunun içerisindeki BDS numarasına göre veriyi 56 bitlik MB (Message Comm-B) alanına doldurarak uzun cevap formatı ile yanıtlar. Cevaplayıcıda BDS numarasına karşılık gelen bilgi mevcut değilse MB alanını tamamını lojik 0 olarak doldurur ve o şekilde yanıtlanır [3].

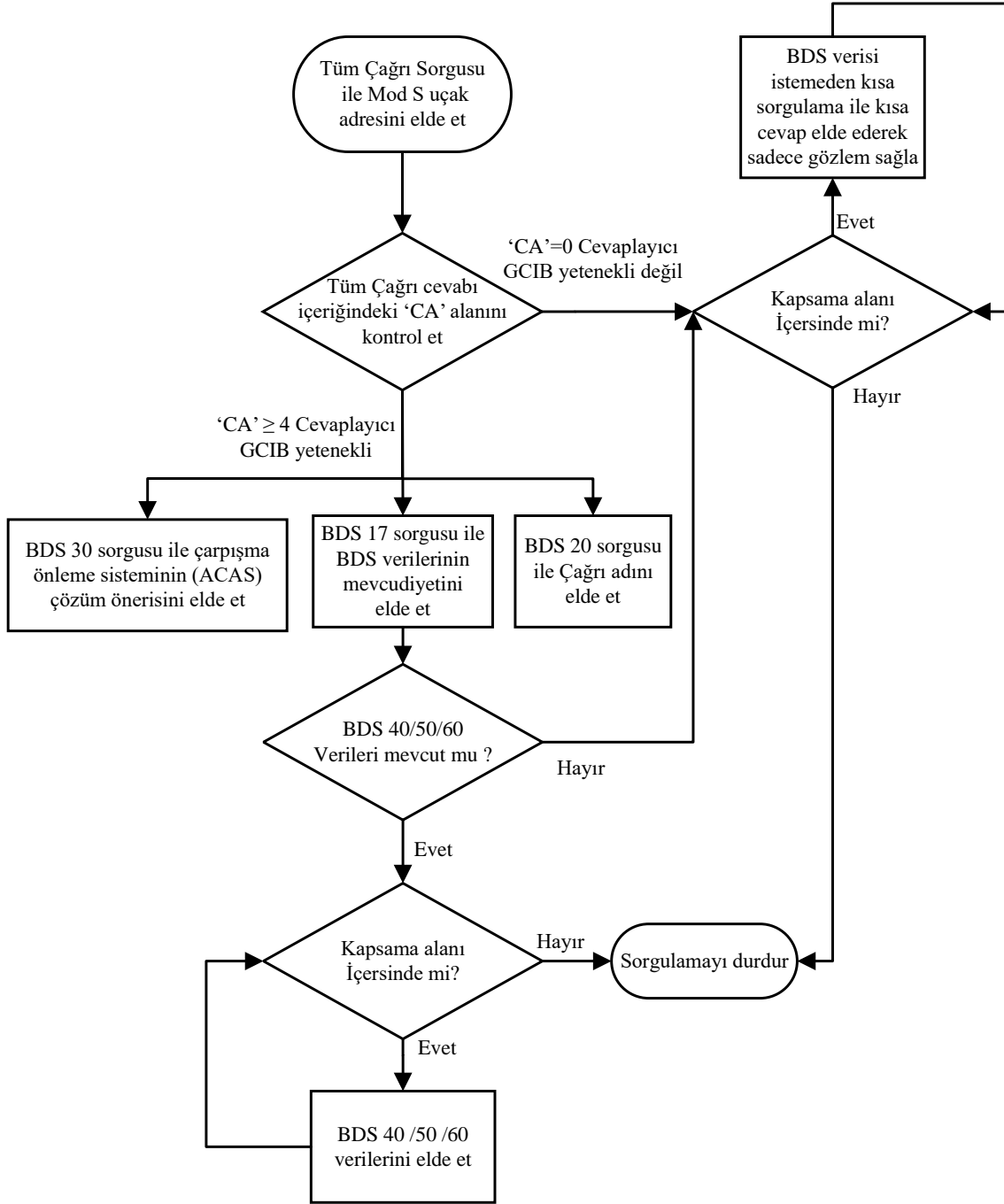
Sorgulayıcı tüm çağrı ve seçici sorgu senaryolarında cevaplayıcıdan elde ettiği verileri Mod S birincil gözetim (Elementary Link Surveillance, ELS) ve gelişmiş gözetim (Enhanced Link Surveillance, EHS) prosedürlerini yürütmektedir. Bu gözetim yöntemleri temelde seçici sorgular ile istenecek BDS verilerini tanımlamaktadır. Bu BDS numaralarının tanımı aşağıdaki tabloda gösterilmektedir [3, 59].

BİRİNCİL GÖZETİM BDS TANIMLARI (ELS)		
BDS Numarası	Tanım	Kullanım Amacı
BDS No : 0x10	Veri linki yeteneği durumu (Datalink Capability Report)	Mod S veri yeteneğinin olup olmadığını yer istasyonuna raporlamak için kullanılır
BDS No : 0x17	GCIB yeteneği özet durumu (Common Usage GICB Capability Report)	BDS verilerinin mevcudiyet durumunu yer istasyonuna raporlamak için kullanılır.
BDS No : 0x20	Çağrı Adı (Aircraft Identification)	Çağrı adını yer istasyonuna raporlamak için kullanılır.
BDS No : 0x30	Çarpışma önleyici sistem çözüm önerisi (ACAS Resolution Advisory Report)	Çarpışma önleme sisteminin çözüm önerilerini raporlamak için kullanılır.
GELİŞMİŞ GÖZETİM BDS TANIMLARI (EHS)		
BDS Numarası	Tanım	Kullanım Amacı
BDS No : 0x40	Seçili Yükseklik Bilgisi (Selected Vertical Intention)	Detaylı irtifa bilgisini yer istasyonuna raporlamak için kullanılır.
BDS No : 0x50	Güzergah ve Dönüş bilgisi (Track and Turn Report)	Uçağın detaylı uçuş açısı bilgileri ,hava hızı ve yere göre olan süratini yer istasyonuna raporlamak için kullanılır.
BDS No : 0x60	İstikamet ve Hız Bilgisi (Heading and Speed Report)	İstikamet bilgilerini ve detaylı hız verilerini yer istasyonuna raporlamak için kullanılır.

Tablo 4.1 ELS EHS Yazmaç Tanım Tablosu [3, 4]

Hava platformları sorgulayıcı gözetim kapsama alanı içerisine girdiği anda, mod S birincil gözetim ve gelişmiş gözetim prosedüründen oluşan bir dizi akış yürütülür. Bu akış tüm çağrı sorguya karşılık cevaplayıcı 24 bit adresini cevaplaması ile başlamaktadır. Sorgulayıcı tarafından alınan cevap içeriğinden platformun adres bilgisi ve tek darbe yöntemi (Monopulse) ile de platformun yanca ve menzili tespit edilir. Alınan ilk tüm çağrı cevabın içerisindeki “CA” alanını değerlendirilerek uçağın Mod S uzun cevap format (DF 20,21) cevaplayabilme yeteneğini elde edilir. Cevaplayıcı yetenekli değilse mod S kapsama içerisinde olduğu sürece GCIB protokolü kullanılmaksızın kısa sorgu cevap ile gözetim yapılmaya devam eder. Cevaplayıcı yetenekli ise birincil gözetim süreci yürütülerek ilk önce

çağrı adı, mevcut GCIB BDS yazmaçları ve çarpışma önleyici sistemin durumu öğrenilir. Mevcut GCIB BDS yazmaçları bilgisine göre cevaplayıcı BDS 40,50,60 yazmaçları mevcut ise gelişmiş gözetim süreci ile gözetime devam edilir. Platform kapsama alanından çıkana kadar gelişmiş gözetim süreci devam eder ve BDS 40, 50, 60 numaralı yazmaçlardaki bilgiler sürekli elde edilerek güncellenir. Özet akış Şekil 4.8’de gösterilmektedir [4].



Şekil 4.8 All-Call Roll-cALL ile Gözlem Akış Diyagramı[4]

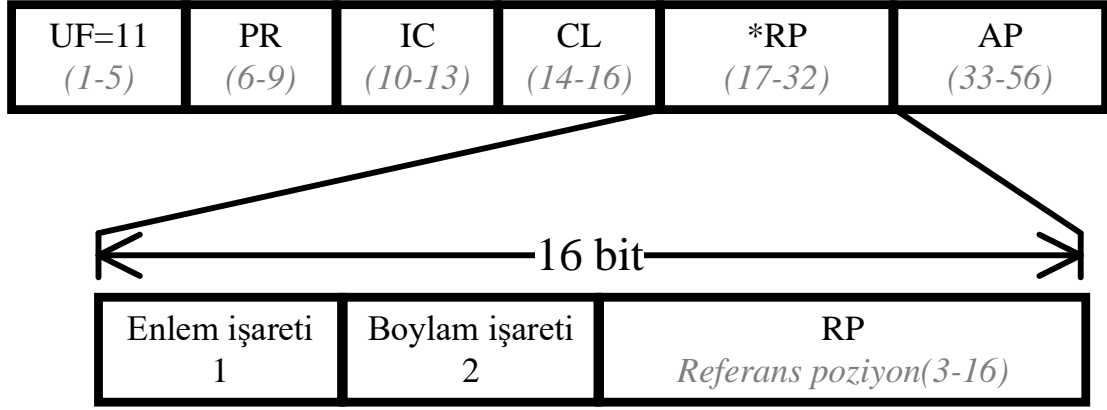
5 IFF Sistemi ile Küresel Konum Bilgisi Sağlanması

Tez kapsamında uçak veya hava platformuna sabit merkezden lokal olarak küresel konum bilgisi sağlama yöntemi geliştirilmiştir. Hava trafik merkezi sabit merkez olup tespit edilen hava platformunun konum bilgisi sorgulayıcı üzerinden cevaplayıcı aracılığı ile hava platformuna iletilmektedir. Bu kapsamda sorgulayıcı hava trafik gözetim merkezine entegre olup konum bilgisi iletimi için mod S haberleşme modu kullanılmaktadır. Tüm çağrı ve seçici sorgu cevap döngüleri ile tespit edilen konum bilgisi bu sorgu cevap döngüsüne peşi sıra planlan roll-call uzun format sorgusu içerisinde iletilir. Özetle bu yöntemde konum bilgisi seçici sorgulama içerisinde yer alan MA alanı içerisine gömülür ve o şekilde iletilir.

Hava platformuna entegre GPS sisteminin arızalanması durumunda veya karıştırma/aldatma ile karşılaşıldığında platformun uçuş güvenliği tehlikeye girebilmektedir. Platformun uçuşunu güvenli bir şekilde sürdürmek için geleneksel olarak telsiz irtibatı veya benzer yönlendirmeler yapılmaktadır. Bu durumda hava trafik kontrol merkezi tarafından platformu kumanda eden personele uçuş direktifleri verilerek yönlendirme sağlanır. Bu yönlendirmenin yapılması ile platformun uçuş rotası ile kesişen diğer platformların rotasını yeniden planlanmak zorunda kalabilmektedir. Başka bir dezavantajı ise hava trafik merkezinin meşguliyetini artırmaktadır. Bu tip durumları ortadan kaldırmak için tez kapsamında platforma konum bilgisi sağlanması üzerine yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem ile küresel konum bilgisini kaybeden platforma sorgulayıcı ile konum bilgisi sağlanarak insan kontrolünde gerçekleşen yönlendirme gibi meşguliyetin ortadan kaldırılması öne sürülmüştür.

Konum bilgisinin sağlanması için gereken ilk adım, hava trafik merkezine entegre sorgulayıcının konum bilgisi tüm çağrı sorgusu içerisinde referans pozisyon bilgisi olarak iletilmesidir. İkinci adım ise sorgulayıcının kapsama alanında olan her hava platformu için referans pozisyon bilgisine göre ofset değeri iletilmesidir. Bu ofset değeri ve referans pozisyon bilgisi kullanılarak konum bilgisi aktarımı sağlanır.

Referans pozisyon bilgisi, sorgulayıcının küresel konumu olup enlem ve boylam çözünürlüğü bir 1° derecedir. Şekil 5.1’de gösterildiği gibi tüm çağrı sorgusu içerisinde kullanılmayan 16. bit ile 32. bit arasındaki on altı bitlik alana yerleştirilerek cevaplayıcıya iletilir. Her bir tüm çağrı ve seçici sorgu cevap döngüsündeki tüm çağrı sorgu mesajı içerisinde bu pozisyon bilgisi iletilir.



Şekil 5.1 Referans Pozisyon Bilgisinin All - Call Sorgusu İçerisine Yerleşimi

Referans pozisyon değeri tüm çağrı sorgusu içerisine Denklem 5.1’deki gibi yerleştirilir. Burada Lat_{ref} ve Lon_{ref} parametreleri, sorgulayıcının küresel pozisyonun enlem ve boylam bilgisinin tam sayı kısmıdır. Lat_{ref} $0^\circ - 87^\circ$ arasında, Lon_{ref} ise $0^\circ - 180^\circ$ arası tanımlıdır. RP tanımlı aralığı ise 3 ila 16383 arasındadır. Bu aralığın dışında olması halinde sorgulayıcının konum bilgisi sağlayabilme yeteneği olmadığı cevaplayıcı tarafından alışırlır. Bu sayede tez kapsamında geliştirilen yöntemin uygulanmadığı sorgulayıcılar için geriye dönüm uyumluluk sağlanacaktır.

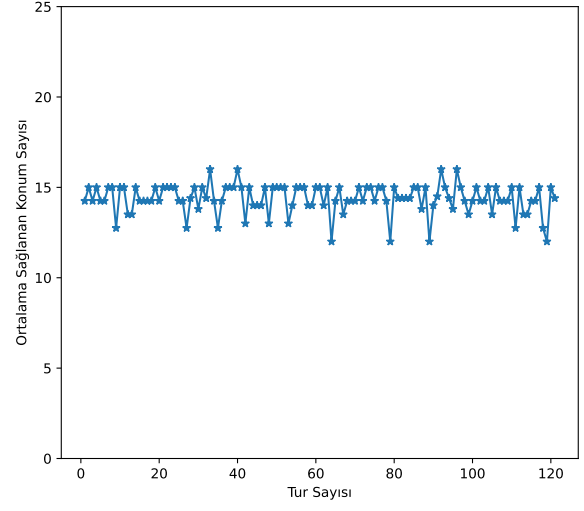
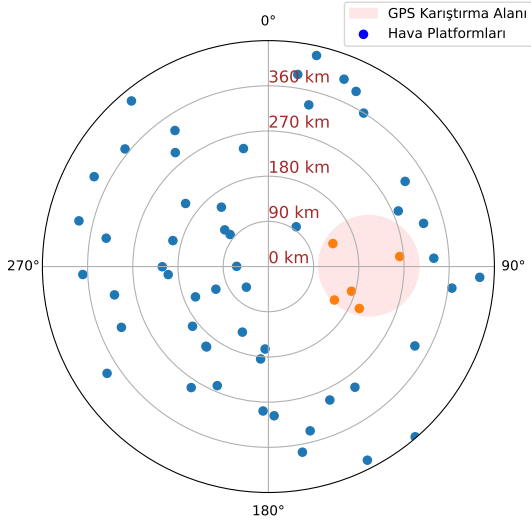
$$RP = (2^{14} - 1) - (Lat_{ref} \times 180 + Lon_{ref}) \quad (5.1)$$

Sorgulayıcının kapsama alanında olan her bir platformun cevaplayıcısında bu pozisyon bilgisi sorgulayıcı II/SI etiketi ile kaydedilir. Cevaplayıcı kendisine iletilen bu pozisyon bilgisini Denklem 5.2’e göre çözümler.

$$\text{Lat}_{\text{ref}} = \text{floor} \left(\frac{(2^{14} - 1) - \text{RP}}{180} \right) \quad (5.2)$$

$$\text{Lon}_{\text{ref}} = \text{mod}((2^{14} - 1) - \text{RP}, 180)$$

Tez kapsamında geliştirilen küresel pozisyon bilgisinin sağlanmasına yönelik protokol Şekil 5.2’de gösterilmektedir. Bu protokolda hava platformu, sorgulayıcının (ikincil gözetim radarı) kapsama alanına girmesi ile gerçekleşen örnek tüm çağrı ve seçici sorgu cevap döngüsü gösterilmektedir. Sorgulayıcı tarafından gönderilen UF 11 tüm çağrı sorgusuna karşılık platformunun cevaplayıcısı tarafından DF11 tüm çağrı cevabı verilir. Bu sorgu cevap döngüsündeki tüm çağrı sorgusu içerisindeki pozisyon bilgisi cevaplayıcıya iletilmiş olur. Cevaplayıcıdan gelen DF11 tüm çağrı cevabı ile cevaplayıcının adresini elde edilir. Bir sonraki döngüde ise tüm çağrı sorgusu ile hava trafik gözetimi için gerekli olan bilgiler elde edilir. Bu seçici sorgunun formatı UF4 olup bu sorguya karşılık cevaplayıcı tarafından cevap oluşturulur. Cevap formatı DF4 kısa cevap veya DF20 uzun cevap olabilir. Her iki cevap formatında da platformun barometrik irtifa bilgisi sorgulayıcıya iletilir. Buna paralel olarak hava platformunun küresel pozisyon bilgisi isteğinde bulunduğu da iletilir. Bu isteği belirtmek için DF4 ve DF20 cevap formatları için ortak olan DR alanını ondalık olarak 8 doldurulur. Sorgulayıcı iletilen bu cevap sinyali içeriğinde DR alanına bakılarak hava platformunun pozisyon bilgisi isteğinde bulunduğu anlaşılır. Bununla birlikte bu cevap sinyaline tek darbe yöntemi uygulanarak hava platformunun konumu yanca ve menzil olarak tespit edilir. Bu yanca ve menzil ile birlikte sorgulayıcının kendi pozisyon bilgisi de hesaba katılarak hava platformunun küresel pozisyon bilgisi çıkartılır. Bu küresel pozisyon bilgisinden referans pozisyon bilgisine göre ofset enlem ve boylam değerleri hesaplanır. Elde edilen bu değerler bir sonraki seçici sorgu cevap döngüsü ile uzun sorgu format sorgusu içerisindeki MA alanına yerleştirilerek cevaplayıcıya iletilir. Cevaplayıcıya iletilen bu bilgi ile daha önce iletilen referans pozisyon bilgisi de kullanılarak hava platformunun küresel pozisyon bilgisi cevaplayıcı tarafından hesaplanır.



Şekil 5.2 All Call-Roll Call ile Konum Bilgisinin İletim Akışı

Hava platformun menzili sorgulayıcı tarafından direkt mesafe olarak ölçülmektedir. Küresel konum hesaplama algoritmaları ile hesap yapılabilesi için yer yüzüne iz düşümü olan mesafenin bilinmesi gerekmektedir.

Bu mesafe

$$d_{\text{projection}} = \sqrt{\rho^2 - (h_{\text{plane}} - h_{\text{ssr}})^2} \quad (5.3)$$

ρ : Ölçülen direk menzil

h_{plane} : Uçağın irtifası

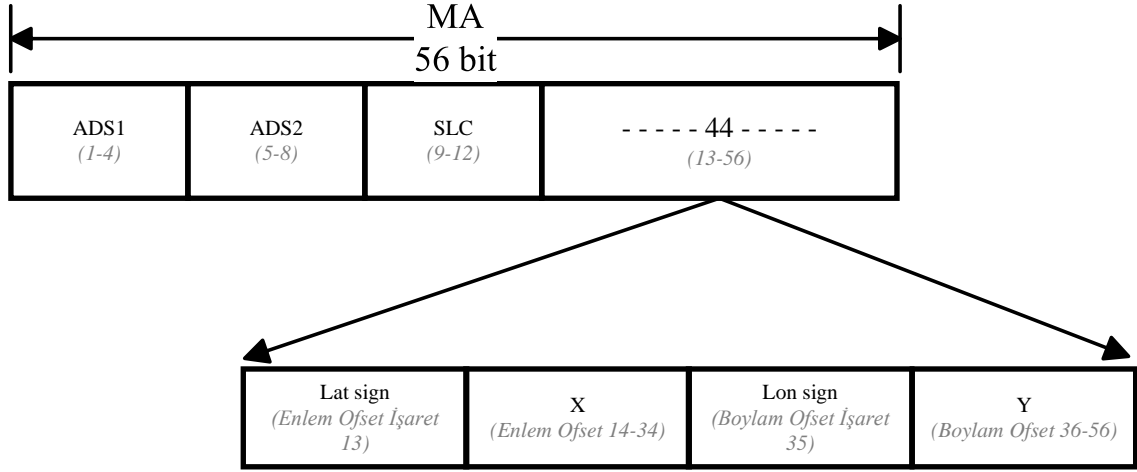
h_{ssr} : Hava trafik radarının yüksekliği

$d_{\text{projection}}$: İz düşümü uzaklık

olarak hesaplanır. Hesaplanan bu menzil bilgisi küresel konumlama algoritmasında kullanılır. Kullanılacak olan küresel konum hesaplama algoritması, sorgulayıcı cihazının performans ve donanım dinamiklerine göre seçilmesi önerilmektedir. Literatürde de bilindik olan ve düşük hata oranlarına sahip vincenty (vincenty direct) ve elips üzerinde jeodezik (geodesic on ellipsoid) algoritmasından birisi seçilmiştir [53, 56, 60]. Tez kapsamında doğruluk ve hız açısından karşılaştırmalı olarak incelendiğinde Karney'in [54] algoritması uygun görülmüştür. Bu algoritma ile iz düşümü mesafe kullanılarak sorgulayıcı tarafından hava platformunun küresel pozisyon bilgisi hesaplanır. Hesaplanan pozisyon bilgisinin ile cevaplayıcı iletilen referans enlem ve boylam değerlerinden MA alanı içerisine yerleştirilmek üzere ofset enlem ve ofset boylam bilgisi hesaplanır. Ofset enlem ve Ofset boylam bilgisi

$$\begin{aligned} \text{lat}_{\text{plane}}, \text{lon}_{\text{plane}} &= \text{geodirect}(\text{lat}_{\text{ssr}}, \text{lon}_{\text{ssr}}, d_{\text{projection}}, \text{theta}_{\text{plane}}) \\ \text{lat}_{\text{offset}} &= \text{lat}_{\text{plane}} - \text{lat}_{\text{ref}} \\ \text{lon}_{\text{offset}} &= \text{lon}_{\text{plane}} - \text{lon}_{\text{ref}} \end{aligned} \quad (5.4)$$

şeklinde hesaplanır. Bu değerler seçici sorgu ile iletilmek üzere Şekil 5.3'de görüldüğü gibi 44 bitlik rezerve alana yerleştirilir.



Şekil 5.3 MA Alanı Ofset Enlem ve Boylam Değerlerinin Yerleşimi

Enlem ofset değerinin maksimum aralığı maksimum sorgulayıcı kapsama menziline göre belirlenmiştir. Maksimum kapsama menzil litertürde 256 deniz mili olarak tanımlıdır [3, 61]. Bu menzil sınırına göre enlem ofset aralığı

$$\begin{aligned}
 X_{\max} &= \frac{d_{\text{ssr}}}{d_{\text{lat max}}} + \text{Lat}_{\text{ref}} \text{ resolution} \\
 &= \frac{(256 \times 1.852) \text{ km}}{111.7 \text{ km}} + 1^\circ \\
 &= 5.244512^\circ \\
 X_{\text{range}} &= \pm 5.244512^\circ
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

olarak hesaplanır. Hesaplanan tanımlanabilir aralık özetle sorgulayıcı gözlem menzilin dünya üzerinde iki meridyen arasındaki ortalama mesafeye bölümü ile referans enlem değerinin çözünürlüğünün toplamı ile elde edilmiştir.

Ofset enlem değerinin MA alanı içerisine yerleşimi

$$X = \text{floor}\left(\frac{\text{lat}_{\text{offset}}}{X_{\text{max}}} \times (2^{21} - 1)\right) \quad (5.6)$$

olarak hesaplanır. Boylam ofset değeri tanımlı aralığı dünyanın küresel şeklinden ötürü enlem ofset değerinde olduğu gibi sabit bir değer değildir. Ekvator bölgesinden kutup bölgesine doğru ilerledikçe bu ofset aralığı uzamaktadır. Bu aralık enlem değerine göre dinamik olarak değişkenlik göstermektedir. Bu aralığı hesaplamak için küresel kosinüs yasası (Spherical law of cosines) kullanılır. Sorgulayıcı hava platformun enlem bilgisini hesapladıktan sonra tanımlanabilir boylam ofset aralığını hesaplayacaktır. Bu aralık

$$Y_{\text{range}} = \pm \frac{d_{\text{ssr}}}{d_{\text{lon max}} \times \cos\left(\frac{\text{Lat}_{\text{plane}}}{180} \times \pi\right)} + \text{Lon}_{\text{ref resolution}} \quad (5.7)$$

$$d_{\text{Lon max}} = 111.4km$$

şeklinde hesaplanır. Ofset boylam değerinin MA alanı içerisine dizilimi enlem ofset değerinde olduğu gibi

$$Y = \text{floor}\left(\frac{\text{Lon}_{\text{offset}}}{Y_{\text{max}}} \times (2^{21} - 1)\right) \quad (5.8)$$

olarak yerleştirilir. Cevaplayıcıya bu MA alanı ile bu ofset değerleri, kendi konumunu hesaplaması için iletilir. İlk olarak iletilen enlem değeri hesaplanır.

Tüm çağrı sorgusu ile cevaplayıcıya iletilen referans enlem pozisyon bilgisi ve MA içerisindeki ofset değeri kullanılarak

$$\text{Lat}_{\text{decoded}} = -1^{\text{Lat sign}} \times \frac{X \times X_{\text{max}}}{2^{21} - 1} + \text{Lat}_{\text{ref}} \quad (5.9)$$

platformun enlem bilgisi hesaplanır. Elde edilen bu enlem bilgisini kullanarak sorgulayıcıda olduğu gibi tanımlanabilir ofset boylam aralığı hesaplanır. Bu aralık hesaplanırken Denklem 5.7 kullanır. Hesaplanan maksimum tanımlanabilir değer kullanılarak platformun boylam değeri

$$\text{Lon}_{\text{decoded}} = -1^{\text{Lon sign}} \times \frac{Y \times Y_{\text{max}}}{2^{21} - 1} + \text{Lon}_{\text{ref}} \quad (5.10)$$

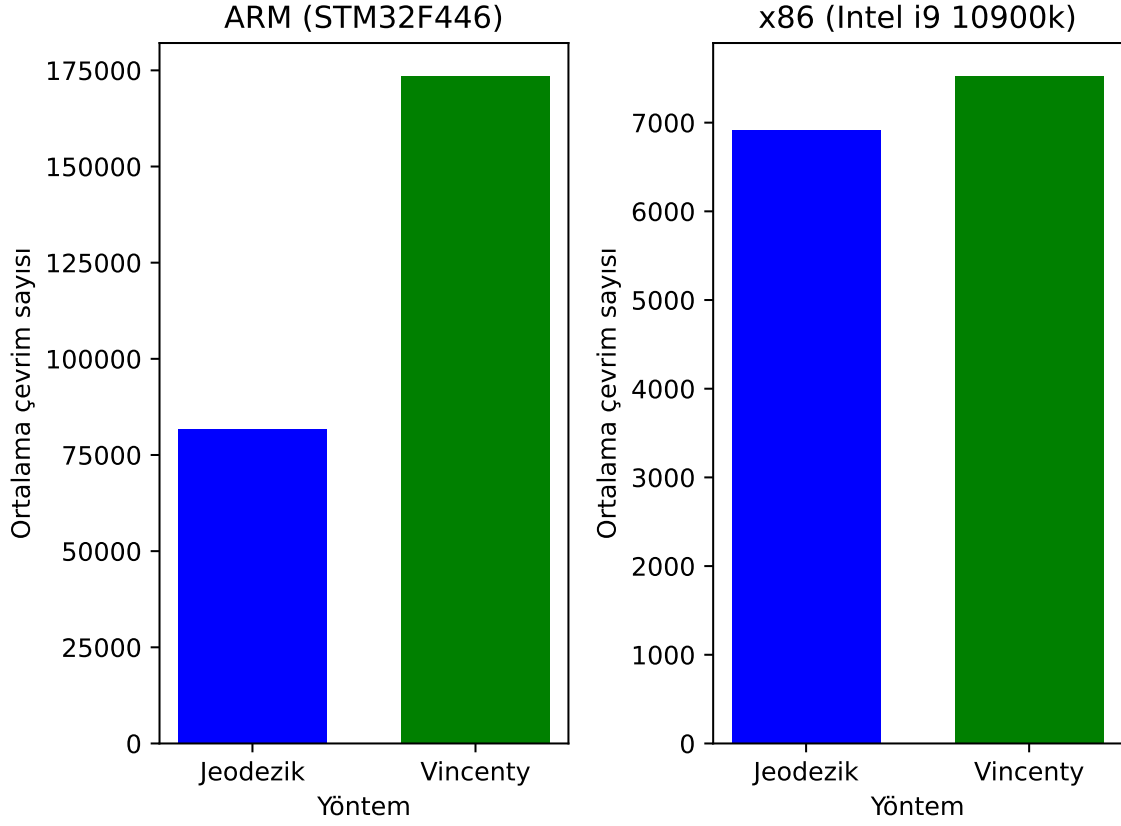
şeklinde hesaplar.

Literatürde küresel konum hesaplama algoritmalarından en bilindik olanları haversine ,vincenty ve jeodezik (geodesic on ellipsoid) algoritmalarıdır. Haversine yönteminde, dünyanın şekli elips yerine küre olarak ele alındığı için km mertebesinde hata payı ile hesaplama yapabilmektedir. Jeodezik ve vincenty çok düşük hata oranlarına sahip iki farklı yöntem olarak literatürde yer almaktadır [55, 56].

Tez kapsamında bu iki yöntem iki farklı işlemci mimarisinde performans ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm için oluşturulan test kodlarında, literatürde geliştirilmiş olan algoritma kütüphaneleri (library) kullanılmıştır[62, 63]. Kullanılan işlemcilerden bir tanesi ARM (RISC) mimarili gömülü kart işlemcisi diğeri ise x86(CISC) masaüstü işlemcisidir. Performans değeri olarak ortalama geçen saat çevrimi (clock cycle) ölçülmüştür. Ölçümlerde 500 km içerisinde bin farklı küresel pozisyon noktasına göre hesaplanmıştır. Her bir nokta için gereken hesaplama çevrim sayılarının ortalaması alınmıştır. Bu süreç yüz kez tekrar edilmiş ve elde edilen sonuçların ortalaması alınarak nihai sonuçlar elde edilmiştir.

Algoritmalar C dilinde kodlanıp test edilmiştir. Şekil 5.4'de görüldüğü üzere jeodezik algoritma her iki işlemcide de daha az çevrim harcadığı gözlemlenmiştir. Bu algoritmanın

performans açısından daha iyi olması sebebi ile tez kapsamında geliştirilen konumlandırma yönteminde kullanılması tercih edilmiştir.



Şekil 5.4 Jeodezik ve Vincenty Algoritmaları Ortalama Çevrim sayıları

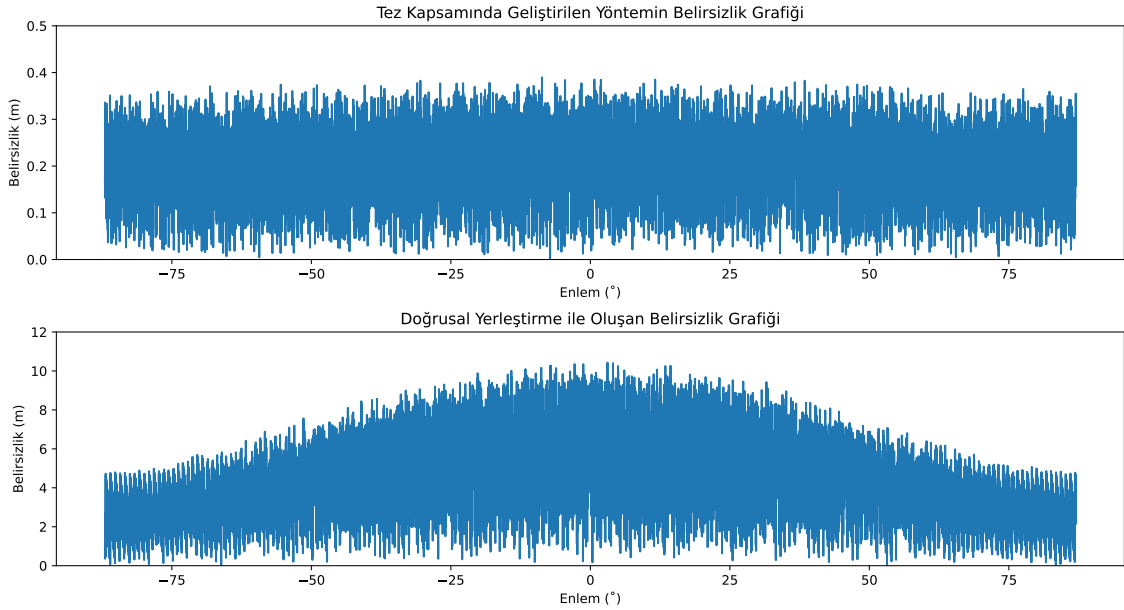
Tablo 5.1 Intel Core i9-10900K ve STM32F446RE Karşılaştırması

Özellik	Intel Core i9-10900K	STM32F446RE
Mimari	CISC (x86-64, Comet Lake, 10. Nesil)	RISC (ARM Cortex-M4, 32-bit)
Çekirdek Sayısı	10 Çekirdek	1 Çekirdek
İş Parçacığı Sayısı	20 İş Parçacığı	Tek iş parçacıklı
Temel Frekans	3.7 GHz	180 MHz
Komut Seti	x86-64 (CISC)	ARMv7-M (RISC)

Tez kapsamında önerilen MA alanı içerisinde ofset enlem ve boylam bilgisi kodlandıktan sonra karşı hava platform tarafından tekrardan çözümlenmesinde belirsizlik oluşmaktadır. Bu belirsizliği (uncertainty) hesaplamak için dünya üzerindeki rastgele herhangi bir noktanın enlem ve boylam bilgisi bu yöntem kodlanıp tekrardan çözümlenerek aradaki belirsizlik

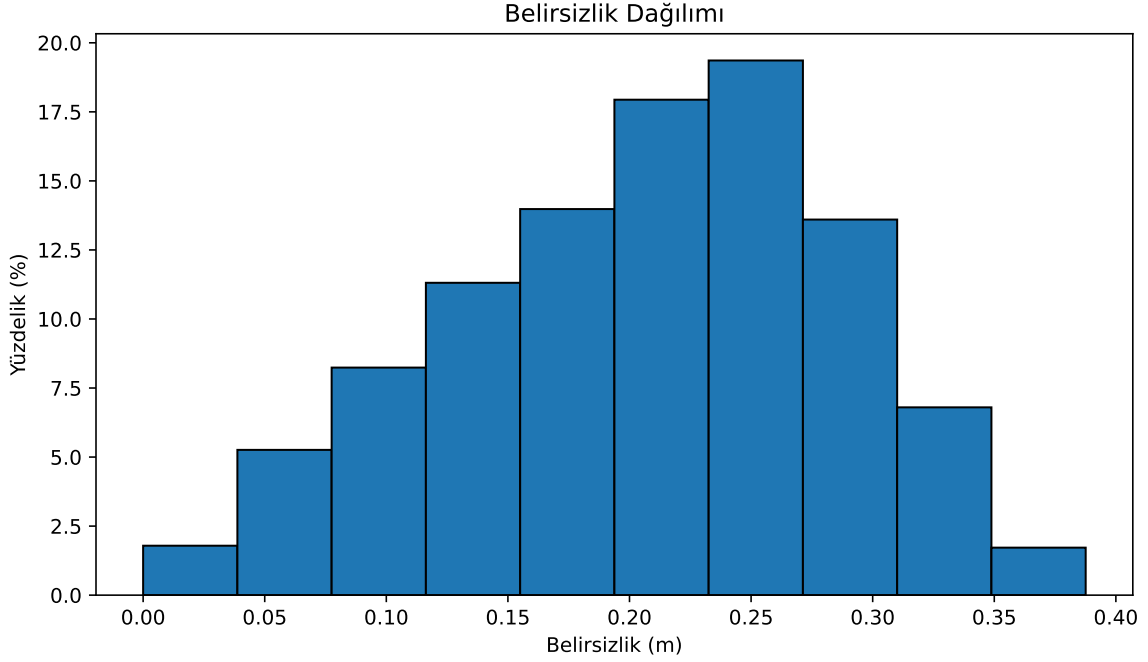
hesaplanmıştır. Belirsizlik değerlerini hesaplamak için orijinal enlem ve boylam verisi ile kodlanıp tekrar çözümlenen enlem ve boylam verisi arasındaki mesafe farkı hesaplanmıştır. Bu mesafe farkı yöntemin metre cinsinden belirsizliği ifade etmektedir. Bu mesafe hesaplamasında ise Karney'in algoritması [54] kullanılmıştır.

Tez kapsamında kodlama yöntemi geliştirilmeden önce hava platformunun enlem ve boylam bilgisi sadece seçici sorgu iletilmesi düşünülmekteydi. Enlem ve boylam bilgisi 22 bit ile doğrusal (linear) kodlanıp MA alanındaki 44 bitlik alana yerleştirilmesi planlanmaktaydı. Karşılaştırma açısından bu şekilde iletilmenin sonucunda oluşan belirsizlik değerleri kıyaslamaya dahil edilmiştir. Bu belirsizlik değerleri, enlem ve boylam bilgisinin 22 bit ile kodlanıp tekrar 22 bit ile çözümlenerek arada oluşan mesafe farkı olarak hesaplanmıştır. Tez kapsamında geliştirilen kodlama ile doğrusal kodlama sonucu oluşan belirsizlik eğrileri Şekil 5.5'de görülmektedir.



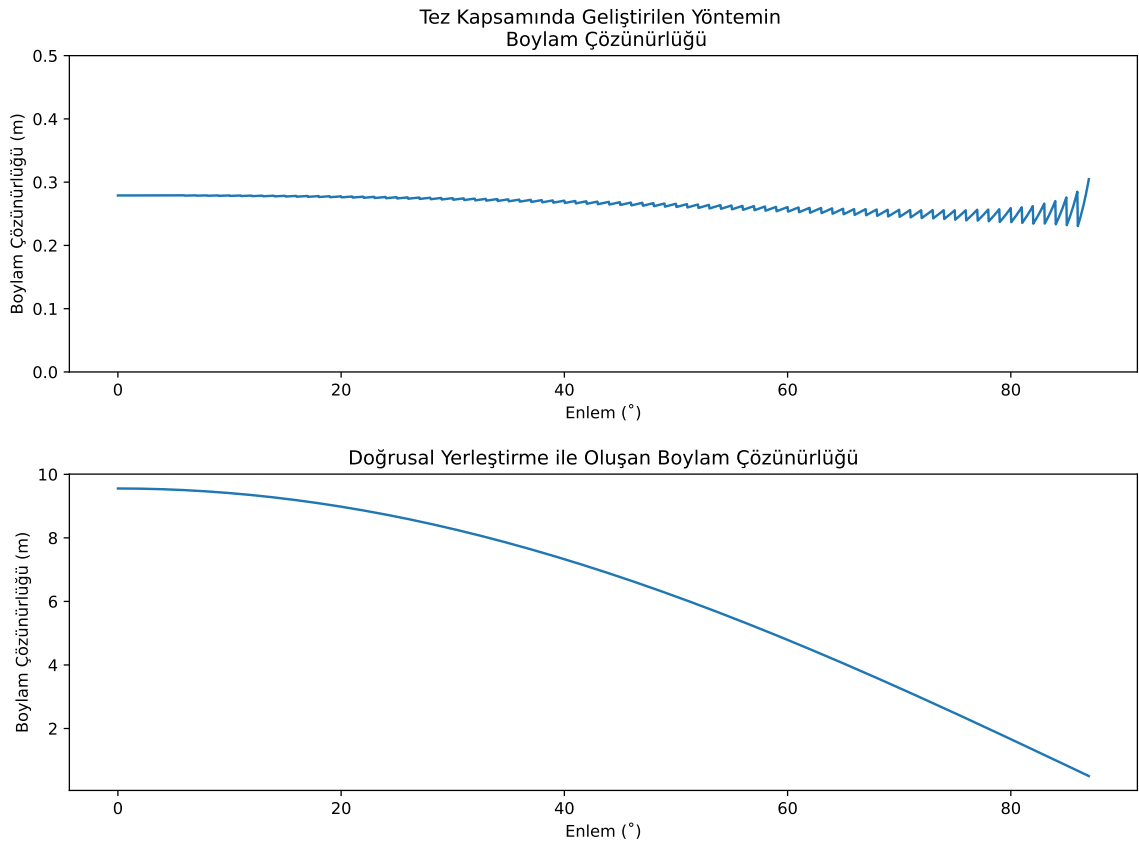
Şekil 5.5 Tez Kapsamında Hesaplanan Belirsizlik Değerleri

Bu veriler doğrultusunda tez kapsamında geliştirilen kodlamanın maksimum belirsizlik değeri 0.4 metre olarak hesaplanmıştır. Hiçbir yöntem olmadan doğrusal olarak kodlandığında maksimum belirsizlik değeri 11 metre olarak hesaplanmıştır. Geliştirilen yöntemin ortalama belirsizlik değeri 0.2 metredir ve dağılımı Şekil 5.6'de gösterilmektedir.



Şekil 5.6 Belirsizlik Dağılımı

Dünyanın küresel yapısından ötürü boylam çizgileri arasındaki mesafe değişkenlik gösterirken enlem çizgileri arasındaki mesafe birbirine hemen hemen eşit uzaklıktadır. Doğrusal kodlama ile enlem ve boylam verisi MA alanı içerisine yerleştirildiğinde enlem verisi için eşit çözünürlük sağlanmaktadır. Ancak boylam verisinin çözünürlüğü enlem verisine göre değişkenlik göstermektedir. Tez kapsamında geliştirilen kodlama yönteminde boylam bilgisi MA alanı içerisine yerleştirilirken enlem verisi baz alındığı için her enlem noktasında eşit boylam çözünürlüğü sunulmaktadır. Hem doğrusal hem de geliştirilen kodlama ile boylam çözünürlüğü hesaplandığında Şekil 5.7'deki gibi sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde geliştirilen yöntem ile çözünürlük 0.3 ila 0.2 metre arasında kalmaktadır.



Şekil 5.7 Boylam Verisinin Enleme Göre Çözünürlük Eğrisi

Tüm çağrı ve seçici sorgulama (All – Call Roll – Call) senaryoları yaklaşık Şekil 4.7’de görüldüğü gibi huzme genişliğinde dört kez seçici sorgulama planlanmaktadır. Her bir seçici sorgu planlamasında üç sorgu cevap döngüsü oluşturulmaktadır. Huzme içerisindeki uçakların konumuna göre her bir sorgu cevap döngüsünde üç ila dört arasında seçici sorgu oluşturulmaktadır. Her turda platforma sağlanabilecek konum sayısı

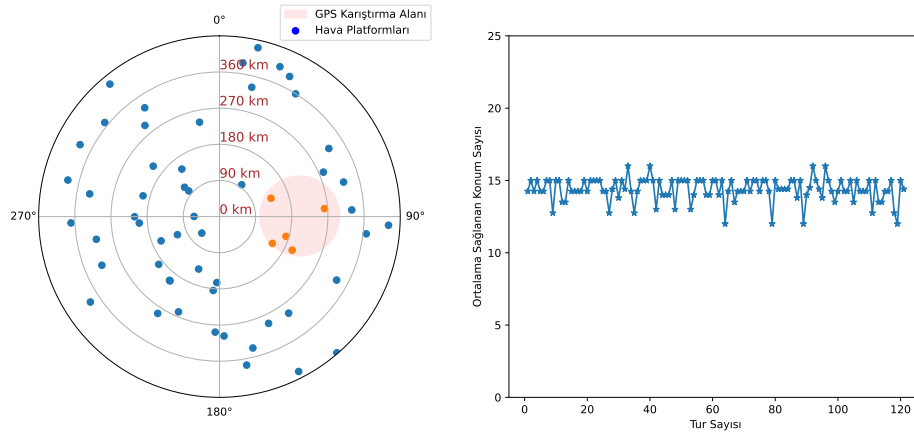
$$\text{Engage}_{\max} = \text{Cycle}_{\text{total}} \times \text{Rollcall}_{\max} = 4 \times 4 = 16$$

$$\text{Engage}_{\min} = \text{Cycle}_{\text{total}} \times \text{Rollcall}_{\min} = 4 \times 3 = 12 \quad (5.11)$$

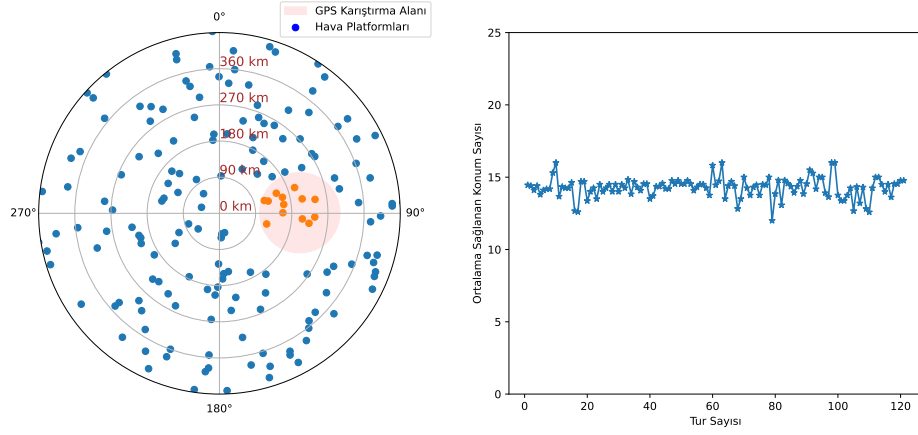
$$\text{Engage}_{\text{avg}} = 14$$

kadardır.

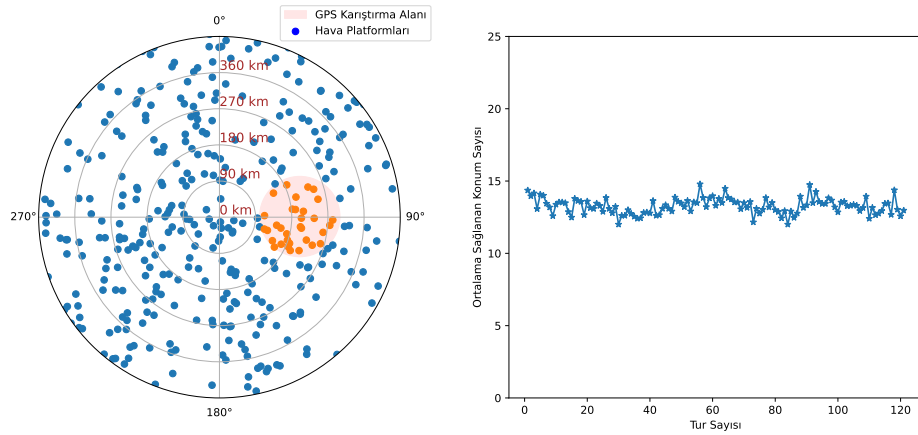
Tüm çağrı ve seçici sorgulama ile her bir platforma sağlanabilecek konum bilgisi sayısının simülasyonları yapılmıştır. Simülasyonda kapsama alanı 450 km olan hava trafik gözetim radarı ile 100 km yarıçapta GPS karıştırması uygulanan hava platformlarına pozisyon bilgisi sağlanmış ve tur başına ortalama kaç adet pozisyon bilgisi sağlanabildiği hesaplanmıştır. Kapsama alanında 100, 250 ve 500 adet platform için benzetim yapılmıştır. Benzetim sonuçlarına her bir platforma tur başına sağlanabilecek ortalama konum sayıları sırası ile 14.2, 13.9, 13.27 olarak edilmiştir.



Şekil 5.8 Kapsama Alanında 100 adet Platform Olması Durumunda Sağlanabilecek Konum Sayısı



Şekil 5.9 Kapsama Alanında 250 adet Platform Olması Durumunda Sağlanabilecek Konum Sayısı



Şekil 5.10 Kapsama Alanında 500 adet Platform Olması Durumunda Sağlanabilecek Konum Sayısı

6 SONUÇ

Bu tez çalışmasında hava platformlarına Küresel Konumlandırma Sisteminden (GPS) bağımsız şekilde IFF sistemi kullanılarak lokal olarak küresel konum bilgisi aktarımına dair bilindiği kadarıyla daha önce kullanılmamış bir yöntem geliştirilmiştir. Hava platformun küresel konumlandırma sistemi (GPS) aldatma/karıştırma taarruz gibi nedenlerle karşı karşıya kalıp küresel konum bilgisini kaybetmesi durumunda IFF sistemini kullanarak küresel konum bilgisini edinmesi için alternatif bir yöntem geliştirilmiştir.

IFF sistemlerinin çalışma prensibi, haberleşme modları ve sistemin kullandığı konum belirleme teknikleri incelenmiştir. Bu dinamikler incelendiğinde küresel konum bilgisinin hava platformuna iletimi veri taşıma yeteneğine sahip Mod S haberleşme modu seçilmiştir. Bu modun hava trafik kontrol radarlarındaki kullanımı All – Call ve Roll – Call sorgu cevap döngüleri ile kullanıldığı edinilmiştir. Bu sorgu-cevap döngüleri incelendiğinde küresel konum bilgisinin hava platformuna UF20 ve UF21 uzun sorgu formatları ile iletebileceği tespit edilmiştir. Geliştirilen yöntemde, güncel hava trafik gözlemi için kullanılan bu sorgu cevap döngülerin akışını değiştirmeden paralel olarak iletilmesi düşünülmüştür.

Hava platformunun küresel konumunun hesaplanması için literatür araştırması yapılmış olup en düşük hata oranına sahip iki mod olan vincenty ve elips üzerinde jeodezik (geodesic on elipsoid) algoritmaları tespit edilmiştir. Bu iki algoritma, gömülü kart ve masaüstü işlemcisinde iteratif olarak koşturulup işlem maliyetleri ölçülmüştür. Ölçülen sonuçlar incelendiğinde jeodezik algoritmanın daha az işlem maliyeti ile öne çıktığı görülmüştür.

Küresel konum bilgisinin, tüm çağrı ve seçici sorgu cevap döngüleri içerisine konum bilgisinin efektif bir şekilde yerleştirilmesine dair hesaplama yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen hesaplama yönteminin belirsizlik (uncertainty) değeri incelendiğinde direkt (lineer) olarak yerleştirmeye göre daha iyi sonuç gösterdiği elde edilmiştir. Bu yöntemin pozisyon çözünürlüğü incelendiğinde maksimum 0.4 metre çözünürlükte pozisyon bilgisi iletimine olanak sağladığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında IFF sistemi ile hava platformuna küresel konum bilgisinin efektif bir şekilde sağlanabildiği ortaya koyulmuştur. Öte yandan ortaya konulan bu yöntemin günümüz hava trafik kontrol standartlarına aykırı olmadığı ve geriye dönük uyumlu (backward compatible) bir yöntem olduğu gösterilmiştir.

Hava trafik gözetim merkezlerinde birden sensör ile platformunu konumunu tespit edip bu konum verilerini füzyon edebilmektedir. Bu füzyon edilen konum verileri platformun konumunu daha yüksek hassasiyette ve doğrulukta tespit edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntem ile bu konum bilgisinin hava platformuna IFF sistemi ile iletilmesine dair ilerleyen çalışmaya temel oluşturmaktadır.

Gelecekteki diğer çalışma ise havadan havaya konum bilgisinin sağlanmasıdır. Günümüz TCAS/ACAS sistemleri IFF sisteminin haberleşme altyapısını kullanmakta ve sorgulayıcıdaki gini sorgu cevap ile karşı platformun konumu tespit edebilmektedir [64]. Bu konum verisini bu yöntemler ile karşı platforma iletilmesine yönelik çalışmalara da temel oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Alaa Fahmy and KH Moustafa. A survey of iff systems. In *The International Conference on Electrical Engineering*, volume 5, pages 1–11. Military Technical College, **2006**.
- [2] International Civil Aviation Organization. *Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation aeronautical telecommunications volume IV surveillance radar and collision avoidance systems*. International Civil Aviation Organization, 999 University Street, Montréal, Quebec, Canada, ISBN 978-92-9249-537-4 edition, **2014**.
- [3] International Civil Aviation Organization. *Doc 9924 AN/474 Aeronautical Surveillance Manual*. International Civil Aviation Organization, 999 University Street, Montréal, Quebec, Canada, ISBN 978-92-9231-690-7 edition, **2010**.
- [4] International Civil Aviation Organization (ICAO). Mode s daps implementation and operations guidance document. Retrieved from <https://www.icao.int/APAC/Documents/edocs/Mode%20S%20DAPs%20Implementation%20and%20Operations%20Guidance%20Document%20Ed%205.pdf>, **2024**.
- [5] Azimut: Product catalog, **2024**. Accessed: 2024-09-08.
- [6] Rockwell International. What is a transponder? <https://www.peel.dk/Rockwell%20International%20-%20What%20Is%20a%20Transponder.pdf>, **n.d.** Accessed: 2024-09-09.
- [7] Carl Carter. Principles of gps. *A Brief Primer on the Operation of the Global Positioning System*, ALLEN OSBORNE ASSOCIATES, **1997**.
- [8] Shankar Achanta, Steve T Watt, and Eric Sagen. Mitigating gps vulnerabilities. In *Proceedings of the 17th annual power and energy automation conference*. **2015**.

- [9] EUROCONTROL. GNSS. <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-03/eurocontrol-sf-gnss-iata.pdf>, **2021**. Accessed: 2024-08-28.
- [10] DJA Weeda, LP Ligthart, LR Nieuwkerk, and DCM van der Klein. Quantitative estimation of secondary surveillance radar information. *The Journal of Navigation*, 45(1):26–35, **1992**.
- [11] North Atlantic Treaty Organization. *STANAG 4193*. North Atlantic Treaty Organization, **1990**.
- [12] R. M. Trim. Mode s: An introduction and overview. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 2(2):53–59, **1990**.
- [13] Radio Technical Commission for Aeronautics. *Minimum Operational Performance Standards for Air Traffic Control Radar Beacon System/Mode Select (ATCRBS/Mode S) Airborne Equipment*. RTCA DO-181E. Radio Technical Commission for Aeronautics, Washington, DC, **2011**.
- [14] Manuel L Garcia, John M Hoffman, Jeffrey L Rowley, and Daniel L Stone. Test for success: next generation aircraft identification system rf simulation. In *2007 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference*, pages 1–10. IEEE, **2007**.
- [15] Michael C Stevens. Secondary surveillance radar. artech house. *Inc.: Norwood, MA, USA*, **1988**.
- [16] Junzi Sun. The 1090 megahertz riddle: a guide to decoding mode s and ads-b signals. *TU Delft OPEN Publishing*, **2021**.
- [17] On Countermeasures. Manpads proliferation reduction by design. *Small Arms*, 2, **2015**.
- [18] MC Stevens. New developments in secondary-surveillance radar. *Electronics and Power*, 31(6):463–466, **1985**.

- [19] W Kolosowski, E Sedek, M Borejko, and A Jeziorski. Monopulse iff antennas. In *MIKON 2008-17th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications*, pages 1–4. IEEE, **2008**.
- [20] G Jacovitti. Performance analysis of monopulse receivers for secondary surveillance radar. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, (6):884–897, **1983**.
- [21] G. Jacovitti. Performance analysis of monopulse receivers for secondary surveillance radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-19(6):884–897, **1983**. doi:10.1109/TAES.1983.309400.
- [22] Iryna Svyd, Ivan Obod, Oleksandr Maltsev, Inna Shtykh, Galyna Maistrenko, and Ganna Zavolodko. Comparative quality analysis of the air objects detection by the secondary surveillance radar. In *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, pages 724–727. **2019**. doi:10.1109/ELNANO.2019.8783539.
- [23] P Poornima, B Roja Reddy, and BG Anantha Murthy. Design and simulation of two-chain monopulse receiver for iff radar application. In *2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, pages 1114–1118. IEEE, **2018**.
- [24] Steven D Thompson and James M Flavin. Surveillance accuracy requirements in support of separation services. *Lincoln Laboratory Journal*, 16(1):97, **2006**.
- [25] Onur PEKER and Deniz AKDUR. A method for elimination of false iff target reports by using isls and rsls techniques. In *2019 Signal Processing Symposium (SPSymo)*, pages 315–318. IEEE, **2019**.
- [26] Tora Lutnaes. Probability of positive identification with an iff e-scan system, **2018**.

- [27] Francois Le Neindre, Guillaume Ferre, Dominique Dallet, Frankie Letellier, and Kevin Pitois. A successive interference cancellation-based receiver for secondary surveillance radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 59(2):805–816, **2023**. doi:10.1109/TAES.2022.3193649.
- [28] Petr Švábeník, David Zeman, Radek Balada, and Zbyněk Fedra. Separation of secondary surveillance radar signals. In *2011 34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, pages 487–490. **2011**. doi:10.1109/TSP.2011.6043683.
- [29] N. Petrochilos and A.J. van der Veen. Algorithms to separate overlapping secondary surveillance radar replies. In *2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, volume 2, pages ii–49. **2004**. doi:10.1109/ICASSP.2004.1326191.
- [30] N. Petrochilos, G. Galati, L. Mene, and E. Piracci. Separation of multiple secondary surveillance radar sources in a real environment by a novel projection algorithm. In *Proceedings of the Fifth IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, 2005.*, pages 125–130. **2005**. doi:10.1109/ISSPIT.2005.1577082.
- [31] N. Petrochilos, G. Galati, and E. Piracci. Projection techniques for separation of multiple secondary surveillance radar sources in a real environment. In *Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing, 2006.*, pages 344–348. **2006**. doi:10.1109/SAM.2006.1706151.
- [32] Nicolas Petrochilos and Alle-Jan van der Veen. Algebraic algorithms to separate overlapping secondary surveillance radar replies. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55(7):3746–3759, **2007**. doi:10.1109/TSP.2007.894248.
- [33] KE Harris. Some problems of secondary surveillance radar systems. *Journal of the British Institution of Radio Engineers*, 16(7):355–382, **1956**.

- [34] H. Leslie Crane and Robert R. Eftekari. Monopulse secondary surveillance radar azimuth error distribution analysis. In *2010 Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceedings*, pages L7–1–L7–11. **2010**. doi:10.1109/ICNSURV.2010.5503340.
- [35] Gheorghe Munteuan, Tudor Palade, Emanuel Puschita, Paul Dolea, and Andra Pastrav. Monopulse secondary surveillance radar coverage—determinant factors. *Sensors*, 21(12):4198, **2021**.
- [36] R.R. Jr. Carson, M.P. Meyer, and D.J. Peters. Fusion of iff and radar data. In *16th DASC. AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Reflections to the Future. Proceedings*, volume 1, pages 5.3–9. **1997**. doi:10.1109/DASC.1997.635094.
- [37] Tang Yong, Wu Honggang, Xu Zhili, and Huang Zhongtao. Ads-b and ssr data fusion and application. In *2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE)*, volume 2, pages 255–258. **2012**. doi:10.1109/CSAE.2012.6272769.
- [38] Iryna Syvd, Oleksandr Maltsev, Ivan Obod, and Ganna Zavolodko. Fusion method of primary surveillance radar data and iff systems data. In *2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, pages 336–340. **2020**. doi:10.1109/DESSERT50317.2020.9125040.
- [39] Jiushun Ni, Lihu Chen, Sunquan Yu, and Aobo Luo. Analysis and application of spaceborne mode s and ads-b data fusion. In *2021 International Conference on Big Data Engineering and Education (BDEE)*, pages 51–55. **2021**. doi:10.1109/BDEE52938.2021.00015.
- [40] Dietrich Fränken and Andreas Hüpper. Aircraft positioning with secondary surveillance radar and time of arrival measurements. In *2013 14th International Radar Symposium (IRS)*, volume 1, pages 355–360. **2013**.

- [41] Mauro Leonardi and Davide Di Fausto. Secondary surveillance radar transponders classification by rf fingerprinting. In *2018 19th International Radar Symposium (IRS)*, pages 1–10. **2018**. doi:10.23919/IRS.2018.8448244.
- [42] Mauro Leonardi, Martin Strohmeier, and Vincent Lenders. On jamming attacks in crowdsourced air traffic surveillance. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 36(6):44–54, **2021**. doi:10.1109/MAES.2021.3054681.
- [43] Saulius Rudys, Jurgis Aleksandravicius, Rimvydas Aleksiejunas, Andriy Konovaltsev, Chen Zhu, and Lukasz Greda. Physical layer protection for ads-b against spoofing and jamming. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 38:100555, **2022**. ISSN 1874-5482. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2022.100555.
- [44] Xue Du, Xiaofeng Shen, and Kuo Liao. Secondary surveillance radar signal processing based on two-channel deep residual network. In *2020 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, pages 1–5. **2020**. doi:10.1109/ICSPCC50002.2020.9259499.
- [45] Mauro Leonardi and Emilio Giuseppe Piracci. Ads-b degarbling and jamming mitigation by the use of blind source separation. In *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pages 1–5. **2018**. doi:10.1109/DASC.2018.8569598.
- [46] E.A. El-Badawy, W.A. EL-Masry, M. A. Mokhtar, and Alaa S. Hafez. A secured chaos encrypted mode-s aircraft identification friend or foe (iff) system. In *2010 4th International Conference on Signal Processing and Communication Systems*, pages 1–6. **2010**. doi:10.1109/ICSPCS.2010.5709756.
- [47] Maria Andersson and Michael Ilestrand. Data fusion of secondary and primary surveillance radars for increased robustness in air-traffic monitoring. In *2007 European Microwave Conference*, pages 1735–1738. IEEE, **2007**.

- [48] Chr. Kabakchiev and I. Garvanov. Cfar bi technique for secondary surveillance radar. In *2008 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles*, pages 1–4. **2008**. doi:10.1109/TIWDC.2008.4649042.
- [49] Khanh D. Do, Loi V. Nguyen, Thanh N. Nguyen, Thang M. Nguyen, and Vu T. Tran. A method for processing unwanted target caused by reflection in secondary surveillance radar. In *2022 14th International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS)*, pages 135–143. **2022**. doi:10.1109/ICSPS58776.2022.00029.
- [50] Hume F Rainsford. Long geodesics on the ellipsoid. *Bulletin Géodésique (1946-1975)*, 37:12–22, **1955**.
- [51] BR Bowring. The further extension of the gauss inverse problem. *Survey Review*, 20(151):40–44, **1969**.
- [52] Thaddeus Vincenty. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations. *Survey review*, 23(176):88–93, **1975**.
- [53] Charles FF Karney. Geodesics on an ellipsoid of revolution. *arXiv preprint arXiv:1102.1215*, **2011**.
- [54] Charles FF Karney. Algorithms for geodesics. *Journal of Geodesy*, 87:43–55, **2013**.
- [55] V. Fisikopoulos. Geodesic algorithms: An experimental study. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W14:45–47, **2019**. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W14-45-2019.
- [56] Özge Gizem Esenbuğa, Alper Akoğuz, Emre Çolak, Beril Varol, and Bihter Erol. Comparison of principal geodetic distance calculation methods for automated province assignment in turkey. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 2:141–148, **2016**.

- [57] EUROCONTROL. Surveillance modes: Principles of modes operation and interrogator codes. Retrieved from <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/surveillance-modes-principles-of-modes-operation-and-interrogator.pdf>, **2003**.
- [58] Vincent A Orlando. The mode s beacon radar system. *The Lincoln Laboratory Journal*, 2(3):345–362, **1989**.
- [59] Robert D Grappel, Garrett S Harris, Mark J Kozar, and Randall T Wiken. Elementary surveillance (els) and enhanced surveillance (ehs) validation via mode s secondary radar surveillance. *Project Report ATC-337, Lincoln Lab., MIT*, **2008**.
- [60] Vikky Aprelia Windarni and Adi Setiawan. Comparative analysis of vincenty and geodesic method approaches in measuring the distance between subdistrict offices in salatiga city. *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan*, 16(4):1207–1220, **2022**.
- [61] EUROCONTROL. Eurocontrol specification for the atfcm services - edition 4.0. Technical report, EUROCONTROL, **2021**. Accessed: 2024-09-08.
- [62] Charles Karney. *GeographicLib: C++ Library for Geographic Calculations - Documentation*, **2024**. Accessed: 2024-09-08.
- [63] CM Thomas and WE Featherstone. Validation of vincenty’s formulas for the geodesic using a new fourth-order extension of kivioja’s formula. *Journal of Surveying engineering*, 131(1):20–26, **2005**.
- [64] William H Harman. Tcas- a system for preventing midair collisions. *The Lincoln Laboratory Journal*, 2(3):437–457, **1989**.