

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTRONİK DESTEK SİSTEMLERİ İÇİN GERÇEK ZAMANLI
UYGULANABİLİR TEK DARBE YÖN BULMA ALGORİTMALARI**

Abdullah Emin GÜREL

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**ANKARA
2020**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Abdullah Emin GÜREL tarafından hazırlanan “Elektronik Destek Sistemleri için Gerçek Zamanlı Uygulanabilir Tek Darbe Yön Bulma Algoritmaları” adlı tez çalışması 06/02/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Gökhan SOYSAL
Ankara Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Juri Üyeleri :

Başkan: Doç. Dr. Emre ÖZKAN
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Murat EFE
Ankara Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Gökhan SOYSAL
Ankara Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



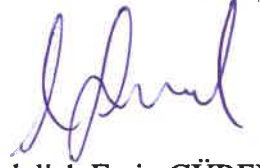
Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Özlem YILDIRIM
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

06/02/2020



Abdullah Emin GÜREL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRONİK DESTEK SİSTEMLERİ İÇİN GERÇEK ZAMANLI UYGULANABİLİR TEK DARBE YÖN BULMA ALGORİTMALARI

Abdullah Emin GÜREL

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan SOYSAL

Elektronik destek sistemlerinde, elektronik harp ortamında bulunan tehdit radarların tespiti, ayrıştırılması ve kimliklendirilmesi işlemleri gerçekleştirilir. Elektronik destek sistemleri belirtilen işlemleri yerine getirebilmek için tespit edilen tehdit radar sinyallerinin karakteristik parametrelerini gerçek zamanlı olarak çıkarır. Tehdit radar sinyalinden çıkartılan parametrelerden bir tanesi tehdit yön bilgisidir. Tehdit yön bilgisinin radarın konumsal yerleşimi nedeni ile anlık olarak değiştirilememesi özellikle tehdit yoğun ortamlarda ayrıştırma işlemlerini kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle tehdit yön bilgisinin yüksek doğrulukta tespit edilmesi elektronik destek sistemleri için kritik öneme sahiptir. Bu tez kapsamında elektronik destek sistemlerinde kullanılan tek darbe yön bulma algoritmaları analiz edilmiştir. Alan ve doğruluk parametreleri göz önüne alınarak önerilen optimum anten yerleşimi için hibrit yön bulma algoritması gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır. Benzetim ortamında yapılan analizler sonucunda önerilen gerçek zamanlı algoritmanın 180 derece bakış açısında, en yüksek 0,24 derece RMS hata ile 188 nano saniye içinde tehdit yön tespiti gerçekleştirdiği gösterilmiştir.

Şubat 2020, 71 sayfa

Anahtar Kelimeler: Tek Darbe Yön Bulma, Elektronik Destek, Elektronik Harp, Genlik Karşılaştırma, Faz Karşılaştırma, Interferometre, Gerçek Zamanlı Yön Bulma Algoritmaları.

ABSTRACT

Master Thesis

REAL TIME APPLICABLE MONOPULSE DIRECTION FINDING ALGORITHMS FOR ELECTRONIC SUPPORT SYSTEMS

Abdullah Emin GÜREL

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Gökhan SOYSAL

In electronic support systems; detection, separation and identification of threat radars in electronic warfare environment are performed. Electronic support systems obtain the characteristic parameters of the detected threat radar signals in real time to execute the specified tasks. One of the parameters achieved from the detected threat signal is the direction information of the threat. The threat direction information cannot be manipulated instantly due to the location of the radar. This facilitate threat separation especially in threat-intensive environment. Therefore, high accuracy detection of the threat direction information is critical for electronic support systems. In this thesis, monopulse direction finding algorithms used in electronic support systems are analyzed. Hybrid direction finding algorithm is applied in real time for the proposed optimum antenna placement considering the area and accuracy parameters. As a result of the analysis in simulation environment, it is shown that proposed real time algorithm provides threat direction finding in 188 nano seconds with the highest 0.24 degree RMS error in 180 degree angle of view.

February 2020, 71 pages

Key Words: Monopulse Direction Finding, Electronic Support, Electronic Warfare, Amplitude Comparison, Phase Comparison, Interferometry, Real Time Direction Finding Algorithms.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımı yönlendiren, araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek yetişmeme ve gelişmeme katkıda bulunan danışman hocam sayın Dr. Gökhan SOYSAL'a içtenlikle teşekkür ederim. Başta Adnan ORDUYILMAZ ve Mustafa AÇILI olmak üzere çalışmalarıma katkıda bulunan tüm ekip arkadaşlarıma ve bu tez çalışmasının oluşmasında büyük katkıları bulunan TÜBİTAK BİLGEM İLTAREN'e çok teşekkür ederim. Çalışmalarım ve hayatım süresince desteklerini hiç esirgemeyen aileme, eősiz fedakarlıkları ile hep arkamda olduğumu hissettiren hayat arkadaşım Zehra Nur'a, beni beklediği zaman diliminde sabır gösteren, buluşma anında hissettirdiği muhabbet ile beni yenileyen kızım Sueda'ya en derin duygularıyla teşekkür ederim.

Abdullah Emin GÜREL
Ankara, Şubat 2020

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	
ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	9
2.1 Radar.....	9
2.1.1 Radar sistemleri	12
2.1.2 Radar mesafe eşitliği.....	14
2.2 Elektronik Destek	16
2.2.1 Elektronik destek sistemleri	17
2.2.2 Elektronik destek mesafe eşitliği.....	19
2.3 Elektronik Destek Sistemlerinde Yön Bulma Yöntemleri	21
2.3.1 Yönlü anten kullanımı	22
2.3.2 Watson-Watt yöntemi	23
2.3.3 Doppler yöntemi.....	24
2.3.4 Dizi sinyal işleme yöntemleri	25
2.3.5 Tek darbe yöntemleri.....	26
2.3.5.1 Genlik karşılaştırma yöntemi.....	27
2.3.5.2 Faz karşılaştırma yöntemi.....	28
2.3.5.3 Hibrit yön bulma yöntemi	32
3. MATERYAL ve YÖNTEMLER	35
3.1 Tehdit Radar Sinyallerinin Oluşturulması	35
3.2 Genlik Karşılaştırma Yöntemi	41
3.3 Faz Karşılaştırma Yöntemi	42
3.4 Hibrit Yön Bulma Yöntemi	43
4. BAŞARIM DEĞERLENDİRMESİ	45
4.1 Genlik Karşılaştırma Yöntemi Analizi.....	45
4.2 Faz Karşılaştırma Yöntemi Analizi	49
4.3 Hibrit Yön Bulma Yöntemi Analizi	55
4.4 Yöntemlerin Karşılaştırılması	60
5. GERÇEK ZAMANLI UYGULAMA	62
6. SONUÇ.....	66
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ	71

SİMGELER DİZİNİ

dB	Desibel
ns	Nano Saniye
um	Mikrometre
cm	Santimetre
GHz	Giga Hertz
MHz	Mega Hertz
λ	Sinyal Dalga Boyu

Kısaltmalar

ASD	Analog Sayısal Dönüştürücü
ED	Elektronik Destek
TRSÜ	Tehdit Radar Sinyal Üretici
SODA	İkincil Düzey Fark Dizisi (Second Order Difference Array)
RMS	Kareler Ortalamasının Karekökü (Root Mean Square)
RF	Radyo Frekans
IFM	Anlık Frekans Ölçümü (Instantaneous Frequency Measurement)
FPGA	Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Array)
SNR	Sinyal Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)
SHR	Taramalı Almaç (Superheterodyne Receiver)
MUSIC	Çoklu Sinyal Sınıflandırma (Multiple Signal Classification)
LUT	Arama Çizelgesi (Look Up Table)
RAM	Rastgele Erişimli Hafıza (Random Access Memory)
DSP	Sayısal Sinyal İşleyici (Digital Signal Processor)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Radar hedef tespit prensibi.....	11
Şekil 2.2	Radar fonksiyonel blok şema	13
Şekil 2.3	Elektronik harp ortamında bulunan sinyal formları.....	17
Şekil 2.4	ED sistemi fonksiyonel blok şeması	18
Şekil 2.5	Yönlü anten kullanımı	22
Şekil 2.6	Watson-Watt yöntemi	23
Şekil 2.7	Doppler yöntemi.....	24
Şekil 2.8	Genlik karşılaştırma yöntemi.....	27
Şekil 2.9	Sinyal geliş açısına göre antenlerde gözlenen faz farkı.....	29
Şekil 2.10	Faz farkına karşılık gelen belirsizlik açıları	31
Şekil 2.11	SODA yöntemi kavramsal yerleşim	31
Şekil 2.12	Hibrit yöntem kavramsal yerleşim	33
Şekil 3.1	Sinyal geliş açısına göre antenlerde gözlenen genlik farkı	37
Şekil 3.2	Spiral eşit açılı anten örüntüsü.....	38
Şekil 3.3	Sinyal geliş açısına göre antenlerde gözlenen faz farkı.....	39
Şekil 3.4	Örnek yerleşim anten örüntüleri.....	40
Şekil 3.5	Örnek yerleşim sinyalleri.....	40
Şekil 3.6	Genlik karşılaştırma yöntemi blok şeması.....	41
Şekil 3.7	Faz karşılaştırma yöntemi blok şeması	42
Şekil 3.8	Hibrit yön bulma yöntemi blok şeması	44
Şekil 4.1	3 anten genlik karşılaştırma yöntemi (a) RMS hata değişimi (b) beklenen genlik farkı değişimi.....	46

Şekil 4.2	4 anten genlik karşılaştırma yöntemi (a) RMS hata değişimi (b) beklenen genlik farkı değişimi.....	47
Şekil 4.3	Farklı radar frekanslarında genlik karşılaştırma yöntemi RMS hata değişimi	48
Şekil 4.4	Faz karşılaştırma yöntemi (a) RMS hata değişimi (b) faz farkı değişimi ..	50
Şekil 4.5	Yaklaştırılmış anten yerleşimi ile (a) RMS hata değişimi (b) faz farkı değişimi	51
Şekil 4.6	Farklı radar frekanslarında faz karşılaştırma yöntemi RMS hata değişimi	52
Şekil 4.7	Frekans bilgisi hatası ie RMS hata değişimi	54
Şekil 4.8	Faz merkezleri arası mesafe bilgisi hatası ile RMS hata değişimi	54
Şekil 4.9	Hibrit yön bulma yöntemi RMS hata değişimi	56
Şekil 4.10	Yaklaştırılmış yerleşim ile RMS hata değişimi	57
Şekil 4.11	Farklı radar frekanslarında hibrit yöntem RMS hata değişimi	58
Şekil 4.12	Frekans bilgisi hatası ie RMS hata değişimi	59
Şekil 4.13	Faz merkezleri arası mesafe bilgisi hatası ile RMS hata değişimi	60
Şekil 5.1	Gerçek Zamanlı Uygulama Blok Şeması	63
Şekil 5.2	Gerçek zamanlı uygulama RMS hata değişimi	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Radar Frekans Bantları	12
Çizelge 2.2	Radar parametreleri	16
Çizelge 2.3	Elektronik destek ve radar sistemi parametreleri	21
Çizelge 5.1	FPGA Tasarımı Kaynak Kullanımı	65



1. GİRİŞ

Elektronik harp askeri terminolojide elektromanyetik spektrumun askeri amaçlar ile kontrol edilmesi olarak tanımlanır. Askeri alanda kullanılan radar sistemleri, güdümlü silah sistemleri, haberleşme sistemleri, kızılötesi sistemler, görüntüleme sistemleri elektromanyetik spektrumun belirli frekans aralıklarını kullanan elektronik harp sistemleridir. Elektromanyetik spektrumun kullanıldığı alanlar ve spektrum kullanılarak gerçekleştirilebilen işlemler düşünüldüğünde elektronik harbin çok geniş bir kapsamda faaliyetler içerdiği anlaşılmaktadır. Elektronik harp kapsamında gerçekleştirilen faaliyetlerin amacı söz konusu elektronik sistemleri kullanarak komuta kontrol ve operasyonel kabiliyetleri arttırmak veya düşman tarafından yine aynı amaçlarla kullanılan sistemlerin tespiti ve etkisiz hale getirilerek sahada düşman kabiliyetlerinin azaltılmasıdır. Gelişen teknoloji ile birlikte her alanda olduğu gibi askeri alanda da birçok faaliyetin elektronik sistemler tarafından gerçekleştirildiği ve mümkün her durumda insan kaybını en az düzeye indirmek için elektronik sistemlerin kullanıldığı düşünüldüğünde elektronik harp kavramının önemi bir kez daha anlaşılmaktadır.

Elektronik harp kapsamında gerçekleştirilen faaliyetler elektronik taarruz, elektronik korunma ve elektronik destek olmak üzere üç alan altında toplanmaktadır. Elektronik taarruz çeşitli teknikler kullanılarak düşman sistemlerinin görevini yerine getiremez hale getirilmesi ya da yanıltılması faaliyetlerini içerir. Elektronik taarruz kapsamında uygulanan bazı teknikler düşman sistemleri sadece uygulama anında etkisiz hale getirmekte veya bazı fonksiyonlarını kullanması engellenmektedir. Bu tekniklerin uygulanması durduğu anda düşman sistemler herhangi bir zarar görmeden çalışmaya devam edebilmektedir. Bu tekniklerin yanı sıra direkt enerji silahları ile düşman sistemlerin alıcı katları yüksek elektromanyetik enerjiye maruz bırakılarak yakılırken karşıt yayılım füzeleri ile sistem imha edilir. Elektronik taarruzun bu gibi yöntemleri ile sistemler tamamen kullanılamaz hale getirilmektedir. Elektronik korunma kapsamında sistemlerin elektronik taarruz tekniklerine karşı korunma faaliyetleri ile fonksiyonlarını yerine getirebilir halde kalmaları amaçlanır. Haberleşme hatlarının güvenliği de bu alan altında gerçekleştirilen faaliyetlerle sağlanmaktadır. Elektronik destek kapsamında

gerçekleştirilen faaliyetler ise gerçek zamanlı tehdit tespit ve sınıflandırma sonrasında elektronik taarruz, elektronik korunma ve silah sistemlerinin karar mekanizmalarına girdi sağlamak ve durumsal farkındalık oluşturmaktır.

Elektronik harp kavramı radar sistemleri göz önüne alınarak incelendiğinde söz konusu sistemler, düşman unsurların tehdit oluşturduğu alanın dışında iken tespiti ile komuta kontrol faaliyetlerini kolaylaştırır. Bununla birlikte güdüm radarlarına sahip silahlar, tehdit oluşturan düşman unsurların imhası için kullanılarak operasyonel kabiliyet artırılır. Dost unsurların düşman sahasına geçtiği durumda ise tespit ve imha amaçlı kullanılan radarlar tehdit oluşturmaya başlamaktadır. Bu durumda elektronik harp kapsamında gerçekleştirilen faaliyetler, elektronik destek sistemleri ile durumsal farkındalık sağlanarak başlamaktadır ve tehdit oluşturan tespit radarlarının elektronik taarruz yöntemleri kullanılarak kör edilmesi veya hatalı tespit yapması sağlanması ile devam etmektedir. Tehdit oluşturan güdüm radarlarına sahip silahlar için ise elektronik harp kapsamında çeşitli teknikler uygulanarak güdüm hedef saptırma amaçlanır. Görüldüğü gibi sistemlerin elektronik harp alanında üstlendiği göreve göre gerçekleştirdiği elektronik harp faaliyeti ve kabiliyeti farklılıklar göstermektedir.

Tarihte elektronik harp faaliyeti olarak tanımlanabilecek ilk işlem 1905 yılında Rus torpido botu tarafından Japon kruvazörünün telsiz haberleşmesinin dinlenmesidir. 1. Dünya savaşı yıllarına gelindiğinde ise İngiliz radyo yön bulucuları ile Alman donanmasının hareketlerinin belirlenmesi İngiliz donanmasının başarı elde etmesini sağlamıştır. Elektronik harp sistemleri geniş kapsamlı olarak ilk defa 2. Dünya savaşı sırasında kullanılmaya başlanmıştır. Sistemlerin tespit edilen unsurların dost düşman ayrımı fonksiyonu özellikle gece operasyonlarında etkisini kanıtlamıştır. 1941 yılında balonlarda bulunan radar yansıtıcılar ile Alman radarlarında sahte filolar oluşturan müttefik kuvvetler Normandiya çıkarması sırasında Alman savunma hattını zayıflatmıştır. Yine aynı yıl Almanlar tarafından İngilizlerin Manş denizini kontrol eden radar sistemleri karıştırılmıştır. Düşman radarlarını aldatmaya yönelik yapılan pasif bir işlem olan Chaff atma 1943 yılında gerçekleşen Hamburg gece bombardımanı sırasında kullanılmış ve Alman hava savunma radarlarını etkisiz hale getirmiştir. Soğuk savaş

döneminde yeni geliştirilen radar sistemleri hakkında bilgi edinmek amacı ile sinyal istihbarat uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Vietnam savaşı sırasında radar ikaz alıcı ve karşıt yayılım füzeleri kullanan Amerika, 1972 yılında uzaktan karıştırma uçakları ile Rus yapımı Vietnam radarlarını karıştırmıştır (Price, 2017). 1982 yılında gerçekleşen İsrail Suriye savaşında İsrail erken uyarı uçakları, uzaktan karıştırma uçakları, radar ikaz alıcı, Chaff/Flare ve IR güdümlü füze mühimmatları ile donatılmış savaş uçakları, kamera, lazer işaretleyici ve uçak ekosu oluşturabilen yansıtıcı ile teçhiz edilmiş insansız hava araçlarını kullanarak bütünleşik bir elektronik taarruz gerçekleştirmiştir (Dinç 2010). Son yıllarda yaşanan Irak ve Suriye savaşlarında kullanılan modern bütünleşik elektronik harp sistemleri ise teknoloji sahibi ülkelerin harp sahasında yaşadığı avantajları bir kez daha göstermiştir. Tarihte görüldüğü gibi elektronik harp sistemlerini etkin kullanan taraflar operasyonlar sırasında büyük avantajlar elde etmiş ve başarıya ulaşmışlardır. Bu nedenle günümüzde savunma sanayiine önem veren ülkeler elektronik harp konusunda son teknolojileri yakalamak için yarışmaktadır.

Elektronik harp sistemlerinin bir alt kolu olan elektronik destek sistemleri, elektromanyetik yayın yapmadan, elektronik harp ortamında bulunan ve tehdit oluşturan radar sistemlerinden gelen RF yayınları dinleyerek tehdit tespit ve sınıflandırması yapan pasif sistemlerdir. Tehdit radarlar yere konuşlu bir sistem ya da uçak, gemi benzeri hareketli bir platform üzerinde olabileceği gibi bir silah sistemi üzerinde de olabilmektedir. Tehdit radarlar ilk olarak arama radarları ile elektronik destek sisteminin üzerinde bulunduğu platformu tespit ederler. Tehdit radarlar tarafından tespit edilen platform radar güdümlü silah sistemleri ile imha edilmek istenir. Bu nedenle elektronik harp ortamında durumsal farkındalık oluşturmak ve tehdit radara karşı tedbir yöntemlerini belirlemek için kullanılan elektronik destek sistemleri hayati öneme sahip olabilmektedir.

Pasif sistemler olan elektronik destek sistemleri alıcı yapısı ve alıcı yapısının arkasında bulunan veri işleme biriminden oluşmaktadır. Alıcı yapısında tehdit radardan gelen RF sinyal tespit edilip özellikleri çıkarılırken bilgi işleme biriminde sinyalin özelliklerine göre değerlendirme ve karar verme işlemleri gerçekleştirilir (Adamy 2001). Sistemin

kullandığı alıcı yapısının mimarisi ise elektronik destek sisteminin kabiliyetini belirleyen en önemli tasarım ögesidir. Elektronik harp sistemlerinin spektrumun geniş bantlarını kullandığı düşünüldüğünde alıcı yapılarının geniş bantta çalışması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle elektronik destek sistemleri temel olarak geniş bantlı alıcı yapıları olarak düşünülebilir. Alıcı tasarımında ana amaç ise gerçek zamanlı sinyal işleme ile kullanılan yöntemlerin en hızlı şekilde sonuç vermesini sağlamaktır (Tsui 2005). Bir diğer önemli parametre ise elektronik destek sisteminin aynı anda tespit edebileceği en yüksek ve en düşük sinyal gücünü belirten dinamik alandır.

Kullanılan ilk elektronik destek sistemleri kristal video alıcı yapıları ile tasarlanmış sistemlerdir. Antenler aracılığı ile alınan RF işaretin video işarete dönüştürülmesi yöntemi ile çalışan alıcılar yüksek bant genişliği sağlarken dinamik alan ve ölçüm doğruluğu açısından yüksek performans sağlayamamaktadır (Martino, 2012). Anlık frekans ölçümü (*Instantaneous Frequency Measurement IFM*) prensibi ile çalışan alıcılar ise bant genişliği, dinamik alan ve ölçüm doğruluğu performansı bakımından tercih edilen alıcı yapılarıdır. Günümüzde hala kullanılabilen IFM alıcı yapılarının en büyük dezavantajı ise anlık olarak tek tehditte gelen sinyal ile çalışabiliyor olmasıdır. ASD teknolojisinde yaşanan gelişmeler alıcı tasarımına yeni bir boyut kazandırmıştır. ASD'lerin yüksek örnekleme frekansında çalışabiliyor olması anlık bant genişliğini arttırmıştır. Ayrıca bit sayıları artırılarak nicemleme hataları azaltılmış ve ASD ile sağlanabilen dinamik alan arttırılmıştır. Kristal video alıcı yapılarında, tespit edilen sinyalin frekans ve faz değerleri kaybolmaktadır. ASD'ler ile tasarlanan sayısal alıcı yapılarında ise sinyalin frekans ve faz bilgilerinin korunmasının yanı sıra örneklenen sinyallerin kayıt edilebilmesi de mümkündür. Sayısal alıcı yapılarında kullanılan FPGA'ler sayesinde yeniden programlanabilen sistemler göreve göre değişen kabiliyetler kazanabilmektedir. Ayrıca sayısal alıcı yapıları sistemlerin performans ve etkinliğini arttırırken kapladığı alan ve güç tüketimini azaltmıştır. Birçok uygulamada en önemli tasarım parametresinin alan ve güç tüketimi olduğu düşünüldüğünde sayısal alıcı yapılarını alternatifsiz hale gelmektedir. Günümüzde modern elektronik destek sistemleri taramalı ya da kanallı mimariye sahip sayısal alıcı yapılarını kullanmaktadır.

Elektronik destek sistemleri temel olarak tehdit tespit ve sınıflandırma işlemlerini gerçekleştirmektedir. Sistemin çıktıları elektronik harp sistemlerinin diğer birimleri tarafından kullanılabilmesi gibi bir ara yüz birimi aracılığı ile doğrudan kullanıcıya da iletilir. Elektronik destek sistemleri kendisinden beklenen görevleri yerine getirebilmek için tehdit radardan gelen işareti sayısal işaret işleme yöntemleri kullanarak işler. Bu işlemler sonrasında radar çalışma frekansı, işaret gücü, darbe genişliği, darbe geliş zamanı ve tehdit yön bilgisi gibi tehdit hakkında kritik öneme sahip karakteristik parametreler elektronik destek sistemi tarafından elde edilmiş olur.

Tehdit radar işaretinden çıkartılan frekans, darbe genişliği ve darbe tekrarlama sıklığı gibi sinyal formuna bağlı parametreler çevik radarlar tarafından darbeden darbeye değiştirilebilmektedir. Değiştirilen parametreler alınan darbelerin yayıncı ile ilişkilendirilmesini zorlaştırır. Tehdit yön bilgisi ise tehdit radar tarafından sinyal üretimi sırasında kontrol edilemeyen, konumsal yerleşimin değişmesi ile değiştirilebilecek bir parametredir. Tehdit konumu milisaniyeler mertebesinde bir sürede değişmeyeceğinden tehdit yön bilgisi parametresi birden fazla radardan alınan işaretlerin yön bilgilerine göre ayrıştırılmasını sağlayarak tehdiye karşı tedbir yöntemi belirleme işlemini kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte elektronik destek sistemlerinde tehdit yön parametresi çıkarımı üst düzey durumsal farkındalık elde etmek için oldukça kritiktir.

Elektronik destek sistemlerinde yön bulma işleminin gerçekleştirilebilmesi için literatürde farklı yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden bazıları yönlü anten kullanımı, Watson-Watt yöntemi, Doppler yöntemi ve tek darbe yöntemleri olarak sıralanabilir. Yöntemin seçiminde sistemden beklenen yön bulma kabiliyeti ve sistemin parçası olacağı platform belirleyici olmaktadır (Poisel 2014). Yönlü anten kullanımı, Watson-Watt yöntemi ve Doppler yöntemi durumsal farkındalık amaçlanan doğruluk ve hız açısından yüksek performans beklenmeyen sistemlerde kullanılan yöntemlerdendir. Bu yöntemlere kıyasla tek darbe yöntemleri yüksek doğruluk ve hızda yön bilgisi çıkarımı yapabilmektedir. Bunlara ek olarak tek darbe yöntemlerinin alansal olarak sağladığı avantajlar sayesinde elektronik destek sistemlerinde sıklıkla tercih edilen yöntemler olduğu görülmektedir.

Tek darbede yön bulma yöntemleri temel olarak genlik ve faz karşılaştırma algoritmalarını kullanmaktadır (Wiley 1986). Genlik karşılaştırma algoritması, farklı bakış açısı ile yerleştirilmiş antenlerden alınan işaretlerin genlik oranlarının karşılaştırılması prensibi ile çalışmaktadır. Basit alıcı yapıları ile maliyeti düşük olarak gerçekleştirilebilen yöntem, antenlerin birbirine yakın yerleştirilebilmesi ile alansal olarak avantaj sağlayabilmektedir. Faz karşılaştırma algoritması ise aynı düzlem üzerine aralarında belirli mesafeler olacak şekilde yerleştirilmiş antenlerden alınan işaretlerin faz farklarını karşılaştırarak yön bulma işlemini gerçekleştirir. Faz karşılaştırma algoritmasının uygulanabilmesi için faz uyumlu kanallara sahip yüksek maliyetli karmaşık alıcı yapıları kullanılır. Algoritmanın doğruluk performansının artırılması için antenler arası mesafe artırıldığından elektronik destek sisteminin çalışma frekans aralığına göre yüksek alan ihtiyacı doğabilmektedir. Faz karşılaştırma yöntemi maliyet ve alan dezavantajlarına rağmen genlik karşılaştırma yöntemine göre daha yüksek doğruluk değerleri sağlayabildiği için tercih edilmektedir (Lipsky 1987). Genlik ve faz karşılaştırma algoritmalarının birlikte kullanıldığı hibrit yön bulma algoritmasında genlik karşılaştırma yönteminin alan avantajı ile faz karşılaştırma algoritmasının yüksek doğruluk avantajı birleştirilmek istenir. Hibrit algoritmanın amacı küçük alanda doğruluğun artırılmasıdır (Murphy 1996).

Elektronik destek sistemlerinde tehdidin yön bilgisi kullanılarak üst düzey durumsal farkındalık sağlanır. Ayrıca yön bilgisi tehdit radarın konum tespiti ve yoğun tehdit bulunan elektronik harp ortamında birden fazla radar sinyalinin yön bilgisi parametresine göre gruplandırılarak kimliklendirilmesi işlemleri için kritik öneme sahiptir. Kimliklendirme ile tehdidin tanınması tehdiye karşı tedbir için uygulanacak elektronik taarruz tekniğini belirleme işlemlerinde kullanılmaktadır. Yön bilgisi parametresinin elektronik destek sistemlerinde kullanıldığı alan düşünüldüğünde, bu parametrenin her bir darbe için herhangi bir kayıp yaşanmadan mümkün olan yüksek doğruluk ile gerçek zamanlı olarak çıkarılmasının önemi anlaşılmaktadır. Bu nedenlerle elektronik destek sistemlerinde tehdit yön parametresi çıkarımının önemi göz önüne alınarak bu tez kapsamında, elektronik destek sistemlerde kullanılan tek darbe yön bulma yöntemleri analiz edilmiştir. Yöntemlerin gerçek zamanlı uygulamasına yönelik

analizler ModelSim benzetim ortamında yapılmıştır.

Elektronik destek sistemlerinin entegre edileceği askeri platformun hareket kabiliyetini azaltmayacak boyut ve ağırlıkta olması gerekmektedir. Platformların kullandığı diğer sistemlerde göz önüne alındığında tasarımlar belirli boyut, ağırlık ve yerleşim kısıtları göz önüne alınarak yapılmaktadır. Gelişen teknoloji ile elektronik destek sistemlerinin analog ve sayısal birimleri küçülse de yön bulma işlemi için kullanılacak antenlerin yerleşimi sistemi büyütebilmektedir. Bazı durumlarda doğruluk değerini arttıracak yön bulma algoritmaları için uygun anten yerleşimi platform üzerinde uygulanamamaktadır. Bu gibi durumlarda elektronik destek sisteminin küçültülen alıcı yapılarıyla kompakt hale getirilmesi istenmekte, sisteme yön bulma işlemi için eklenen antenlerin kapladığı alanın küçültülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada yöntemler analiz edilirken en küçük alanda en yüksek doğruluğu verecek yöntemin bulunması amaçlanmıştır. Bu kapsamda farklı anten yerleşimleri ve anten örüntüleri ile faz ve genlik karşılaştırma algoritmaları analiz edilmiş, alan ve doğruluk parametreleri göz önüne alınarak optimum bir tasarım önerilmiştir.

Elektronik destek sistemleri tasarlanırken en önemli amaç gerçek zamanlı işaret işleme yöntemleri ile en kısa zamanda sonuca ulaşmaktır. Sayısal alıcı yapılarında anten tarafından alınan sinyaller RF kattan geçtikten sonra ASD ile örneklenir. Örneklenen sinyaller FPGA ortamında işlenerek gerçek zamanlı yön bulma işlemleri gerçekleştirilmiş olur. Bu çalışma kapsamında yapılan gerçek zamanlı uygulamada tek darbe yöntemleri ASD tarafından üretilen her bir tehdit radar sinyali örneği için tehdit yön bilgisini hesaplayabilmektedir. Bu yaklaşımda tek darbe yöntemlerini gerçekleştirmek için ölçülen antenler arası faz ve genlik farkları, bilinen anten yerleşimi ve örüntüleri göz önüne alınarak oluşturulan eşitliklerde kullanılmış ve tehdit yön bilgisinin elde edilmesi sağlanmıştır. Bu sayede literatürde bulunan korelasyon tabanlı kestiricilerin, gerçek zamanlı uygulamalar ile mikro saniyeler mertebesinde elde ettiği tehdit yön bilgisi nano saniyeler mertebesinde elde edilebilmiştir. Sonuç olarak alan ve doğruluk kriterleri göz önüne alınarak seçilen optimum tasarıma uygun en az zaman çevriminde sonuç verecek gerçek zamanlı algoritma geliştirilmiştir.

Bu çalışmada genlik karşılaştırma, faz karşılaştırma ve hibrit tek darbe yön bulma yöntemlerinin doğruluk performans analizleri benzetim ortamında yapılmıştır. Analizler için ilk olarak tehdit radar sinyalleri MATLAB benzetim ortamında elektronik destek sisteminin anten yerleşimi referans alınarak üretilmiştir. Üretilen tehdit radar sinyalleri ile MATLAB benzetim ortamında farklı anten yerleşimleri için uygulanan genlik karşılaştırma, faz karşılaştırma ve hibrit yöntemin doğruluk analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda anten sayısı, parametre doğruluğu ve parametre çıkarım hızı göz önüne alınarak önerilen hibrit yöntemin kullanıldığı 3 anten içeren tasarım ModelSim benzetim ortamında VHDL dili kullanılarak gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır. Gerçek zamanlı uygulaması yapılan algoritmanın parametre çıkarım hızı ve parametre doğruluğu analiz edilmiştir. Ayrıca algoritmanın FPGA biriminde kullandığı kaynaklar Vivado tasarım ortamında incelenmiştir.

Tez kapsamında, yapılan çalışmalar ile ilgili alan hakkında temel bilgiler Bölüm 2’de verilmiştir. Bölüm 3’te oluşturulan benzetim ortamı anlatılmış ve yöntemler hakkında teorik bilgi verilmiştir. 4. Bölümde yöntemlerin başarımları analizleri yapılmış, gerçek zamanlı olarak uygulanacak yöntem belirlenmiştir. Belirlenen yöntem Bölüm 5’de gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır. Son bölümde ise gerçek zamanlı uygulanan algoritmanın sonuçları ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

Tez kapsamında tehdit radarlara karşı kullanılan elektronik destek sistemlerinde yön bulma konusu üzerine çalışılmıştır. Bu nedenle bu bölümde ilk olarak tehdit olarak görülen radar sistemleri hakkında bilgi verilmiş, radar sistemlerinin çalışma prensibi ve radar mesafe eşitliği konularına değinilmiştir. Tehdit radar sistemleri hakkında temel düzeyde bir anlatımdan sonra elektronik destek sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca elektronik destek sistemlerinin yapıları ve elektronik destek mesafe eşitliği anlatılmıştır. Son olarak elektronik destek sistemlerinde kullanılan yön bulma yöntemlerinden bahsedilmiştir.

2.1 Radar

İsmi “**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging” kelimelerinin kısaltmasından alan radarlar uzayın belirli bir bölümüne elektromanyetik enerji yayarak ilgili bölümde hedef tespiti yapmayı amaçlayan sistemlerdir. Arama yapılan uzay bölümünde bulunan cisimlerden dönen yansımalar radar alıcılar tarafından tespit edilip işlenerek hedef hakkında menzil, hız, açı gibi bilgiler elde edilir. Radarlar askeri amaçlar için keşfedilip geliştirilen sistemler olsa da askeri amaçlı kullanımının yanı sıra uzaktan algılama uygulamalarında, hava trafik kontrol uygulamalarında ve birçok sivil uygulamada kullanılmaktadır.

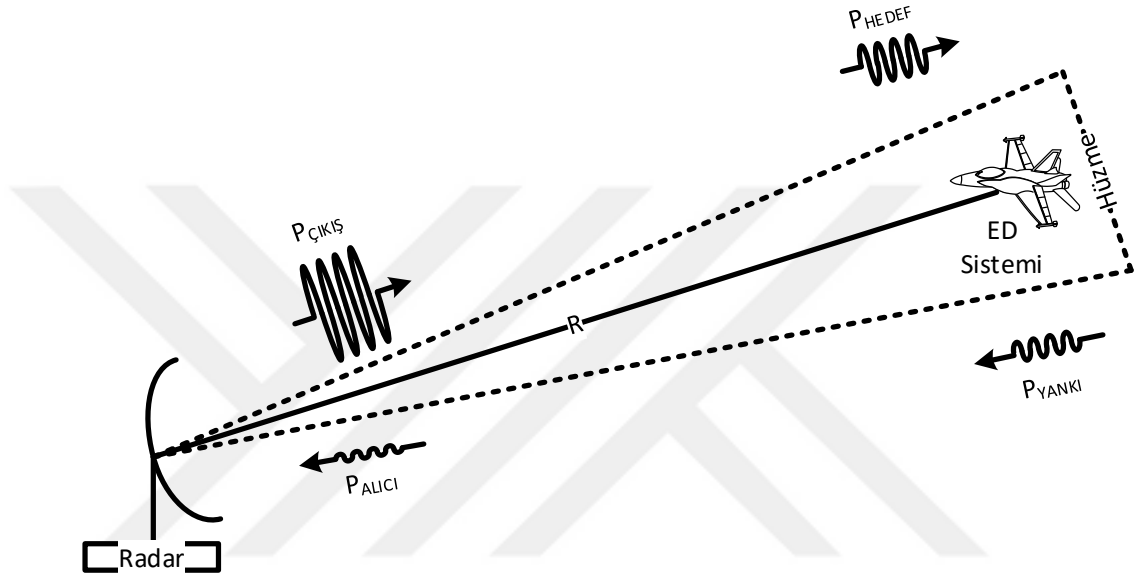
Radar sisteminin özelliklerini belirleyen en büyük etken sistemin hedef olarak belirlediği cisimdir. Hedef, uzaktan algılamak isteyeceğimiz ve elektromanyetik yansıtıcılığa sahip her cisim olabilir. Askeri uygulamalarda hedef cisim uçak, gemi, füze veya kara platformları gibi sistemler olabilmektedir. Uzaktan algılama uygulamalarında ise hava akımları, böcek sürüleri, buzul alanları ve yer altına gömülü cisimler hedef olarak tanımlanabilmektedir. Radarların yoğun bir şekilde kullanıldığı hava trafik kontrolünde ise hedefler ticari uçuş gerçekleştiren uçaklardır. Bu radarlarla hava trafiği güvenli yerden sağlanırken aynı zamanda hava durumuna göre rota çizme işlemleri ile güvenli uçuş rotaları oluşturulur. Kullanıldığı bütün alanlarda aynı temel prensibe göre çalışan radar sistemleri uygulamanın hedef olarak değerlendirdiği cisme göre farklı özellikler ile

donatılır (Mahafza 2013).

Radarlar tarafından hedef hakkında farklı bilgiler elde edilebilmektedir. Hedef ile radar arasında bulunan mesafe bilgisi bunlardan ilki olarak sıralanabilir. Hedef tespiti ile başlayan bilgi çıkarımı sürecinde hedefin radara olan mesafe bilgisi ışık hızı ile yayılan elektromanyetik dalganın hedeften yansıyor gelme süresinin ölçümü ile gerçekleştirilmektedir. Skolnik'e (2008) göre uzak mesafelerdeki hedeflerin menzil ölçümünü yüksek doğruluk ile yapabilecek radarlardan başka sensör yapıları bulunmamaktadır. Mesafe ölçüm doğruluğu ise radar tarafından gönderilen işaretin bant genişliği ile değişmektedir. Yüksek bant genişliği ile yüksek doğruluk elde edilebilmektedir. (Skolnik, 2001). Hedeften yansıyan işaretten çıkarılabilen bir diğer bilgi ise hedefin hızıdır. Hedef hızı doppler frekans kaymasından veya zaman içinde gerçekleşen menzil değişiminden hesaplanabilmektedir. Ayrıca hedefin yön bilgisi radar tarafından tespit edilebilmektedir. Dönen anten kullanan hava izleme radarları gibi sistemlerde hedeften yansıyan sinyalin en güçlü olduğu nokta tespit edilerek hedefin bulunduğu yönün çıkarılması mümkün olmaktadır. Tek darbe izleme radarlarında ise birden fazla yönlü anten kullanarak kerteriz ve yükselişte hedef yönü tespit edilebilir. Menzil, hız ve yön gibi bilgilerin yanı sıra menzil ve açı çözünürlüğü yüksek radarlarda hedefin şekli ve boyutları hakkında bilgi edinilmesi de mümkün olmaktadır.

Radarlar askeri alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Genellikle hava savunma sistemlerinde kullanılan askeri radarlar uzun mesafe hava izleme, silah kontrol, füze güdüm, hedef tanıma ve imha değerlendirme amaçları ile kullanılır. Radarlar ayrıca kara ve denizde kullanılan ufuk ötesi sistemlerle erken uyarı ve istihbarat amaçlı olarak kullanılabilir. Tez kapsamında tehdit olarak değerlendirilen radar sisteminin ED sistemi taşıyan bir hava platformu ile angajman senaryosu Şekil 2.1'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi radar anteninden atmosfere yayılan elektromanyetik dalga hedef olarak tespit edilecek hava platformundan yansdıktan sonra tekrar radar antenine ulaşmaktadır. Antene tekrar ulaşan sinyal radar sisteminin işaret işleme birimlerinde işlenerek hedef tespiti gerçekleştirilmektedir. Radar sisteminin özelliklerine göre işaret işleme biriminde hedef hakkında menzil, hız ve yön gibi çeşitli bilgiler de elde edilebilmektedir. Üzerinde ED

sistemi bulunan hava platformu ise radar sistemi tarafından elde edilen bilgilerin hedef tanıma ve imha gibi amaçlar ile kullanılması riskini göz önüne alarak radar sistemini tehdit olarak değerlendirmektedir. Bu nedenle ED sistemleri radarların gönderdiği sinyalleri kullanarak elektronik harp ortamında bulunan tehdit radarlar hakkında durumsal farkındalık oluşturmayı amaçlar.



Şekil 2.1 Radar hedef tespit prensibi

Radarlar ortama yaydıkları elektromanyetik sinyalin formuna göre darbeli ve sürekli sinyal radarları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Radar tipleri gerçekleştirmek istedikleri görevlerin özelliklerine göre farklı sinyal formları ve karakteristiklerine sahip olabilmektedir. Darbeli formda sinyal üreten bir radarda karakteristik özellikler sinyalin frekansı, darbe genişliği, darbe tekrarlama aralığı ve darbe üzerinde bulunan modülasyondur. Sürekli sinyal formuna sahip bir radar da karakteristik özellikler sinyalin frekansı ve sinyal üzerinde bulunan modülasyon olarak sıralanabilir. Askeri alanda kullanılan arama radarları, izleme radarları ve güdümlü radarları sinyal formlarının karakteristik yapıları bakımından ayırt edici özellikler taşımaktadır (Neri 2006). Bu nedenle radar sinyal formunun bilinmesi radarın gerçekleştirmek istediği görevin tespitini olanaklı kılmaktadır.

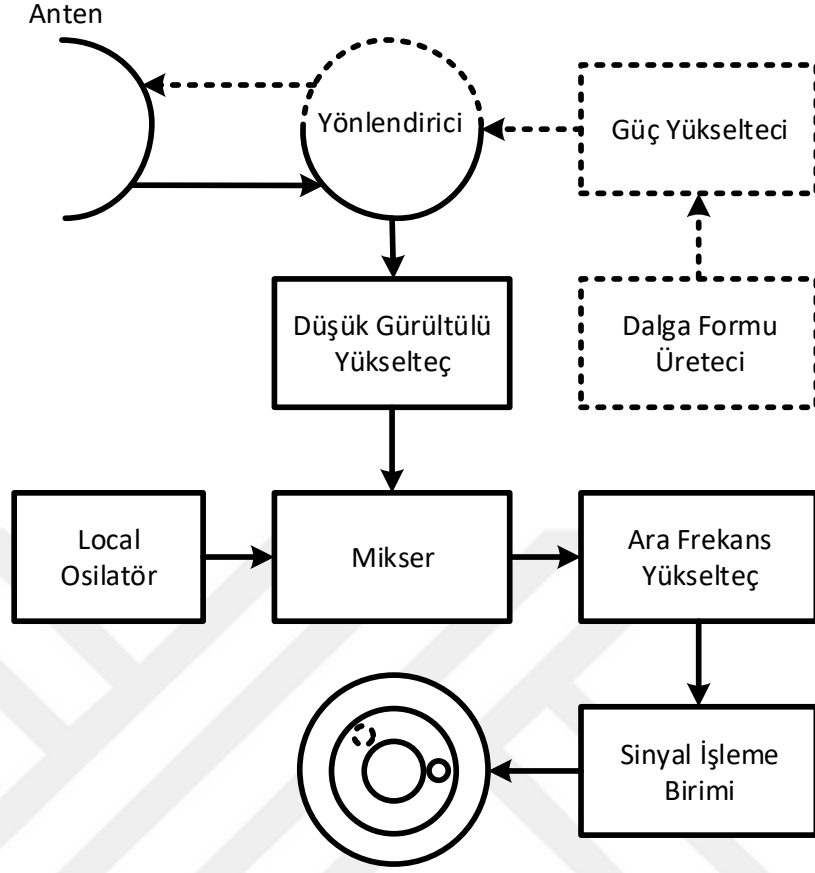
Çalışma frekansı radar yeteneklerini belirleyen önemli bir parametredir. Bu nedenle radarlar çalışma frekans aralıklarına göre sınıflandırılabilir. Çalışma frekanslarına göre belirlenen radar bantları Çizelge 2.1’de verilmiştir. Tez kapsamında ilgilenilen elektronik harp ortamında kullanılan radarlar genellikle 2-18 GHz frekans aralığında çalışmaktadır. Bu nedenle Çizelge 2.1’de ilgili frekans aralığı incelenmiştir. S bant çalışma frekansı düşük frekansların atmosferde daha az zayıflaması nedeni ile özellikle uzun menzil arama radarlarında kullanılmaktadır. S ve X bant özelliklerini birlikte gösterebilen C bant çalışma frekans aralığı eski radar tiplerinde kullanılmıştır. X bant frekans aralığı ise yüksek mesafe gerektirmeyen, alan ve ağırlık kısıtları bulunan radar uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Yükselen frekansla beraber anten boyutlarının küçülmesi bazı radar uygulamalarında K_u çalışma frekans bantının tercih edilmesine neden olmaktadır. Elektronik harp alanında bulunan askeri radarların büyük bir kısmı X bant çalışma frekansını kullanmaktadır (Schleher 1999). Bu durum göz önüne alınarak tez kapsamında tehdit olarak görülen radarların X bantta olduğu varsayılmıştır.

Çizelge 2.1 Radar Frekans Bantları

Bant Sembolü	Bant Frekans Aralığı
S	2 - 4 GHz
C	4 - 8 GHz
X	8 - 12 GHz
K_u	12 - 18 GHz

2.1.1 Radar sistemleri

Radar sistemleri kullanım amaçları ve teknolojilerine göre farklı sistem bileşenleri içermektedir. Bu nedenle alıcı yapıları değişse de çalışma prensibi değişmeyen radarların genel fonksiyonlarını anlatmak amacı ile monostatik, darbeleri sinyal formuna sahip bir radarın blok şeması Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 Radar fonksiyonel blok şema

Radarlarda dalga biçimi üretici tarafından üretilen sinyal, güç yükseltici tarafından uygulamanın gerektirdiği miktarda güçlendirilir. Yönlendirici katına iletilen güçlü sinyal anten üzerinden atmosfere elektromanyetik dalga olarak yayılır. Radarın dinleme döneminde anten üzerinde oluşan sinyal yönlendirici ile radarın alıcı katına iletilir. Yönlendirici, radarın sinyal gönderimi sırasında sistemin alıcı katının yüksek güçte sinyale maruz kalarak yanmasını engellemektedir. Yüksek frekans bölgesinde alınan sinyal düşük gürültülü yükselteçten geçtikten sonra mikser yardımı ile ara frekans bölgesine indirilir. Ara frekansa indirilen sinyal, radar sinyal işleme biriminde işlenerek hedef tespit edilmektedir. Tespit edilen hedef ise radar ekranı aracılığı ile operatöre gösterilmektedir.

Radar dalga formunun sürekli sinyal haline gelmesi durumunda aynı anda gönderme ve

alma işlemleri gerçekleştirildiğinden iki anten gerekmektedir. Bu tür radarlarda alıcı ve verici kanal birbirinden yalıtılarak yönlendirici birimine gerek kalmamaktadır. Bistatik radarlarda ise verici ve alıcı yapıları konumsal olarak birbirinden ayrılarak radar yapısını değiştirmektedir. Monostatik radarlar gibi bistatik radarlarda askeri, ticari ve bilimsel amaçlarla kullanılmaktadır.

2.1.2 Radar mesafe eşitliği

Radarlar antenleri aracılığı ile atmosfere yaydıkları elektromanyetik sinyalin hedef cisimden yansımaları sonra alıcılarında oluşturduğu sinyalin belirli güç seviyesini geçmesi ile hedef tespiti yapmaktadır. Radar mesafe eşitliği kullanılarak parametreleri bilinen bir radarın belirli bir hedefi tespit edebilmesi için gereken mesafe hesaplanabilmektedir. Herhangi bir radarın atmosfere yaydığı sinyalin çıkış gücü Eşitlik (2.1)'de verilmiştir.

$$P_{CIKIS} = P_R G_R \quad (2.1)$$

Eşitlik (2.1)'de verilen P_R radar sinyalinin çıkış gücünü ifade ederken, G_R ise radar anteninin kazancıdır. Radardan yayılan sinyal, hedef cisimden yansımadan önce tek yönlü serbest uzay kaybı nedeni ile zayılamaktadır. Radar sinyalinin hedef cisme ulaşmadan önce kat ettiği R mesafesine bağlı olan zayıflamadan sonra sinyalin gücü Eşitlik (2.2) kullanılarak hesaplanmaktadır. Eşitlik (2.2)'de verilen $4\pi R^2$ ifadesi R yarıçaplı kürenin yüzey alanını ifade etmektedir.

$$P_{HEDEF} = \frac{P_R G_R}{4\pi R^2} \quad (2.2)$$

Hedeyten yansıyan güç ise hedefin radar kesit alanı σ 'ya bağlı olarak Eşitlik (2.3) ile hesaplanır.

$$P_{YANKI} = \frac{P_R G_R}{4\pi R^2} \times \sigma \quad (2.3)$$

Hedeyten yansıyan işaret radar ile hedef arasındaki mesafede tekrar serbest uzay kaybına

uğradıktan sonra radarın alıcı antenin etkinliği açıklığına bağlı olarak alınır. Radar kayıpları L_R 'de hesaba katılarak Eşitlik (2.4) ile radar sinyal işleme birimi öncesinde hedeften dönen sinyalin gücü elde edilir.

$$P_{ALICI} = \frac{P_R G_R}{4\pi R^2} \times \sigma \times \frac{1}{4\pi R^2} \times \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \times \frac{1}{L_R} \quad (2.4)$$

Modern radarlarda kullanılan uyumlu filtreleme gibi sinyal işleme algoritmaları ile işlem kazancı elde edilir. Eşitlik (2.4)'e bu kazanç da eklendiğinde sinyal işleme birimi sonrasında elde edilen sinyal gücü P_{SIB} Eşitlik (2.5) ile hesaplanır.

$$P_{SIB} = \frac{P_{RT} G_R}{4\pi R^2} \times \sigma \times \frac{1}{4\pi R^2} \times \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \times \frac{1}{L_R} \times G_P \quad (2.5)$$

Radara hedef tespiti yapılabilmesi için sinyal işleme birimi sonrasında sağlanması gereken en düşük sinyal gücü S_{min} olarak tanımlandığında, S_{min} 'nin ısı gürültü, radar alıcısının gürültü figürü ve SNR cinsinden ifadesi Eşitlik (2.6)'de verilmiştir.

$$S_{min} = kTB_R \times F_R \times SNR_{min} \quad (2.6)$$

Tespit edilebilir en düşük sinyal gücü Eşitlik (2.5)'de yerine konulduğu zaman Eşitlik (2.7) elde edilmektedir.

$$P_{SIB} = S_{min} = kTB_R \times F_R \times SNR_{min} = \frac{P_{RT} G_R}{4\pi R^2} \times \sigma \times \frac{1}{4\pi R^2} \times \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \times \frac{1}{L_R} \times G_P \quad (2.7)$$

Eşitlik (2.7)'de radar ile tehdit arasında bulunan mesafe değeri R yalnız bırakıldığında en düşük SNR seviyesine karşılık düşen en yüksek tespit mesafesi Eşitlik (2.8) kullanılarak hesaplanabilmektedir. Eşitlik (2.8) radar mesafe eşitliği olarak adlandırılmaktadır.

$$R_{max} = \left[\frac{P_R G_R^2 G_P \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 L_R kTB_R F_R SNR_{min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.8)$$

Radara mesafe eşitliği kullanılarak tespit olasılığı ve yanlış alarm olasılığı ile belirlenen SNR değerine göre, radar sisteminin tespit yapabileceği mesafe hesaplanabilmektedir. Zarf detektörü kullanan bir sistemde tespit teorisine göre %90 tespit olasılığı ve 10^{-6} yanlış alarm olasılığı için 13 dB SNR değeri gerekmektedir (Martino 2012). 13 dB SNR

değeri kullanılarak Çizelge 2.2’de verilen düşük olasılıklı algılama tipi radar parametreleri ile σ değeri 100 m^2 olan bir hedefin tespit edilebileceği mesafe 21,8 km olarak hesaplanmıştır.

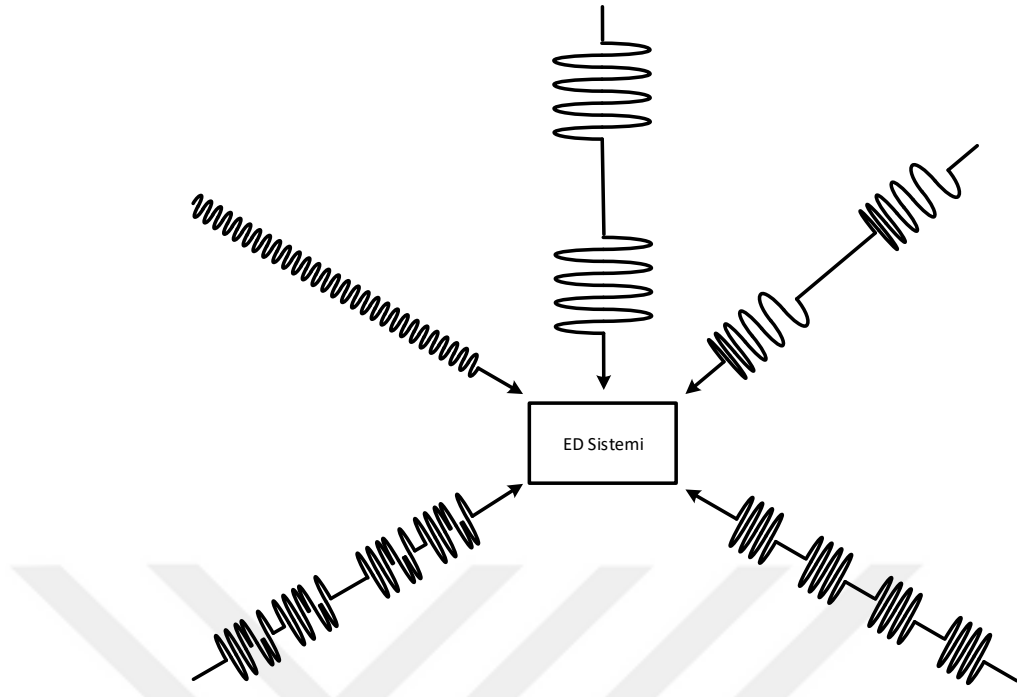
Çizelge 2.2 Radar parametreleri

Radar Parametresi	Parametre Değeri	Radar Parametresi	Parametre Değeri
P_R	100W	L_R	4 dB
G_R	35 dB	F_R	3 dB
G_P	30 dB	B_R	500 MHz
λ	3 cm	T	290 K

2.2 Elektronik Destek

Elektronik destek, elektronik harbin tehdit tespit ve sınıflandırma faaliyetlerini içeren alt dalıdır. Elektronik harp ortamında bulunan arama, güdüm, hedef takip ve hedef aydınlatma gibi farklı amaçlarla kullanılan radarların sinyalleri elektronik destek sistemi tarafından gerçek zamanlı olarak işlenerek tehdit hakkında bilgi edinilmektedir. Şekil 2.3’de elektronik harp ortamında bulunan farklı radar tiplerinin sinyal formları gösterilmiştir. Radar sinyalleri sürekli, darbeli, frekans modülasyonlu veya faz modülasyonlu olabilmektedir. Sinyaller radarın çıkış gücü ve ED sistemi ile arasındaki mesafeye göre farklı güç seviyelerinde alınmaktadır. Aynı zamanda radar tipine göre değişkenlik gösteren frekans ve darbe tekrarlama sıklığı radar sinyal formunu etkilemektedir. Elektronik harp ortamında bulunan ve Şekil 2.3’de gösterilen farklı sinyal formları, karakteristik özellikleri kullanılarak elektronik destek sistemleri tarafından ayrıştırılmaktadır.

Elektronik destek sistemlerinde radar tiplerine göre farklı formlarda olan sinyallerin ayrıştırılması ile tehdit radar tipi belirlenebilmektedir. Bu durum sayesinde elektronik destek yüksek durumsal farkındalık sağlanmasının yanı sıra tehdit radara karşı tedbir ve elektronik taaruz yöntemlerinin belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. ED sisteminde

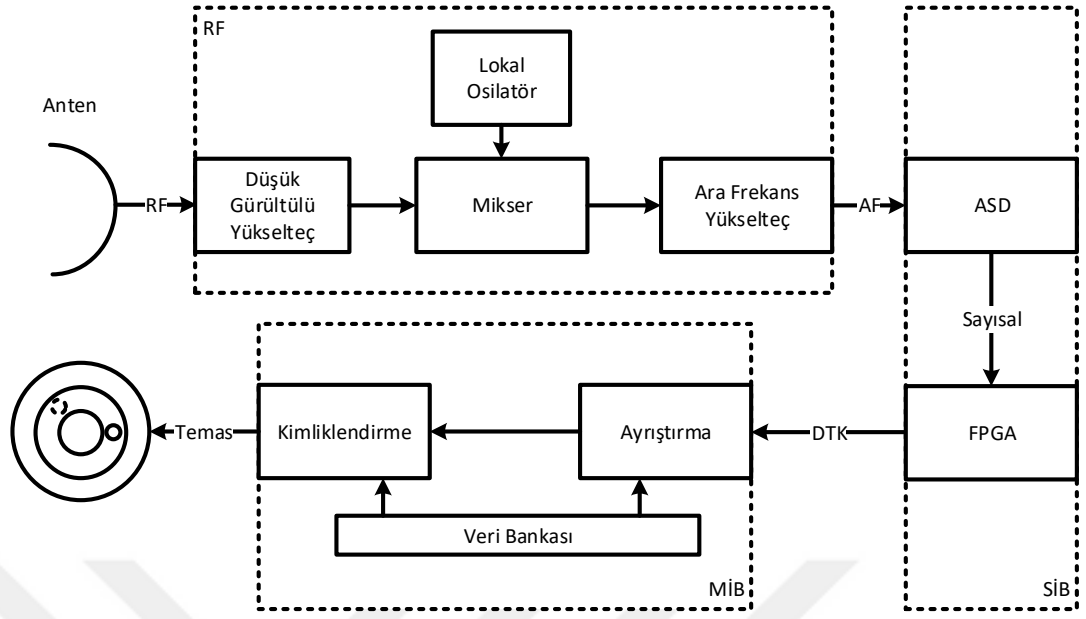


Şekil 2.3 Elektronik harp ortamında bulunan sinyal formları

kullanılan alıcı yapılarının pasif olarak alınan sinyallerin ayırt edici parametrelerini çıkarabilecek sinyal işleme kapasitesinde olması gerekmektedir. Tehdit radarların frekans aralığının yüksek olması, aynı zamanda ED sisteminin yüksek bant genişliğinde çalışıyor olmasını gerektirmektedir (Adamy 2001). Özellikle tehdit yoğun ortamlarda sinyallerin sisteme eş zamanlı gelme olasılığının yüksek olması elektronik destek sisteminin birden fazla tehditten alınan sinyallerin eş zamanlı olarak işlenmesini gerektirmektedir.

2.2.1 Elektronik destek sistemleri

Elektronik destek sistemleri temel olarak tehdit radarlardan gelen sinyalleri işleyen pasif alıcı yapılarıdır. Elektronik destek sistemleri kullanım amaçlarının belirlediği performans düzeylerine göre farklı alıcı yapılarına sahip olabilmektedir. Ancak temel olarak pasif alıcı yapıları olduğundan benzer çalışma prensiplerine sahiptirler. Şekil 2.4’de taramalı yapıya sahip elektronik destek sisteminin fonksiyonel blok şeması görülmektedir.



Şekil 2.4 ED sistemi fonksiyonel blok şeması

Elektronik harp ortamında bulunan sinyaller anten aracılığı ile alındıktan sonra sistemin RF katında işlenmektedir. Taramalı yapıya sahip alıcılarda (*Superheterodyn Receiver SHR*) RF katında bulunan lokal osilatörün değeri elektronik destek sisteminin kapsadığı frekans bantı boyunca gezerek, sinyal işleme biriminin sağladığı anlık bant genişliğine uygun ara frekans bölgesinde sinyal oluşturulmaktadır. ASD tarafından sayısallaştırılan sinyaller FPGA biriminde gerçek zamanlı olarak işlenerek sinyallerin karakteristik parametreleri çıkarılmaktadır. Çıkarılan parametreler darbe tanımlama kelimesi (DTK) formatı altında birleştirilerek merkezi işlemci birimine iletilmektedir. DTK formatında genel olarak sinyal frekansı, sinyal genliği, sinyal geliş anı, modülasyon bilgisi, tehdit yön bilgisi, darbe genişliği gibi parametreler bulunmaktadır. Merkezi işlemci biriminde sinyal özelliklerine göre ayrıştırılan sinyaller veri bankasında bulunan tehdit radar sinyali örnekleri ile ilişkilendirilerek kimliklendirilir. Elde edilen sonuçlar bir ekran aracılığı ile doğrudan operatöre iletebileceği gibi diğer elektronik harp birimleri ile entegre çalışan sistemlerde karar verici mekanizmalara raporlanabilmektedir. Yapıda bulunan ASD'nin örnekleme frekansı anlık bant genişliğini belirlediği için kritik öneme sahiptir. Aynı zamanda FPGA içinde uygulanan sinyal işleme algoritmaları sistemin ayrıştırma performansını doğrudan etkilemektedir.

Elektronik destek sisteminin kabiliyetleri alıcı yapısını değiştirebilmektedir. Tehditin yön tespiti yapabilme kapasitesine sahip elektronik destek sistemlerinin alıcı yapılarında birden fazla kanal ile çalışılması gerekliliği oluşmaktadır (Tsui 2010). Yüksek doğrulukla tehdit yön bilgisi elde etmek için kanallar arasında genlik ve faz uyumlarının sağlanması gerekliliği alıcı maliyeti ve sistem karmaşıklığını arttırmaktadır. Ancak tehdit yön bilgisinin sağladığı ayrıştırma işleminde kolaylık ve üst düzey durumsal farkındalık elektronik destek sistemlerinde tehdit yön tespitini en önemli parametrelerden biri haline getirmektedir.

2.2.2 Elektronik destek mesafe eşitliği

Tehdit radarın atmosfere yaydığı sinyal elektronik destek sisteminin alıcısında belirli bir güce ulaştığında sistem tarafından tehdit tespiti gerçekleştirilmiş olmaktadır. Farkındalık ve tehdiye karşı tedbir faaliyetleri için tehdit radar sisteminin hedefi tespitinden önce elektronik destek sisteminin tehdit radarı tespit etmesi gerekmektedir. Elektronik destek sistemi radar sinyalini tek yönlü mesafe zayıflatmasından sonra almaktadır. Bu durum elektronik destek sisteminin tehditi erken tespiti için avantaj oluşturmaktadır. Elektronik destek sistemi mesafe eşitliği kullanılarak, sistemin parametreleri bilinen bir radarı tespit edebileceği mesafenin hesaplanması mümkün olmaktadır. Tehdit radar tarafından atmosfere yayılan sinyalin tek yönlü serbest uzay zayıflatmasından sonra elektronik destek sistemi girişinde oluşturduğu güç, P_{ED} Eşitlik (2.9) ile hesaplanır. Eşitlikte verilen P_R radar sinyalinin çıkış gücünü, G_R ise radar anteninin kazancını ifade etmektedir.

$$P_{ED} = \frac{P_R G_R}{4\pi R^2} \quad (2.9)$$

ED sistemi girişinde bulunan sinyal elektronik destek sisteminin anten efektif açıklığına bağlı olarak alınmaktadır. Antenden alınan sinyal elektronik destek sistemi içinde L_{ED} ile ifade edilen sistem kayıplarına uğradıktan sonra sinyal işleme birimine ulaşmaktadır. Sinyal işleme biriminde kullanılan algoritmaların işlem kazançları G_{PED} olarak kabul edildiğinde elektronik destek sisteminde elde edilen sinyal gücü, P_{ALICI} Eşitlik (2.10) kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$P_{ALICI} = \frac{P_R G_R}{4\pi R^2} \times \frac{G_{ED} \lambda^2}{4\pi} \times \frac{1}{L_{ED}} \times G_{PED} \quad (2.10)$$

Elektronik destek sisteminde tehdit tespiti yapılabilmesi için gereken en düşük sinyal gücü S_{min} olarak kabul edilirse, S_{min} 'nin ısı gürültü, elektronik destek sistemi alıcı gürültü figürü ve SNR cinsinden ifadesi Eşitlik (2.11)'de verilmiştir.

$$S_{min} = kTB_{ED} \times F_{ED} \times SNR_{min} \quad (2.11)$$

Tehdit tespiti için gerekli en düşük sinyal gücü Eşitlik (2.10)'de yerine konulduğu zaman Eşitlik (2.12) elde edilmektedir.

$$P_{ALICI} = S_{min} = kTB_{ED} \times F_{ED} \times SNR_{min} = \frac{P_R G_R}{4\pi R^2} \times \frac{G_{ED} \lambda^2}{4\pi} \times \frac{1}{L_{ED}} \times G_{PED} \quad (2.12)$$

Eşitlik (2.12)'de ED sistemi ile radar arasında bulunan mesafe değeri R yalnız bırakıldığında en düşük SNR seviyesine karşılık düşen en yüksek tehdit tespit mesafesi Eşitlik (2.13) kullanılarak hesaplanabilmektedir. Eşitlik (2.13) elektronik destek mesafe eşitliği olarak adlandırılmaktadır.

$$R_{max} = \left[\frac{P_R G_R G_{ED} G_{PED} \lambda^2}{(4\pi)^2 L_{ED} k T B_{ED} F_{ED} SNR_{min}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

Zarf detektörü ile tespit gerçekleştiren bir sistemde tespit teorisine göre %90 tespit olasılığı ve 10^{-6} yanlış alarm olasılığı için 13 dB SNR değeri gerekmektedir (Martino 2012). Elektronik destek mesafe eşitliği kullanılarak 13 dB SNR değerine sahip sinyalin tespit edilebileceği mesafe 53,2 km olarak hesaplanmıştır. Hesaplama sırasında kullanılan düşük olasılıklı algılama tipi radar ve elektronik destek sistemi parametreleri Çizelge 2.2'de verilmiştir. Elektronik destek sisteminde anlık tehdit yön tespiti için gereken en düşük SNR seviyesi ise 18 dB'dir (Martino, 2012). 18 dB SNR seviyesi için hesaplamalar tekrar edildiğinde, elektronik destek sisteminin tehdit yönünü 29 km mesafede anlık olarak tespit edebileceği görülmektedir. Aynı radar parametrelerine sahip düşük olasılıklı algılama radarının 21,8 km de hedef tespiti yapabildiği göz önüne

alındığında, elektronik destek sisteminin mesafe avantajı görülmektedir.

Çizelge 2.3 Elektronik destek ve radar sistemi parametreleri

Parametre	Parametre Değeri	Parametre	Parametre Değeri
P_R	100W	G_{ED}	5 dB
G_R	35 dB	G_{PED}	3 dB
L_{ED}	2 dB	B_{ED}	2 GHz
F_{ED}	10 dB	λ	3 cm
T	290 K	k	1.38×10^{-23} W/HzK

2.3 Elektronik Destek Sistemlerinde Yön Bulma Yöntemleri

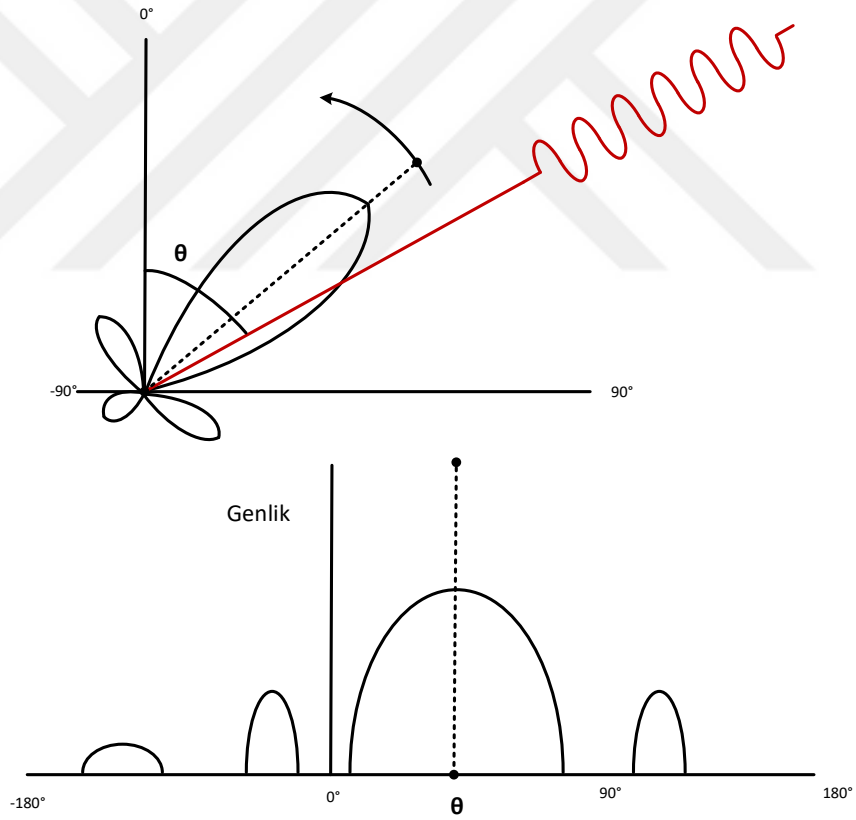
Elektronik destek sistemlerinde tehdit radar sinyalinin çıkarılan parametrelerden olan tehdit yön bilgisi, özellikle çevik radarlar tarafından elektronik korunma kapsamında anlık olarak değiştirilebilen parametrenin dışında kalan bir bilgidir. Tehdit yön bilgisinin tehditin konumsal yerleşimi ile alakalı olması bu parametrenin elektronik korunma kapsamında değiştirilmesini engellemektedir. Özellikle tehdit yoğun ortamlarda elektronik destek sistemi alıcılarında elde edilen sinyallerin ayrıştırılmasını kolaylaştıran tehdit yön bilgisi sistemler için vazgeçilmez bir parametre olmaktadır.

Elektronik destek sistemlerinde yön bulma yöntemlerine tarihsel olarak bakıldığında ilk sistemlerde genlik karşılaştırma prensibine dayanan yönlü anten kullanımı ve Watson-Watt yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntemlerle maliyeti düşük, alıcı yapıları basit sistemler kurmak mümkün olmakla birlikte yüksek doğruluk değerlerine ulaşamamaktadır. Dönen bir anten üzerinde oluşan Doppler frekans kayması bilgisinden tehdit yön bilgisi tespiti yapan Doppler yöntemi ise mekanik sistem gerekliliğinden kısıtlı uygulamalarda kullanılabilir. Sayısal donanımların gelişmesi ile artan işlem gücü sayesinde yüksek doğruluk değerlerine ulaşabilen yön bulma yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır. Faz ve genlik karşılaştırma algoritmalarını içeren tek darbe yön bulma yöntemleri ile MUSIC ve ESPRIT algoritmalarını içeren dizi

sinyal işleme yöntemleri karmaşık alıcı sistemlerinde yüksek doğrulukla tehdit yön bilgisi tespiti yapabilmektedir.

2.3.1 Yönlü anten kullanımı

Yöntemde mekanik olarak döndürülen yönlü antenden alınan tehdit radar sinyalinin genlik ölçümleri ile yön bulma işlemi gerçekleştirilmektedir. Yönlü anten olarak horn, spiral, sinüs, vivaldi veya log-periodic anten tipleri kullanılmaktadır (Lipsky 1987). Ölçümler sırasında en yüksek genlik seviyesine ulaşılan açı tehdit radarın yönünü vermektedir. Şekil 2.5’de yön bulma sisteminde kullanılan anten yerleşimi ve anten örüntüsü görülmektedir.



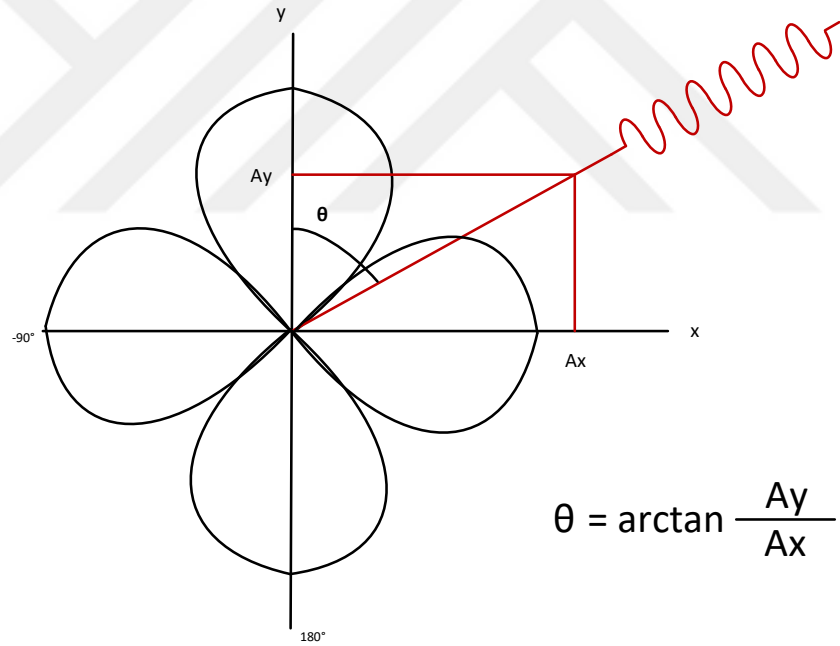
Şekil 2.5 Yönlü anten kullanımı

Mekanik sistem yardımı ile sürekli dönen antenden elde edilen tehdit radar sinyalinin genlik ölçümleri θ geliş açısı değerinde en yüksek seviyeye ulaşmaktadır. Tehdit yön bilgisi ise ölçülen genlik verilerinden en yüksek genliğin bulunması ile çıkarılmaktadır.

Yönlü anten kullanımı basit ve maliyeti düşük bir yöntem olmasının yanında dönme hareketine bağlı olarak özellikle darbe genişliği düşük ve darbe tekrarlama aralığı büyük sinyal formlarının yakalanması ve yön tespitinin yapılması için uygun değildir.

2.3.2 Watson-Watt yöntemi

Watson-Watt yöntemi genlik karşılaştırma prensibi ile çalışmaktadır. Yöntem 1926 yılında ilk olarak Watson-Watt tarafından uygulanmıştır. Çapraz döngü alıcı antenlerden alınan genlik seviyeleri oranlandıktan sonra ters tanjant dönüşümü ile geliş açısı tespiti yapılır. Tümyönlü anten ile yöntemde oluşan 180 derece belirsizliğin çözümü gerçekleştirilir (Poisel 2014). Şekil 2.6'de Çapraz döngü alıcı antenlere ait anten örüntüsü ve yöntemin çalışma prensibi verilmiştir.



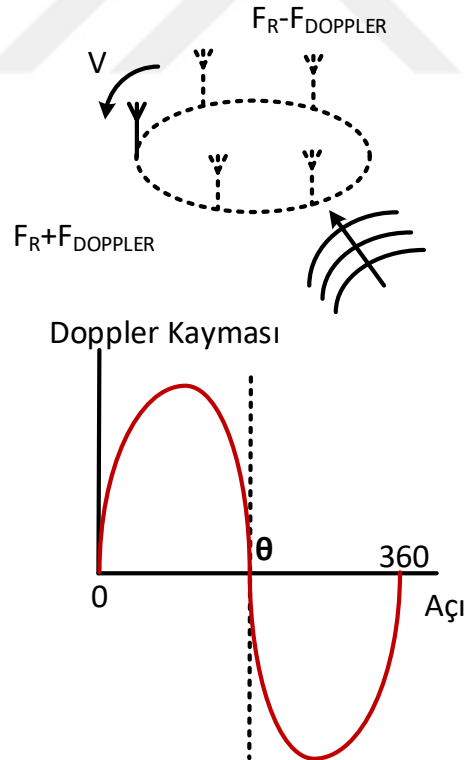
Şekil 2.6 Watson-Watt yöntemi

Çapraz döngü anten kullanılarak uygulanan yöntem darbe genişliği düşük ve darbe tekrarlama aralığı büyük sinyallerde yön bulma işlemi gerçekleştirebilmektedir. Uygulaması kolay, yer gereksinimi az olan yöntem taşınabilir sistemlerde kullanılabilir. Ancak çapraz döngü anteninin kısa açıklığı çok yönlü sinyal yayılımlarının fazla olduğu ortamlarda hatalara neden olur. Watson-Watt yönteminin

Adcock antenleri ile uygulanması antenlerin birbirinden uzaklaştırılmasını mümkün kılarak daha fazla açıklık elde edilmesini sağlamaktadır ve çok yolluluk etkisinden kaynaklanan hatalar bu sayede azaltılabilmektedir (Poisel 2014). Adcock anteni kullanan modern sistemlerde antenlerden alınan sinyallerin genlik seviyelerinin ASD ile sayısallaştırılması sonrasında yapılan hesaplamalar sonucunda tehdit yön bilgisi elde edilmektedir.

2.3.3 Doppler yöntemi

Doppler yöntemi alıcı antenin sabit bir yarıçap etrafında döndürülmesi sonucunda tehdit radar frekansında oluşan Doppler frekans kaymasını kullanarak yön tespiti yapmaktadır. Alıcı anten tehdiye yaklaşırken sinyal frekansı artarken, uzaklaşırken frekans azalmaktadır. Şekil 2.7’de sabit yarıçap etrafında dönen anten ve frekans üzerinde gerçekleşen Doppler kayması verilmiştir.



Şekil 2.7 Doppler yöntemi

Dönme hareketine bağlı olarak Doppler kayması sinüzoidal bir işaret olarak gözlenir. Açısal hız vektörünün sinyale dik olduğu noktalarda en yüksek Doppler kayması oluşmaktadır. Tehdit doğrultusundan geçtiği noktalarda ise açısal hız vektörü alınan sinyal ile paralel olduğundan Doppler kayması gözlenmemektedir (Adamy 2009). Doppler kayması sinyalinin azalırken geçtiği sıfır noktası tespiti ile tehdit yönü tespit edilmiş olmaktadır. Oluşan Doppler kaymasının hesaplanabilmesi için yüksek doğrulukta tehdit radar frekansı ölçümü gerektiren yöntem kısa süreli sinyallerden yön tespiti yapma konusunda başarısız olmaktadır.

2.3.4 Dizi sinyal işleme yöntemleri

Özellikle girişim ve çoklu tehdit bulunan elektronik harp ortamlarında MUSIC ve ESPRIT gibi dizi sinyal işleme algoritmaları ile yüksek doğrulukta tehdit yön tespiti yapmak mümkün olmaktadır (Adamy 2001). Dizi sinyal işleme algoritmaları ile n adet anten içeren dizi kullanılarak $n - 1$ adet tehditin yönü belirlenebilmektedir. Yöntemlerde sinyal ve gürültü uzaylarının diklik özelliği kullanılır ve antenlerden alınan sinyallerin korelasyon matrisinin özdeğer ve özvektörlerine ayrıştırılması sonrasında istenilen açı çözünürlüğünde çoklu sinyal sınıflandırma spektrumu oluşturulur. Oluşturulan spektrumda tehdit sinyalinin alındığı açı değerlerinde oluşan genlik tepeleri tehdit yön bilgisinin tespit edilmesini sağlamaktadır (Dabak vd. 2018). Dizi sinyal işleme yöntemlerinde kullanılan anten sayısı arttıkça yön tespiti doğruluğu artmaktadır. Yöntem doğruluğunu arttıran bir diğer parametre ise korelasyon matrisinin kullandığı örnek sayısıdır. Örnek sayısının artması ile yöntem için gereken işlem gücü ve süresi artmaktadır. Aynı zamanda tehditin veya ED sisteminin yerleşik olduğu platformun hareketli olduğu senaryolarda fazla örnek sayısı ile çalışmak tehdit yön bilgisinin hata miktarının artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle dizi sinyal işleme algoritmalarında örnek sayısı değişken senaryolara göre adaptif olarak seçilmesi gerekmektedir. Bu durum yöntemlerin zaman kısıtı gerektirmeyen durumlarda kullanılmasına neden olmaktadır.

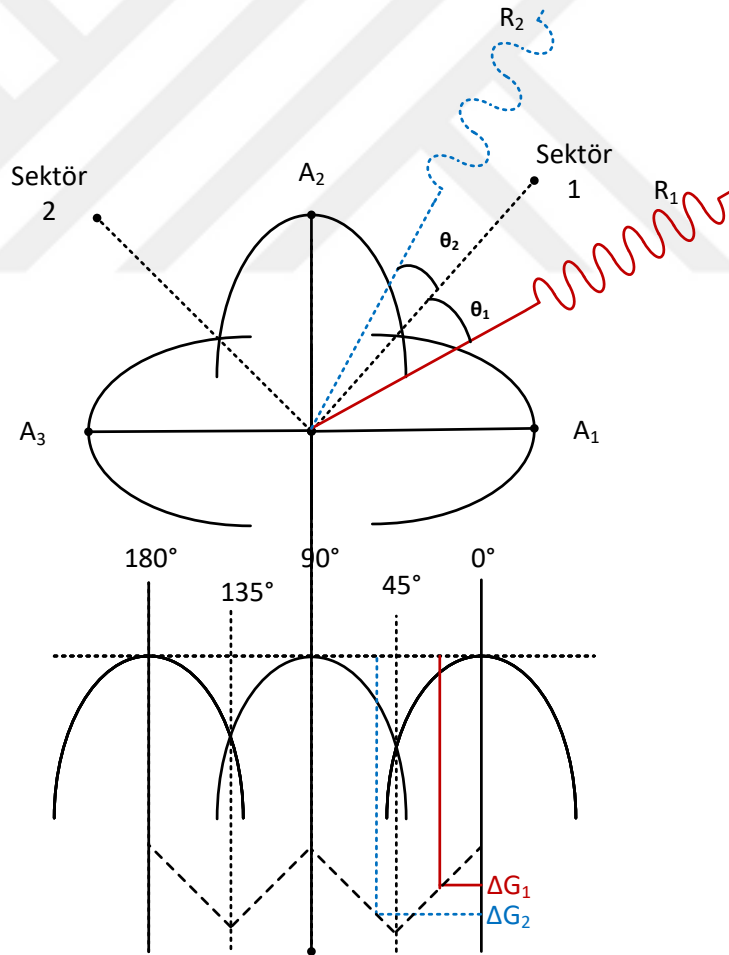
2.3.5 Tek darbe yöntemleri

Tek darbe yön bulma yöntemleri özellikle yer ve zaman kısıtı olan uygulamalarda kullanılan genlik ve faz karşılaştırma prensipleri ile çalışan yöntemlerdir. Tek darbe, elektronik destek sisteminde alınan her bir radar sinyali darbese için yapılan işlemler sonucunda ilgili darbeye ait tehdit yön bilgisinin elde edilebiliyor olmasını ifade etmektedir. Tek darbe yöntemlerinde elektronik destek sistemi tarafından alınan her sinyal birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmektedir. Yöntemin sonuç vermesi için uzun süreli tehdit radar sinyaline gerek duyulmamaktadır. Aynı zamanda sürekli sinyal formuna sahip tehdit radarlar için elektronik destek sistemi tarafından alınan sinyalin bir kısmı işlenerek yöntem uygulanabilmektedir. Bu nedenle yöntem tehdit radarın sinyal formundan bağımsız olarak çalışmaktadır.

Tek darbe yöntemleri genlik karşılaştırma, faz karşılaştırma ve hibrit yöntemlerden oluşmaktadır. Genlik karşılaştırma yönteminde, farklı bakış açıları ile yerleştirilen yönlü antelerden alınan tehdit radar sinyallerinin genlik farkları işlenerek tehdit yön bilgisi tespiti yapılır. Basit alıcı yapıları kullanılarak uygulanabilen yöntem kullanılan anten sayısına göre 3-10 derece RMS hata aralığında sonuçlar verebilmektedir (Tsui 2005). Faz karşılaştırma yöntemi ise tümyönlü antenlerden alınan tehdit radar sinyalleri arasında anten yerleşim düzlemine geliş açısına bağlı olarak oluşan faz farklarının işlenmesi ile tehdit yön tespitinin yapılması prensibine dayanmaktadır (Bullock vd. 1971). Faz karşılaştırma algoritmalarını kullanan tek darbe yön bulma yöntemleri kanallar arası faz uyumu gerektirdiğinden alıcı yapısı karmaşık sistemlere ihtiyaç duymaktadır. Faz karşılaştırma yöntemleri kullanılarak 1 derecenin altında RMS hata değerleri ile tehdit yön tespiti yapabilmek mümkündür (Cui vd. 2017). İki yöntemin bir arada kullanıldığı hibrit tek darbe yönteminde ise anten yerleşimi küçültülerek yer kısıtı olan uygulamalar için tehdit yön tespiti doğruluğu artırılabilir.

2.3.5.1 Genlik karşılaştırma yöntemi

Genlik karşılaştırma yöntemi antenlerden alınan sinyallerin genlik farklarının bilinen anten örüntülerinde farkın karşılık düştüğü açının tespit edilmesi prensibine dayanmaktadır. Yönlü antenlerin kullanıldığı genlik karşılaştırma yönteminde farklı bakış açıları ile yerleştirilmiş antenler alıcı sistemin kanallarında genlik farkı oluşmasına neden olmaktadır. Bu genlik farkı tehdit radar işaretinin geliş açısına ve anten örüntülerine bağlı olarak değişmektedir. Alıcı sistem kanallarındaki sinyallerin genlik farklarının elde edilmesi sonrasında bilinen örüntü farklarından tehdit radar sinyalinin geliş açısı tespit edilmektedir (Wiley 1986). Genlik karşılaştırma yöntemi örnek bir yerleşim ile Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



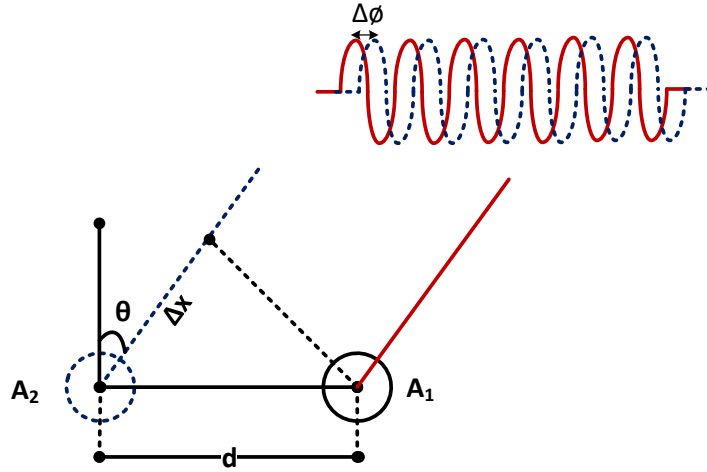
Şekil 2.8 Genlik karşılaştırma yöntemi

Şekil 2.8’de kullanılan 3 anten 180 derecelik bölgeyi 2 sektöre bölmektedir. Sektörlerin bakış açısı iki anten örüntüsünün aynı olduğu açı değerini ifade etmektedir. 180 derece tehdit radar sinyali geliş açısını kapsayan anten yerleşimi için anten sayısından bir eksik sayıda sektör oluşmaktadır. Alıcı sistemin kanallarında oluşan genliklerden en yüksek ikisinin bulunması ile tehdit radar sinyalinin hangi sektörden alındığı tespit edilmektedir. En yüksek genlikli sinyalin alındığı antenin numarası sinyalin geliş açısının sektörün hangi yarısında olduğunu göstermektedir. En yüksek genlik seviyesine sahip iki kanal arasında oluşan genlik farkı ise örüntü genlik farkları tablosunda tehdit radar sinyalinin geldiği açıyı göstermektedir.

Şekil 2.8’de R_1 tehdit radarından alınan sinyal Sektör 1’e θ_1 açısı yapacak şekilde gelmektedir. Bu sinyal için tespit edilen en yüksek genlikli anten A_1 iken ikinci anten ise A_2 ’dir. İki anten arasında oluşan genlik farkını ise ΔG_1 ifade etmektedir. Bilinen anten örüntülerinden elde edilen farkların grafiği ise kesikli çizgiler ile gösterilmiştir. ΔG_1 farkının bu grafikte karşılık geldiği açının tespiti ile yön bulma işlemi gerçekleştirilmiş olur. R_2 tehdit radarından alınan sinyal ise en yüksek genlikli olarak A_2 anteninde tespit edilmektedir. Bu neden ile sinyalin geliş açısının Sektör 1’in diğer yarısında olduğu anlaşılmaktadır. ΔG_2 genlik farkının sinyallerden elde edilmesi ve bu farkın karşılık geldiği açının bulunması ile R_2 tehdit radarından alınan sinyalin yönünde bulunmaktadır.

2.3.5.2 Faz karşılaştırma yöntemi

Tek darbe yöntemlerinden faz karşılaştırma yöntemi tümyönlü antenlerden alınan sinyaller arasında hesaplanan faz farkının, bilinen anten yerleşiminde hesaplanan faz farkına neden olacak geliş açısının geometrik olarak tespiti prensibine dayanmaktadır. İki tümyönlü anten arasında oluşan faz farkı Şekil 2.9’de kavramsal olarak gösterilmiştir. Tehdit radar sinyalinin iki antene geliş açısına göre farklı mesafeler kat ederek gelmesi iki sinyalin farklı fazlarda olmasına neden olmaktadır. Şekilde verilen yerleşime göre A_1 ve A_2 antenlerinden alınan sinyaller Eşitlik (2.14)’de verilmiştir.



Şekil 2.9 Sinyal geliş açısına göre antenlerde gözlenen faz farkı

$$s_1(t) = \sin(2\pi ft + \varphi_1) + n(t) \quad (2.14)$$

$$s_2(t) = \sin(2\pi ft + \varphi_2) + n(t)$$

Eşitlik (2.14)'de verilen φ_1 ve φ_2 sinyallerin fazlarını göstermektedir. İki sinyal arasında oluşan faz farkı ise Eşitlik (2.15) kullanılarak hesaplanmaktadır. Eşitlikte d antenlerin faz merkezleri arasındaki mesafeyi, λ tehdit radar sinyalinin dalga boyunu, θ ise sinyalin geliş açısını ifade etmektedir.

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{d \sin(\theta)}{\lambda} \times 2\pi \quad (2.15)$$

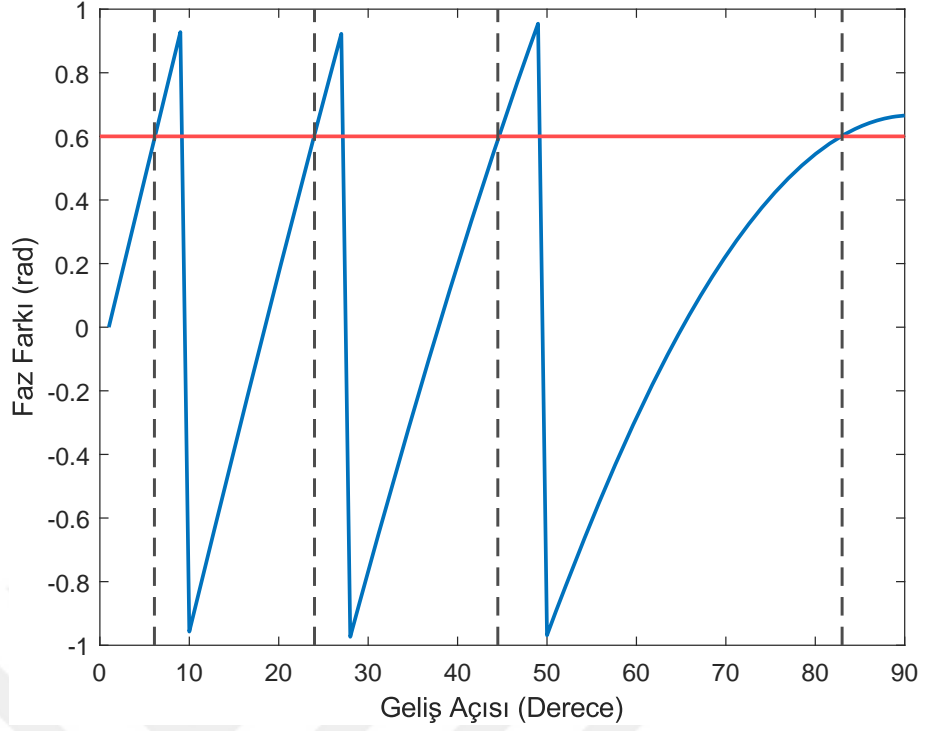
Eşitlik (2.15)'de görüldüğü gibi sinyaller arasındaki faz farkı antenlerin yerleşimi ile belirlenen d , tehdit radar sinyalinden çıkarılabilecek λ ve tespit edilmek istenen geliş açısı θ değişkenleri tarafından belirlenmektedir. Sinyaller arasında oluşan faz farkının hesaplanması ile Eşitlik (2.15)'de sinyalin geliş açısı dışında bilinmeyen kalmamaktadır. Faz farkının bilindiği durumda tehdit radar sinyalinin geliş açısı Eşitlik (2.16) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta\varphi\lambda}{2\pi d}\right) \quad (2.16)$$

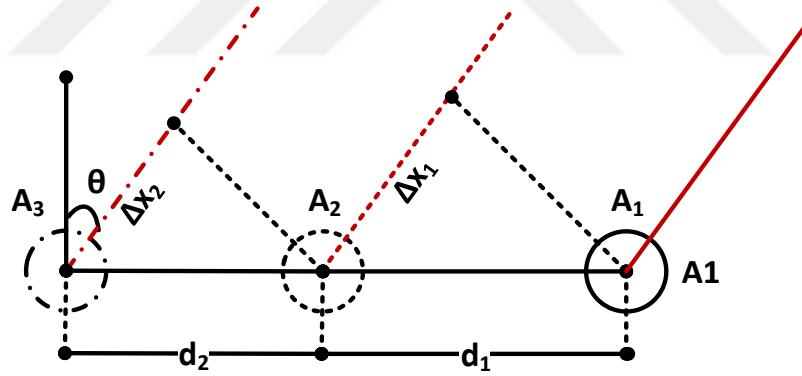
Faz karşılaştırma yönteminde belirsizlik oluşmaması için antenlerin faz merkezleri arasındaki mesafenin λ 'nın yarısına eşit yada küçük olması gerekmektedir. Böylelikle tespit edilmek istenen her geliş açısı tek faz değeri ile ifade edilebilmektedir (Wu vd. 1995). Faz merkezleri arası mesafenin belirsizlik oluşmaması için küçültülmesi birim geliş açısı değişiminin oluşturduğu faz farkını azaltmaktadır. Bu durum faz farkı hesaplaması sırasında oluşan hataların sonucu daha fazla etkilemesine neden olarak doğruluğu azaltmaktadır. Bu nedenle faz karşılaştırma yönteminde faz merkezleri arası mesafe büyütülerek yöntem doğruluğu artırılabilir (Lee vd. 2018). Doğruluğu arttırmak için faz merkezleri arasındaki mesafe artırıldığında sinyaller arasında oluşan faz farkı 2π etrafında katlanarak farklı geliş açıları için aynı faz farkı oluşmaya başlamaktadır. Bu durum faz karşılaştırma yönteminde aynı faz farkı değerinin birden fazla geliş açısını ifade etmesine neden olarak belirsizliği oluşturmaktadır. Tehdit radar sinyalinin 10 GHz olduğu durumda 10 cm faz merkezleri arası mesafe için 0 - 90 derece geliş açısı aralığında oluşan belirsizlik grafiği Şekil 2.10'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 0.6 radyan faz farkına karşılık düşen 4 farklı geliş açısı bulunmaktadır. Faz karşılaştırma yöntemi ile açının yüksek doğrulukta tespit edilebilmesi için belirsizliğin çözülmesi gerekmektedir. Bu tez kapsamında faz karşılaştırma yönteminde belirsizliğin çözülmesi için yapay olarak oluşturulan faz merkezleri arası mesafeyi kullanarak belirsizlik oluşumunu engelleyen ikincil düzey fark dizisi (SODA) yöntemi kullanılmıştır (Ly vd. 2013).

Yüksek frekanslarda küçülen λ değeri anten yerleşiminde faz merkezleri arası mesafelerin anten boyutlarından daha küçük olmasını gerektirmektedir ve belirsizlik oluşturmayacak yerleşim anten boyutları nedeni ile fiziksel olarak imkansız olmaktadır. SODA yönteminde 3 adet anten kullanılarak λ 'nın yarısına eşit yada küçük değerde yapay faz merkezleri arası mesafe oluşturulabilmektedir (Ly vd. 2012). SODA yönteminde kullanılan anten yerleşimi kavramsal olarak Şekil 2.11'de verilmiştir.

Şekil 2.11'de verilen yerleşimde $A_1 - A_2$ anten çiftinde d_1 faz merkezleri arası mesafesinden dolayı $\Delta\phi_1$, $A_2 - A_3$ anten çiftinde d_2 faz merkezleri arası mesafesinden dolayı $\Delta\phi_2$ faz farkı oluşmaktadır. $\Delta\phi_1$ ve $\Delta\phi_2$ kullanılarak yerleşimde bulunmayan



Şekil 2.10 Faz farkına karşılık gelen belirsizlik açıları



Şekil 2.11 SODA yöntemi kavramsal yerleşim

λ 'nın yarısından daha küçük Δd faz merkezleri arası mesafe için oluşan faz farkını elde etmek mümkün olmaktadır (Searle 2017). Δd mesafesi için oluşan faz farkı $A_1 - A_2$ anten çiftinde oluşan faz farkından $A_2 - A_3$ anten çiftinde oluşan faz farkının çıkarılması ile elde edilmektedir. SODA yönteminde Δd mesafesi ve θ geliş açısı için elde edilecek faz farkı Eşitlik (2.17) ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta\varphi_{SODA} = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = \frac{\Delta d \sin(\theta)}{\lambda} \times 2\pi \quad (2.17)$$

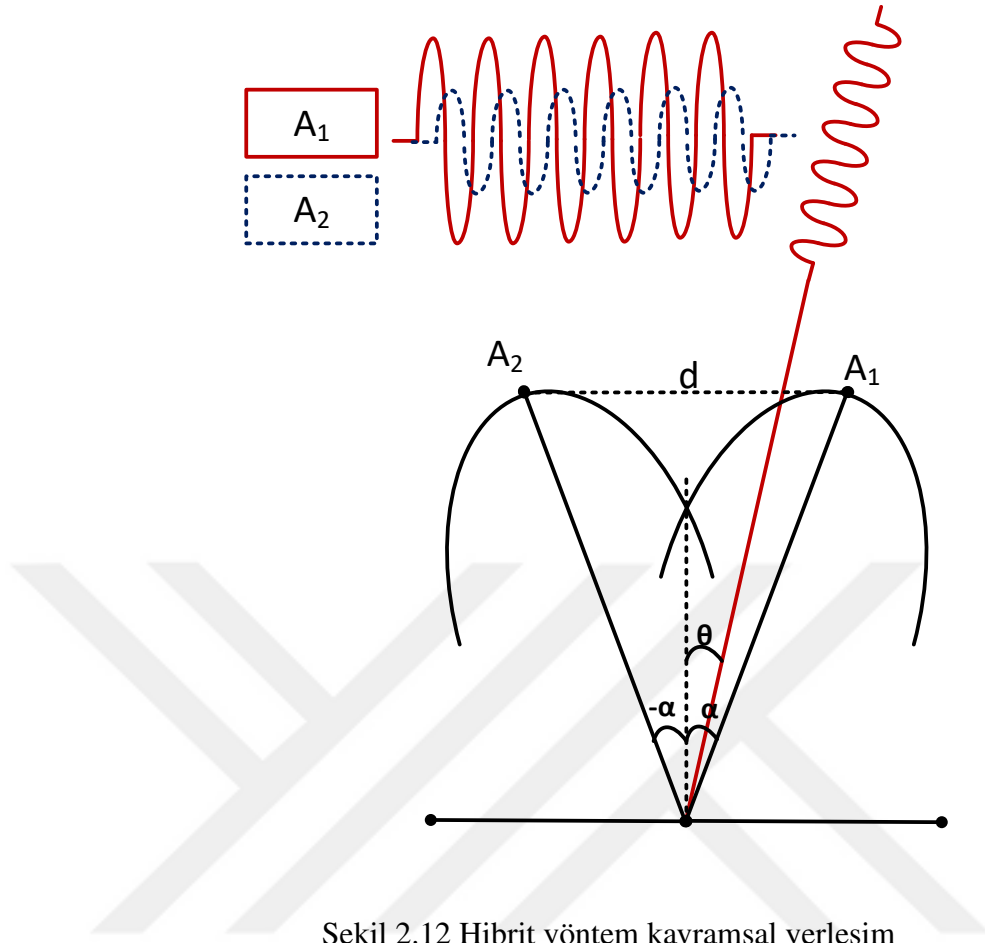
Antenlerden alınan sinyaller işlenerek $\Delta\varphi_{SODA}$ hesaplandığında Eşitlik (2.17)'de tek bilinmeyen θ kalmaktadır. Alınan sinyallerden hesaplanan ve belirsizlik içermeyen SODA faz farkından tehdit radar sinyalinin geliş açısı bilgisi ise Eşitlik (2.18) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\theta_{SODA} = \arcsin\left(\frac{\Delta\varphi_{SODA}\lambda}{2\pi\Delta d}\right) \quad (2.18)$$

2.3.5.3 Hibrit yön bulma yöntemi

Hibrit yön bulma yönteminde farklı bakış açıları ile yerleştirilen yönlü antenler kullanılarak faz ve genlik karşılaştırma yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntem, antenlerin faz merkezleri arasındaki mesafenin sinyalin dalga boyundan büyük olduğu durumda oluşan faz karşılaştırma yöntemi belirsizliğinin genlik karşılaştırma yöntemi sonucunda elde edilen geliş açısı kullanılarak giderilmesi prensibine dayanmaktadır. Hibrit yöntem sayesinde genlik karşılaştırma yöntemine uygun anten yerleşiminde faz karşılaştırma yöntemi de uygulanarak tehdit radar sinyalinin geliş açısı tespit doğruluğu arttırılmaktadır (Brinegar 2000). Yöntemde kullanılan anten yerleşimi kavramsal olarak Şekil 2.12'de gösterilmiştir.

Şekil 2.12'de α ve $-\alpha$ bakış açıları ile faz merkezleri arası mesafe d olacak şekilde yerleştirilmiş iki anten verilmiştir. Bu yerleşimde θ geliş açısı ile alınan tehdit radar sinyali A_1 ve A_2 antenlerinden faz ve genlik farkı içerecek şekilde elde edilmektedir. Yöntemde faz ve genlik farkı içeren sinyaller genlik ve faz karşılaştırma yöntemlerinin uygulanması için kullanılmaktadır. Antenlerden alınan sinyaller Eşitlik (2.19)'de verilmiştir. Eşitlikte verilen $A_1(\theta)$ ve $A_2(\theta)$ anten örüntüleri ve geliş açısına bağlı genlik değerlerini ifade etmektedir. Sinyaller arası faz farkı ise d ve θ değerine göre değişmektedir.



Şekil 2.12 Hibrit yöntem kavramsal yerleşim

$$\begin{aligned}
 s_1(t) &= A_1(\theta) \sin\left(2\pi ft + \frac{d \sin(\theta)}{\lambda} \times 2\pi\right) + n(t) \\
 s_2(t) &= A_2(\theta) \sin(2\pi ft) + n(t)
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

Hibrit yöntemde iki sinyalin antenlere ulaşmadan önce katettiği yol farkının lambda değerinden büyük olduğu durumda faz katlanması nedeni ile belirsizlik oluşmaktadır. Oluşan belirsizliğin sayısını ise antenler arası mesafe, yerleşimde bir anten çifti ile alınması hedeflenen en yüksek geliş açısı ve tehdit radar sinyalinin dalga boyu belirlemektedir. Belirsizlik sayısı Eşitlik (2.20) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$n = \left\lfloor \frac{d \sin(\theta_{\max})}{\lambda} \right\rfloor
 \tag{2.20}$$

Eşitlik (2.20)'in uygulanması ile elde edilen n , sinyalin en yüksek geliş açısında kat

ettiği fazlardan mesafenin neden olduğu katlanmanın gerçekleşme sayısını ifade etmektedir. Hibrit yöntemde faz karşılaştırma yöntemi uygulanırken belirsizlik içeren faz farkları ile kullanılmaktadır. Bu nedenle sinyaller arasında hesaplanan temel faz farkına gerçekleşen her faz katlanması için 2π değeri eklenmektedir. Temel faz farkından elde edilen faz farkları Eşitlik (2.21) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\Delta\varphi_i = \Delta\varphi + i \times 2\pi \quad (i = 0, 1 \dots n) \quad (2.21)$$

Hibrit yöntemde eşitlik (2.21) kullanılarak elde edilen $n + 1$ adet faz farkı faz karşılaştırma yönteminde ayrı ayrı kullanılarak $n + 1$ adet geliş açısı elde edilmektedir. Geliş açıları Eşitlik (2.22) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\theta_i = \arcsin\left(\frac{\Delta\varphi_i \lambda}{2\pi d}\right) \quad (i = 0, 1 \dots n) \quad (2.22)$$

Eşitlik (2.22) sonucunda elde edilen $n + 1$ belirsizlik içeren geliş açısı ve genlik karşılaştırma sonucu elde edilen geliş açısı kullanılarak belirsizlik çözme işlemi gerçekleştirilmektedir. Belirsizlik çözme işlemi sırasında genlik karşılaştırma yöntemi sonucunda elde edilen geliş açısı değerine en yakın faz karşılaştırma yöntemi geliş açısı seçilerek hibrit yöntem sonuçlandırılmış olur.

3. MATERYAL ve YÖNTEMLER

Bu bölümde ilk olarak elektronik destek sistemi tarafından tespit edilecek tehdit radar sinyalleri, anten yerleşimlerine uygun olarak üretilmiştir. Daha sonra tez kapsamında tehdit yön bilgisinin çıkarımında kullanılan tek darbe yöntemlerinin başarımlarını analiz için yapılan algoritmaları oluşturulmuştur.

3.1 Tehdit Radar Sinyallerinin Oluşturulması

Tek darbe yön bulma algoritmalarının başarımlarını analiz için gerekli tehdit radar sinyallerinin üretimi, elektronik destek sistemi için önerilen anten sayısı ve yerleşimine göre sinyalin geliş açısı göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Geliştirilen MATLAB kodu elektronik destek sistemi için tehdit radar sinyal üretici (TRSÜ) olarak çalıştırılmıştır. TRSÜ darbe genişliği, darbe tekrarlama sıklığı, sinyal frekansı, SNR, anten örüntüleri ve anten yerleşimi girdilerini kullanarak elektronik destek sistemi alıcılarındaki faz ve genlik farklarına sahip sinyalleri üretebilmektedir.

Algoritmaların analizinde kullanılacak tehdit radar sinyallerinin elektronik destek sisteminin alıcı parametrelerine göre üretilmesi gerekmektedir. Bu tez kapsamında alınan sinyalden yön bulma işleminin gerçekleştirilmesi için önerilen anten yerleşiminin kullanılacağı elektronik destek sistemi parametreleri bazı kabuller ile belirlenmiştir. TRSÜ tarafından sinyaller, aşağıda listelenen kabuller göz önüne alınarak üretilmiştir.

- Radar tarafından yüksek frekans bölgesinde gönderilen sinyal elektronik destek sistemi tarafından alındıktan sonra RF birimler yardımı ile ara frekans bölgesine düşürülmektedir. Bu çalışma kapsamında alınan sinyalin ara frekans bölgesinde 1 GHz frekansa denk gelecek şekilde düşürüldüğü varsayılmıştır.
- Ara frekans bölgesine düşürülen analog sinyaller sayısal dönüştürücüler tarafından örneklenerek sayısal sinyal elde edilir. Elektronik destek sisteminde kullanılan

ASD'nin örnekleme frekansının 4 GHz olduğu kabul edilmiştir. Bu sayede elektronik destek sisteminde 2 GHz anlık bant genişliği sağlanmıştır.

- Tehdit radarlardan alınan sinyallerden anlık parametre çıkarımı için yüksek SNR değeri gerekmektedir. Zaman ve frekans parametrelerinin yüksek doğrulukta çıkarımı için gereken en düşük SNR değeri 15 dB iken yön parametresinin çıkarımı için gereken SNR değerinin 18 dB'den büyük olması gerekmektedir (Martino 2012). Bu nedenle analizi yapılan algoritmalar için 18 dB SNR değerine sahip sinyaller üretilmiştir.
- Sinyallerdeki gürültü seviyesi elektronik destek sisteminin anlık bant genişliği olan 2 GHz değeri göz önüne alınarak belirlenmiştir.
- Tez kapsamında analizi yapılan tek darbe algoritmalarının tehdit sinyalin tespitinden sonra en kısa zamanda yön bilgisini üretmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle bilinen en küçük radar darbe genişliği olan 100 ns değerine sahip sinyaller üretilmiştir. Radardan alınan sinyalin daha büyük darbe genişliğinde olması durumunda veya radarın sürekli dalga radarı olması durumunda ise alınan ilk 100 ns sinyalden yön bilgisinin çıkarılacağı varsayılmıştır. Bu varsayım ile zaman ve frekans parametrelerine göre daha uzun işlem süresi gerektiren yön parametresi çıkarımı işleminin belirli bir gecikmede bitirilmesi hedeflenmiştir.

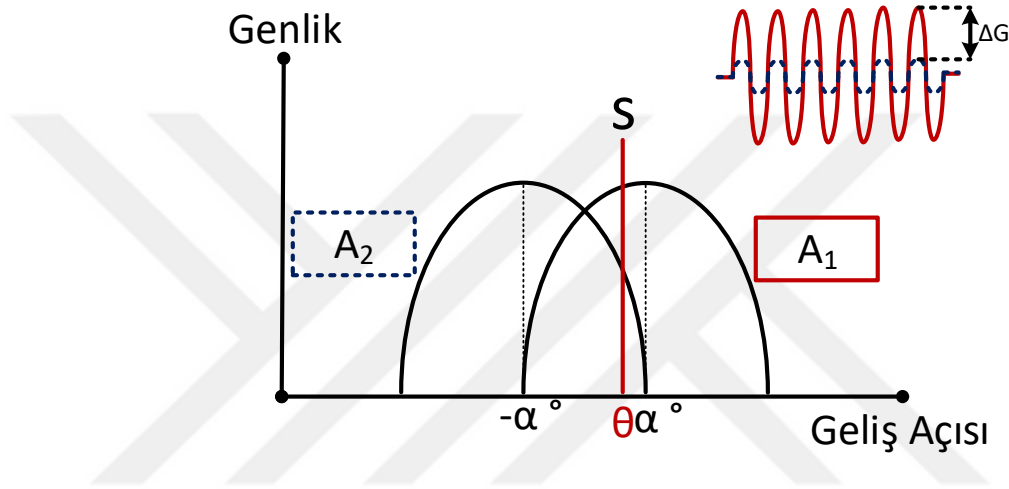
Anten yerleşiminin belirlediği anten sayısı, antenler arası mesafe ve anten bakış açılarına göre TRSÜ tarafından farklı genlik ve faz değerlerinde üretilen sinyaller Eşitlik (3.1)'de verilmiştir.

$$s_i(t) = A_i \sin(2\pi ft + \varphi_i) + n(t) \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.1)'de verilen i , sinyalin alındığı antenin numarasını göstermektedir. A_i , anten bakış açısı ve örüntüsü baz alınarak belirlenen geliş açısına bağlı sinyal genliğini, φ_i antenlerin faz merkezleri arası mesafesinin neden olduğu geliş açısı ile değişen faz

değerini, f ise sinyal frekansını ifade etmektedir. Sinyallere eklenen sıfır ortalamalı Gauss dağılımlı gürültü n ile gösterilmiştir.

Örnek olarak iki anten içeren yerleşim için üretilen sinyallerde, anten bakış açısı ve anten örüntüsüne bağlı olarak oluşan genlik farkı Şekil 3.1’de sunulmuştur. α ve $-\alpha$ bakış açısı değerine sahip örnek yerleşimde, A_1 ve A_2 antenleri tarafından θ geliş açısı ile alınan S tehdit radar sinyalinin iki anten arasındaki genlik farkı ΔG olarak gerçekleşmektedir.



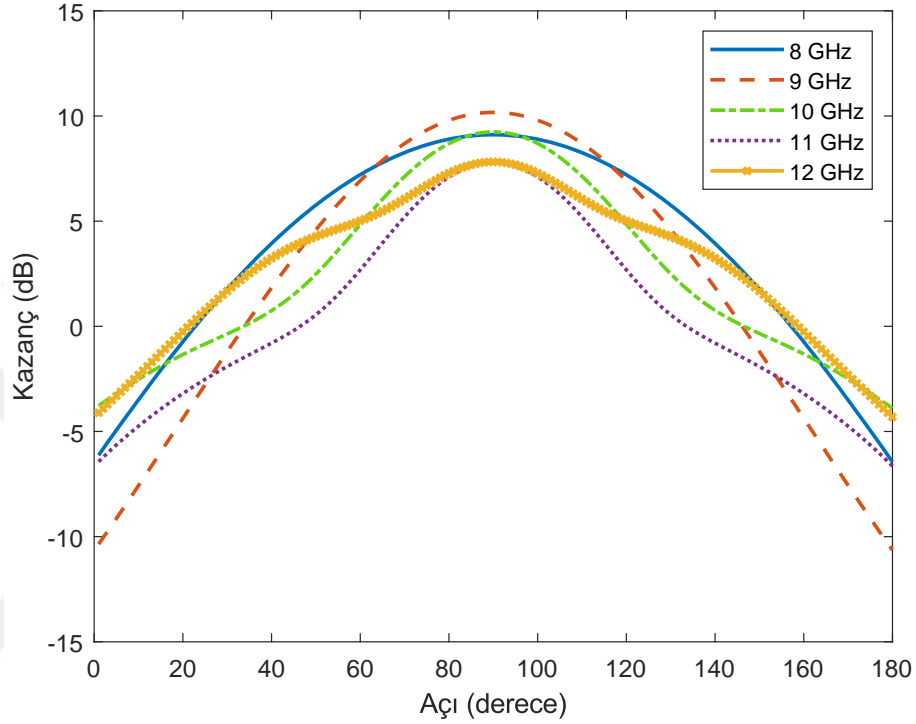
Şekil 3.1 Sinyal geliş açısına göre antenlerde gözlenen genlik farkı

TRSÜ tarafından üretilen sinyallerde Eşitlik (3.2) kullanılarak tehdit radar sinyalinin geliş açısına uygun genlik farkları oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} s_1(t) &= A_1(\theta) \sin(2\pi ft) + n(t) \\ s_2(t) &= A_2(\theta) \sin(2\pi ft) + n(t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Tez kapsamında X bant radarlar için yön bulma analizleri yapılmıştır. Tek darbe yön bulma sistemlerinde genel olarak geniş hüzmeye ve çalışma frekansı aralığına sahip spiral antenler kullanılmaktadır (Lipsky 1987). Bu nedenle TRSÜ tarafından üretilen sinyallere verilecek genlik farkının belirlenmesi için X bantta çalışan spiral anten örüntüleri gerekmektedir. Tez kapsamında kullanılan spiral anten örüntüleri MATLAB programının anten kütüphanesinde bulunan spiral eşit açılı antenden, MATLAB programının örüntü hesaplayıcı fonksiyonları kullanılarak elde edilmiştir. TRSÜ tarafından 8 ile 12 GHz

aralığında 1 GHz adım ile elde edilen örüntüler kullanılmıştır. Anten yerleşiminde belirtilen antenlerin bakış açısı bilgisine göre kaydırılan ilgili frekanstaki örüntüler sayesinde tehdit radar sinyalinin geliş açısına uygun genlik farkları içeren sinyallerin üretilmesi sağlanmıştır. TRSÜ tarafından kullanılan spiral eşit açılı antenin 90 derece bakış açılı yerleşimi ile elde edilen örüntü grafikleri ise Şekil 3.2’de verilmiştir.



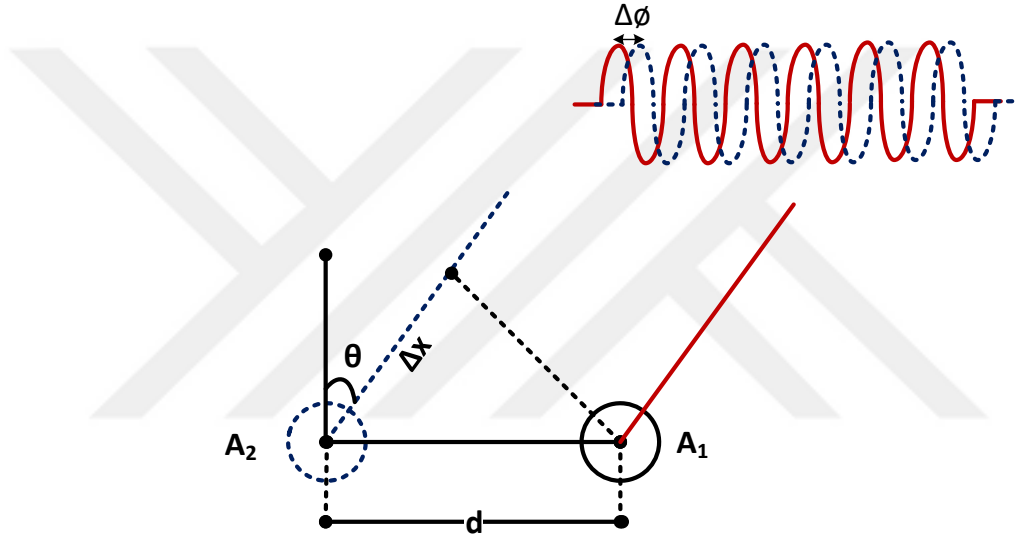
Şekil 3.2 Spiral eşit açılı anten örüntüsü

Anten yerleşiminde belirlenen antenler arası mesafe, antenlerden elde edilen sinyaller arasında faz farkı oluşmasına neden olmaktadır. Bu faz farkı tehdit radar sinyalinin antenlerin yerleştirildiği düzleme geliş açısına bağlı olarak değişmektedir. Faz farkına neden olan anten yerleşimi ve tehdit radar sinyalinin geliş açısı geometrisi Şekil 3.3’de verilmiştir. Şekilde görülen d tümyönlü iki antenin faz merkezleri arasındaki mesafeyi göstermektedir. θ ise tehdit radar sinyalinin antenlerin yerleştirildiği düzleme geliş açısını göstermektedir. Şekilde 3.3’de verilen Δx , sinyalin A_2 antenine ulaşmadan önce kat ettiği faz farkına neden olan fazladan mesafeyi göstermektedir. Δx mesafesi nedeni ile sinyal A_2 antenine Δt süre geçikme ile ulaşmaktadır. Geliş açısı ve antenlerin faz merkezleri arasındaki mesafe bilgileri ile Δt süresinin çıkarımı Eşitlik (3.3) kullanılarak yapılmaktadır.

$$\Delta t = \frac{d \sin(\theta)}{c} \quad (3.3)$$

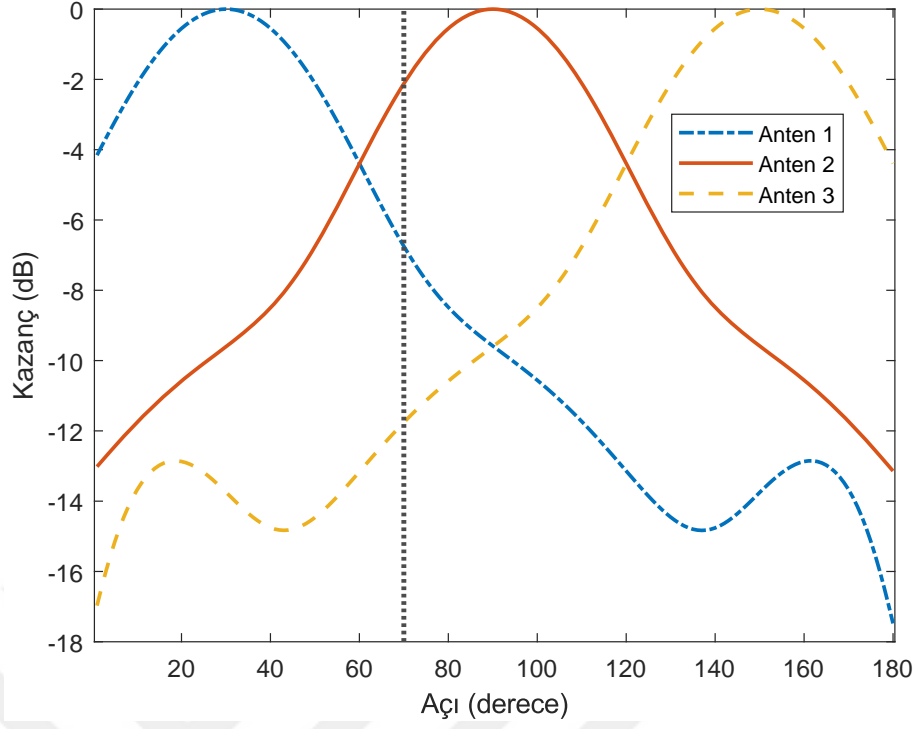
TRSÜ Δt hesaplandıktan sonra Eşitlik (3.4)'ü kullanarak antenlerde oluşan fazları farklı sinyalleri üretmektedir.

$$\begin{aligned} s_1(t) &= \sin(2\pi f(t + \Delta t)) + n(t) \\ s_2(t) &= \sin(2\pi f t) + n(t) \end{aligned} \quad (3.4)$$

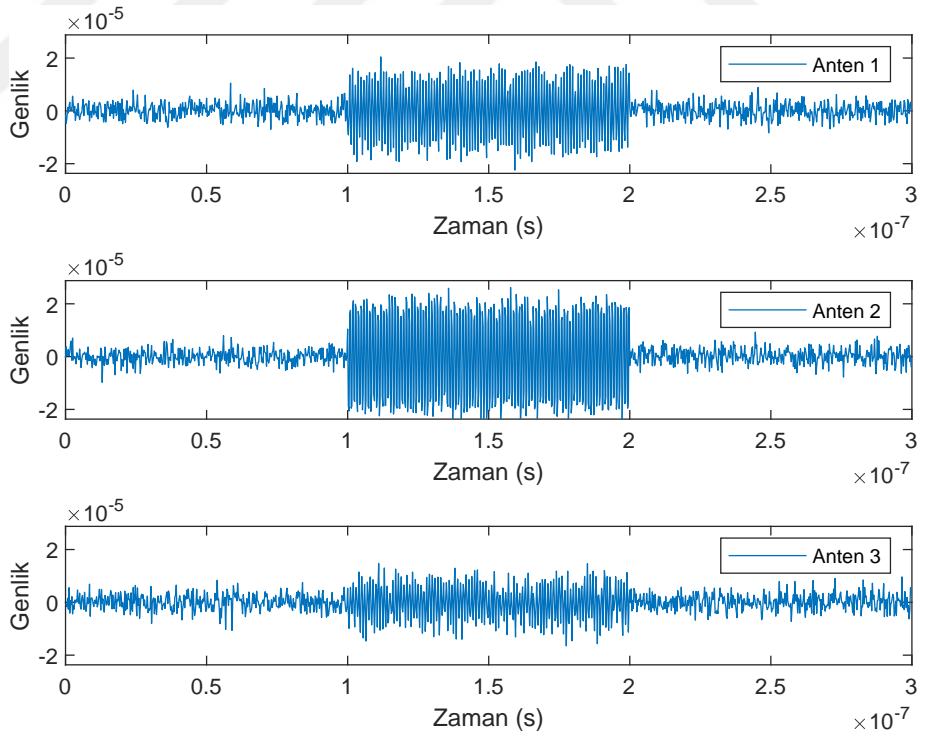


Şekil 3.3 Sinyal geliş açısına göre antenlerde gözlenen faz farkı

TRSÜ tarafından üç anten içeren örnek bir yerleşim için sinyaller üretilmiştir. Üretilen tehdit radar sinyalinin frekansı 10 GHz, antenlerin bulunduğu platforma geliş açısı ise 70 derecedir. Bu yerleşimde antenlerin bakış açıları 30, 90 ve 150 derece olacak şekilde seçilmiş ve anten örüntüleri Şekil 3.4'de verilmiştir. Şekilde görülen kırmızı dikey çizgi ise örüntülerin 70 derecede karşılık geldiği değerleri göstermektedir. Bu yerleşimde antenler arası mesafe 10 cm varsayılmıştır ve üretilen sinyallere geliş açısına bağlı olarak faz farkları verilmiştir. TRSÜ tarafından üretilen sinyaller Şekil 3.5'de görülmektedir. Bu tez kapsamında yapılan algoritma analizlerinde kullanılan sinyaller, anten yerleşimleri göz önüne alınarak TRSÜ tarafından üretilmiştir.



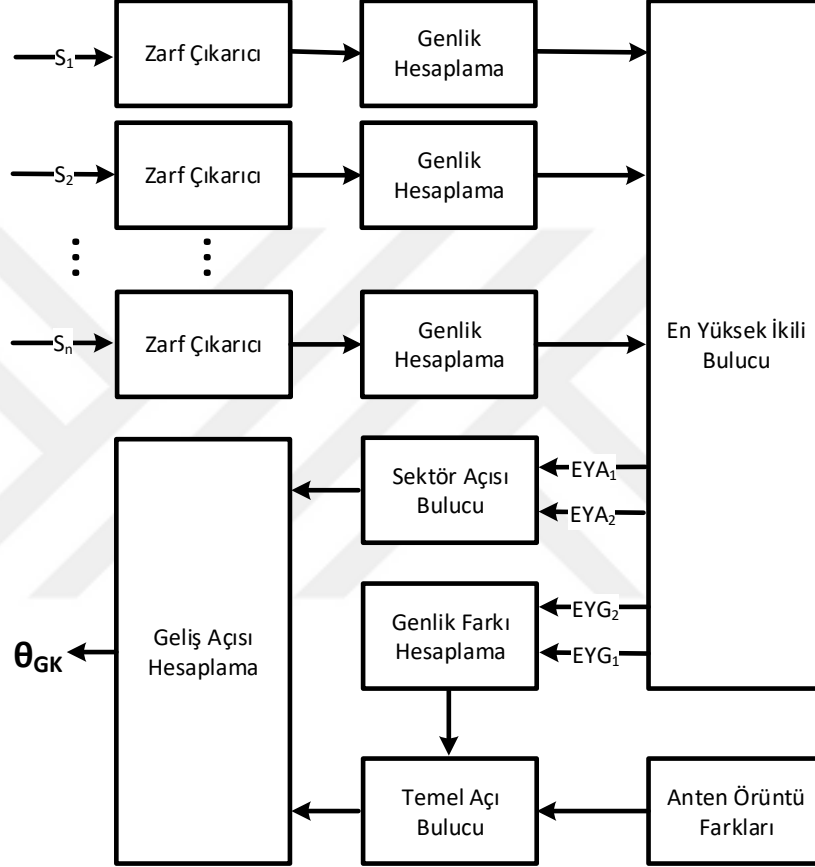
Şekil 3.4 Örnek yerleşim anten örüntüleri



Şekil 3.5 Örnek yerleşim sinyalleri

3.2 Genlik Karşılaştırma Yöntemi

Bu bölümde teorik olarak Bölüm 2.3.5.1’de anlatılan genlik karşılaştırma yönteminin tez kapsamında analizi yapılan algoritması sunulmuştur. Algoritmanın blok şeması Şekil 3.6’de verilmiştir.



Şekil 3.6 Genlik karşılaştırma yöntemi blok şeması

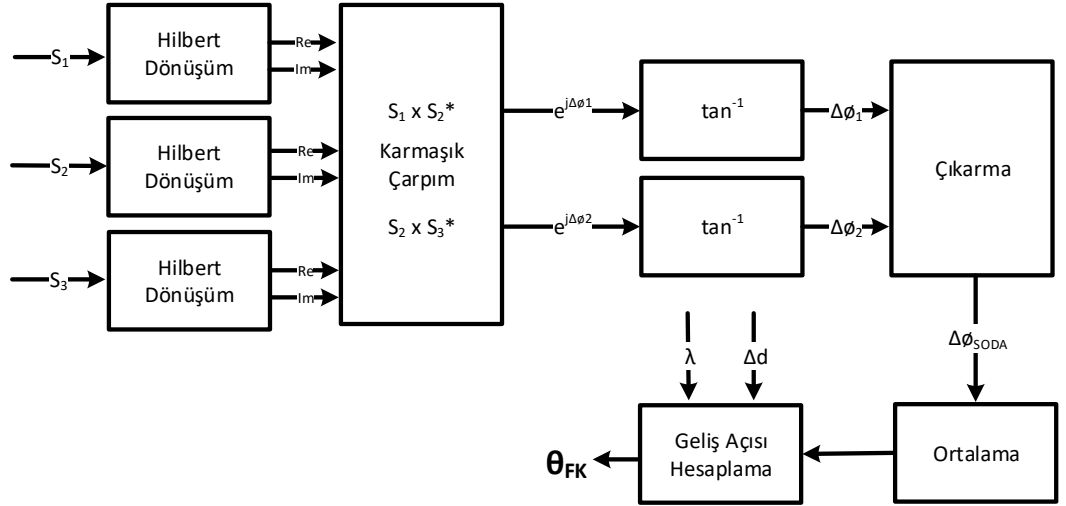
Antenlerden alınan n adet sinyal ilk olarak zarf çıkarıcı bloğundan geçirilerek sinyallerin zarfları elde edilmektedir. Sinyallerin zarfının hesaplanmasında Eşitlik 3.5 kullanılmıştır. Eşitlikte verilen $\hat{s}(t)$, anten tarafından alınan $s(t)$ sinyalinin Hilbert dönüşümünü ifade etmektedir.

$$e(t) = \sqrt{s(t) \times s(t) + \hat{s}(t) \times \hat{s}(t)} \quad (3.5)$$

Genlik hesaplama bloğunda sinyal zarflarının gürültü seviyesine göre belirlenen eşik değerini geçtiği süre boyunca ortalaması alınarak genlik değeri hesaplanmaktadır. En yüksek ikili bulucu bloğunda n adet antenden alınan sinyalden en yüksek sinyal genliğine sahip iki antene ait sinyallerin genlikleri EYG_1 ve EYG_2 olarak raporlanmaktadır. Yine bu blokta en yüksek iki genliğin alındığı antenler EYA_1 ve EYA_2 olarak raporlanmaktadır. EYA_1 ve EYA_2 girişlerini kullanan sektör açısı bulucu bloğu iki antenin ait olduğu sektör açısını bularak geliş açısı hesaplama bloğuna iletmektedir. Genlik farkı hesaplama bloğunda EYG_1 ve EYG_2 kullanılarak genlik farkı hesaplanmaktadır. Hesaplanan genlik farkı temel açı bulucu bloğunda anten örüntü farkları ile karşılaştırılarak farkın en yakın olduğu değer temel açı olarak raporlanır. Tehdit radar sinyalinin elektronik destek sistemine geliş açısı θ_{GK} sektör açısı ve temel açı girdilerini kullanan geliş açısı hesaplama bloğu tarafından bulunmaktadır.

3.3 Faz Karşılaştırma Yöntemi

Bölüm 2.3.5.2’de teorik olarak anlatılan SODA faz karşılaştırma yönteminin tez kapsamında analizi yapılan algoritması Şekil 3.7’de verilmiştir.



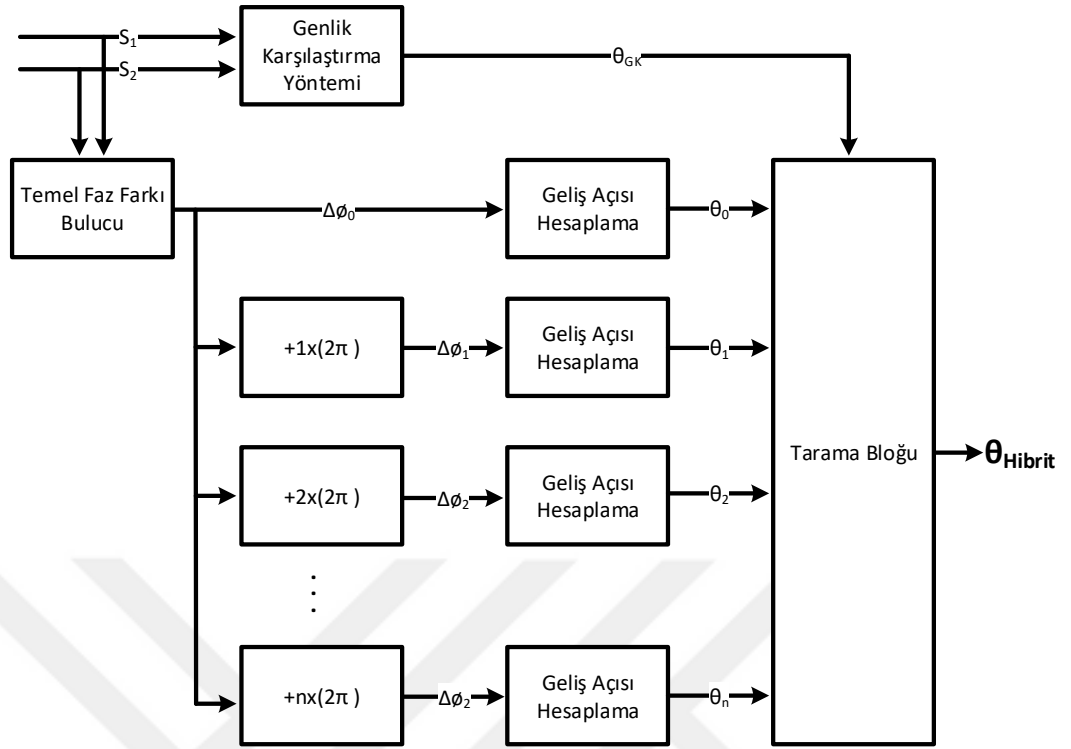
Şekil 3.7 Faz karşılaştırma yöntemi blok şeması

Şekil 3.7’de verilen algorithmanda antenlerden alınan sinyallere ilk olarak Hilbert

dönüşümü uygulanmış ve sinyaller gerçek ve sanal olmak üzere iki bileşene ayrılmıştır. İkinci adımda faz farkı hesaplanmak istenen sinyal çiftlerine karmaşık çarpım uygulanarak $e^{\Delta\varphi_1}$ ve $e^{\Delta\varphi_2}$ sinyalleri elde edilmiştir. Bir sonraki blokta $e^{\Delta\varphi_1}$ ve $e^{\Delta\varphi_2}$ sinyallerinin gerçek ve sanal kısmı kullanılarak ters tanjant formülü ile faz farkları hesaplanmıştır. Ters tanjant bloğu çıkışında elde edilen iki faz farkı, çıkarma bloğunda birbirinden çıkarılarak yapay olarak oluşturulmuş Δd faz merkezleri arasındaki mesafenin neden olacağı faz farkı elde edilmiştir. Tehdit radar sinyalinin ASD ile elde edilen her bir örneği için hesaplanan yapay açıklık faz farkının, ortalama bloğu ile darbe süresince ortalaması alınmıştır. Son olarak geliş açısı hesaplama bloğunda Eşitlik (2.18) uygulanarak θ_{FK} tehdit radar sinyalinin geliş açısı hesaplanmıştır. Bu yöntem uygulanırken tehdit radar sinyalinin dalga boyu λ parametresinin sinyalden daha önce çıkarılarak geliş açısı hesaplama bloğuna raporlandığı varsayılmıştır.

3.4 Hibrit Yön Bulma Yöntemi

Bu bölümde teorik olarak Bölüm 2.3.5.3'de anlatılan hibrit yönteminin tez kapsamında analizi yapılan algoritması sunulmuştur. Algoritmanın blok şeması Şekil 3.8'de verilmiştir. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi antenlerden alınan S_1 ve S_2 sinyalleri temel faz farkı bulucu bloğunda işlenerek iki sinyal arasındaki faz farkı elde edilir. Hesaplanan temel faz farkına belirsizlik sayısı miktarınca eklenen 2π değerleri ile elde edilen faz farkları kullanılarak faz karşılaştırma yöntemi geliş açısı hesaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Faz karşılaştırma yöntemi uygulanırken tehdit radar sinyalinin dalga boyu λ parametresinin sinyalden daha önce çıkarılarak geliş açısı hesaplama bloğuna raporlandığı varsayılmıştır. Sinyallerin faz farkının hesaplanması ve geliş açısı tespiti sırasında Bölüm 3.3'de anlatılan algortima kullanılmıştır. Faz karşılaştırma yöntemi ile elde edilen $n + 1$ belirsiz geliş açısı kullanılarak gerçekleştirilecek belirsizlik çözümü için gereken genlik karşılaştırma geliş açısı ise genlik karşılaştırma yöntemi bloğu tarafından tespit edilmiştir. Genlik karşılaştırma yöntemi bloğunda Bölüm 3.2'de anlatılan algoritma uygulanmıştır. Son olarak tarama bloğunda genlik karşılaştırma yöntemi ile elde edilen geliş açısına en yakın değerdeki faz karşılaştırma yöntemi geliş açısı seçilerek hibrit yön bulma yöntemi geliş açısı tespiti gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8 Hibrit yön bulma yöntemi blok şeması

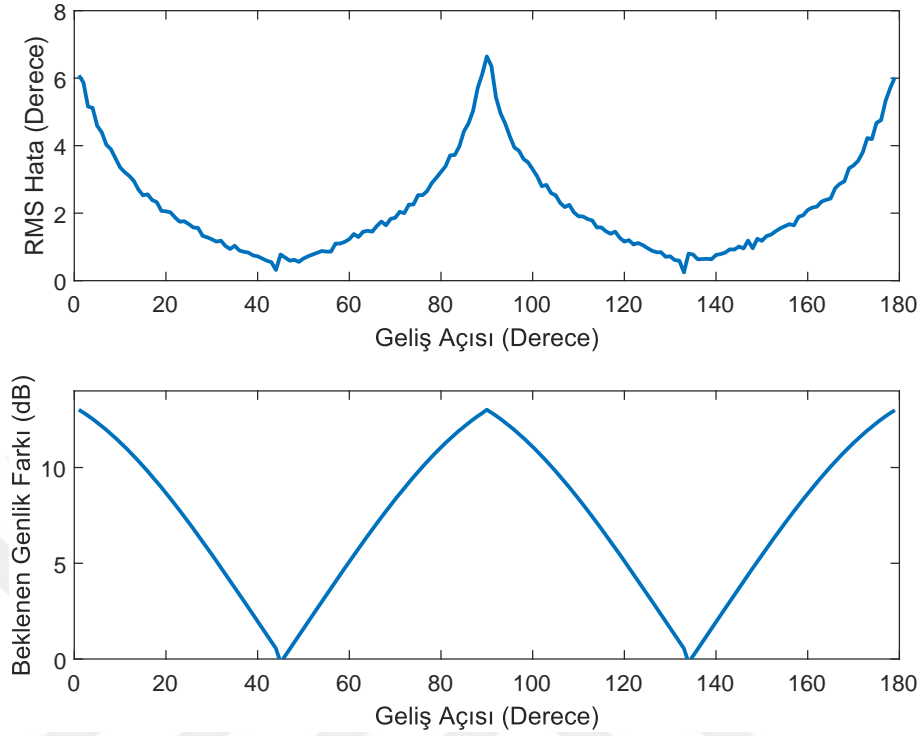
4. BAŞARIM DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde tez kapsamında analizi yapılan algoritmaların, farklı anten yerleşimi ve radar frekanslarında doğruluk performansları, MATLAB ortamında Monte Carlo benzetimleri ile analiz edilmiştir. Genlik karşılaştırma, faz karşılaştırma ve hibrit yöntem için yapılan analizlerde Bölüm 3.2, 3.3 ve 3.4'de blok şemaları verilen algoritmalar kullanılmıştır. Algoritmaların analizi sırasında kullanılan anten yerleşimleri ise analiz sonuçları verilmeden önce detaylı olarak anlatılmıştır. Analizler sırasında 18 dB SNR seviyesinde 100 ns darbe genişliği süresine sahip 8-12 GHz frekans aralığında sinyaller kullanılmıştır. Sinyallerin üretimi ise detayları Bölüm 3.1'de verilen TRSÜ kullanılarak yapılmıştır. Yöntemlerin başarımlarını değerlendirme, 0-180 derece aralığında bulunan her bir geliş açısı değeri için 100 Monte Carlo koşumu yapılarak elde edilen RMS hata grafikleri üzerinden yapılmıştır. Ayrıca analizi yapılan algoritmaları sinyal üzerinde bulunan gürültü dışında etkileyebilecek hata kaynakları tespit edilmiş ve bu hata kaynakları eklenerek analizler tekrarlanmıştır.

4.1 Genlik Karşılaştırma Yöntemi Analizi

Genlik karşılaştırma yönteminin analizinde ilk olarak bakış açıları 0, 90 ve 180 derece olarak yerleştirilmiş 3 adet yönlü anten kullanılmıştır. Söz konusu yerleşim ile 10 GHz tehdit radar frekansında geliş açısı tespiti RMS hata grafiği Şekil 4.1 (a)'da verilmiştir. 3 anten içeren bu yerleşim için anten örüntüleri ile hesaplanan, beklenen genlik farkları grafiği de Şekil 4.1 (b)'de verilmiştir. Şekil 4.1 (a)'da RMS hatanın en yüksek olduğu geliş açısı değerleri antenlerin bakış açısına karşılık gelen geliş açısı değerleridir. Şekil 4.1 (b)'de verilen beklenen genlik farkları grafiğinde görüldüğü gibi bu noktalarda iki sinyal arasındaki genlik farkı artarak en yüksek değere ulaşmaktadır. Bu durum nedeni ile genlik değeri küçük olan ikinci sinyal gürültü tabanına yaklaşmaktadır. Gürültü nedeni ile hesaplanan genlik seviyelerinde oluşan hataların artması geliş açısının hatalı tahmin edilmesine dolayısıyla RMS hatanın yüksek çıkmasına neden olmaktadır. RMS hata değerinin en az olduğu geliş açısı değerleri ise en yüksek genlikli iki sinyalin genlik seviyelerinin eşit olduğu, sektör açısına eşit olan geliş açısı değerleridir. Sektör açısında

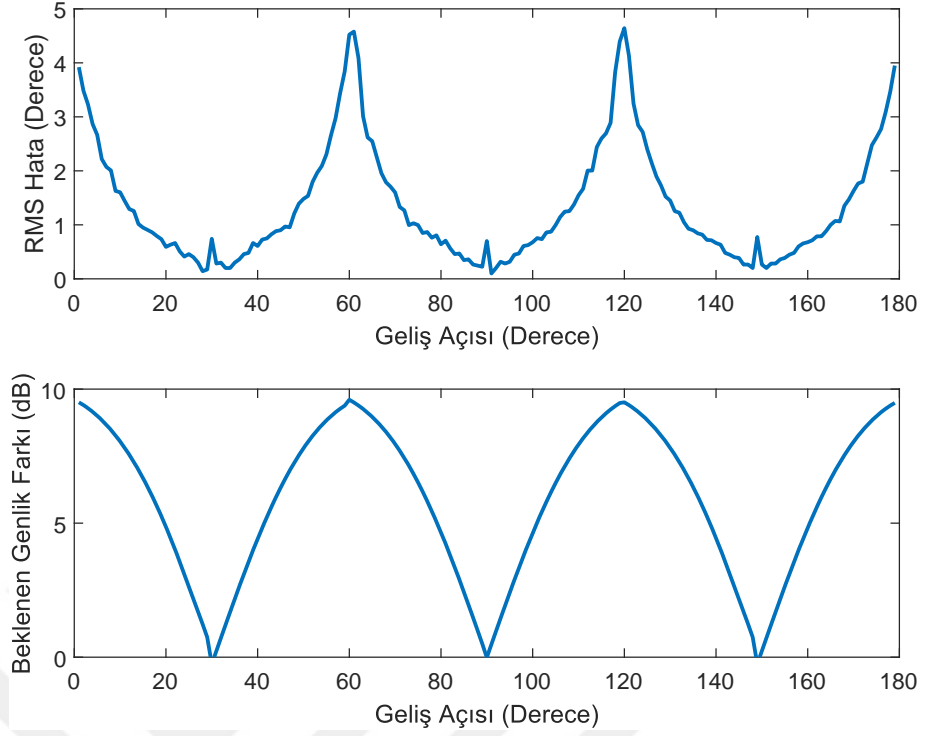
en güçlü ikinci sinyal en yüksek SNR seviyesine ulaşarak genlik farkı hesaplama hatasını en az seviyeye indirmektedir.



Şekil 4.1 3 anten genlik karşılaştırma yöntemi (a) RMS hata değişimi (b) beklenen genlik farkı değişimi

Anten sayısı arttırıldığında anten bakış açılarında genlik farkı azalmaktadır. Bu durum daha fazla anten ile yöntem uygulandığında en yüksek ikinci antenin en düşük SNR değerini arttırarak RMS hatayı azaltmaktadır. 4 antenin 0, 60, 120 ve 180 derece bakış açısı ile yerleştirildiği durumun 10 GHz tehdit radar frekansında RMS hata grafiği Şekil 4.2 (a)'da beklenen genlik farkları grafiği ise Şekil 4.2 (b)'de verilmiştir. Şekil 4.2 (b)'de 4 antenli yerleşimin anten örüntülerinden elde edilen beklenen genlik farkları grafiğinden görüldüğü gibi en yüksek ikinci antenin en düşük SNR değeri 3 antenli yerleşime göre 4 dB artmaktadır. Bu durumun sonucu olarak 3 anten yerleşiminde en yüksek 7 derece RMS hata değerine yaklaşan algoritma, 4 anten kullanılarak oluşturulan yerleşimde en yüksek 4,5 derece RMS hata değerinde sonuçlar verebilmektedir.

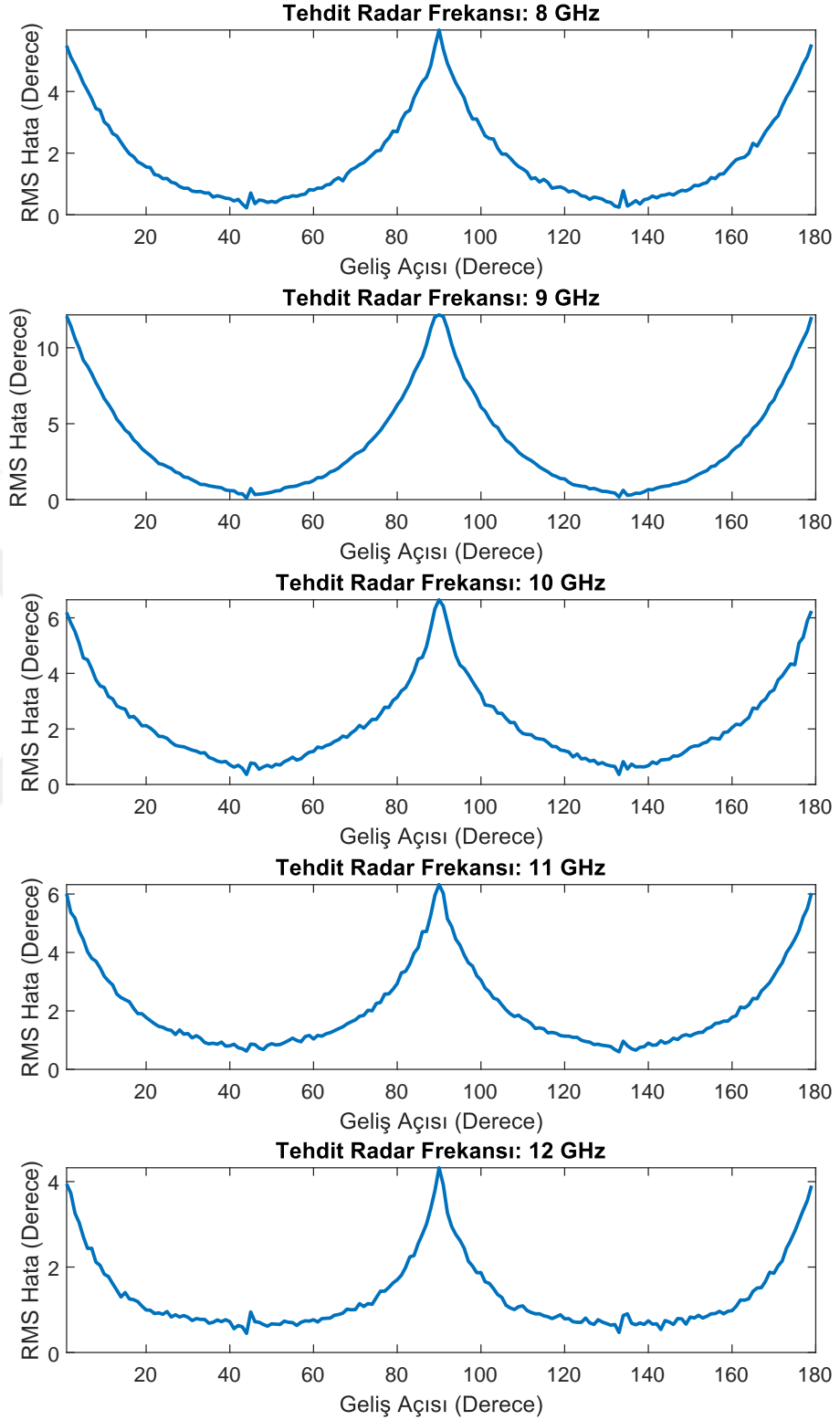
Genlik karşılaştırma yönteminde kullanılan anten sayısı arttırıldıkça RMS hata değeri azalsada eklenen her anten, yerleşim için gereken alanı arttırmaktadır. Aynı zamanda



Şekil 4.2 4 anten genlik karşılaştırma yöntemi (a) RMS hata değişimi (b) beklenen genlik farkı değişimi

eklenen her anten alıcı sistemin kanal sayısını artırarak alıcı yapısını karmaşıktırmaktadır. Genlik karşılaştırma yönteminin farklı radar frekanslarında doğruluk performans analizi, 3 anten içeren yerleşim kullanılarak yapılmıştır. 8-12 GHz aralığında 1 GHz adım ile yapılan analizler sonucunda elde edilen RMS hata grafikleri Şekil 4.3'de verilmiştir. Şekilde RMS hata değerlerinin farklı frekanslarda değiştiği görülmektedir. Bu durum Şekil 3.2'de verilen anten örüntülerinin frekansla değişiminden kaynaklanmaktadır. Her frekans için antenin o frekanstaki örüntüsüne bağlı olarak farklı değerler alan beklenen genlik farkı grafikleri algoritma başarımını etkilemektedir. En yüksek RMS hatanın olduğu 9 GHz tehdit radar frekansında anten bakış açısında iki sinyal arasındaki genlik farkı en yüksek değere ulaşmaktadır. Bu nedenle ilgili bölgede en yüksek genliğe sahip ikinci antende, yöntemin çalıştığı en düşük SNR değeri oluşmakta ve dolayısı ile RMS hata artmaktadır. En yüksek RMS hata değerinin en az olduğu 12 GHz tehdit radar frekansı için ise anten örüntüsü nedeni ile sinyaller arasında daha az genlik farkı oluşmaktadır. Bu durum bakış açısına karşılık gelen geliş açısında, en yüksek ikinci antendeki SNR seviyesini diğer frekanslara göre

daha yüksek tutarak RMS hata değerini azaltmıştır.



şekil 4.3 Farklı radar frekanslarında genlik karşılaştırma yöntemi RMS hata değişimi

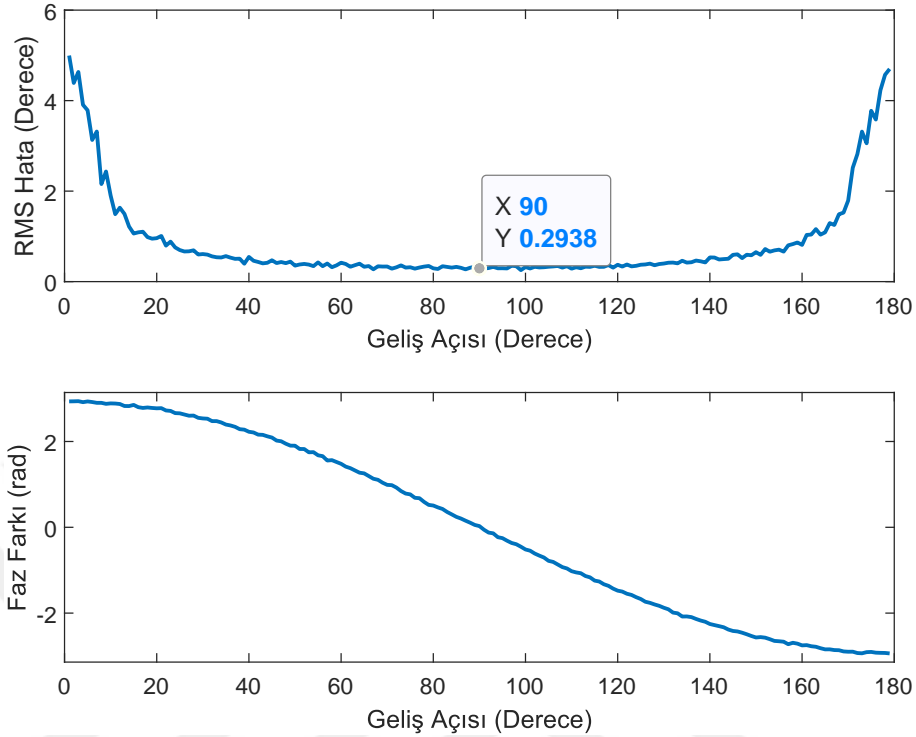
şekil 4.3 genlik karşılaştırma yönteminin anten örüntülerine yüksek bağımlılığını

göstermektedir. 10 ve 11 GHz frekanslarda anten huzme genişliklerinin yakın olması RMS hata değerlerinin yaklaşık olarak aynı olmasına neden olmaktadır. En düşük huzme genişliğine sahip 9 GHz’de ise en yüksek RMS hata değeri artarak 12 derece olmaktadır. Analizlerin yapıldığı beş frekans değeri içinde en yüksek huzme genişliği 12 GHz frekans değerinde oluşmaktadır. Bu durumun sonucu olarak en yüksek RMS hata değerinin yaklaşık olarak 4 derece ile en az olduğu frekans değeri 12 GHz olmaktadır. Yöntemde RMS hata değerinin frekansla değişiminin azaltılabilmesi için optimum anten huzme genişliğinin çalışılacak her frekansta sağlanması gerekmektedir. Özellikle yüksek bant genişliğinde çalışan antenler için bu durumun sağlanması mümkün olmamaktadır (Volakis 2007).

4.2 Faz Karşılaştırma Yöntemi Analizi

Faz karşılaştırma yönteminde uygulanan SODA algoritmasının analizi ilk olarak 3 adet tümyönlü anten içeren yerleşim ile 10 GHz tehdit radar frekansında yapılmıştır. Antenlerin yerleşimi faz merkezleri aralarında 10 ve 8,5 cm mesafe olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu yerleşim ile faz karşılaştırma yöntemi uygulanırken kullanılan Eşitlik (2.18)’da bulunan Δd değerinin, 10 GHz radar frekansında oluşan 3 cm dalga boyunun yarısı olması sağlanarak faz belirsizliği oluşması engellenmiştir. Yöntemin ilgili yerleşimi ile yapılan analizi sonucunda elde edilen RMS hata grafiği Şekil 4.4 (a)’da verilmiştir. Her bir geliş açısında sinyaller arasında oluşan faz farkı ise Şekil 4.4 (b)’de verilmiştir. Şekil 4.4 (a)’da RMS hata değerinin geliş açısının 20 dereceden 160 derece olduğu bölgeye kadar 1 derecenin altında kaldığı görülmektedir. SODA algoritması ile 140 derecelik bakış açısında geliş açısı yüksek doğruluk ile tespit edilebilmektedir. Yöntemde RMS hatanın fazla olduğu bölgeler geliş açısı değişiminin daha az faz farkı değişimine neden olduğu geliş açısı aralığında gerçekleşmektedir. Geliş açısının farklı bölgelerinde faz farkı değişiminde gerçekleşen farklılık Eşitlik (2.15)’de bulunan sinüs fonksiyonu karakteristiğinden kaynaklanmaktadır. Sinüs fonksiyonu türevinin 90 dereceye yaklaştıkça azalması analizi yapılan anten yerleşiminde 0 ve 180 derece bölgelerinde geliş açısı değişiminin daha az faz farkı değişimi oluşturmaya neden olmaktadır. Geliş açısı değişiminin faz farkında az değişime neden olması gürütü

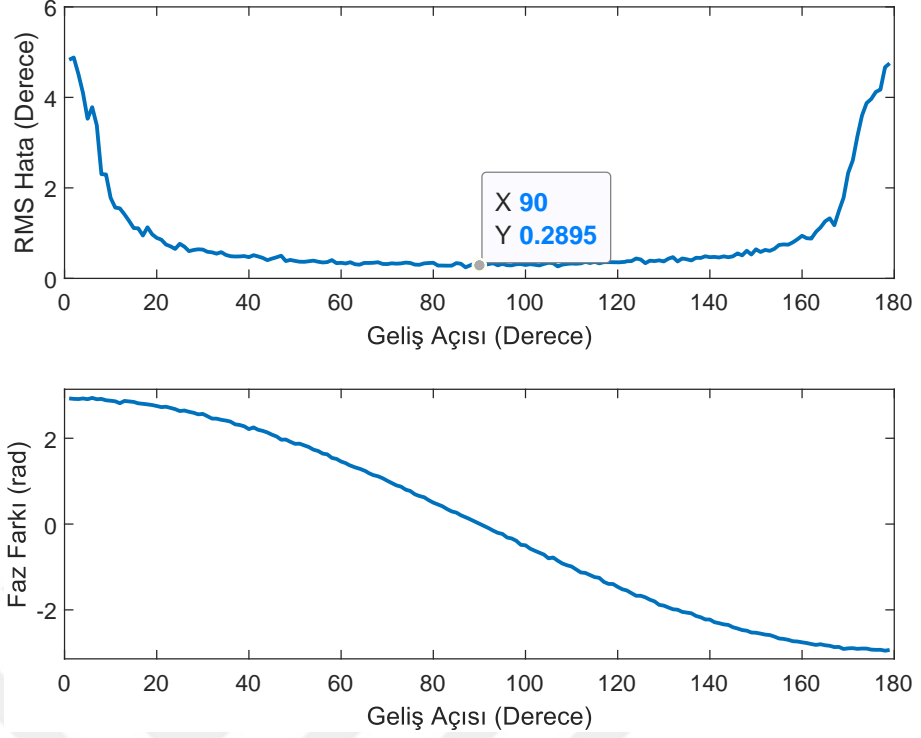
nedeni ile yapılan faz farkı hesaplama hatalarının geliş açısı tespiti hatalarını artırmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.4 Faz karşılaştırma yöntemi (a) RMS hata değişimi (b) faz farkı değişimi

Analizlerin ikinci kısmında, dalga boyunun yarısının Δd değerine eşit olduğu durumda d_1 ve d_2 mesafeleri azaltılarak antenler birbirine yaklaştırılmıştır. Bu yerleşim, yöntemin daha küçük bir alanda uygulanmasının yöntemin başarımına etkisini analiz etmek için kullanılmıştır. Antenler arası mesafe 5 ve 3,5 cm olacak şekilde uygulanan yerleşimin analizi sonucunda elde edilen RMS hata grafiği Şekil 4.5 (a)'da faz farkı değişimi grafiği ise Şekil 4.5 (b)'de verilmiştir. Antenler arası mesafe kısaltılarak yerleşimin daha küçük bir alanda uygulanmasının Δd değerinin değişmediği durumda yöntemin RMS hata performansında bir değişime neden olmadığı Şekil 4.5 (a)'da görülmektedir. Elde edilen iki sonuç incelendiğinde SODA algoritması ile gerçekleştirilen faz karşılaştırma yönteminin d_1 ve d_2 mesafelerinden etkilenmediği değerlendirilmektedir.

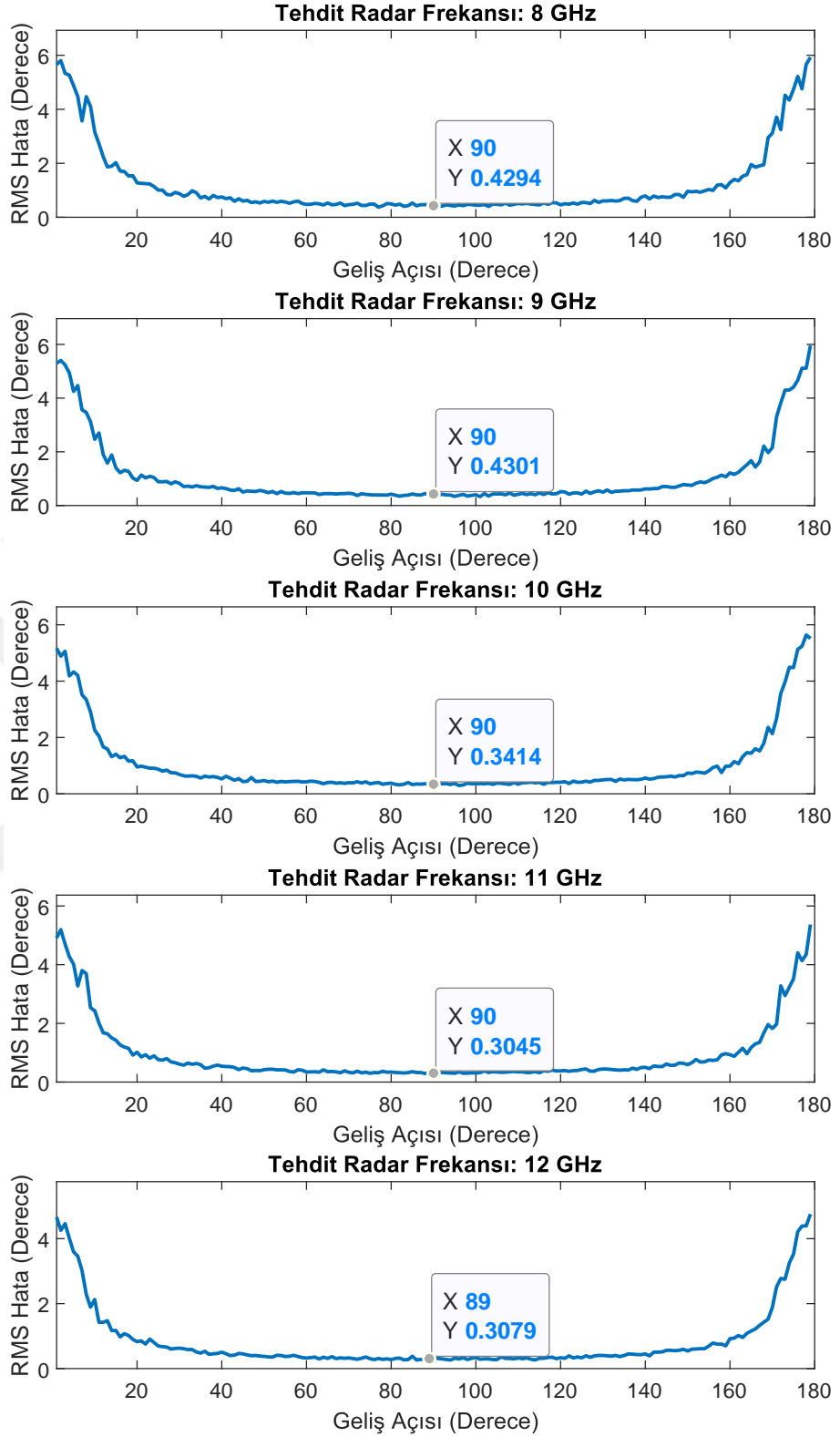
Faz karşılaştırma yönteminin farklı tehdit radar frekanslarında başarımları analiz için 8-12 GHz aralığında 1 GHz adım ile yapılmıştır. Yerleşimde faz belirsizliği oluşmaması için Δd en



Şekil 4.5 Yaklaşdırılmış anten yerleşimi ile (a) RMS hata değişimi (b) faz farkı değişimi

yüksek tehdit radar frekansı 12 GHz'in dalga boyunun yarısı olacak şekilde seçilmiştir. Farklı tehdit radar frekansları için RMS hata grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.6'da frekans azaldıkça en yüksek RMS hata değerinin arttığı görülmektedir. 12 GHz tehdit radar frekansına göre seçilen Δd değeri kullanılarak gerçekleştirilen analizde, frekans azaldıkça Δd değeri sinyalin dalga boyunun yarısından daha küçük olmaktadır. Faz karşılaştırma yönteminde RMS hata antenler arası mesafe azaldıkça arttığından düşük frekanslarda dalga boyuna bağlı azalma hata oranını arttırmaktadır. Faz karşılaştırma yönteminde kullanılan SODA algoritmasında, sistemin çalışacağı en yüksek frekansta belirsizlik oluşturmaması için belirlenen Δd değeri, diğer frekanslarda RMS hata değerini arttırmaktadır.

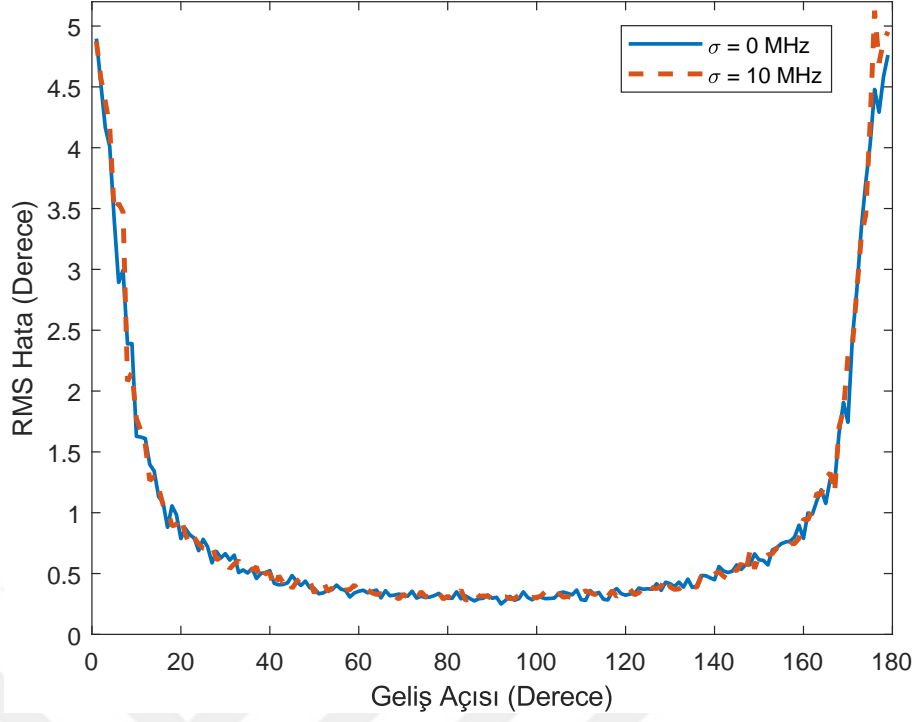
Eşitlik (2.18) kullanılarak uygulanan SODA algoritması faz farkı hatası dışında tehdit radar frekansı bilgisi hatası ve Δd değeri bilgisi hatasından etkilenmektedir. Elektronik destek sisteminde tehdit radarın yön bilgisi hesaplanırken tehdit radar sinyalinden çıkartılan frekans parametresi kullanılmaktadır. ED sistemleri tarafından hesaplanan



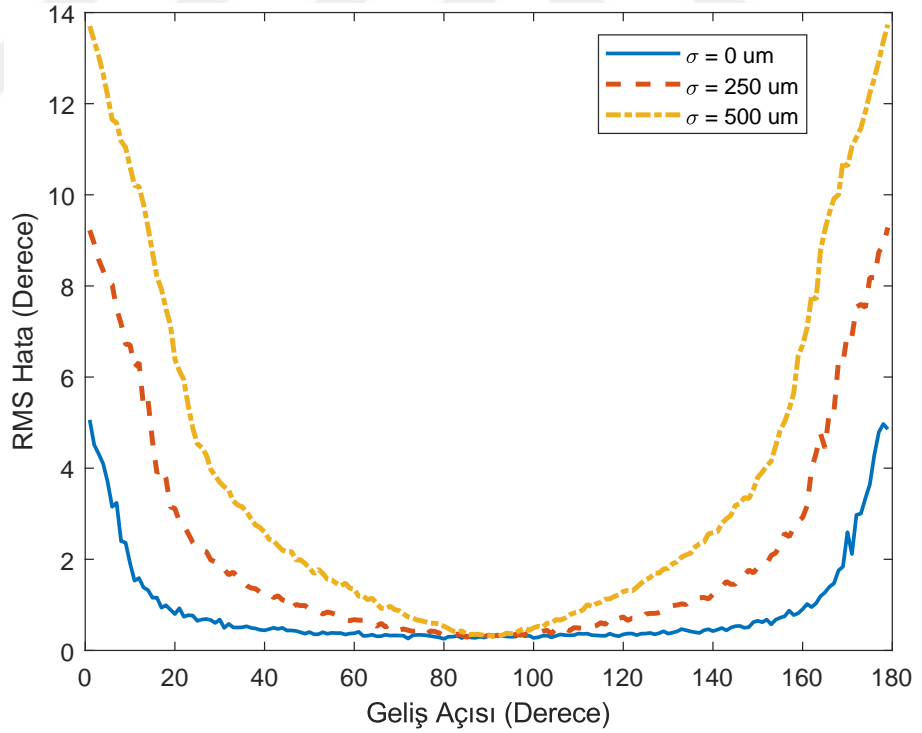
Şekil 4.6 Farklı radar frekanslarında faz karşılaştırma yöntemi RMS hata değişimi

tehdit radar frekansı parametresi gürültü gibi etkenler nedeni ile hatalı olarak tespit edilmektedir (Neri 2006). Tez kapsamında yapılan analizlerde tehdit radar frekansının, yön bilgisi hesaplanmadan önce ED sistemi tarafından tehdit radar sinyalinden çıkarıldığı ve faz karşılaştırma yönteminde kullanılan algoritmaya raporlandığı varsayılmaktadır. Raporlanan hatalı frekans bilgisinin algoritmaya etkisini incelemek için sıfır ortalamalı 10 MHz standart sapma değerli Gauss dağılımlı hataya sahip 10 GHz tehdit radar frekans bilgisi kullanılarak RMS hata analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuç, frekans hatası içermeyen analiz sonucu ile birlikte Şekil 4.7’de verilmiştir. RMS hata grafiğinde görüldüğü gibi raporlanan frekans bilgisinde bulunan 10 MHz standart sapmaya sahip hata faz karşılaştırma yönteminin RMS hatasını değiştirmemektedir. Faz karşılaştırma yöntemi tehdit radar frekansını sinyalin dalga boyunu hesaplamak için kullanılmaktadır. Tehdit radar frekansında yapılan hatalar özellikle yüksek frekans bölgesinde olan tehditler için dalga boyunda küçük hatalara neden olmaktadır. Bu durum nedeni ile yapılan iki analiz benzer RMS hata değerlerinde sonuçlar vermektedir. ED sistemlerinde tehdit radarın frekans bilgisi, bu tez kapsamında analizlerin yapıldığı 18 dB SNR seviyesinde 1 MHz’in altında doğruluk ile raporlanabilmektedir (Ortatatlı 2017). Yüksek doğrulukta frekans hesaplayabilen bir ED sisteminde faz karşılaştırma yöntemi frekans bilgisi hatasından etkilenmemektedir.

Faz karşılaştırma yönteminde faz merkezleri arası mesafe değerini ifade eden Δd değerinde bulunan hatalar yöntemin hatalı sonuçlar vermesine neden olmaktadır. Faz merkezleri arasındaki mesafe bilgisi antenlerin fiziksel yerleşimi sırasında oluşacak hatalardan etkilenmektedir. Aynı zamanda antenlerin fiziksel faz merkezleri, antenlerin üretimleri sırasında oluşabilecek farklılıklar nedeni ile değişkenlik gösterebilmektedir (Volakis 2007). Bu gibi etkenler nedeni ile Δd değerinde oluşacak hataların faz karşılaştırma yöntemine etkisinin analizi için faz merkezleri aralarında 10 ve 8,5 cm olan yerleşimde faz merkezleri arası mesafe bilgisine sıfır ortalamalı 0, 250 ve 500 mikrometre standart sapma değerine sahip Gauss dağılımlı hatalar eklenerek RMS hata grafikleri elde edilmiştir. 10 GHz tehdit radar frekansı için yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.7 Frekans bilgisi hatası ie RMS hata değişimi



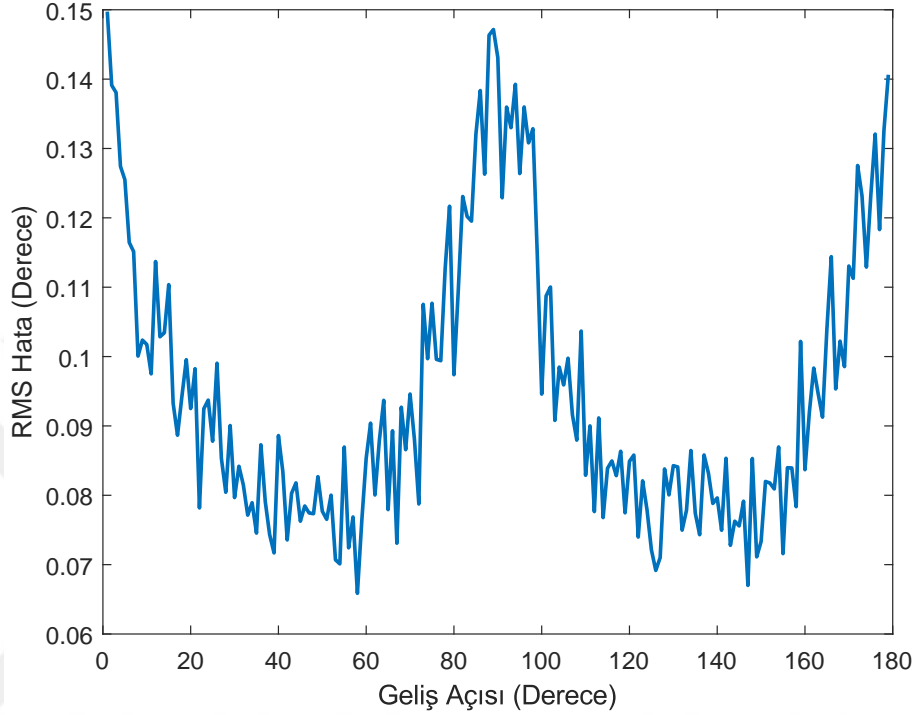
Şekil 4.8 Faz merkezleri arası mesafe bilgisi hatası ile RMS hata değişimi

Faz karşılaştırma yönteminde faz merkezleri arası mesafe büyütülerek birim geliş açısı değişimine karşılık gelen faz farkı değişiminin artırılması yöntemin doğruluğu arttırmaktadır (Ly vd. 2012). SODA algoritmasında ise faz merkezleri arasındaki mesafenin belirsizlik oluşturmaması için dalga boyunun yarısına eşit olması, birim geliş açısı değişiminin neden olduğu faz farkını azaltmaktadır. Bu nedenle Δd değerinde yapılan hatalar sebebi ile hesaplanan faz farkında oluşan kaymalar, SODA algoritmasında geliş açısına dönerken yapılan hatayı daha fazla arttırmaktadır. Özellikle faz farkı değişiminin az olduğu geliş açısı bölgelerinde küçük faz farkı değişimleri büyük açı değişimlerine karşılık geldiğinden, yöntemin faz merkezleri arası mesafe bilgisi hatasından çok etkilenmesine neden olmaktadır. Şekil 4.8’de verilen RMS hata grafiğinde görüldüğü gibi faz merkezleri arasındaki mesafe hatası standart sapma değerinin değişimi ile 0 ve 180 derece bölgelerindeki RMS hata hızla yükselmektedir. Aynı zamanda hatanın standart sapması arttıkça yöntemin 1 derece RMS hata değeri altında çalıştığı bakış açısı bölgesi oldukça daralmaktadır. Bu nedenlerle faz karşılaştırma yönteminde SODA algoritması uygulandığında faz merkezleri arası mesafe bilgisinin yüksek doğruluk ile biliniyor olması gerekmektedir.

4.3 Hibrit Yön Bulma Yöntemi Analizi

Faz ve genlik karşılaştırma yöntemlerini beraber kullanan hibrit yöntemin analizinde, 3 adet yönlü anten 0, 90 ve 180 derece bakış açısı ile aralarında 10 cm faz merkezleri arası mesafe olacak şekilde yerleştirilmiştir. 10 GHz tehdit radar frekansında yapılan analizler sonucunda elde edilen RMS hata grafiği Şekil 4.9’de verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi hibrit yön bulma yöntemi yüksek doğruluk ile tehdit radar sinyalinin geliş açısı tespitini yapabilmektedir. Yöntemin anten bakış açılarında daha yüksek hata yapmasının nedeni ilgili geliş açılarında ikinci en yüksek genliğe sahip sinyalin genlik seviyesinin azalarak gürültüye yaklaşması sonucunda faz farkı hesaplama işleminin hatasının artmasıdır. Yöntemde yüksek doğruluğa sahip faz karşılaştırma yönteminde oluşan belirsizlik, genlik karşılaştırma yöntemi ile elde edilen hatası yüksek geliş açısı tespiti ile çözülebilmektedir. Yöntemin aynı zamanda faz karşılaştırma yöntemini iki adet 90 derecelik sektör için seçilen anten çiftlerini kullanarak uyguluyor olması faz

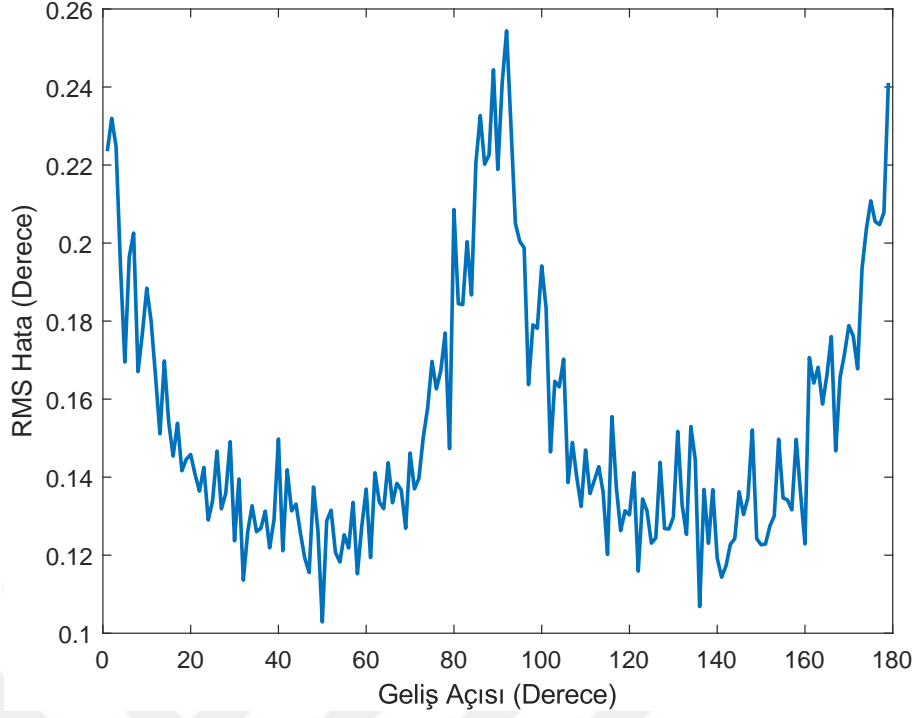
karşılaştırma yönteminin birim geliş açısı değişiminde faz farkı değişiminin fazla olduğu geliş açısı aralığını kullanması nedeni ile doğruluğu arttırmaktadır. Doğruluğu arttıran bir diğer etken ise faz merkezleri arasındaki mesafenin yöntemde dalga boyunun yarısından büyük olarak uygulanabiliyor olmasıdır.



Şekil 4.9 Hibrit yön bulma yöntemi RMS hata değişimi

Hibrit yöntemin daha küçük bir alanda uygulanmasının yöntemin başarımına etkisinin analizi için aynı bakış açısı değerine sahip antenler faz merkezleri arası mesafe 5 cm olacak şekilde yerleştirilmiştir. 10 GHz tehdit radar frekansı için yöntemin RMS hata grafiği 4.10'de verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda RMS hatanın arttığı görülmüştür. Bu durum kısalan faz merkezleri arası mesafe nedeni ile faz karşılaştırma yönteminin hata miktarının artması sonucunda gerçekleşmektedir. X bantta çalışan spiral antenlerin çapları 2 cm olacak şekilde üretilebilmektedir (Chae ve Lim 2013). Anten boyutları göz önüne alınarak yerleşimi faz merkezleri arası mesafeyi daha da azaltarak yapmak mümkündür ancak bu durum yerleşim alanında küçülme sağlarken yöntemin hata miktarını arttırmaktadır.

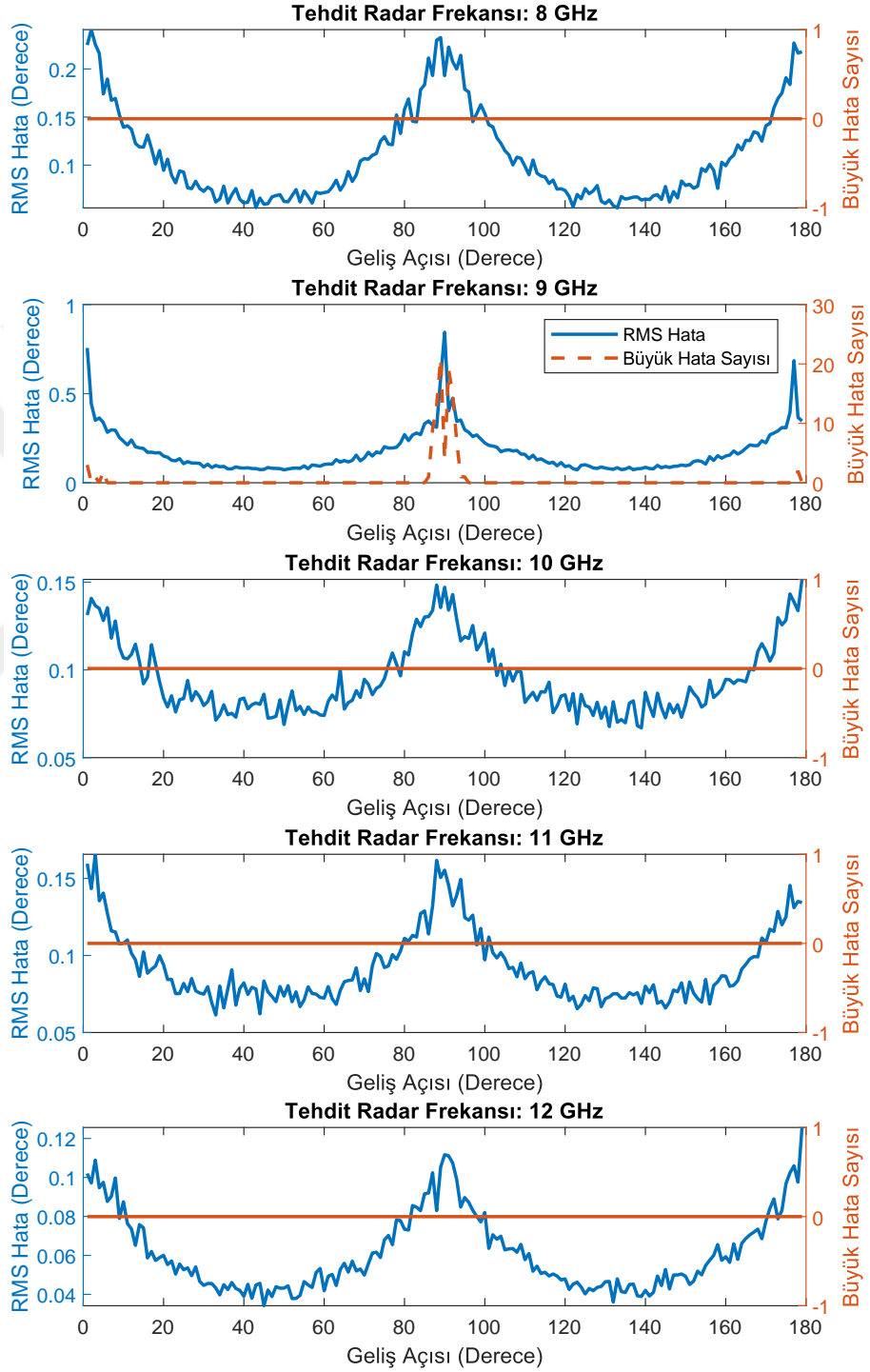
Hibrit yöntemin farklı tehdit radar frekanslarında başarım analizi 8-12 GHz frekans



Şekil 4.10 Yaklaştırılmış yerleşim ile RMS hata değişimi

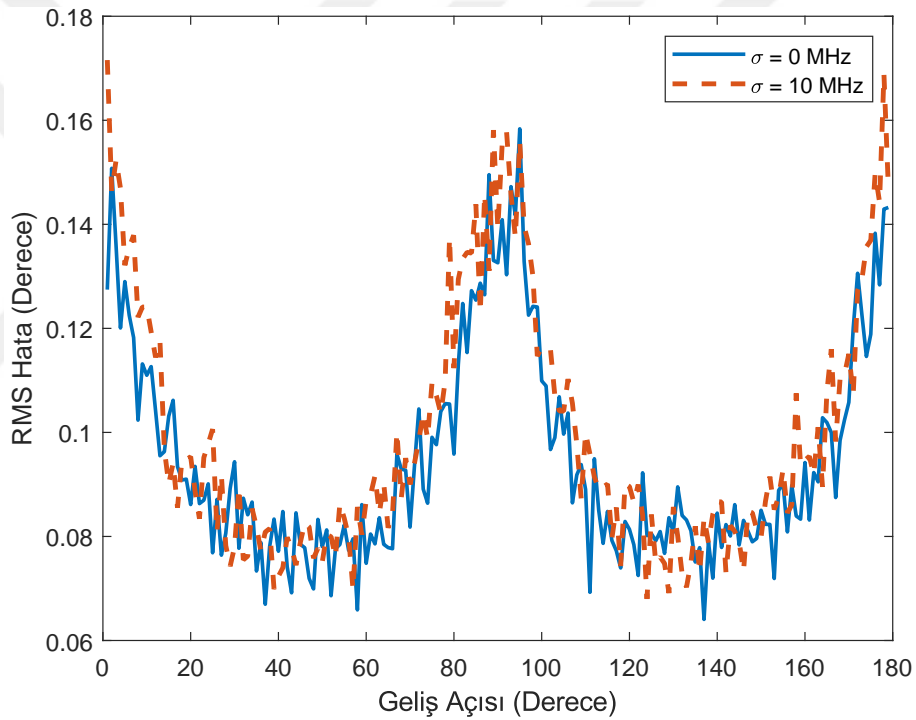
aralığında 1 GHz adım ile yapılmıştır. 3 antenin 0, 90 ve 180 derece bakış açısı ile yerleştirildiği yerleşimde faz merkezleri arası mesafe 10 cm olarak alınmıştır. Analizler sonucunda elde edilen RMS hata değerleri Şekil 4.11’de verilmiştir. Şekilde hibrit yöntemin 8, 10, 11 ve 12 GHz tehdit radar frekansında yakın RMS hata değerleri ile sonuç verdiği görülmektedir. Frekanslar arasında gerçekleşen RMS hata değişimi faz merkezleri arası sabit mesafe ile tehdit radar sinyalinin dalga boyu arasındaki oranın değişmesinden kaynaklanmaktadır. Sabit faz merkezleri arası mesafe için dalga boyu küçüldükçe yöntem doğruluğu artmaktadır. Şekil 4.11’de verilen büyük hata sayısı ise yöntemin belirsizlik çözerken başarısız olarak 15 dereceden büyük hata yaptığı Monte Carlo koşumu sayısını vermektedir. Yöntemin büyük hata yaptığı noktalar RMS hata hesabına katılmamıştır. Yöntem 8, 10, 11 ve 12 GHz frekanslarında büyük hata yapmazken 9 GHz frekansında özellikle 90 derece bölgesinde büyük hata yapmıştır. Bu durum 9 GHz frekansında anten örüntüsü hüzmeye genişliğinin daralması sonucu diğer frekanslara göre daha fazla gürültü tabanına yaklaşan ikinci en yüksek sinyalin genlik karşılaştırma yöntemi hatasını arttırması nedeni ile gerçekleşmektedir. Hibrit yöntemde oluşan büyük hataların engellenebilmesi için çalışma frekansı aralığında anten hüzmeye

genişliklerinin yakın olması gerekmektedir. Aynı zamanda yöntem 9 GHz tehdit radar frekansında antenlerin bakış açıları bölgesinde diğer frekanslara göre daha yüksek RMS hata yapmıştır. Bu durum ise en yüksek ikinci sinyal genliğinin azalması nedeni ile faz farkı hesaplaması sırasında oluşan hatalardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.11 Farklı radar frekanslarında hibrit yöntem RMS hata değişimi

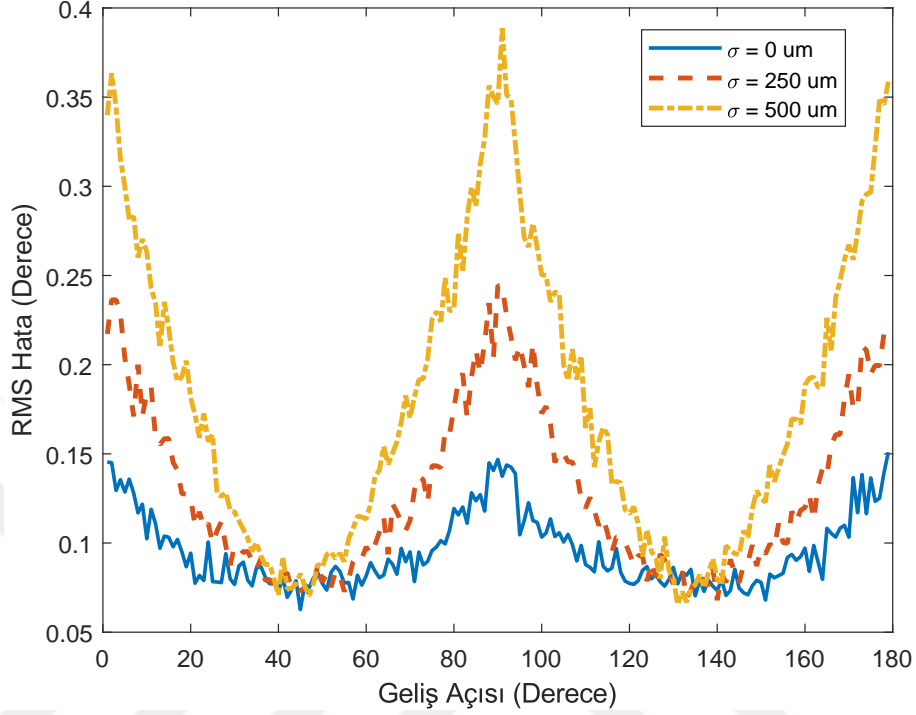
Faz karşılaştırma yönteminde olduğu gibi hibrit yön bulma yönteminde de tehdit radar frekansı bilgisi hatası ve faz merkezleri arası mesafe bilgisi hatası yöntemin doğruluğunu etkilemektedir. Frekans bilgisi hatasının hibrit yöntem doğruluğuna etkisinin analizi için sıfır ortalamalı, 10 MHz standart sapma değerli, Gauss dağılımlı hataya sahip 10 GHz tehdit radar frekans bilgisi kullanılarak RMS hata analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuç frekans hatası içermeyen sonuç ile birlikte Şekil 4.12’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi hibrit yöntem 10 MHz standart sapma değerine sahip frekans hatasından etkilenmemektedir. Yüksek doğrulukta tehdit radar frekansı kestirimi yapan bir ED sistemi için tehdit sinyalden frekans çıkarım hatası 1 MHz’den az olduğu için hibrit yöntem frekans bilgisi hatasından etkilenmemektedir.



Şekil 4.12 Frekans bilgisi hatası ile RMS hata değişimi

Faz merkezleri arası mesafe bilgisi hatasının hibrit yön bulma yöntemi doğruluğuna etkisinin analizi için faz merkezleri arası mesafe bilgisine sıfır ortalamalı 0, 250 ve 500 mikrometre standart sapma değerine sahip Gauss dağılımlı hatalar eklenerek RMS hata değerleri elde edilmiştir. 10 Ghz tehdit radar frekansı için yapılan analizlerin sonucu Şekil 4.13’de verilmiştir. Yerleşim hatası arttıkça yöntemin RMS hata miktarı artmaktadır. Özellikle geliş açısı değişimine göre faz farkı değişim miktarının azaldığı

geniş açısı bölgelerinde faz merkezleri arası mesafe bilgisi hatası daha fazla etkili olmaktadır. Hibrit yöntem uygulanırken faz merkezleri arası mesafe bilgisinin yüksek doğrulukla biliniyor olması RMS hata miktarını azaltmaktadır.



Şekil 4.13 Faz merkezleri arası mesafe bilgisi hatası ile RMS hata değişimi

4.4 Yöntemlerin Karşılaştırılması

Yapılan analizler sonucunda elde edilen RMS hata verileri karşılaştırıldığında en yüksek hata oranının genlik karşılaştırma yönteminde olduğu görülmektedir. Aynı zamanda genlik karşılaştırma yönteminin anten örüntüsüne yüksek miktarda bağımlılığı özellikle çalışma frekans aralığı geniş olan uygulamalarda yöntemin doğruluk performansını azaltan bir etken olmaktadır.

Faz karşılaştırma yönteminde kullanılan SODA algoritması 140 derece genişliğe sahip bakış açısında 1 derecenin altında RMS hata değerlerinde sonuç verebilmektedir. Aynı zamanda yöntem X bant çalışma frekansı aralığında yakın RMS hata değerleri ile çalışmaktadır. SODA algoritmasında kullanılan dalga boyunun yarısına eşit faz merkezleri arası yapay mesafe faz karşılaştırma yöntemi belirsizliği oluşumunu

engellemektedir. Ancak faz merkezleri arası mesafenin küçük olması faz karşılaştırma yöntemi doğruluğunu azaltmakta ve yöntemin faz merkezleri arası mesafe bilgisi hatasından hibrit yön bulma yöntemine göre daha fazla etkilenmesine neden olmaktadır.

Hibrit yön bulma yöntemi 180 derece bakış açısı aralığında en yüksek doğruluk performansına sahip yöntemdir. Yöntemde faz merkezleri arası mesafenin dalga boyunun yarısından büyük olabiliyor olması doğruluğu arttırmaktadır. Hibrit yöntem anten örüntüsü nedeni ile belirli frekans ve geliş açısı bölgelerinde belirsizlik çözümünü yanlış yaparak RMS hata değerini arttırabilmektedir. Bu durum hibrit yöntem ile anten örüntüsü arasındaki bağı göstermektedir. Yöntemde faz merkezleri arası mesafenin büyük olması, hibrit yön bulma yönteminin faz merkezleri arası mesafe bilgisi hatasından daha az etkilenmesine neden olmaktadır. Aynı zamanda faz karşılaştırma yönteminin iki sektör bölgesinde uygulanıyor olması yöntemin faz merkezleri arası mesafe hatasına olan bağışıklığını arttırmaktadır.

Genlik karşılaştırma yöntemi, faz karşılaştırma yöntemi kullanan diğer iki yöntemle göre daha yüksek RMS hata değerlerine sahiptir. Faz karşılaştırma yöntemi kısa antenler arası mesafe nedeni ile hibrit yöntemle göre daha düşük doğruluk performansı ile çalışmaktadır. Aynı zamanda hibrit yöntem analizi yapılan en yüksek faz merkezleri arası mesafe bilgisi hatası durumunda, faz karşılaştırma yönteminin hatasız faz merkezleri arası mesafe bilgisi kullandığı analizlerden daha iyi sonuçlar vermektedir.

Bütün analizler göz önüne alındığında üç yöntem arasında eşit anten sayısı ile 180 derece bakış açısı aralığında en yüksek doğruluğa ulaşılabilen yöntemin hibrit yön bulma yöntemi olduğu görülmektedir. Aynı zamanda hibrit yön bulma yönteminin analizi yapılan hata kaynaklarına olan bağışıklığı daha yüksektir. Bu nedenle tez kapsamında elektronik destek sistemi için gerçek zamanlı uygulaması yapılacak yöntem 3 anten içeren hibrit yön bulma yöntemi olarak seçilmiştir.

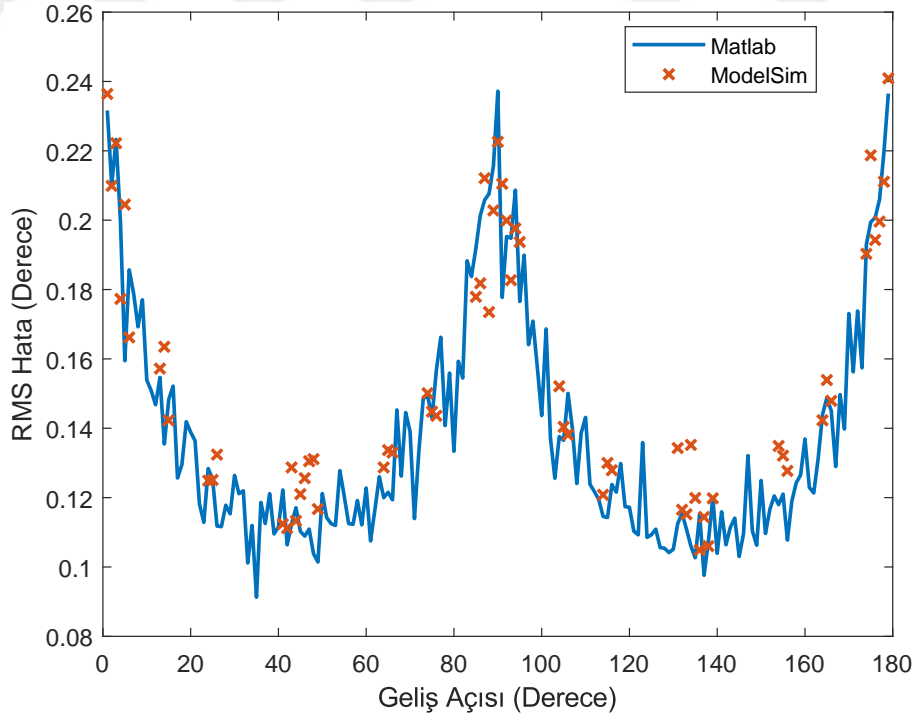
5. GERÇEK ZAMANLI UYGULAMA

Elektronik destek sistemlerinde antenler tarafından alınan tehdit radar sinyalleri sistemin RF hattından geçerek ara frekans bölgesine indirilir. Ara frekans bölgesindeki sinyaller ASD'ler tarafından örneklendikten sonra sistemin FPGA biriminde gerçek zamanlı olarak işlenir. ASD'lerin örnekleme frekansı arttıkça sistemin anlık bant genişliği artarak birden fazla tehdit bulunan ortamda eş zamanlı işleme yapılabilmektedir (Tsui 2004). Ancak ASD'lerin örnekleme frekansı arttıkça bit sayısı azalmaktadır. Azalan bit sayısı nicemleme hatalarını arttırdığından elektronik destek sistemlerinde örnekleme frekansı ve bit sayısı sistemin karşılaması istenen performans kriterlerine göre seçilmektedir (Adamy 2001). Bu tez kapsamında yapılan analizlerde ASD örnekleme frekansı 4 GSPS olarak seçilerek anlık bant genişliğinin 2 GHz olması sağlanmıştır. Aynı zamanda ASD'nin 12 bit örnekleme yaptığı varsayılmıştır.

Tehdit radar sinyallerinin ASD tarafından yüksek frekansta örneklenmesi FPGA biriminde elde edilen verinin anlık olarak işlenmesini zorlaştırmaktadır. ASD'lerin örnekleme hızının FPGA'lerin veri işleme hızından yüksek olduğu durumlarda paralel işleme yapılması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır (Tsui 2004). Bu nedenle tez kapsamında 4 GSPS örnekleme frekansı ile örneklenen sinyaller FPGA ortamına 16 paralel kanalda alınmıştır. Paralel kanalların çıktılarını kanallaştırıcı yardımı ile farklı frekans bantlarına bölünerek işlendiğinde, her kanalın çıkışına farklı frekans aralığı için çalışan yön bulma algoritması uygulanabilmektedir. Ancak kanallaştırıcı yapıları bu tezin kapsamının dışında olduğundan hibrit yön bulma algoritması 16 paralel kanaldan bir tanesinin çıktısı ile beslenecek şekilde uygulanmıştır.

FPGA ortamında gerçek zamanlı uygulaması gerçekleştirilen algoritmanın blok şeması Şekil 5.1'de verilmiştir. Antenlerden alınan sinyaller ASD tarafından örneklendikten sonra FPGA biriminde işlenecek 16 paralel kanaldan bir tanesinin oluşturulması için örnekleme frekansı azaltılmaktadır. Anten seçimi bloğunda geliş açısı tespiti sırasında kullanılacak en yüksek genliğe sahip iki anten seçilerek antenlerden elde edilen sinyaller temel faz farkı bulucu ve genlik karşılaştırma yöntemi bloklarına iletilmektedir. Genlik

frekansa indirildiği varsayılmıştır. Bu sayede 16 paralel kanaldan bir tanesini kullanarak 250 MHz örnekleme hızında çalışan yöntemin Nyquist kriterine uyması sağlanmıştır. Gerçek zamanlı olarak uygulanan algoritmanın başarımı, belirli geliş açılarında her bir açı değeri için 100 Monte Carlo koşumu yapılarak elde edilen RMS hata değerleri üzerinden analiz edilmiştir. Aynı zamanda gerçek zamanlı uygulanan algoritma MATLAB ortamında Fixed Point Toolbox kullanılarak 0-180 derece geliş açısı aralığında 100 Monte Carlo koşumu ile analiz edilmiştir ve iki uygulamanın RMS hata karşılaştırması yapılmıştır. MATLAB ve Modelsim ortamında analizi yapılan algoritmanın RMS hata değerleri Şekil 5.2’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi MATLAB ve Modelsim analizlerinden yakın RMS hata değerleri elde edilmiştir. Alınan sonuçlar algoritmanın gerçek zamanlı uygulama için uygun olduğunu göstermektedir. Gerçek zamanlı uygulama RMS hata değerlerinin, aynı anten yerleşimi ile Bölüm 4.3’de yapılan RMS hata analizinden yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum tehdit radar sinyallerinin 12 bit ile örneklenmesi neticesinde oluşan nicemleme hataları ve FPGA’de paralel işleme gerekliliği nedeni ile yöntemlerde kullanılan sinyal boyutunun 16 kat azalması nedeni ile gerçekleşmektedir.



Şekil 5.2 Gerçek zamanlı uygulama RMS hata değişimi

Algoritmanın kaynak kullanımının analizi FPGA platformunda Xilinx firmasının Vivado yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Uygulama sırasında Xilinx firmasının Virtex 7 ailesinden FPGA içeren geliştirme kartı kullanıldığı varsayılmıştır. Uygulanan algoritmanın FPGA biriminde kullandığı kaynak miktarı Çizelge 5.1’de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde algoritmanın kaynak kullanımının, FPGA ortamında işlenen her paralel kanal için uygulanabilecek miktarda olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.1 FPGA Tasarımı Kaynak Kullanımı

Sayısal Kaynak İsmi	Kullanım Miktarı	Kullanım Yüzdesi
Dilim LUT	2245	%0.5182
Dilim Yazmaç	1585	%0.1829
Blok RAM	5	%0.34
DSP	21	%0.583

Elektronik destek sistemlerinde yön bulma algoritmalarının mümkün olan en kısa sürede sonuç vermesi gerekmektedir. Bu sayede özellikle tehdit yoğun ortamlarda herhangi bir kayıp yaşanmadan tehdit tespit ve sınıflandırması mümkün olmaktadır. Bu nedenle tez kapsamında analizi yapılan yöntemin performansının değerlendirildiği bir diğer parametre, tehdit radar sinyalinin alınması ile geliş açısı tespiti arasında geçen süredir. Gerçek zamanlı uygulanan algoritmanın ModelSim benzetimlerinde, yöntemin sinyalin geliş anından 47 saat darbesi sonrasında geliş açısı tespiti yapabildiği görülmüştür. Algoritmanın çalıştığı saat frekansı göz önüne alındığında, yöntem 188 ns içinde geliş açısı tespiti yapabilmektedir. Gerçek zamanlı uygulanan korelasyon tabanlı kestiricilerde yön bulma işlemi mikro saniyeler mertebesinde sonuç vermektedir (Hu ve Wan 2019). Bu durum göz önüne alındığında gerçek zamanlı uygulanan hibrit yön bulma algoritmasının sonucu oldukça kısa bir sürede üretebildiği görülmektedir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada elektronik destek sistemlerinde kullanılan tek darbe yön bulma yöntemleri analiz edilmiştir. Analizler sırasında kullanılan tehdit radar sinyalleri elektronik destek sistemi için önerilen anten yerleşimleri göz önüne alınarak MATLAB benzetim ortamında üretilmiştir. Üretilen sinyaller ile tek darbe yön bulma yöntemleri olan genlik karşılaştırma, faz karşılaştırma ve hibrit yön bulma yöntemleri için önerilen algoritmaların başarımları analizleri, 8-12 GHz frekans aralığında bulunan farklı frekanslarda yapılmıştır. Analizler sırasında 100 ns darbe genişliğine sahip sinyaller kullanılmıştır. Analiz edilen algoritmalarından hibrit yön bulma yönteminin üç yöntem arasında eşit anten sayısı ile 180 derece bakış açısı aralığında en yüksek doğruluğa ulaşılabilen yöntem olduğu görülmüştür. Bu nedenle 180 derece bakış açısı aralığı için 3 anten kullanan hibrit yön bulma yöntemi gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır. Gerçek zamanlı uygulamanın tehdit yön bilgisi çıkarım doğruluğu ModelSim benzetim ortamında analiz edilmiştir. Aynı zamanda uygulamanın tehdit yön bilgisi çıkarım süresi ve FPGA biriminde kapladığı alan bilgisi verilmiştir.

Genlik karşılaştırma yöntemi için literatürde önerilen algoritma basit yapısı sayesinde düşük maliyet ile uygulanabilir niteliktedir. Ancak analizler sonucunda genlik karşılaştırma yönteminin en yüksek hata düzeyine sahip olduğu görülmüştür. Yöntemin doğruluğunun artırılması için anten sayısının artırılması gerekmektedir. Bu durum sistemin alan gereksinimini arttırdığından çoğu uygulama için dezavantaj oluşturmaktadır. Aynı zamanda anten sayısının artırılması alıcı yapısındaki kanal sayısı artırarak alıcı maliyetini yükseltmektedir. Ayrıca analizlerin ideal ve frekanstan bağımsız anten örüntüleri yerine MATLAB benzetim ortamında hazır bulunan bir antenin örüntüleri ile yapılmış olması yöntemin anten örüntüsü ve hüzmeye genişliğine yüksek bağımlılığını göstermiştir. Bu durumun yöntemin pratik olarak uygulanmasını zorlaştıran başka bir etken olduğu değerlendirilmektedir.

Faz karşılaştırma yöntemi genlik karşılaştırma yöntemine göre yüksek doğruluk ile tehdit yön bilgisi tespiti yapabilen bir yöntemdir. Yöntemin dezavantajı ise antenlerin

boyutları nedeni ile faz merkezleri arasındaki mesafenin dalga boyunun yarısından büyük olması neticesinde oluşan belirsizliktir. Bu tez kapsamında belirsizliğin çözümü için 3 adet anten kullanan SODA algoritması kullanılmış ve başarımları analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda yöntemin 140 derecelik bakış açısı aralığında 1 derecenin altında RMS hata ile sonuçlar üretebildiği görülmüştür. Ayrıca yapılan analizler sonucunda antenlerin yerleşimi ve üretimi sırasında oluşabilecek hataların neden olduğu faz merkezleri arası mesafe bilgisi hatasının yöntem sonucunu fazlaca etkilediği görülmüştür. Bu nedenle yöntemin uygulanması sırasında yüksek faz merkezleri arası mesafe bilgisi doğruluğu gerekmektedir. Bütün bunlarla beraber faz karşılaştırma yöntemi uygulanırken sinyaller arasında oluşan faz farkının korunması için maliyeti yüksek alıcı yapıları gerekmektedir. Bakış açısı aralığı yeterli olan uygulamalarda yöntemin tüm yönlü antenler ile uygulanabiliyor olması yöntem için yer ve uygulama avantajı sağlamaktadır.

Genlik ve faz karşılaştırma yöntemlerini beraber kullanan hibrit yön bulma yöntemi, genlik karşılaştırma yöntemi ile elde edilen hata oranı yüksek yön tespiti kullanarak faz karşılaştırma yöntemi belirsizliğini çözmektedir. Bu yöntemde antenlerin faz merkezleri arası mesafesi alan kısıtları dahilinde artırılabilirdiğinden faz karşılaştırma yönteminin doğruluğu artırılabilir. Aynı zamanda faz merkezleri arası mesafe SODA yöntemine göre uzun olduğundan yöntem faz merkezleri arası mesafe hatasından çok daha az etkilenmektedir. Belirsizlik çözümü genlik karşılaştırma algoritması sonucu kullanarak yapıldığı için yöntemin anten örüntüleri değişiminden etkilenmektedir. Yapılan analizlerde yöntemin dezavantajını oluşturan genlik karşılaştırma hatası kökenli belirsizlik çözme hatası tek frekans bölgesinde kısıtlı geliş açısı aralığında gerçekleşmiştir. Bu hatalardan anten örüntülerinde yapılabilecek iyileştirmeler ile kurtulmak mümkündür. Ayrıca yöntem faz karşılaştırma yöntemini içerdiği için alıcı yapısının sinyaller arasında oluşan faz farkını koruyabiliyor olmasını gerektirmektedir. Bu durum hibrit yöntemin uygulandığı elektronik destek sistemlerinde alıcı maliyetini arttırmaktadır. Genlik ve faz karşılaştırma yöntemlerine göre daha fazla işlem yükü gerektiren hibrit yöntem aynı miktarda anten ve alıcı kanalı kullanarak tehdit yön bilgisi parametresi doğruluğunu arttırmaktadır.

Yapılan analizler sonucunda 3 adet anten kullanarak 180 derece bakış açısında en düşük RMS hata ile tehdit yön bilgisi tespiti yapabilen hibrit yön bulma yöntemi gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır. Gerçek zamanlı uygulanan algoritmanın ModelSim ortamında benzetimleri ile RMS hata analizi yapılmış ve yöntemin en yüksek 0,24 derece RMS hata ile geliş açısı tespiti yapabildiği görülmüştür. Elektronik destek sistemlerinde kısa işlem süresi ile tehdit yön tespiti yapılabilmesi özellikle tehdit yoğun elektronik harp ortamlarında alınan her sinyalden tehdit yön tespiti yapılabilmesi için önemlidir. Yapılan analizler sonucunda gerçek zamanlı uygulanan algoritmanın 188 nano saniyede tehdit radarın yön tespitini yapabildiği görülmüştür. Bütün bunların yanı sıra algoritmanın, kullanıldığı varsayılan geliştirme kartında bulunan kaynaklardan en fazla binde 6 oranında kullanmış olması algoritmanın bütünleşik bir elektronik destek sistemi gerçek zamanlı uygulaması içinde kullanılabilceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Adamy D. 2001. EW 101: A First Course in Electronic Warfare, Artech House
- Adamy D. 2009. EW 103: Tactical Battlefield Communications Electronic Warfare, Artech House
- Brinegar, C. 2000. Passive direction finding: combining amplitude and phase based methods, Proceedings of the IEEE Conference on National Aerospace and Electronics Conference, 78
- Bullock, L. G., Oeh, G., Sparagna, J. J., 1971. An analysis of wide-band microwave monopulse direction-finding techniques, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., no. 1, pp. 188–203
- Chae G. Lim J. 2013. Design and Optimization of a Cavity-Baked Spiral Antenna for Use in 6-12 GHz Band, Springer
- Cui, K., Chen, X., Huang, J., Yuan, N. 2017. A novel DOA estimation algorithm for a 5-element circular array, IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference
- Dabak O. C. 2018. ED Sistemlerinde Girişim Ortamında MUSIC Algoritması ile Yön Tayini, 26. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Konferansı (SİU), 2-5 Mayıs, İzmir
- Diñç V. 2010. Elektronik Harp Teknikleri, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara
- Lee, J. H., Kim, J. K., Ryu, H. K., Park, Y. J. 2018. Multiple Array Spacing for an Interferometer Direction Finder With High Direction-Finding Accuracy in a Wide Range of Frequencies, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. Vol 17 No 4
- Lipsky, S. E. 1987 Microwave Passive Direction Finding, John Wiley and Sons
- Ly P. Q. C., Elton S. D., Gray D. A., Li J., 2012. Unambiguous AOA estimation using SODA interferometry for electronic surveillance, Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM) 2012 IEEE 7th, pp. 277-280
- Ly P. Q. C., Elton S. D., Gray D. A., Li J., 2013. Computationally fast AOA estimation using sparse large aperture arrays for electronic surveillance, 2013 International Conference on Radar, Adelaide, SA, 2013, pp. 526-531.

- Mahafza, B. R. 2013. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, CRC Press, Third Edition
- Martino, A. D. 2012. Introduction to Modern EW Systems, Artech House Radar Library
- Murphy, M. P., Menegozzi, L. N., Harding, A. C. 1996, Hybrid amplitude/phase Comparison Direction Finding System, U.S. Patent 5541608
- Neri, F. 2006. Introduction to Electronic Defense Systems, Artech House
- Ortatatlı I. E., Orduyılmaz, A., Ozdil, O., Serin., M., Gürel, A. E., Yıldırım, A. ve Kurt, H. 2017. Üst Üste DArbe Durumunda Gerçek Zamanlı Anlık Radar Frekans Ölçümü, 25. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Konferansı (SİU), Antalya
- Poisel R. A. 2014. Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems, Artech House
- Price A. 2017. Instruments of Darkness: The History of Electronic Warfare, Naval Institute
- Schleher, D. C. 1999. Electronic Warfare in the Information Age, Artech House
- Searle, S., An examination of bias in SODA interferometry, IEEE Signal Process. Lett., 2017, 24, (4), pp. 470–474
- Skolnik, M. I. 2001. Introduction to Radar Systems, The McGraw-Hill, Third Edition
- Skolnik, M. I. 2008. Radar Handbook, The McGraw-Hill, Third Edition
- Tsui J. 2005. Microwave Receivers with Electronic Warfare Applications, SciTech Publishing
- Tsui J. 2004. Digital Techniques For Wideband Receivers, SciTech Publishing
- Tsui J. 2010. Special Design Topics in Digital Wideband Receivers. Artech House
- Volakis J. 2007. Antenna Engineering Handbook, McGraw-Hill, Fourth Edition
- Wiley, R. G. 1986. Electronic Intelligence: The Interception of Radar Signals, Artech House
- Wu, Y.W., Rhodes, S., Satorius, E., Direction of arrival estimation via extended phase interferometry, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1995, 31, (1), pp. 375–381
- Hu, Z., Wan, Q. 2019. Enhanced Interferometer DOA Estimator for Signal with Known Waveform, 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Xi'an, China, pp. 1-5.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Abdullah Emin GÜREL

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Tarihi : 20/09/1991

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Orhan Dengiz Anadolu Lisesi

Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Elektrik ve Haberleşme Mühendisliği (2010-2015)

Çalıştığı Kurum

Tübitak Bilgem İltaren - Araştırmacı (2016 - Devam Ediyor)

Ulusal Kongre

Gürel, A. E., Orduyılmaz, A., Serin., M., Yıldırım, A. ve Soysal G. 2018. Hibrit Genlik/Faz Karşılaştırmalı Yön Bulma Sistemlerinde Gerçek Zamanlı Belirsizlik Çözümü, 26. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Konferansı (SİU), İzmir

Orduyılmaz, A., Kara, G., Gürel, A. E., Serin., M., Yıldırım, A. ve Soysal, G. 2018. Gerçek Zamanlı Dört Kanal Faz Karşılaştırma Yön Bulma Yöntemi Pasif Yön Bulma, 26. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Konferansı (SİU), Antalya

Gürel, A. E., Orduyılmaz, A., Yıldırım, S. A., Kara, G., Serin., M., Ortatalı, I. E. ve Yıldırım, A. 2017. FPGA Ortamında Gerçek Zamanlı Pasif Yön Bulma, 25. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Konferansı (SİU), Antalya