

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK DARBE PASİF YÖN BULMA TEKNİKLERİNİN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kıvanç CEYHAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent TAVLI

Kasım 2016

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.

.....
Doç. Dr. Tolga GİRİCİ
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 131211038 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Kıvanç CEYHAN** 'nın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**TEK DARBE PASİF YÖN BULMA TEKNİKLERİNİN ANALİZİ**" başlıklı tezi **08.11.2016** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Bülent TAVLI**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Tolga GİRİCİ (Başkan)**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin Uğur YILDIZ
TED Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm. .

Kıvanç CEYHAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TEK DARBE PASİF YÖN BULMA TEKNİKLERİNİN ANALİZİ

Kıvanç CEYHAN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bülent TAVLI

Tarih: Kasım 2016

Elektronik harp operasyonları; elektronik atak, elektronik savunma ve elektronik destek olmak üzere üç temel görevi içermektedir. Elektronik destek operasyonları savaş durumunda komuta kontrol mekanizmasına ya da dost birliklere istihbarat sağlamak, düşman sistemler hakkında değerli bilgi üretmek ve bu bilgileri hem saldırı hemde savunma operasyonlarında kullanmak üzere güncel, gizli ve hazır tutmak amacıyla gerçekleştirilen elektronik harp operasyonudur. Radar ikaz alıcı sistemleri hedefin varlığı, konumu, mesafesi ve yönü gibi kritik bilgileri üretmek için kullanılan elektronik destek sistemidir. Bu sistemler hedefin yönünü bulabilmek amacıyla farklı yön bulma teknikleri kullanılmaktadır. Bu tezde tekdarbe yön bulma tekniklerinden genlik karşılaştırma ve faz karşılaştırma algoritmaları incelenmiştir. Genlik ve faz karşılaştırma algoritmaları kullanılarak standart 4, 6 ve 8 sektörlü anten yerleşim yapılarının farklı SNR ve frekans değerleri altında yön bulma performansı analiz edilmiştir. Faz karşılaştırma tekniği genlik karşılaştırma tekniğine göre daha yüksek doğrulukta yön kestirimi yapabilmektedir. Ancak yüksek frekanslarda yön bulma hatasını arttıran yön belirsizlikleri oluşmaktadır. Bu tez çalışmasında, faz karşılaştırma tekniği ile ortaya çıkan belirsizliklerin sebepleri açıklanmış ve giderilebilmesi için çözüm önerileri sunulmuştur. Ayrıca belirli bir tarama aralığı için kırıklı anten yapıları kullanılarak az sayıda anten ile yön kestirimi yapılmış ve düşük hata oranları ile açı kestirimleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan anten sayısının azaltılması için farklı anten yerleşim geometrileri farklı SNR ve frekans altında denenmiş ve sonuçları sunulmuştur. Bunların dışında elektronik sistemlerin doğasından kaynaklı sistem uyumsuzluk hataları genlik ve faz karşılaştırma teknikleri için ayrı ayrı incelenmiş, antenlerin hedefe farklı yükseliş açılarında baktığı durumlar göz önünde bulundurularak, yükseliş açısı hatalarının yön bulma performansına etkisi analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Faz farkı, Genlik karşılaştırma, İnterferometre, Yön bulma.

ABSTRACT

Master of Science

ANALYSIS OF MONOPULSE PASSIVE DIRECTION FINDING TECHNIQUES

Kıvanç CEYHAN

TOBB University of Economics and Technology

Institute of Natural and Applied Sciences

Electrical Electronics Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Bülent TAVLI

Date: November 2016

Electronic warfare operations involve three basic missions including electronic attack, electronic defense and electronic support measures. Electronic support measures are utilized to provide intelligence to command and control mechanism or the friendly troops, to generate valuable information, kept confidential, up to date and available in order to use both in attack and in defense operations in the event of war. Radar warning receiver systems, used to generate critical information about presence, distance, location and direction of target, is one of the electronic support measures. These systems use many different direction finding techniques for finding direction of target. In this thesis, amplitude comparison and phase comparison algorithms of monopulse direction finding techniques are analyzed. Direction finding performance is examined at different SNR and frequencies using amplitude and phase comparison algorithms for 4, 6 and 8 sector antenna structures. Phase comparison technique can perform more accurate estimation of direction of arrival compared to amplitude comparison technique. However, in this technique, direction ambiguities increasing error of estimation of direction of arrival are emerging at high frequencies. The causes of consisting ambiguities were explained and solution methods were recommended for these ambiguities because of phase comparison technique. Moreover, direction estimation is analyzed with less antenna using fractured antenna structures for specific search interval and direction estimation is achieved with low error rates. Different antenna placement geometries are tested at different SNR and frequencies in order to decrease the number of antenna and the result are introduced. Beside these, system mismatch errors caused by the nature of electronic system was analyzed severaly for amplitude and phase comparison techniques, considering the situation that antennas look in target with different elevation angle, the effect of consisting elevation angle errors on direction finding performance was analyzed.

Keywords: Phase difference, Amplitude comparison, Interferometer, Direction finding.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocalarım Ali Cafer GÜRBÜZ ve Bülent TAVLI' ya, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve yüksek lisans programı süresince bana burs sağlayan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne, destekleriyle her zaman yanımda olan aileme, arkadaşlarıma ve bu tezde çok büyük katkısı olan çalışma arkadaşım Yięit TÜKEL'e, bu süreçte gösterdiği destek ve sabırdan dolayı, her zaman yanımda olan biricik eőim Damla OR CEYHAN'a çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
KISALTMALAR	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Elektronik Harp Teknolojilerinin Gelişimi	1
1.2 Elektronik Harp ve Radar Teknolojisi	2
1.3 Tez Kapsamı.....	3
1.4 Tez Organizasyonu.....	3
2. ELEKTRONİK HARP (EH) SİSTEMLERİ	5
2.1 Elektronik Harp ve İstihbarat	5
2.2 Elektronik Harp ve Silah Sistemleri	6
2.3 Elektronik Harp ve Komuta Kontrol Mekanizması.....	7
2.4 Elektronik Harp Bileşenleri	8
2.4.1 Elektronik atak sistemleri.....	9
2.4.1.1 Aktif elektronik atak sistemleri	10
2.4.1.2 Pasif elektronik atak sistemleri	12
2.4.2 Elektronik destek sistemleri	14
2.4.2.1 Sinyal istihbarat (Sİ) sistemleri	15
2.4.2.2 Destek ölçümleri (DÖ) sistemleri	17
2.4.3 Elektronik savunma sistemleri	19
3. YÖN BULMA (YB) SİSTEMLERİ	21
3.1 Pasif Yön Bulma Sistemleri	23
3.1.1 Pasif yön bulma sistemlerinin avantajları	23
3.2 Yön Bulma Sistemlerinin Teknik Altyapısı	24
3.3 Tekdarbe Yön Bulma Sistemleri	26
3.4 Yön Bulma Teknikleri.....	26
3.4.1 Üçgenleme yöntemi	27
3.4.2 Zaman farkı yöntemi	28
3.4.3 Genlik karşılaştırma yöntemi	28
3.4.4 Faz karşılaştırma yöntemi	30
3.4.5 Hüzme Oluşturma Metodu.....	32
4. YÖN BULMA (YB) TEKNİKLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ	35
4.1 Anten Örüntüsü	35
4.2 Standart Anten Yerleşim Senaryoları.....	37
4.3 Genlik Karşılaştırma	40

4.3.1 En büyük olabilirlik kestirimi (Maksimum Likelihood Estimation, MLE)	42
4.3.2 Kuzey - doğu oranı	44
4.3.3 En güçlü iki genlik kullanımı	46
4.4 Faz Karşılaştırma (İnterferometre)	48
4.5 Kırıklı Anten Yapılarında Hibrit Genlik Faz Karşılaştırma	55
4.5.1 Kırıklı anten yapılarında hibrit genlik faz karşılaştırma yönteminin matematiksel olarak modellenmesi	55
4.5.1.1 Kırıklı yapıda hibrit sistem analizi	56
5. ANALİZ	63
5.1 Genlik ve Faz Karşılaştırma Benzetimleri	63
5.1.1 Benzetim ortamı	64
5.2 Genlik Karşılaştırma Analizleri.....	65
5.2.1 En büyük olabilirlik kestirimi (Maksimum Likelihood Estimation, MLE)	65
5.2.2 Kuzey – doğu oranı	69
5.2.3 En güçlü iki genlik kullanımı	70
5.2.4 Frekansın genlik karşılaştırma tekniğine etkisi.....	73
5.3 Faz Karşılaştırma Analizleri.....	74
5.3.1 Genlik ve genlik faz karşılaştırma metotlarının karşılaştırılması.....	75
5.3.2 Genlik faz karşılaştırma metodunun sektörel bağımlılığı	78
5.3.3 Genlik faz karşılaştırma metodunda kullanılan faz anteni sayısının etkisi.....	79
5.4 Kırıklı Yapılarda Hibrit Genlik Faz Karşılaştırma Benzetimleri	83
5.5 Farklı Anten Yerleşim Senaryoları.....	85
5.6 Sistemsel Hata Analizleri	92
5.6.1 Yükselti (Elevation) açısı hataları.....	92
5.6.2 Genlik faz uyumsuzluk hataları.....	94
5.6.3 Bozuk anten örüntüsü.....	99
6. SONUÇLAR	103
6.1 Standart Anten Yerleşim Geometrileri	103
6.1.1 Genlik karşılaştırma sonuçları.....	104
6.1.2 Genlik faz karşılaştırma sonuçları.....	105
6.3 Farklı Anten Yerleşim Sonuçları.....	106
6.4 Kırıklı Yapıya Sahip Yön Bulma Sistemlerinde Hibrit Genlik Faz Karşılaştırma Sonuçları	108
6.5 Sistemsel Hata Sonuçları.....	109
KAYNAKLAR.....	111
ÖZGEÇMİŞ.....	115

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Radar çalışma yapısı.	2
Şekil 2.1: Elektronik harp unsurları.	8
Şekil 2.2: Elektronik harp bileşenleri.	9
Şekil 2.3: Elektronik atak sistem bileşenleri.	10
Şekil 2.4: Gürültü karıştırması.	11
Şekil 2.5: Aktif elektronik atak bileşenleri.	12
Şekil 2.6: Pasif elektronik atak bileşenleri.	13
Şekil 2.7: Elektronik destek sistemleri bileşenleri.	15
Şekil 2.8: Sinyal istihbarat bileşenleri.	16
Şekil 2.9: Destek ölçümleri bileşenleri.	18
Şekil 3.1: Anten dizilim tipleri.	25
Şekil 3.2: Üçgenleme tekniği.	27
Şekil 3.3: Zaman farkı tekniği.	28
Şekil 3.4: Anten örüntülerinin üstten görünüşü.	29
Şekil 3.5: Genlik karşılaştırma sistem yapısı.	29
Şekil 3.6: Faz karşılaştırma sistem yapısı.	31
Şekil 4.1: 3dB hüzmeye genişliği (a) 60 derece, (b) 90 derece olan anten örüntüsü.	36
Şekil 4.2: 4 sektörlü (a) 8 antenli, (b) 12 antenli yerleşim yapısı.	37
Şekil 4.3: 6 sektörlü (a) 12 antenli, (b) 18 antenli yerleşim yapısı.	38
Şekil 4.4: 8 sektörlü (a) 16 antenli, (b) 24 antenli yerleşim yapısı.	39
Şekil 4.5: Anten kazançları (a) 4 sektörlü, (b) 6 sektörlü, (c) 8 sektörlü yerleşim yapıları.	40
Şekil 4.6: 4 antenli yön bulma sistemleri (a) dairesel, (b) doğrusal.	41
Şekil 4.7: (a) 75 dereceden , (b) 145 dereceden gelen tehdit sinyalinin antenlerde oluşturduğu genlik farkları.	41
Şekil 4.8: 4 sektörlü yerleşim yapısı kullanılarak 120 dereceden gelen sinyal için MLE.	44
Şekil 4.9: 6 sektörlü yerleşim yapısı kullanılarak 0 dereceden gelen sinyal için MLE	44
Şekil 4.10: 4 sektörlü yerleşim yapısında 30 dereceden gelen sinyal için Kuzey Doğu Oranı algoritması ile açı kestirimi.	45
Şekil 4.11: 6 sektörlü yerleşim yapısında -20 dereceden gelen sinyal için Kuzey Doğu Oranı algoritması ile açı kestirimi.	46
Şekil 4.12: 4 sektörlü yerleşim yapısı için Kuzey Doğu Oranı ile En Güçlü İki Genlik Kullanımı algoritmalarının farklı SNR değerlerinde karşılaştırılması.	47
Şekil 4.13: İnterferometrik üçgen yapısı.	48
Şekil 4.14: 4 sektör 12 antenli yön bulma yapısında (a) 2GHz, (b) 10 GHz frekansta 75 dereceden gelen sinyal için J vektörü.	52
Şekil 4.15: 6 sektör 18 antenli yön bulma yapısında (a) 2GHz, (b) 10 GHz frekansta 75 dereceden gelen sinyal için J vektörü.	52

Şekil 4.16: 4 sektör 12 antenli yön bulma yapısında (a) 30 dereceden, (b) 75 dereceden gelen sinyalin genlik faz karşılaştırma tekniği ile kestirimi ..	54
Şekil 4.17: 6 sektör 18 antenli yön bulma yapısında (a) 80 dereceden, (b) 50 dereceden gelen sinyalin genlik faz karşılaştırma tekniği ile kestirimi ..	54
Şekil 4.18: Kırıklı anten yapısı genlik faz karşılaştırma	56
Şekil 4.19: 30 - 150 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının farklı hüzm genişlikleri ile açı kestirim performansı.....	57
Şekil 4.20: 30 - 150 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının farklı hüzm genişlikleri.....	57
Şekil 4.21: 45 - 135 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının farklı hüzm genişlikleri ile açı kestirim performansı.....	57
Şekil 4.22: 45 - 135 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının farklı hüzm genişlikleri.....	58
Şekil 4.23: 60 - 120 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının farklı hüzm genişlikleri ile açı kestirim performansı.....	58
Şekil 4.24: 60 - 120 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının farklı hüzm genişlikleri.....	58
Şekil 4.25: 75 - 105 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının farklı hüzm genişlikleri ile açı kestirim performansı.....	59
Şekil 4.26: 75 - 105 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının farklı hüzm genişlikleri.....	59
Şekil 4.27: (a) 30 - 150, (b) 45 - 135, (c) 60 - 120, (d) 75 - 105 derecelere bakan kırıklı antenlerle oluşturulan yön bulma yapılarının RMS hata analizi. .	60
Şekil 5.1: 4 sektör 8 anten seçilerek oluşturulmuş anten yerleşim geometrisi.....	64
Şekil 5.2: 6 sektör 18 anten seçilerek oluşturulmuş anten yerleşim geometrisi.....	65
Şekil 5.3: (a) 4 sektörlü, (b) 6 sektörlü, (c) 8 sektörlü yön bulma sistemlerinde MLE sonucu oluşan RMS hata.	66
Şekil 5.4: Farklı sektör sayılarının ortalama RMS hataya etkisi.....	68
Şekil 5.5: (a) 4 sektörlü, (b) 6 sektörlü, (c) 8 sektörlü yön bulma sistemlerinde Kuzey Doğu Oranı algoritması sonucu oluşan RMS hata.	69
Şekil 5.6: Kuzey - Doğu Oranı sonucu Farklı sektör sayılarının ortalama RMS hataya etkisi.	70
Şekil 5.7: En Güçlü İki Genlik Kullanımı sonucu farklı sektörlerin ortalama RMS hataya etkisi.....	71
Şekil 5.8: (a) 4 sektör 12 antenli, (b) 6 sektör 18 antenli yön bulma yapılarında genlik karşılaştırma algoritmalarının analizi.....	72
Şekil 5.9: 4 sektörlü yerleşim yapısı için frekanstan bağımsız anten örüntüsü.....	73
Şekil 5.10: İdeal anten örüntüleriyle oluşturulmuş 4 sektörlü yerleşim yapıları için frekansın ortalama RMS hataya etkisi.	73
Şekil 5.11: İnterferometrik yapı.	75
Şekil 5.12: 4 sektörlü yapısı için (a) 6 GHz, (b) 10 GHz frekansta GK ve GKFK analizi.	76
Şekil 5.13: 6 sektörlü yapısı için (a) 6 GHz, (b) 10 GHz frekansta GK ve GKFK analizi.	77
Şekil 5.14: (a) 6 GHz, (b) 10 GHz, (c) 18 GHz frekansta farklı sektörlerin GKFK tekniğine etkisi.	78
Şekil 5.15: 4 sektörlü yerleşim yapısında (a) 6 GHz, (b) 10 GHz, (c) 18 GHz frekansta gerçekleştirilen GKFK için faz anten sayısının etkisi.	80
Şekil 5.16: 6 sektörlü yerleşim yapısında (a) 6 GHz, (b) 10 GHz, (c) 18 GHz frekansta gerçekleştirilen GKFK için faz anten sayısının etkisi.	81

Şekil 5.17: (a) 4 sektör, (b) 6 sektör, (c) 8 sektör 2 GHz frekansta GKFK yönteminde faz anten sayısının etkisi.	83
Şekil 5.18: Kırıklı yapılarda farklı bakış açılarının hibrit GKFK yönteminde ortalama RMS hataya etkisi.	84
Şekil 5.19: Standart 4-sektör yön bulma yapısı Dizilim 0.	86
Şekil 5.20: Farklı anten bakış açıları ile oluşturulmuş 4-sektör yön bulma yapısı Dizilim 1.	86
Şekil 5.21: Farklı anten bakış açıları ile oluşturulmuş 4-sektör yön bulma yapısı Dizilim 2.	86
Şekil 5.22: Farklı anten bakış açıları ile oluşturulmuş 4-sektör yön bulma yapısı Dizilim 3.	87
Şekil 5.23: Farklı anten bakış açıları ile oluşturulmuş 4-sektör yön bulma yapısı Dizilim 4.	87
Şekil 5.24: 4 sektörlü farklı anten yerleşim yapılarının yön kestirim hatası.....	88
Şekil 5.25: Standart 6-sektör yön bulma yapısı Dizilim 0.	89
Şekil 5.26: Farklı anten bakış açıları ile oluşturulmuş 6-sektör yön bulma yapısı Dizilim 1.	89
Şekil 5.27: Farklı anten bakış açıları ile oluşturulmuş 6-sektör 6-sektör 6-sektör yön bulma yapısı Dizilim 2.	90
Şekil 5.28: Farklı anten bakış açıları ile oluşturulmuş 6-sektör 6-sektör 6-sektör 6-sektör yön bulma yapısı Dizilim 3.	90
Şekil 5.29: 6 sektörlü farklı anten yerleşim yapılarının yön kestirim hatası.....	91
Şekil 5.30: Yükselti yönündeki anten örüntüsü.	93
Şekil 5.31: (a) 4 sektörlü, (b) 6 sektörlü, (c) 8 sektörlü yerleşim yapıları için GK tekniğinde elevation hatalarının etkisi.	93
Şekil 5.32: (a) 4 sektörlü, (b) 6 sektörlü, (c) 8 sektörlü yerleşim yapıları için GK tekniğinde elevation hatalarının etkisi.	94
Şekil 5.33: Genlik uyumsuzluk seviyeleri 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 35, ve 45 faz uyumsuzluk seviyesi 0 iken (a) GK, (b) GKFK analizi.	96
Şekil 5.34: Genlik uyumsuzluk seviyeleri 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 35, ve 45; faz uyumsuzluk seviyeleri ise 0, 1, 3, 7, 12, 17, 25, 40 ve 45 iken (a) GK, (b) GKFK analizi.	98
Şekil 5.35: 3 dB hüzme genişliği 90 derece olan 4 sektörlü Gaussian anten örüntüsü.	100
Şekil 5.36: 3 dB hüzme genişliği 60 derece olan 6 sektörlü Gaussian anten örüntüsü.	100
Şekil 5.37: 3 dB hüzme genişliği 90 derece olan 4 sektörlü salınımlı anten örüntüsü.	100
Şekil 5.38: 3 dB hüzme genişliği 60 derece olan 6 sektörlü salınımlı anten örüntüsü.	100
Şekil 5.39: Düzgün ve salınımlı anten örüntüleri için 4 ve 6 sektörlü yapılarda ortalama RMS hata.....	101

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: EKT uygulama prosedürü.....	14
Çizelge 4.1: Anten örüntüsü katsayıları.....	36
Çizelge 4.2: 4 sektörlü yapıda anten bakış açıları.....	38
Çizelge 4.3: 6 sektörlü yapıda anten bakış açıları.....	38
Çizelge 4.4: 8 sektörlü yapıda anten bakış açıları.....	39
Çizelge 4.5: 4 sektörlü yerleşim yapısında Kuzey Doğu Oranı ile En Güçlü İki Genlik Kullanımı algoritmalarının farklı SNR'larda RMS hata değerleri.....	47
Çizelge 5.1: MLE sonucu farklı sektörlerin ortalama RMS hata değeri.....	68
Çizelge 5.2: Kuzey - Doğu oranı sonucu farklı sektörlerin ortalama RMS hata değeri.....	70
Çizelge 5.3: En Güçlü İki Genlik Kullanımı sonucu farklı sektörlerin ortalama RMS hata değeri.....	71
Çizelge 5.4: 4 sektör 12 antenli yerleşim yapılarında Genlik Karşılaştırma algoritmalarının ortalama RMS hata değerleri.....	72
Çizelge 5.5: 6 sektör 18 antenli yerleşim yapılarında Genlik Karşılaştırma algoritmalarının ortalama RMS hata değerleri.....	72
Çizelge 5.6: İdeal anten örüntüleriyle oluşturulmuş 4 sektörlü yerleşim yapıları için frekansa göre ortalama RMS hata değerleri.....	74
Çizelge 5.7: 4 sektörlü yerleşim yapısı için 6 GHz frekansta GK GKFK ortalama RMS hata değerleri.....	76
Çizelge 5.8: 4 sektörlü yerleşim yapısı için 10 GHz frekansta GK GKFK ortalama RMS hata değerleri.....	76
Çizelge 5.9: 6 sektörlü yerleşim yapısı için 6 GHz frekansta GK GKFK ortalama RMS hata değerleri.....	77
Çizelge 5.10: 6 sektörlü yerleşim yapısı için 10 GHz frekansta GK GKFK ortalama RMS hata değerleri.....	77
Çizelge 5.11: Farklı frekans ve sektörler için GKFK tekniğinde ortalama RMS hata değerleri.....	79
Çizelge 5.12: 4 sektörlü yerleşim yapısında farklı frekanslarda 2 ve 3 antenle GKFK tekniğinde oluşan ortalama RMS hata değerleri.....	81
Çizelge 5.13: 6 sektörlü yerleşim yapısında farklı frekanslarda 2 ve 3 antenle GKFK tekniğinde oluşan ortalama RMS hata değerleri.....	82
Çizelge 5.14: Kırıklı yapılarda farklı bakış açılarının hibrit GKFK yönteminde ortalama RMS hata değerleri.....	84
Çizelge 5.15: 4 sektörlü yön bulma yapısında farklı anten bakış açıları.....	87
Çizelge 5.16: 4 sektörlü farklı anten yerleşim yapılarının yön kestirim hatası değerleri.....	88
Çizelge 5.17: 6 sektörlü yön bulma yapısında farklı anten bakış açıları.....	90
Çizelge 5.18: 6 sektörlü farklı anten yerleşim yapılarının yön kestirim hatası değerleri.....	91

Çizelge 5.19: Genlik uyumsuzluk seviyeleri 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 35, ve 45 faz uyumsuzluk seviyesi 0 iken GK sonucu oluşan ortalama RMS hata...	96
Çizelge 5.20: Genlik uyumsuzluk seviyeleri 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 35, ve 45 faz uyumsuzluk seviyesi 0 iken GKFK sonucu oluşan ortalama RMS hata	97
Çizelge 5.21: Genlik uyumsuzluk seviyeleri 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 35, ve 45; faz uyumsuzluk seviyeleri ise 0, 1, 3, 7, 12, 17, 25, 40 ve 45 iken GK sonucu oluşan ortalama RMS hata.	98
Çizelge 5.22: Genlik uyumsuzluk seviyeleri 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 35, ve 45; faz uyumsuzluk seviyeleri ise 0, 1, 3, 7, 12, 17, 25, 40 ve 45 iken GKFK sonucu oluşan ortalama RMS hata.	99
Çizelge 5.23: Düzgün ve salınımlı anten örüntülerinin 4 ve 6 sektörlü anten yapılarında oluşturduğu ortalama RMS hata değerleri.	101
Çizelge 6.1: Genlik karşılaştırma algoritmaları.	104
Çizelge 6.2: Genlik karşılaştırma faz karşılaştırma analizi.	106
Çizelge 6.3: Farklı anten bakış açıları ile GK analizi.	107
Çizelge 6.4: Kırıklı yapılarda hibrit genlik faz karşılaştırma sonuçları.	108

KISALTMALAR

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ADC	Analog to Digital Converter
AEA	Aktif Elektronik Atak
AEKT	Aktif Elektronik Karşı Tedbir
ARMs	Anti Radiation Missiles
DC	Direct Current
DEWs	Direct Energy Weapons
DÖ	Destek Ölçümleri
DTF	Darbe Tekrarlama Frekansı
EA	Elektronik Atak
ED	Elektronik Destek
EH	Elektronik Harp
Eİ	Elektronik İstihbarat
EKT	Elektronik Karşı Tedbir
EKKT	Elektronik Karşı Karşı Tedbir
EMP	Electromagnetic Weapons
ES	Elektronik Savunma
ESPRIT	Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques
FFT	Fast Fourier Transform
FK	Faz Karşılaştırma
FPGA	Field Programmable Gate Array
GK	Genlik Karşılaştırma
HDÖ	Haberleşme Destek Ölçümleri
Hİ	Haberleşme İstihbaratı
IF	Intermediate Frequency
K2	Komuta Kontrol
MLE	Maximum Likelihood Estimation
MUSIC	Multiple Signal Classification
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NEMPs	Nuclear Electromagnetic Weapons
PDW	Pulse Descriptor Word
PEA	Pasif Elektronik Atak
PEKT	Pasif Elektronik Karşı Tedbir
PYB	Pasif Yön Bulma
RADAR	Radio Detection and Ranging
RCS	Radar Cross Section
RDÖ	Radar Destek Ölçümleri
RF	Radio Frequency
RGPO	Range Gate Pull Off
RIA	Radar İkaz Alıcı

RMS	Root Mean Square
SAGE	Space Alternating Generalized Maximization Expectation
Sİ	Sinyal İstihbaratı
SNR	Signal to Noise Ratio
VGPO	Velocity Gate Pull Off
VLSI	Very Large Scale Integration
YB	Yön Bulma

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Gelen sinyalin genliği
i	Kullanılan anten numarası belirteci
$J'(\phi)$	Faz karşılaştırma tekniği için en büyük olabilirlik fonksiyonu
$M(\theta)$	Genlik karşılaştırma tekniği için en büyük olabilirlik fonksiyonu
n	Gürültü
N	Kullanılan anten sayısı
σ^2	Beyaz Gauss gürültüsü varyansı
λ	Dalga boyu
Ψ	Faz Farkı

1. GİRİŞ

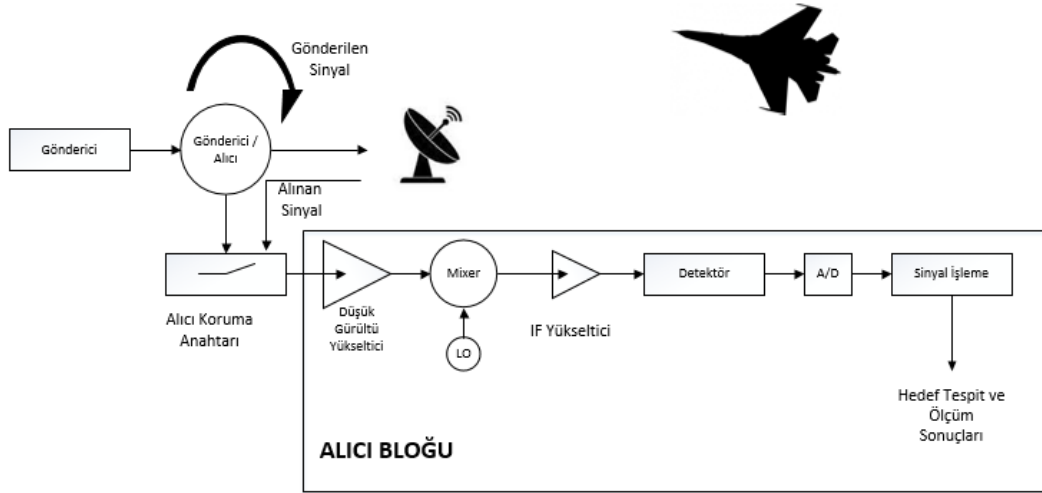
1.1 Elektronik Harp Teknolojilerinin Gelişimi

II. Dünya Savaşı'ndan sonra dünya ülkeleri savunma teknolojilerini değerlendirme sürecine girmiştir. Bu süreç içerisinde elektrik elektronik teknolojilerinde çok ciddi gelişmeler yaşanmıştır. Bu gelişmeler; ulaştırma, iletişim, üretim, sağlık, meteoroloji gibi sektörlerin yanında özellikle askeri, uzay ve havacılık sektörlerinin gelişmesinde de büyük rol oynamıştır [1]. Askeri elektronik teknolojisinde yapılan çalışmalar, temel olarak uzakta bulunan ve tehdit oluşturabilecek durumda olan uçak, gemi ve füze gibi nesnelere hakkında bilgi edinme konusunda oluşan ihtiyaçlar nedeniyle uzaktan tespit teknolojileri üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu teknolojilerden birisi de, ışık farkından ve hava koşullarından etkilenmeyen RADAR (Radio Detection And Ranging) teknolojisidir [2]. Radar sistemleri ilk olarak uzakta bulunan bir nesnenin varlığını, hızını, konumunu ve yönünü tespit edebilmek amacıyla kullanılmıştır [3]. Devam eden süreçte radar sistemleri ile tespit edilen hedeflerin etkisiz hale getirilmesi için kullanılan füzelerin, hassas bir şekilde hedefe yönlendirilmesini sağlamak amacıyla güdümlü sistemleri kullanılmıştır [4], [5]. Savunma teknolojileri, gelişen radar ve güdümlü füze sistemleriyle birlikte askeri elektronik teknolojilerinde çok etkin bir yapı oluşturmuştur. Askeri elektronik sistemlerde yaşanan bu gelişmeler, savaş sırasında savunma teknolojilerinin etkinliğini azaltmak amacıyla radar ve füze sistemlerini aldatmaya yönelik olarak yapılan birçok çalışma takip etmiştir. Bu çalışmalar sonucunda Elektronik Karşı Tedbir (EKT) sistemleri adı verilen ve savunma sistemlerinin etkinliğini azaltan yeni bir savaş teknolojisi ortaya çıkmıştır. Elektronik karşı tedbir sistemleri füze ve radar sistemlerinin etkinliğini ciddi oranda azaltmış ve bu sistemleri aldatma, karıştırma konusunda büyük başarı sağlamıştır. EKT sistemleriyle etkisi azalan radar ve füze sistemlerinin, EKT sistemlerinden kurtulması ve eski etkinliğini kazanabilmesi için Elektronik Karşı – Karşı Tedbir (EKKT) sistemleri geliştirilmeye başlanmıştır. Askeri elektronik sektöründe yaşanan tüm bu gelişmeler, savaş alanında üstünlük sağlama çabaları ve

geliştirilen elektronik sistemler Elektronik Harp (EH) konusunun temel içeriğini oluşturmuştur [6].

1.2 Elektronik Harp ve Radar Teknolojisi

II. Dünya Savaşı sırasında radar ve silah sistemlerinin kullanılmasının getirdiği avantajların görülmesi ile birlikte, tüm dünyada elektronik savaş sistemlerinin kullanımı Bölüm 1.1'de bahsedildiği üzere belirgin bir biçimde artmıştır. Temel olarak radar sistemleri; hava araçları, uçaklar ve diğer uzakta bulunan nesnelere hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla kullanılmaktadır. Radar sistemleri uzakta bulunan nesnelere varlığını, pozisyonunu ve hızını tespit edebilmek amacıyla elektromanyetik dalgaları kullanmaktadır [7]. Radar sistemleri gönderici antenleri yardımıyla uzaya elektromanyetik dalgaları göndermekte ve alıcı antenleriyle yansıyan dalgaları alarak analiz etmektedir. Bu analizler sonucunda nesne hakkında bilgi sahibi olmayı amaçlamaktadır. Şekil 1.1'de radarların temel çalışma yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1. 1 : Radar çalışma yapısı.

Radar sistemlerinin bu kabiliyetleri dünya üzerinde büyük yankı uyandırmıştır. Elektronik sektöründeki gelişmelerle birlikte radar sistemlerinin daha da geliştirilmesi sonucunda, bu sistemler ile mücadele etmek neredeyse imkânsız hale gelmiştir. Bu gelişmelerle birlikte askeri kurumlar, bu sistemlere karşı kullanılabilecek silahlar ve bu sistemleri yanıltma kabiliyetine sahip teknolojiler üzerinde yoğunlaşarak, radar sistemlerine karşı kullanılabilen, Bölüm 1.1'de

bahsedilen EKT sistemlerini geliştirmişlerdir. Geliştirilen EKT sistemlerine örnek olarak, radar sistemlerini bastırmak ve şaşırtmak amacıyla kullanılan VGPO (Velocity Gate Pull Off) ve RGPO (Range Gate Pull Off); ateşlenen bir füzeden kaçmak için füzeyi ya da füze sistemini yanıltmak amacıyla kullanılan chaff, flare gibi yöntemler verilebilmektedir [8], [9].

1.3 Tez Kapsamı

Bu tezde, elektronik harp sistemlerinde sıklıkla kullanılan ve kritik öneme sahip Radar İkaz Alıcı (RİA) sistemlerinden biri olan Yön Bulma (YB) sistemleri incelenmiştir. Yön bulma sistemlerinin temelini kullanılan anten yapısı oluşturmaktadır. Yön bulma sistemlerinde kullanılan antenler, farklı dizilim varyasyonları ile yön bulma performansını direk olarak etkileyebilen çok önemli bileşenlerdir. Bir diğer önemli bileşen sinyal analizi için kullanılan algoritmalarıdır. Gelen sinyalin hızlı bir şekilde işlenip, analiz edilerek gerekli parametrelerinin çıkarılması ve ilgili sistemlere iletilmesi gerekmektedir. Genel yön bulma sistemleri için bu tezde, farklı anten yerleşimleri ile genlik ve faz karşılaştırma algoritmalarının performansı incelenmiştir. Bu inceleme, frekans ve SNR (Sinyal Gürültü Oranı) gibi etkilerin yön bulma performansına etkisi ile birlikte kullanılan genlik ve faz karşılaştırma algoritmalarının etkisini de içermektedir. Tez içerisinde 360 derece kapsamaya sahip farklı anten yerleşim yapıları oluşturularak önce genlik karşılaştırma, ardından faz karşılaştırma performansları incelenmiş, oluşan hata ve belirsizlik durumlarının sebepleri araştırılmış ve bu belirsizliklerin giderilebilmesi için öneriler sunulmuştur. Bu çalışmaların yanında çevresel faktörlerin ve elektronik sistemlerin yapısına bağlı olarak oluşan gürültü, genlik ve faz uyumsuzluk hatalarından meydana gelen ölçüm hatalarının yön bulma performansına etkisi ve klasik anten yerleşim senaryoları dışında farklı anten yerleşim senaryoları denenmiş ve yön bulma performansına etkisi incelenmiştir.

1.4 Tez Organizasyonu

Bölüm 1’de elektronik harp sistemlerine kısaca giriş yapılmıştır. Elektronik harp sistemlerinin tarihsel gelişimi ve kullanım alanları Bölüm 1.1’de; radar teknolojisinin elektronik harp sistemlerine etkisi, temel radar çalışma yapısı ve radar sistemleri ile

elektronik harp sistemlerinin ortak noktaları Bölüm 1.2’de değerlendirilmiştir. Bölüm 1.3 bu tezin genel olarak amacını ve içeriğini Bölüm 1.4 ise organizasyon yapısını açıklamaktadır. Bölüm 2’de elektronik harp sistemleri detaylandırılmış ve birçok yönden incelenmiştir. Elektronik harp teknikleri, unsurları ve amaçları bu bölümde detaylıca açıklanmıştır. Bölüm 3’de yön bulma sistemlerine değinilmiştir. Elektronik harp sistemlerinde yön bulma tekniklerinin önemi ve kullanılış amacı değerlendirilmiştir. En temel yön bulma teknikleri irdelenmiş, avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır. Bölüm 4’de elektronik harp sistemlerinde kullanılan ve kritik öneme sahip yön bulma yapılarının matematiksel modeli incelenmiş ve çalışma yapısı açıklanmıştır. Yön bulma operasyonlarında sıklıkla kullanılan genlik ve faz karşılaştırma tekniklerinin matematiksel modeli sunulmuş standart anten yerleşim geometrileri gösterilmiştir. Genlik karşılaştırma ve faz karşılaştırma algoritmaları detaylı olarak açıklanmış ve yön bulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak belirli bir tarama aralığı için daha az anten kullanılarak oluşturulan yön bulma sistemlerinde kırıklı anten yapıları ve bu yapılarda hibrit genlik faz karşılaştırma tekniği açıklanmıştır. Kırıklı anten yapıları için farklı hüzmeye genişlikleri denenmiş ve analiz edilmiştir. Bölüm 5’de tezde uygulanan genlik ve faz karşılaştırma algoritmalarının analizlerine yer verilmiştir. Yapılan benzetimler bu bölümde açıklanmıştır. Kırıklı anten yapılarıyla oluşturulan yön bulma sistemlerinin farklı anten yerleşimleri ile birlikte detaylı analizleri ve sistemsel hatalar bu bölümde detaylı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca sistemsel hatalar, yükseliş açısı hataları ve bozuk anten örüntüsü gibi yön bulma performansını etkileyen diğer durumlar da ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bölüm 6’da genlik ve faz karşılaştırma metotlarının yön bulma performansına etkisi tartışılmıştır. Yön bulma performansı, kullanılan algoritmaların birbirlerine göre avantajları, dezavantajları bu bölümde açıklanmıştır. Kırıklı anten yerleşim yapıları ve farklı anten dizilimleri ile oluşturulan yön bulma sistemlerinin amaçları ve performans analizlerinin sonuçları bu bölümde belirtilmiştir. Elektronik sistemlerin doğasından kaynaklanan uyumsuzluklar ve yükseliş hataları ile birlikte bozuk anten örüntüleri analizleri de bu bölümde sonuçlandırılmıştır. Genel olarak bu tezde gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları da bu bölümde sunulmuştur.

2. ELEKTRONİK HARP (EH) SİSTEMLERİ

Günümüzde yaşanan modern savaşlar, önemli ölçüde elektronik sistemlere bağlıdır. Bu elektronik sistemler, silah sistemleri ve bilgi işletim sistemlerinin önemli bir parçasını oluşturan sensörler, işlemciler, haberleşme sistemleri gibi elektronik alt sistemlerden oluşmaktadır [9], [10]. II. Dünya Savaşı'ndan sonra radar teknolojisi ve elektronik harp teknolojisi askeri operasyonlar içerisinde Bölüm 1'de bahsedildiği üzere çok önemli bir yer edinmiştir. Modern savaşlarda sayıca üstünlük ya da arazi şartları çok fazla avantaj sağlamamaktadır. Elektronik harp açısından daha fazla teknik altyapıya sahip ülkeler modern savaşlarda avantajlı olan taraflar olmaktadır. 1974 yılında Sovyet Amirali Gorshkov elektronik sistemlerin kullanımının savaşlarda sağladığı avantajları "Elektromanyetik spektrumu kontrol eden taraf bir sonraki harbi kazanacaktır." sözüyle belirtmiştir [11]. Elektronik harp sistemleri savaşlarda kullanım alanlarına ve kullanım amaçlarına göre istihbarat, silah sistemleri ve komuta kontrol yapısı olarak gruplandırılabilir.

2.1 Elektronik Harp ve İstihbarat

Askeri operasyonlar savunma, saldırı ve destek sistemleri olmak üzere üç temel görev kapsamında gerçekleştirilmektedir. Bu görevlerin başarılı bir şekilde sonlandırılabilmesi için en önemli ve en gerekli kaynak istihbaratı bilgidir [12]. Tarihten günümüze kadar savaşların kaderini değiştiren en önemli silah, savaş ortamında ki istihbarat olmuştur. Bu nedenle, düşman hakkında elde edilen bilginin doğru bilgi olması ve bu bilginin doğru zamanda, doğru şekilde kullanılması tarihte yaşanan birçok savaşın kaderini değiştirmiştir. 1998 – 1999 yılları arasında yaşanan Kosova Krizi sırasında NATO (North Atlantic Treaty Organization)'nun Yugoslav ve Sırp güçlerin savaş sistemlerini tanımak için Elektronik İstihbarat (Eİ) sistemlerine başvurması ve aldığı istihbaratlar doğrultusunda müdahale etmesi savaş sırasında alınan istihbaratın önemini göstermektedir [13]. Elektronik harp sistemlerinin kullanıldığı önemli bir savaş 1991 yılında gerçekleşen Körfez Savaşı'dır. Bu savaşın kaderini belirleyen en önemli etken ABD (Amerika Birleşik

Devletleri)'nin hava operasyonları konusunda ki üstünlüğü olmuştur. İçlerinde ABD, Birleşik Krallık ve Suudi Arabistan gibi ülkelerin bulunduğu koalisyon güçleri o dönemde dünyanın beşinci büyük kara ordusuna sahip devleti Irak'ı kısa sürede yenilgiye uğratmıştır. Bu yenilginin birincil sebebi, koalisyon güçlerinin teknik anlamda yüksek teknolojiye sahip olması ve elektronik savaş tekniklerini etkili bir biçimde kullanabilme yeteneğine sahip olmasıdır. Diğer bir sebep ise, II. Dünya Savaşı'nda kullanılan savaş teknolojilerinin koalisyon güçleri tarafından iyi analiz edilmiş olmasıdır. Bu analiz sonucunda ABD, Irak karşısında ilk olarak hava hâkimiyetini sağlamış, ardından hava ile kara kuvvetleri arasında güçlü bir komuta kontrol mekanizması sağlayarak başarılı bir savaş stratejisi izlemiştir. Son olarak ABD, Irak'ın Sovyetler' den aldığı Scud füzelerini, Patriot hava savunma sistemleri ile havada imha ederek Irak'ı yenilgiye uğratmıştır [14].

2.2 Elektronik Harp ve Silah Sistemleri

Elektronik savaşlarda bilgi işletim sistemlerinin dışında önemli bir faktörde kullanılan silah sistemleridir [9]. Silah sistemleri genel olarak, hedefin ya da tehdit unsurunun etkisiz hale getirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Genellikle operasyonun bitirici hamlesi olarak kullanıldığı için, hatalı yapılan bir silah kullanımında istenmeyen sonuçlar yaşanabilmektedir. Örneğin, hedefin konumu hakkında alınan yanlış bir bilgi sonucu yanlış hedefler vurulabilmekte ya da silah sistemi hedef tarafından şaşırtıldığı için kullanılan silah hedefi kaçırabilmektedir. Silah sistemlerinin bu kadar önemli olmasının diğer sebepleri de pahalı sistemler olması, karmaşık yapıya sahip olması ve hedefi kaçırması durumunda hedefin kaçırılması ihtimali sonucunda yaşanacak kayıplardır. Bu sebeplerden dolayı, bir silah sistemi çalıştırılacaksa çok yüksek başarımlar sağlanması gerekmektedir. Yüksek oranda başarılı atışlar için, hedef hakkında yeterli ve doğru bilgi sağlanmış olmalıdır. Silah sisteminin yüksek hassasiyette ve yüksek doğrulukta hedefi yakalaması için, hedefin hızı, konumu ve hareket modeli gibi bilgilerinin önceden tespit edilmiş olması gerekmektedir. Hem düşman hem dost kuvvetler bu bilgileri önceden hızlı ve doğru bir şekilde sağlamak amacıyla elektronik harp sistemlerini etkin bir biçimde kullanmaktadır [15].

1982 yılında Arjantin ile Birleşik Krallık arasında yaşanan Falkland Savaşı silah ve bilgi sistemlerinin ne kadar önemli olduğunu ve bir savaşın kaderini nasıl

değiştirdiğini göstermektedir. Ayrıca Falkland Savaşı elektronik harp sistemlerinin savaşlarda kullanılmasının temelini oluşturan ve milli teknolojilerin önemini gösteren çok önemli bir savaştır [16]. Bu savaşta Arjantin Falkland Adaları'nı işgal etmiş ve Birleşik Krallık donanması bölgeye gitmiştir. Arjantin'in elinde Fransız yapımı Exocet füzeleri ve bu füzeleri atan Super Etendard uçakları vardı. Bu füzeler kullanılarak Birleşik Krallık donanmasına ait 2 destroyer, 1 yük gemisi, 2 füzeatar firkateyn ve 4 askeri gemi kısa bir süre içerisinde batırılmıştır. Bunun üzerine birçok kayıp veren Birleşik Krallık Fransız yapımı füzeleri durdurmak amacıyla Fransa'dan bu füzelerin kodlarını istemiştir. Fransa'nın olumlu yanıt vermesiyle Arjantin'in silah sistemleri Birleşik Krallık tarafından susturulmuş ve savaş Birleşik Krallık lehine sonuçlanmıştır [17]. Geçmişte yaşanan elektronik savaşlara bakıldığında zaman iki temel kavram dikkat çekmektedir. Bunlardan ilki bilgi ve istihbarat, diğeri ise yüksek başarılı silah sistemlerinin kullanımınıdır. Genel anlamda elektronik harp sistemleri, doğru istihbarat ile yüksek başarılı silah sistemlerinin savunma, saldırı ve destek amacıyla kullanılmasını sağlayan elektronik sistemler ve stratejiler bütünüdür.

2.3 Elektronik Harp ve Komuta Kontrol Mekanizması

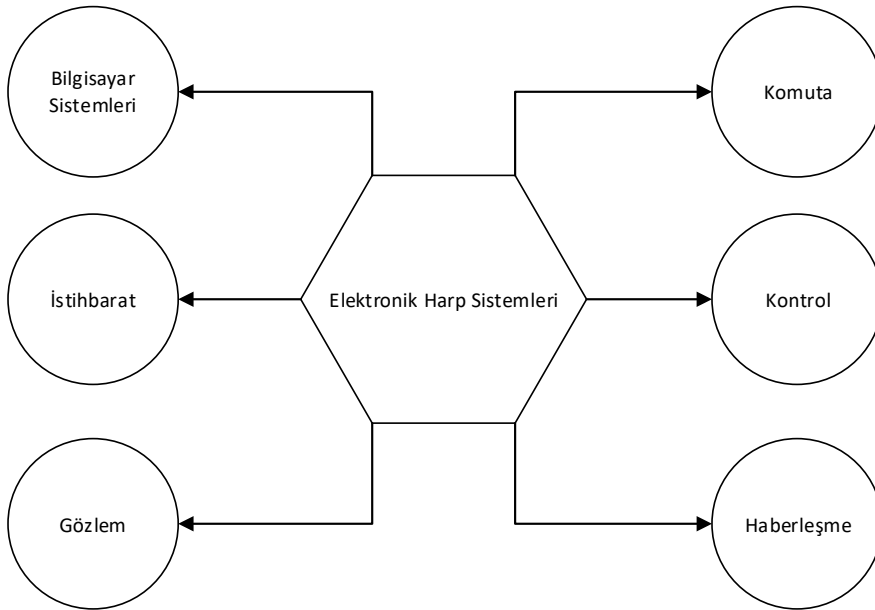
Elektronik harp sistemlerinde kullanılan temel ekipmanlar, sensör görevi gören farklı ortamlar için kullanılan radar, kızılötesi ve sonar sistemleri; haberleşme için haberleşme ağları, haberleşme bağlantıları, sensörlerden gelen dataların analiz edileceği, saklanacağı K2 (Komuta Kontrol) merkezleri ve çıkış ekipmanları olarak kullanılan karıştırıcılar, lazerler olarak sınıflandırılabilir [9]. Bu sistemlerin birbirleriyle olan ilişkileri, çalışma mekanizmaları ve yapısal özellikleri elektronik harp konusunun yapı taşlarını oluşturmaktadır.

Elektronik savaşlar, komuta kontrol savaşlarının askeri operasyonlarından birisidir. K2 sistemlerinin amacı, düşman komuta kontrol sistemini kırarak, üstünlük sağlamaktır. Böylece komuta kontrol sistemi daha güçlü olan taraf, savaşta başarıya daha yakın olacaktır. Komuta kontrol sistemleri genel olarak; savaş sırasında alınan kararların, uygulanacak stratejinin, hedef hakkında ve düşman elektronik sistemleri hakkında toplanan bilgi ve istihbaratın savaş güçlerine iletilmesini sağlayan bağlantıdır. Sistemik olarak komuta kontrol sistemi, sensörler, alt sistemler, navigasyon sistemleri, komuta ve veri analiz merkezleri ve haberleşme ağları gibi sistemler arasındaki bağlantıyı oluşturmaktadır [9].

2.4 Elektronik Harp Bileşenleri

Askeri alanlarda EH teknikleri tüm bileşenleriyle çok büyük önem arz etmektedir. Elektronik Atak (EA) bileşeni savaş operasyonları sırasında hedefe müdahale etmek amacıyla kullanılmaktadır. Elektronik Savunma (ES) bileşeni düşman saldırılarından korunmak amacıyla ve hemen cevap verebilme kabiliyetine sahip olma amacıyla kullanılmaktadır. Elektronik Destek (ED) ise bilgi, istihbarat ve savaş stratejileri konusunda komuta kontrol merkezine destek olması amacıyla kullanılmaktadır [18].

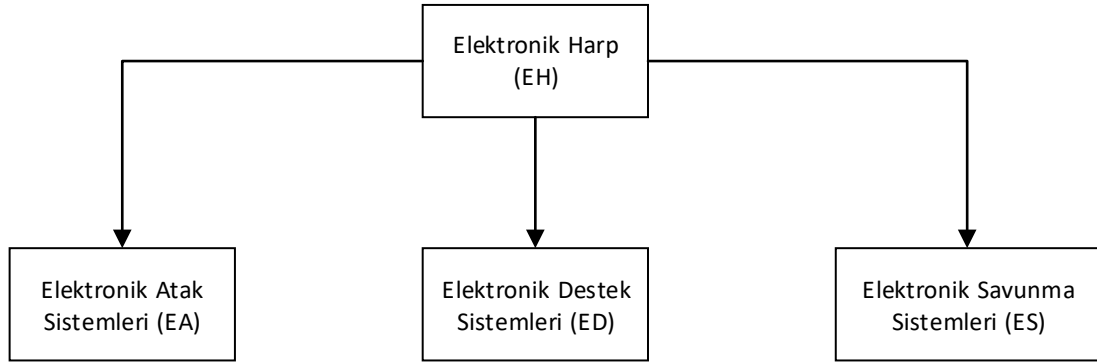
Modern savaşlarda, elektronik savaş teknikleri, savaşın gidişatını ve kaderini etkileyen çok önemli unsurlardır. Bu teknikler genel anlamda düşman kuvvetleri doğru bir şekilde tanımlamak, uygun zamanda doğru hedeflere karşı silah sistemlerini etkin bir biçimde kullanmak, düşman elektronik sistemlerinin karşı ataklarına karşı kendisini savunmak, destek kuvvetlere istihbarat sağlamak ve düşmanın bir sonraki hamlesini sezerek uygun komuta kontrol stratejisi belirlemek amacıyla kullanılmaktadır [19]. Elektronik savaş sistemlerinin en geniş kapsamda kullanım amaçları Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2. 1 : Elektronik harp unsurları.

Elektronik harp sistemleri genel olarak Şekil 2.1’de belirtilen altı temel unsurdan oluşmaktadır. Bu unsurların her biri bir operasyon tipini belirlemektedir. Savaş

durumunda savaşın kazanılması için savaşın başından sonuna kadar bu altı unsur üzerinde elektronik sistemlerin başarıyla görevini yerine getirmesi gerekmektedir. Temel olarak bu unsurlar; düşman elektronik sistemlerinden yayılan sinyallerin gözlenmesi, algılanması ve analiz edilmesi; bu sinyallerin tespit edildikten sonra hedef platformların konumunun belirlenmesi, konvansiyonel silahlar kullanmadan elektromanyetik sinyallerle düşman elektronik sistemlerinin etkinliğinin azaltılması, bozulması ve karıştırılması ve dost sistemlere düşman sistemler hakkında istihbarat sağlanması gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de gösterilen altı unsuru kapsayan elektronik harp sistemleri savaş durumundaki görevlerine göre de Şekil 2.2’de gösterildiği üzere üç farklı alanda incelenebilmektedir. Elektronik saldırı, elektronik destek ve elektronik savunma sistemleri elektronik harp sistemlerinin kullanım amaçlarına yönelik temel bileşenleridir [9].



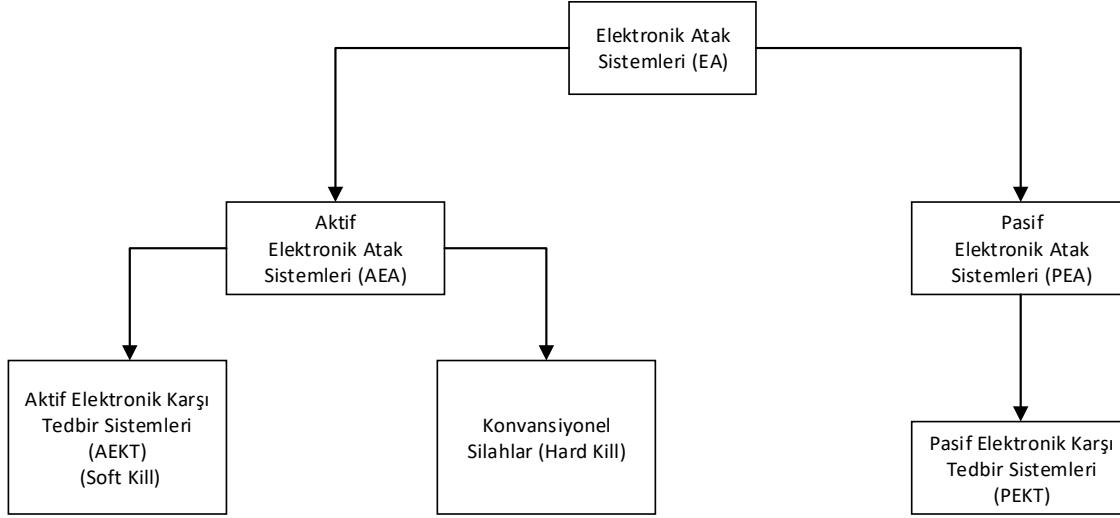
Şekil 2. 2 : Elektronik harp bileşenleri.

2.4.1 Elektronik atak sistemleri

Elektronik atak sistemleri; radyo dalgalarının, radyo frekanslarının genel olarak elektromanyetik spektrumun düşman kuvvetler tarafından kullanılmasını engellemeyi amaçlamaktadır [12], [18]. Elektromanyetik spektrumun kullanımının engellenmesi, düşman elektronik harp sistemlerinin hedef tespit sistemleri, hedef takip sistemleri, hava gözetleme ve kontrol sistemleri, haberleşme ve istihbarat sistemleri gibi kabiliyetlerinin engellenmesi anlamına gelmektedir. Elektronik atak sistemleri çalışma şekillerine göre aktif ve pasif olarak ikiye ayrılmaktadır [9]. Her iki sisteminde kendisine göre avantajlı olduğu yanları vardır. Aktif ya da pasif elektronik sistemler çalıştırılırken genelde amaca göre karar verilmektedir. Eğer karşı tarafa bir müdahale yapılacaksa ya da düşman sistemlerin çalışması engellenecekse aktif sistemler kullanılmaktadır. Ancak amaç sadece istihbarat ya da düşman

sistemlere karşı önlem almak ise pasif sistemlerin kullanımı daha uygun olmaktadır.

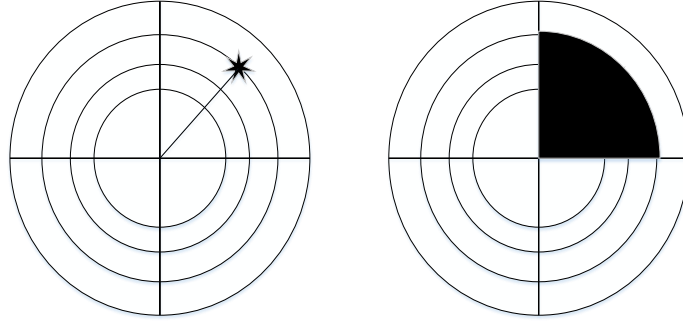
Şekil 2.3’de aktif ve pasif elektronik atak bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 2. 3 : Elektronik atak sistem bileşenleri.

2.4.1.1 Aktif elektronik atak sistemleri

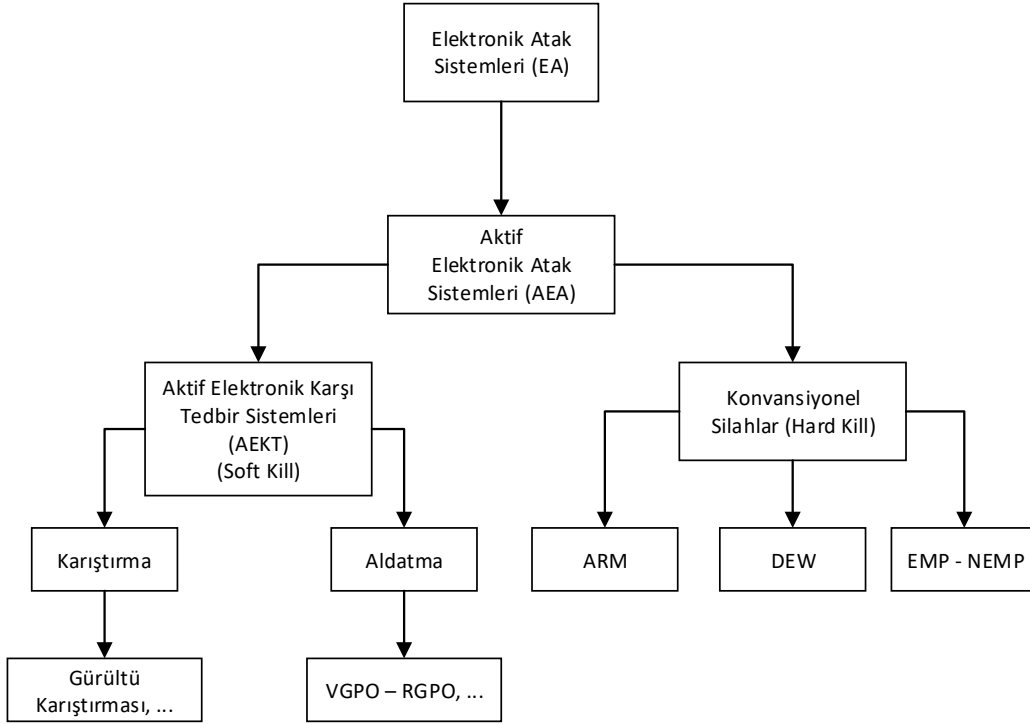
Aktif sistemler genel olarak, dışarı bir yayın yapan ve aktif olarak çalışan, belirli bir güç gerektiren sistemlerdir. Aktif sistemler çalışırken bir enerji yaymakta ve bundan dolayı frekans bandında, elektromanyetik spektrumda bir yer işgal etmektedir [20]. Bu dezavantajının yanında karşı tarafta oluşturduğu etki çok güçlü olduğu için savaş durumunda sıklıkla kullanılan elektronik saldırı şeklidir. Elektronik atak sistemleri genel anlamda, düşman haberleşme sistemlerini ya da düşman radar sistemlerini karıştırmakla beraber, yüksek güçlü mikrodalgalar kullanarak düşman elektronik sistemlerini bozmayı, etkisiz hale getirmeyi amaçlamaktadır [9]. EA sistemlerinin temelini aldatma teknikleri oluşturmaktadır. Aldatma teknikleri, düşman sistemlerini şaşırtarak yanlış ya da eksik bilgiye sahip olmalarını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bunun dışında karıştırma teknikleri de düşman sistemleri etkileyen önemli bir yöntemdir. Karıştırma teknikleri kullanılarak düşman elektronik sistemlerinin işlevselliği kaybolmakta ve etkisiz hale gelmektedir. Bu teknikler ile düşman sistemlerin; yanlış ya da eksik istihbarat ve bilgi doğrultusunda hareket etmesi sağlanmaktadır. Şekil 2.4’ de örnek bir gürültü karıştırmasının radar ekranında yarattığı etki gösterilmiştir [21].



Şekil 2. 4 : Gürültü karıştırması.

Hedef sistemler hakkında hız, konum gibi parametreler ile ilgili yanlış bilgi edinilmesi nedeniyle müdahale sonucu ya da hedef hakkında istihbarat alamama gibi nedenlerden dolayı başarısızlık ortaya çıkabilmektedir. Bunun sonucunda beklenmedik bir karşı atakla ciddi kayıplar verilebilmekte ya da hedef gerekli manevralarla kaçabilmektedir. Aldatma ve karıştırma teknikleri genel olarak düşman sistemlerin komuta kontrol mekanizmalarını etkileyen ve düşmana ciddi zaman kaybı yaratmakla beraber mühimmat kaybı da yaşatabilecek; aynı zamanda durumu kendi lehine çevirebilecek kadar büyük sonuçlar doğurabilecek aktif elektronik atak yöntemleridir.

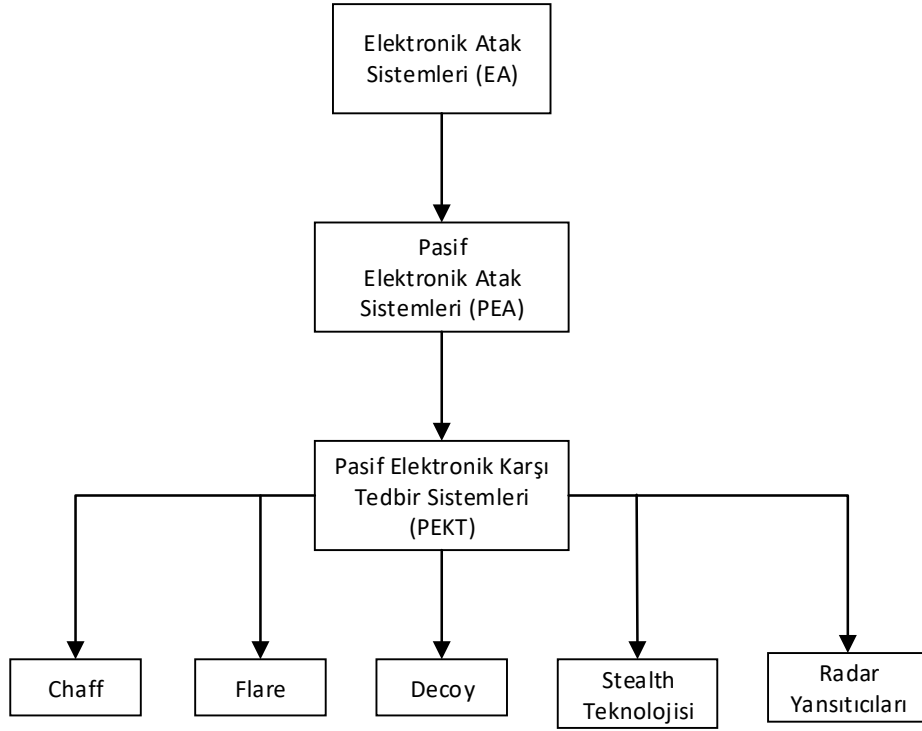
Fiziksel imha, elektronik savaşın en çok kullanılan ve en etkili yöntemlerinden birisidir. Müdahale sonrası oluşan etkiye bağlı olarak iki farklı şekilde kullanılmaktadır [2]. İlk yöntem, düşman sensörler, haberleşme bağlantıları gibi elektronik sistemlerin; karıştırma teknikleriyle kullanılamaz hale getirilmesidir. Bu yöntem can kaybına ya da bir felakete neden olmadığı için soft kill olarak adlandırılmaktadır. Soft kill de amaç düşman karşısında taktiksel olarak öne geçmek, zaman kazanmak, kendisi hakkında yanlış bilgiye sahip olmasını sağlamak ve onun komuta kontrol mekanizmasını kırmaktır. Diğer yöntem ise, DEWs (Direct Energy Weapons), ARMs (Anti Radiation Missile) ya da EMP – NEMPs (Electromagnetic – Nuclear Weapons) gibi konvansiyonel silah sistemleriyle çok ciddi sonuçlara ve kayıplara neden olan düşman sistemlerini tamamen yok etmek amacıyla kullanılan hard kill yöntemleridir [9]. Şekil 2.5’de genel hatlarıyla aktif elektronik atak bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 2. 5 : Aktif elektronik atak bileşenleri.

2.4.1.2 Pasif elektronik atak sistemleri

Pasif elektronik atak sistemleri, pasif olduğu için bir sinyal yayılımı yapmamaktadır. Bu sistemler genellikle aktif elektronik atak sistemlerine bağlı silah sistemlerinin etkinliğini azaltmak amacıyla kullanılmaktadır [20]. Bu sistemler, yanıltmak ve aldatmak üzerine çalışmakta olup, aktif sistemlerden farkı ise yanıltma ve aldatma operasyonlarını düşmana karşı saldırı olarak değil; düşmanın saldırısından kurtulmak ya da saldırıyı hafifletmek amacıyla kullanılmasıdır. Bu tip sistemler çalışma yapıları gereği düşman sensörler tarafından fark edilemediği için kendilerini gizli tutabilmektedir. Pasif sistemler çalışırken elektromanyetik spektrumda yer işgal etmediği için fark edilemediği gibi sinyal yayılımı yapmadığı için de çok fazla güce ihtiyaç duymamaktadır [5]. Pasif elektronik atak sistemleri, dost kuvvetlere de birçok yönden destek sağlayabilmektedir. Saldırı altındaki bir dost kuvvet bu sistemlerin yardımıyla füzeyi ya da bir radarı kandırabilmekte ve tehlikeli durumdan kurtulabilmektedir. Pasif elektronik atak sistemleri temel olarak; Şekil 2.6’da gösterildiği gibi chaff, flare, decoy, stealth teknolojileri ve radar yansıtıcılarından oluşmaktadır [9].



Şekil 2. 6 : Pasif elektronik atak bileşenleri.

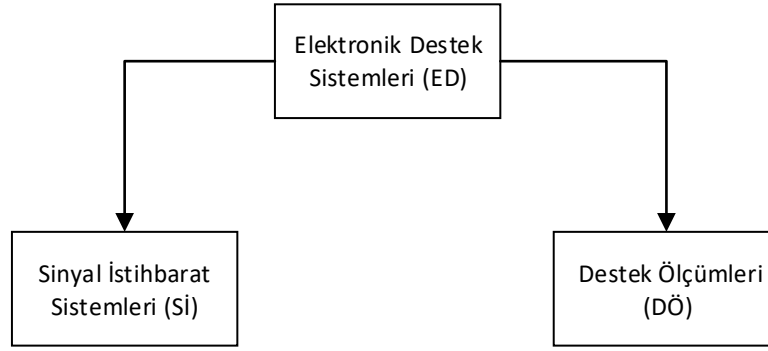
Chaff, radar sistemlerine karşı kullanılabilen çok büyük bir hacim ve RCS (Radar Cross Section)'e ulaşabilen, bu şekilde radar sistemlerini kandırmayı amaçlayan metal ya da alüminyum parçacıklarından oluşan bulut yapısındaki bir karşı tedbirdir. Flare, chaff ile benzer özellikleri taşıyan ancak radar yerine kızılötesi sensörlere karşı kullanılabilen bir seferde birden çok fırlatılabilen yüksek ısı oluşturarak ısı sensörlü füzeleri kandırmayı amaçlayan diğer bir karşı tedbir sistemidir. Decoy sistemleri, füze görünümü olup uçağa bağlı ya da uçaktan bağımsız olarak hareket edebilen aldatma sistemlerinden birisidir. Bu sistemler radar ya da füze sistemlerini uçağın RCS değerine yakın bir RCS oluşturarak kandırmayı amaçlayan karşı tedbir sistemleridir. Bir elektronik harp senaryosunda, elektronik karşı tedbirler belirli bir prosedür takip edilerek sistematik bir şekilde uygulanmaktadır. Çizelge 2.1 bu prosedürü sırasıyla göstermektedir [2], [12], [15].

Çizelge 2. 1: EKT uygulama prosedürü.

1	Elektronik atak sistemi hangi amaç için kullanılacak belirlenmelidir.
2	Elektronik atak sistemlerinin uygulanacağı hedeflerin belirlenmesi ve çalışma şekillerinin analiz edilmesi gerekmektedir.
3	Hedeflerin tehdit unsuru oluşturduğu andan itibaren mesafe ölçümlerinin yapılması ve vuruş mesafesinin belirlenmesi gerekmektedir.
4	Hedeflerin savaş ortamında parametre, çalışma zamanları ve dağılımlarının detaylı analizi yapılmalıdır.
5	Hedeflerin tehlike analizi yapılmalıdır. En ciddi tehlike oluşturabilecek olan hedeften en aza doğru öncelik sıralaması yapılmalıdır.
6	Hedeflerin savaş ortamına bağlı zayıflıklarının belirlenmesi gerekmektedir.
7	Hedefin zayıflıklarına karşı uygulanacak olan Elektronik Karşı Tedbir sistemleri belirlenmelidir.
8	Belirlenen elektronik karşı tedbir sistemleri test edilip doğrulanmalıdır.

2.4.2 Elektronik destek sistemleri

Elektronik destek sistemlerinin temel amacı RF (Radyo Frekansı) güdümlü silahları tespit etmektir [18]. ED sistemleri RF güdümlü silahları tespit etmek amacıyla ilk olarak, RF güdümlü silah sistemleri ile ilgili olan yayınları yakalamaktadır. Bu yayınları, ortamda ki diğer yayınlardan ayırarak RF güdümlü silah yayınlarını analiz etmekte ve sinyalin genlik, darbe tekrarlama aralığı, frekans, darbe genişliği, modülasyon tipi gibi parametrelerini hesapladıktan sonra, önceden kayıt altına alınmış olan sensör tiplerinin saklandığı veri tabanında bulunan verilerle karşılaştırarak sensörün tipini ve kimliğini belirlemektedir. Son aşama olarak tespit edilen silah ya da sensör tipi veri tabanına ölçülen parametreleriyle birlikte kayıt edilmektedir. Elektronik destek sistemleri Şekil 2.7’de gösterildiği gibi görevlerine göre Sinyal İstihbaratı (Sİ) ve Destek Ölçümleri (DÖ) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [9].

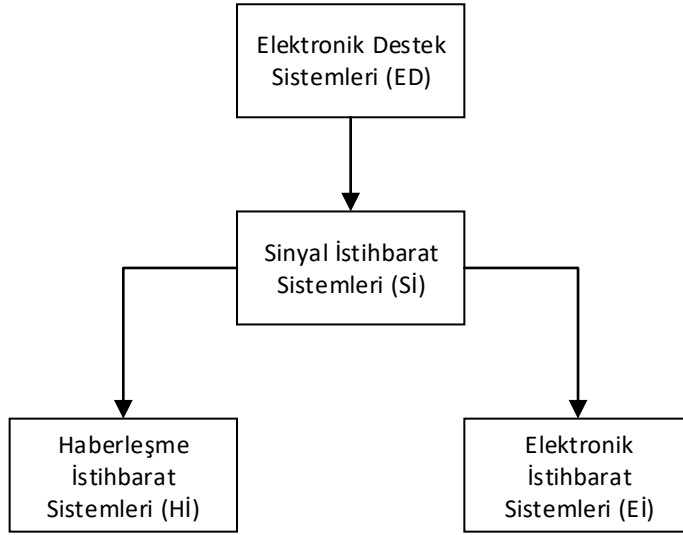


Şekil 2. 7 : Elektronik destek sistemleri bileşenleri.

Elektronik destek sistemleri genel anlamda, saldırının ya da savunmanın daha etkili ve başarılı olabilmesi için gerekli istihbarat ve tehdit tanımlamasını yapmayı amaçlamaktadır. Bu sistemler, ortamda bulunan ve tehdit oluşturabilecek her türlü elektromanyetik enerji kaynağını alarak analiz etme görevini üstlenmektedir. Bu analiz sonucunda elde edilen bilgiler; savunma ya da saldırı sistemleri için değerli bilgiye ve istihbarata çevrilmek amacıyla kullanılmaktadır [22].

2.4.2.1 Sinyal istihbarat (Sİ) sistemleri

Sinyal istihbaratı, düşman elektronik sistemlerini tanımlamayı, belirlemeyi, kimliklendirmeyi ve ortamdaki tüm iletişim kaynakları ile elektronik sistemleri sınıflandırarak ilgili sistemlere düşman hakkında değerli bilgi olarak sağlamayı amaçlamaktadır. Sinyal istihbarat sistemleri savaş sırasında olduğu gibi savaş dışında da çevrede olup biteni araştırmaktadır. Bu araştırmaları sonucu tehdit oluşturabilecek sistemlerin yayınlarını toplamakta ve analiz etmektedir. Analiz sonucunda potansiyel tehdit oluşturabilecek hedef sistemlerini, özellikleriyle birlikte veri tabanına kayıt etmektedir. Sinyal istihbarat sistemleri istihbaratın toplandığı elektronik harp sistemlerinin çeşitlerine göre iki temel bileşene ayrılabilir. Haberleşme İstihbaratı (Hİ) ve Elektronik İstihbarat (Eİ) sistemlerinden oluşan bu bileşenler Şekil 2.8'de gösterilmiştir [8], [9].



Şekil 2. 8 : Sinyal istihbarat bileşenleri.

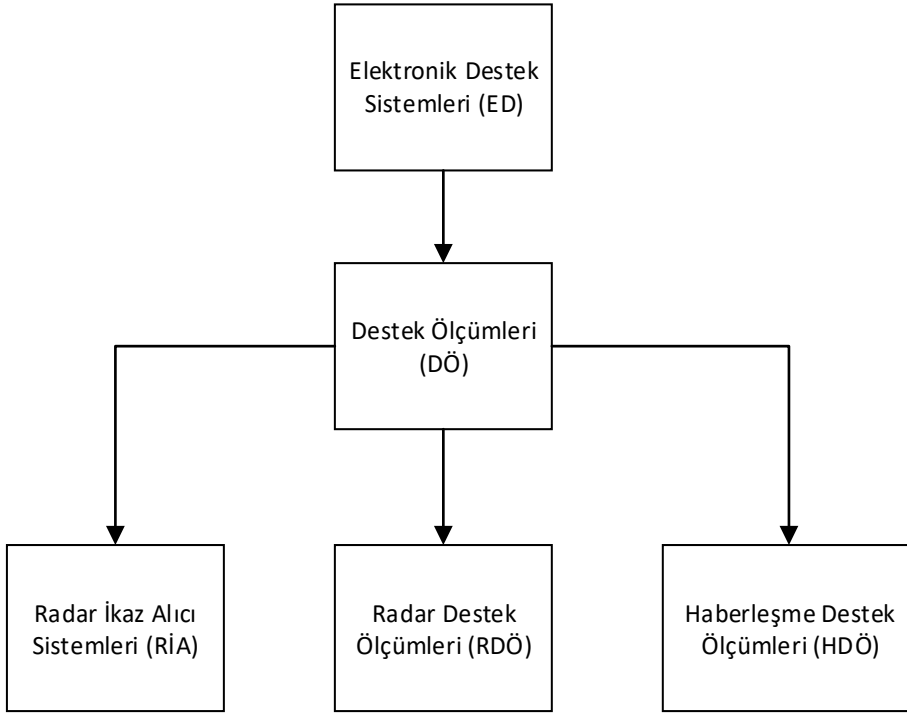
Haberleşme istihbaratı, düşmanın tüm haberleşme ağını, haberleşme bağlantılarını ele geçirmeyi amaçlamaktadır. Yapılan bilgi alışverişi sırasındaki mesaj trafiğinin detayları ve hangi birimlerin haberleştiği gibi bilgileri tespit ederek, elektronik atak ve elektronik savunma birimlerine iletmek haberleşme istihbarat sistemlerinin temel görevidir [9].

Elektronik istihbarat sistemleri, ortamda var olan ve potansiyel tehdit oluşturan radar sistemlerinin detaylı analizini yapabilmek amacıyla kullanılmaktadır. Genellikle pasif olarak kullanılan bu sistemler, kendisini fark ettirmeden çevredeki tehdit unsurlarının radyo frekansı, darbe tekrarlama frekansı, darbe genişliği ve modülasyon tipi gibi önemli parametrelerini belirlemektedir. Eİ sistemlerinin bu parametreleri belirlemesiyle birlikte; tehdit unsurunun tüm bilgileri veri tabanına kaydedilebilmekte ve gerektiği zaman dost kuvvetlerle istihbarat olarak paylaşılabilen; pilota erken uyarı olarak iletilebilmekte ve bağlı bulunduğu silah sistemlerini aktif duruma geçirebilmektedir [23]. Ayrıca Eİ sistemi, savaş komuta kontrol mekanizmasında da çok önemli yer tutmaktadır. Komuta kontrol sistemlerinin uygun bir savaş stratejisi oluşturmada gerekli olan bilgilerin birçoğu elektronik istihbarat sistemleri tarafından sağlanmaktadır. Bu kritik ve önemli kabiliyetleri nedeniyle bu sistemler genellikle pasif olarak çalıştırılmaktadır. Pasif sistemler çalışırken enerji yaymadığı için elektromanyetik spektrumu dinleyen hiçbir sistem, pasif çalışan bir sistemin varlığını tespit edememektedir. Elektronik istihbarat sistemleri, savaş sırasında çalıştırıldığı gibi savaş öncesinde de çalıştırılabilmektedir.

Savaş öncesinde sağlanan istihbarat savaş sırasında nasıl bir tehditle karşı karşıya olunduğunun, tehdite nasıl müdahale edilmesinin gerektiğinin ve ne tür elektronik silahlar kullanılmasının gerektiğinin önceden belirlenmesini sağlamaktadır. Bu tarz bilgilerin önceden bilinmesi savaş sırasında çok büyük avantaj sağlamaktadır.

2.4.2.2 Destek ölçümleri (DÖ) sistemleri

Elektronik destek sistemlerinin sinyal istihbarat sistemlerine çok benzeyen bir diğer bileşeni destek ölçümleri sistemleridir. Destek ölçümleri sistemleri, bir çeşit istihbarat yapmaktadır. Sinyal istihbarat sistemleriyle çok yakın gözükseler de destek ölçüm sistemlerinin ufak bir farkı vardır. Bu fark zaman kavramıdır [19], [21]. Sinyal istihbarat sistemleri savaş öncesi hazırlık ve savaş sırasında doğru müdahale için çalışmaktadır. Ancak destek ölçüm sistemleri sadece savaş sırasında çalışmaktadır. Bunun anlamı destek ölçüm sistemlerinin anlık ve gerçek zamanlı ölçümler ve analizler yaparak, bu bilgileri savaş sırasında ilgili birimlere aktarmasıdır [21]. Destek ölçüm sistemleri elektronik atak ve savunma sistemleriyle koordineli çalışmaktadır. Savaş sırasında değişen hedef pozisyonlarını, hedef sistemler tarafından kullanılan silahları ya da hedef radarların aydınlatma bilgilerini anlık olarak kendi sistemlerine ilgili görevler kapsamında aktarmaktadır. Bu aktarımlar neticesinde düşman sistemlerin stratejileri analiz edilip, bu sistemler hakkında bilgi sahibi olunması amaçlanmaktadır. Bu analizler sonucunda komuta kontrol mekanizması yapılacak müdahaleyi belirleyerek ilgili sistemlere, hedefin stratejisine ya da hedef sistemlerin müdahalesine karşı, bir savunma ya da saldırı stratejisi belirlemesi için aktarmaktadır. Şekil 2.9'da destek ölçümlerinin bileşenleri gösterilmiştir [9], [20].



Şekil 2. 9 : Destek ölçümleri bileşenleri.

Radar ikaz alıcı sistemleri, genel olarak uçak, helikopter ve gemi gibi araçlara kendini koruma kabiliyeti ve erken uyarı sistemi kazandırma amacıyla takılan gerçek zamanlı pasif sistemlerdir [10]. Radar ikaz alıcı sistemleri özellikle hava platformlarına, tehdit tarama, kilit radarları ile havadan havaya ya da yerden havaya atılan füzelerin ya da füze sistemlerinin varlığını ilgili sistemlere, pilota bildirmek amacıyla yerleştirilmektedir. Savaş ortamında oluşabilecek tehdit sistemlerinin sinyal parametreleri önceden radar ikaz alıcı sistemlerinde bulunan tehdit tanıma veri tabanına kaydedilmektedir. Bu sayede RİA sistemleri savaş sırasında tehdit oluşturan unsurları tanımlayıp gerekli parametrelerini çıkararak uyarı mesajı oluşturabilmektedir [24]. Bu tezde bahsedilecek olan yön bulma yöntemleri; RİA sistemlerinde tehdit yönünü bulabilmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Radar ikaz alıcı sistemleri, modern savaş elektronik harp teknikleri içinde çok temel bir sistemdir. Sinyal işleme, RİA'nın temel yapısını oluşturmakla beraber, tüm sistem bileşenlerinin kontrolünü de sağlamaktadır. Antenlerden ve alıcılardan gelen veriyi işleyen sinyal işlemcisi, veri tabanındaki sinyal özellikleriyle bu sinyali karşılaştırmaktadır. Tespit edilen sinyal RİA Scope da görüntülenerek, pilota görüntülü ve sesli olarak ikaz oluşturabilmektedir.

Radar destek ölçümleri, düşman radar sistemlerine odaklanmaktadır ve bu sistemler üzerinden istihbarat sağlamayı amaçlamaktadır. Genellikle radar parametreleri ve radarın tehdit oluşturup oluşturmadığıyla ilgilenmektedir [19]. Dinlediği bölgede var olan radar sistemlerini analiz ederek potansiyel tehdit oluşturan radarları ilgili sistemlere bildirmektedir.

Haberleşme destek ölçümleri, RDÖ ile aynı şekilde çalışan radar yerine haberleşme bağlantıları üzerinden istihbarat sağlayan sistemlerdir. Haberleşme sistemleri savaş durumunda çok kritik sistemler haline gelmektedir. Komuta kontrol mekanizması ve savaş stratejisi haberleşme sistemleri ve ağları üzerinden sürekli güncellenmektedir. Bu nedenle bu sistemler dinlenerek elde edilen istihbarat, düşmanın tüm kozlarını kaybetmesine neden olmaktadır. HDÖ sistemleri haberleşme bağlantılarından gelen sinyalleri analiz ederek kendi komuta kontrol sistemine aktarmakta ve düşmanın savaş stratejisini çözmekle birlikte kendisi için yeni bir savaş stratejisi oluşturulmasına katkı sağlamaktadır [9], [20].

2.4.3 Elektronik savunma sistemleri

Elektronik savunma sistemleri genel anlamda, elektronik atak sistemlerinde kullanılan karıştırma tekniklerine karşı dayanıklı sistemler tasarlamak, yüksek güçlü mikrodalga ataklarına karşı daha dirençli donanımlar tasarlamak, donanım sertleştirme ve yayılıma güdümlü füzeler kullanarak düşman saldırılarını engellemek ve düşman sistemlerini imha etmek amacıyla kullanılmaktadır [9]. Düşman elektronik harp sistemleri tarafından gerçekleştirilen elektronik atak sistemlerinin dost elektronik harp sistemleri üzerinde yarattığı etki üzerine, bu sistemlerin etkinliğinin azaltılması amacıyla elektronik savunma sistemleri geliştirilmiştir [6]. Bu sistemler elektronik karşı tedbir sistemleriyle gerçekleştirilen elektronik atak faaliyetlerine karşı, karşı - karşı tedbir sistemleriyle cevap verilmesi ile elektronik atak sistemlerinin durdurulması ve etkisiz hale getirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca elektronik savunma sistemleri, dost elektronik harp sistemlerinin elektromanyetik spektrumu daha etkin bir şekilde kullanabilmesini sağlamak için gerçekleştirilen elektronik harp faaliyetleridir. Elektronik savunma sistemlerinin en temel görevi; elektronik karşı tedbir uygulayan düşman sistemleri karşısında gerçek tehdit sinyalini elektronik karşı tedbir sistemlerinden ayırt edebilme ve tehdit sinyalinin hız, mesafe, konum gibi parametrelerinin çıkarılarak gerekli müdahalenin

yapılmasını sağlamaktır. Bu amaçlar doğrultusunda gerçekleştirilen operasyonlardan biri; RF ve Darbe Tekrarlama Frekansı (DTF) gibi bazı parametrelerin her darbede değiştirilerek karşı tedbir sistemlerinin birbirine yakın RF ve DTF' lerde sinyaller göndermesini engellemektir [19], [20]. Bundan dolayı da gerçek tehdit sinyali, karşı tedbir sisteminin yarattığı sinyaller ile karışmamaktadır. Diğer bir yöntem ise, faz bilgisi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde algılanan sinyallerin fazlarına bakılarak gönderilen sinyallerin faz bilgileriyle karşılaştırılmaktadır. Farklı fazlara sahip olan sinyallerin aldatma sinyalleri olduğu sonucu çıkarılarak gereksiz yere analiz edilmemektedir [22].

3. YÖN BULMA (YB) SİSTEMLERİ

II. Dünya Savaşı'ndan sonra radar kontrollü silah sistemlerine yapılan yatırımlar ve elektronik sektöründeki gelişmelerin de etkisiyle radar kontrollü silah sistemleri oldukça yaygınlaşmıştır [25]. Bu sistemlerin gelişmesiyle birlikte, bu sistemlere engel olabilecek karşı elektronik sistemlere olan ihtiyaçlar artmıştır. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda elektronik atak sistemlerine karşı kullanılabilmesi amacıyla elektronik karşı karşı tedbir sistemleri geliştirilmiştir. Elektronik karşı karşı tedbir sistemlerinin uygulanabilmesi için gerekli istihbarat ve analizi de elektronik destek sistemleri sağlamaktadır. Bu sistemlerden birisi olan yön bulma sistemleri, hedefin yönünü bulmak ve gerekli uyarı mesajlarını sağlamak amacıyla kullanılan radar ikaz alıcı sistemlerinden birisidir [26]. Elektronik harp tekniklerinin yaygınlaşması ve savaş sırasında tehdit yönünün bilinmesinin getirdiği avantajların görülmesiyle birlikte yön bulma sistemleri, askeri operasyonlarda en çok kullanılan elektronik harp sistemlerinden birisi durumuna gelmiştir. Yön bulma tekniklerinin kullanımının artmasıyla birlikte, özellikle elektronik istihbarat ve destek ölçümleri operasyonlarında tehdit yönünü tespit etmek temel görev haline gelmiştir [27]. Elektronik istihbarat sistemleri ortamda bulunan tüm sinyallerin içinden, düşman sistemlere ait olan tehdit vericilerin sayısını ve türünü belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. İlk olarak bu amaçlar, klasik dönen antenler (rotational), dar bant tarayıcı alıcıları (scanning), gerçek zamanlı darbe işleme ve görüntüleme teknikleri kullanılarak düşük başarımlarında gerçekleştirilmiştir. Devam eden süreçte, insan müdahalesine de gereksinim duyan ve düşük başarımlarıyla çalışan yön bulma sistemleri, yüksek hızla gerçek zamanlı çalışan bilgisayar kontrollü sistemler ile yüksek başarımlarına ulaşmıştır. Bu sistemler, 360 derece yanca (azimuth) tarama ve geniş frekans bantlarında çalışma imkânı sağlamıştır [26]. Bu gelişmelere ek olarak RF yükselticilerde ve anten teknolojilerinde yaşanan gelişmelerle birlikte yüksek hassasiyette, yüksek doğrulukta yön tespiti gerçekleştirilmiştir. Modern savaşlarda, yön bulma tekniklerinin sıklıkla kullanıldığı operasyonlara erken uyarı ve tespit sistemleri, hedefe kilitlenme ve karıştırma ve elektronik istihbarat operasyonları örnek olarak verilebilmektedir [25], [27].

Erken uyarı ve tespit sistemlerinin kullandığı en temel tekniklerden biri yön bulma tekniğidir. Yön bulma sistemleri yüksek hızda işlem yapabilme yeteneği neticesinde tehditlerden alınan sinyallerin genlik, darbe genişliği, faz ve modülasyon tipi gibi parametrelerini analiz ederek; hedefi, yoğun ve karmaşık ortamlarda bulunsa bile tespit edebilmektedir [27]. Bu bilgiler ışığında, oluşabilecek bir saldırıdan ya da çevrede bulunan tehdit unsurlarından önceden haber alınarak gerekli birimler uyarılmakta ve destek sağlanmaktadır. Hedefe kilitleme ve karıştırma teknikleri genel anlamda silah sistemlerinin kullanımını içermektedir. Füze sistemlerinde genellikle, önceden belirlenmiş bir hedefin koordinatları tespit edildikten sonra füze aktarılmakta ve füze, imha için hedefe doğru yönlendirilmektedir. Füze havadayken önünde bulunan seeker (alıcı) hedeften aldığı bilgileri kontrol sistemlerine aktararak, füzenin gerekli manevra, hız ayarlamaları ve irtifa değişikliklerini, hedefe kilitleme amacıyla yapmasını sağlamaktadır [9], [28]. Bu nedenle füze atılmadan önce ve atıldıktan sonra hedefin yönü ile ilgili bilgilerin sürekli olarak füze gelip gidiyor olması gerekmektedir. Füze havada hedefe kilitlemiş bir şekilde hareket ederken, hedef sistemler füzeyi algılayabilmekte ve önlem alabilmektedir. Bu nedenle yakalanmamak için füze üzerinde bulunan radar gibi aktif sistemlerin kapatılması gerekmektedir. Pasif sistemler kullanarak sessiz bir şekilde hedefe doğru yönelmek ve hedefi kaybetmemek füzenin temel amacını oluşturmaktadır. Füze sistemlerinin, pasif yön bulma tekniklerini kullanırken, dalga boyunu düşürmek için daha yüksek frekanslı küçük boyutlu on board antenler kullanma zorunluluğu küçük boyutlu yüksek doğrulukta pasif yön bulma sistemlerinin gelişmesini hızlandırmıştır [27].

Elektronik istihbarat; pasif yön bulma tekniklerinin en çok kullanıldığı diğer bir elektronik harp sistemidir [23]. Pasif sistemlerin hiç enerji yaymaması istihbarat sistemleri için biçilmiş bir kaftandır. Pasif yön bulma sistemleri gibi çalışan sistemleri fark etmek neredeyse imkânsızdır. Savaş sırasında istihbarat amaçlı kullanılan yön bulma tekniği, savaş dışında da günlük hayat için farklı amaçlar doğrultusunda kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları, çevrede oluşan yeni sinyalleri izleyerek tehdit unsuru oluşturup oluşturmadığının tespit edilmesi, tehdit oluşturmayan hedeflerin izlenerek konum güncellemesi yapılması, hava trafik izleme noktaları oluşturma ve haritalama gibi görevler olarak sıralanabilmektedir [3]. Bir radar vericisi uzaya birçok yönden kendisini tanımlayan sinyaller göndermektedir.

Radyo frekansı, darbe genişliği, darbe tekrarlama aralığı gibi radar sinyal parametreleri, radarın türünü belirlemek için yeterli bilgiyi oluşturmaktadır. Elektronik istihbarat sistemlerinde bu özellikler kullanılarak tespit edilen radarları bir kütüphane oluşturarak saklamak mümkündür. Bu şekilde birçok farklı radar tipini sınıflandırarak, dost, düşman, tehdit oluşturabilir ya da tehdit oluşturamaz şeklinde ayırma işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Bir sinyal alındığı zaman bu kütüphane yardımıyla ne tür bir hedefle karşı karşıya olunduğu bilgisi elde edilebilmekte ve ona göre komuta kontrol stratejisi geliştirilebilmektedir [9], [23].

3.1 Pasif Yön Bulma Sistemleri

Geçen zamanla birlikte, elektronik harp sistemlerinde yüksek performanslı uçak ve gemi savar sistemlerinin kullanım oranlarının artmasıyla birlikte bu sistemlerin tehdit oluşturduğu anda ki tespiti, tanımlanması ve kontrol edilmesi gereksinimi de aynı oranda artmıştır [6], [26]. Yüksek hızlı uçaklar, gemiler ve yer sistemleri için erken uyarı ve koruma sistemlerinin gelişmesi, karmaşık bir elektronik savaş ortamında savunma tekniklerinin gelişmesine zemin hazırlamıştır. Bu gelişmelerle birlikte pasif yön bulma kullanımı, RİA donanımları için olmazsa olmaz bir sistem haline gelmiştir.

Pasif radar sistemleri, aktif çalışan bir sinyal kaynağının yaydığı sinyalleri alıp analiz eden, dışarı sinyal yayılımı yapmayan sistemler oldukları için aktif radarlardan farklı olarak aldığı sinyal ile ilgili hiçbir bilgiye sahip olmamaktadır [29]. Aktif radarlar ise aldığı sinyali gönderdiği sinyal ile karşılaştırarak gelen sinyal ile ilgili bilgi sahibi olabilmektedir. Sonuç olarak; pasif yön bulma sistemleri, sinyal göndermeden sadece ortamda bulunan yayınları dinleyerek tehdit oluşturabilecek hedeflerin tespit edilmesini sağlayan, bu hedeflerin doğrultusunu belirleyen ve bu hedefleri sınıflandıran elektronik sistemlerdir [3].

3.1.1 Pasif yön bulma sistemlerinin avantajları

Pasif yön bulma sistemleri, sinyal yayılımı yapmadığı için çok fazla güce ihtiyaç duymamaktadır. Aktif radar sistemlerinin uzaya bir sinyal gönderebilmesi için ise güç kullanması gerekmektedir [29]. Bu ihtiyaç bazı durumlarda büyük maliyetler ve bu maliyetlerin getirdiği kısıtları da ortaya çıkartmaktadır. Pasif sistemler çalışma yapısı gereği gizlidir. Hedef sistemler, bu sistemlerle ilgili hiçbir bilgiye sahip

olamamaktadır. Bu durum bazen ciddi avantajlar sağladığı için elektronik harp sistemlerinde pasif sistemler sıklıkla kullanılmaktadır. Pasif Yön Bulma (PYB) teknolojisi karmaşık, bilinmeyen ortamlarda, ortamdan alınan her türlü sinyal içinden analiz yapabilen ve hedefin yönünü yüksek başarımlı oranlarında tespit edebilen bağımsız bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır [27]. Pasif yön bulma sistemleri, alınan sinyali analiz ederek operatörü uyarma görevini üstlenmektedir. Aldığı sinyalin analizi sonucu, ilgili birimleri uyarabilmekte, radarın veya hedefin konumunu belirleyebilmekte ya da sistem direk olarak hedefe karşı, karşı tedbir uygulanmasını başlatabilmektedir. Özet olarak pasif yön bulma sistemleri; hedefin haberi olmadan hedefle ilgili bilgi ve istihbaratı pilota ya da operatöre aktarmak amacıyla kullanılmaktadır [10]. Bu iletilen bilgiler pasif yön bulma sistemleri için genellikle hedefin konum ve yön bilgisidir.

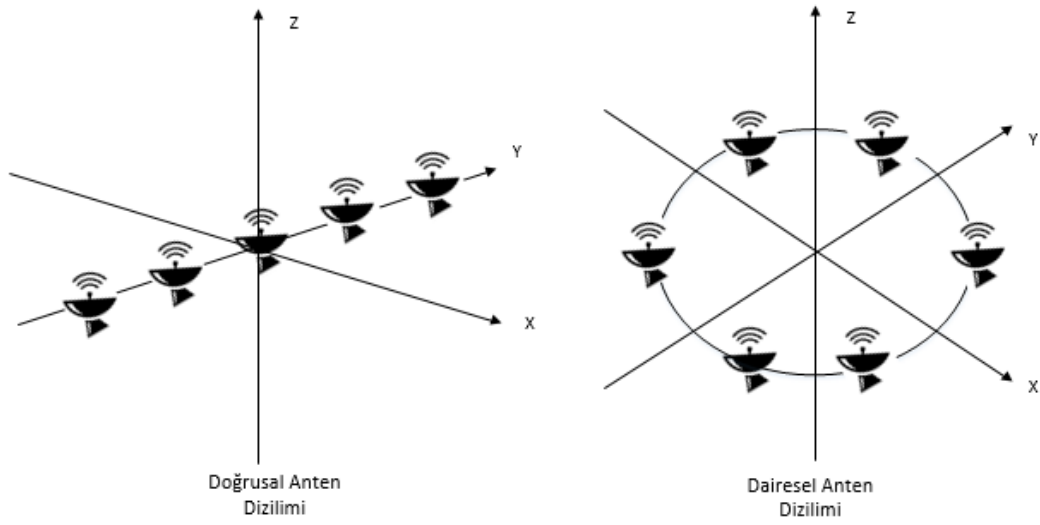
3.2 Yön Bulma Sistemlerinin Teknik Altyapısı

Yön bulma sistemleri RF enerjinin geliş yönünü belirleyen pasif sistemlerdir [26]. Sinyal yayıcılar genellikle her darbeyi değiştirmeden gönderdiği için, bu sinyallerin geliş yönü gelen darbelerin karakteristik özellikleri karşılaştırılarak belirlenebilmektedir [27]. Yön bulma sistemlerinin genel amacı, sinyal yayıcının pozisyonunu belirlemektir. Bir sinyal yayıcının yönünün belirlenmesini etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörler; kullanılan anten tipi ve anten geometrisi, alıcı sensörlerin yapısı ve alınan sinyallerin analizi için kullanılan sinyal işleme algoritmaları olarak sıralanabilmektedir [26].

Yön bulma sistemlerinin temelini antenler oluşturmaktadır. Anten örüntüsü ve anten polarizasyonu yön bulma sistemlerinin doğruluğunu, çözünürlüğünü etkileyen önemli parametrelerdir. Yön bulma sistemlerinde çözünürlüğü, doğruluğu, hassasiyeti ve hangi sinyal işleme algoritmasının kullanılacağını belirleyen en önemli etkenlerden birisi de anten yerleşim geometrisidir [30]. Bu özelliklerin iyileştirilmesi için yön bulma sistemlerinde özdeş antenlerden oluşan farklı anten yerleşim geometrileri kullanılmaktadır [26].

Yön bulma sistemlerinde anten dizilimleri çoğunlukla doğrusal ve dairesel olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilmektedir [26], [31]. Doğrusal ya da dairesel olarak yerleştirilen antenlerin birbirine olan uzaklığı, yön bulma sistemlerinin performansını

etkileyen önemli bir parametredir. Antenler arası mesafeler seçilen yerleşim geometrilerinde sabit ya da değişken olabilmektedir. Antenler arası mesafeleri sabit olan dizilimlerde kullanılan her bir anten arası uzaklık, merkez frekansın dalga boyunun yarısından büyük seçilememektedir [6], [26]. Bu sınırlandırma ileriki bölümlerde bahsedilen anten yerleşim kısıtlarından doğan belirsizlik hatalarına sebep olmaktadır. Diğer yandan antenler arası mesafeleri değişken olarak seçmenin avantajı, ışınım karakteristiği açısından sabit aralıklı anten dizilimlerine göre daha dayanıklı olmasıdır [12], [26]. Şekil 3.1’de doğrusal ve dairesel anten dizilimleri gösterilmektedir.



Şekil 3. 1 : Anten dizilim tipleri.

Elektronik destek sistemleri genel anlamda çevrede olup biteni kendisini fark ettirmeden ilgili birimlere ya da dost kuvvetlere bildirmekle görevlidir. Bu nedenle bağlı olduğu sistemin çevresini tamamen tarayabilmeli ve izleyebilmelidir. Dairesel dizilimli anten konfigürasyonları 360 derece tarayabilme özelliğine sahip olduğu için doğrusal dizilimli anten konfigürasyonlarına göre daha avantajlıdır [26].

Yön bulma sistemlerinde özelliklerine göre birçok farklı yön bulma tekniği kullanılmaktadır. Monopulse (tek darbe) ve yüksek çözünürlük teknikleri en çok kullanılan yön bulma teknikleridir [6]. Bu tezde tekdarbe yön bulma sistemi ele alınmıştır. Tekdarbe yön bulma sistemleri gerçek zamanlı çalışabilen, hızlı tepki verebilen, pratik ve daha basit sistemler olduğu için yaygın olarak kullanılmaktadır [32]. Buna karşın yüksek çözünürlük metodu tekdarbe yön bulma sistemlerine göre daha karmaşık bir yapıya sahip olduğu ve işlem yükü daha fazla olduğu için, maliyeti

daha yüksektir [26], [30]. İşlem yükü, pratik sistemler için sorun oluşturabileceğinden dolayı yüksek işlem maliyeti gerektiren sistemler genellikle çok fazla tercih edilmemektedir.

3.3 Tekdarbe Yön Bulma Sistemleri

Tekdarbe yön bulma sistemleri hem hızlı, hem gerçek zamanlı hem de daha fazla veri işleme kapasitesine sahip sistemlerdir [32]. Tekdarbe sistemler genellikle hedef açısı ölçümlerinde kullanılmaktadır. Bu sistemler, iki veya daha fazla eşzamanlı olarak alınan sinyalin karşılaştırılması ile açı bilgisi oluşturma ilkesine dayanmaktadır [33]. Bu sistemin diğer açı ölçüm metotlarına göre en büyük avantajı, hedef yankıların genlik dalgalanmalarından etkilenmemesidir. Çünkü yankının genliğinin değiştiği durumlarda, tüm alıcı kanalları aynı şekilde değişmektedir. Tekdarbe yön bulma sistemlerinde hedef açı kestirimi yapabilmeyi sağlayan üç temel yöntem vardır. Bunlar Genlik Karşılaştırma (GK), Faz Karşılaştırma (FK) ve Genlik-Faz Karşılaştırma metotlarıdır [3], [34]. Tekdarbe uygulamalarında herhangi bir sinyal işleme algoritması uygulanmadan önce alınan sinyalin yapısı belirlenmektedir [35]. Bu nedenle tekdarbe sistemlerinin seçimi radar anten sistemlerinin yapısını etkilemektedir [35]. Genlik açı ayırıcılar sadece genlik ile ilgili ayırım yapabilirler. Faz açı bilgisiyyle ilgili açı ayırımı yapan ayırıcılar faz açı ayırıcılarıdır. Eğer bu ayırıcı sistemler hem genlik hem de faz açı bilgilerini ayıran tipteysse toplam ve fark açı ayırıcıları olarak adlandırılmaktadır. Bu ayırıcıların tipi, alınan sinyallerden açı bilgisini çıkartmak için gerekli işlemin yapısını belirlemektedir [32], [35].

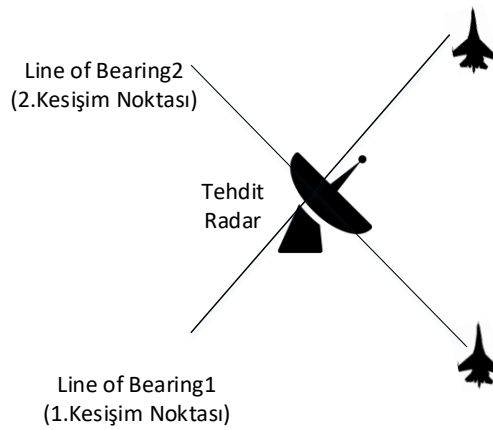
3.4 Yön Bulma Teknikleri

Yön bulma; radar, sonar, astronomi gibi birçok alanda kullanılan ve literatürde sıkça rastlanan bir konudur [6]. Radar ve elektronik harp teknolojilerinde sıkça kullanılmasının önemli bir nedeni yüksek hızlı sinyal işlemciler kullanılarak gerçek zamanlı analizler yapılabilmesidir [36]. Günümüz sistemlerinde VLSI (Very Large Scale Integration) teknolojileri kullanılarak yön bulma tekniklerinin işlem ağırlığı azaltılabilmekte ve gerçek zamanlı uygulamalar gerçekleştirilebilmektedir [37]. Tehdit konum belirleme sistemlerinin genel amacı hedefin koordinatları ve

pozisyonu hakkında bilgi sahibi olmaktır [27]. Hedefin ya da tehditin konum bilgisi diğer dost kuvvetleri uyarmak amacıyla onlarla paylaşılmaktadır. Eğer hedeften ve hedefin koordinatlarından emin olunursa hedefe kilitlenip, etkisiz hale getirilmesi için atak aşamasına geçilmektedir. Temel olarak bir yön bulma sistemi, gelen sinyali olarak karakteristik özelliklerini belirlemekte ve hedefin tipini, kabiliyetini, lokasyonunu ve doğrultusunu hesaplamak amacıyla tasarlanıp kullanılmaktadır [12]. Bu amaçlar doğrultusunda tasarlanan yön bulma sistemlerinde dört temel yön bulma yöntemi göze çarpmaktadır. Bunlar üçgenleme, zaman farkı, genlik karşılaştırma ve faz karşılaştırma yöntemleridir [10]. Bu yöntemlerin ortak özelliği, her yöntem uygulanırken en az iki anten kullanılması gerekliliğidir [9]. Bu yöntemler kullanılırken çözünürlüğü ve doğruluğu etkileyen en önemli faktör antenler arasındaki uzaklık ve anten yerleşim konfigürasyonlarıdır [26].

3.4.1 Üçgenleme yöntemi

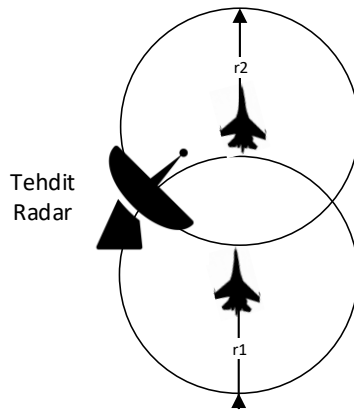
Üçgen kullanım metodu yön bulma sistemlerinin en temel metotlarından bir tanesidir [6]. Birden fazla kaynak kullanılarak yapılan ölçüm metodu olarak açıklanmaktadır. Azimut ölçümlerinin kesiştiği nokta (lines of bearing) sinyal yayıcının, yani hedefin konumunu vermektedir. Bu yöntemin etkili bir şekilde sonuç verebilmesi için, destek uçakların kesişme noktasında mevcut pozisyonlarla ilgili doğru bilgiye sahip olması gerekmektedir [10].



Şekil 3. 2 : Üçgenleme tekniği.

3.4.2 Zaman farkı yöntemi

Zaman farkı yönteminde en az iki anten kullanılmaktadır. Bu antenlere gelen sinyallerin geliş zamanlarının farkı üzerinden geliş yönü hesaplanabilmektedir. Zaman farkı yöntemi ile, geliş yönünden farklı olarak, sinyallerin geliş zamanlarının farkı kullanılarak hedefin uzaklığı da bulunabilmektedir [9], [25]. Bu yöntemle geliş yönü bulmanın doğruluk oranı, kullanılan antenlerin arasındaki uzaklığa bağlı olmaktadır. Geliş zamanı ya da geliş zaman farkı olarak bilinen bu yöntemde, radar sinyallerinin ortalama olarak ışık hızında hareket ettikleri düşünüldüğünde, uzak mesafedeki vericiye göre konum denklemi, hız ile zamanın çarpımına eşitlenir. Bunun sebebi, tek bir antende yön ile alakalı hiçbir bilginin olmayışıdır. Bu konum denkleminin, alıcı antenin çevresini saran bir dairenin yarıçapının değerini verdiği kabulü yapılmaktadır. Hedefin konumu ise bu iki dairenin kesiştiği nokta olarak belirlenmektedir.

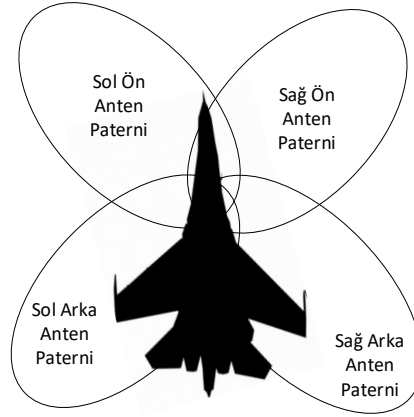


Şekil 3. 3 : Zaman farkı tekniği.

3.4.3 Genlik karşılaştırma yöntemi

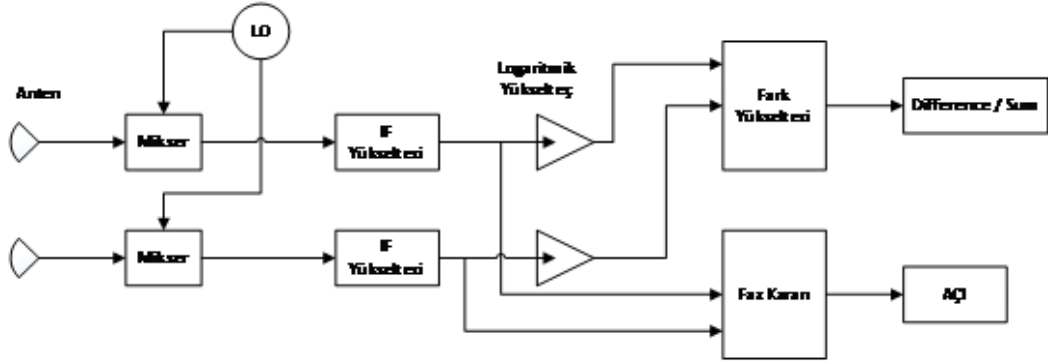
Günümüz teknolojilerinde kullanılan çoğu radar ikaz alıcı sistemleri yön bulma operasyonları doğrultusunda genlik karşılaştırma tekniğini kullanmaktadır [26]. Temel olarak genlik karşılaştırma tekniği, 360 derece kapsama sağlayan eşit aralıklarla yerleştirilmiş özdeş antenler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Genlik karşılaştırma tekniği, farklı alıcı kanallarından aldığı genlik değerlerini birbirlerine oranlayarak bir geliş açısı hesaplamayı amaçlamaktadır [10]. Bu sistemlerde genel olarak dört ya da altı anten ve alıcı kanalları kullanılmaktadır. Bu antenler farklı şekillerde yerleştirilerek, gelen sinyaller üzerinden genlik analizi yapılabilmektedir.

Şekil 3.4’de uçak platformuna yerleştirilen antenlerin oluşturduğu anten örüntülerinin üstten görünüşü gösterilmiştir.



Şekil 3. 4 : Anten örüntülerinin üstten görünüşü.

Her bir anten; karıştırıcı (mikser), osilatör, detektör ve logaritmik video yükseltici içeren alıcı kanallarından oluşmaktadır. Bu alıcı kanallarında RF sinyaller algılanmakta ve yükseltilmektedir [3]. Genlik karşılaştırma tekniklerinde genellikle, dairesel polarize edilmiş, geniş bant anten yapıları kullanılmaktadır. Şekil 3.5’de genlik karşılaştırma tekniğinin mimari yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3. 5 : Genlik karşılaştırma sistem yapısı.

Yön bulma sistemlerinde kullanılan genlik karşılaştırma tekniğinin doğruluğunu arttırmak için, daha dar hüzmeye genişliğine sahip antenler kullanılmalıdır. Genlik karşılaştırma yöntemi ile geliş açısı hesaplanırken genellikle iki tane farklı yöne bakan doğrusal anten kullanılmaktadır [32]. Bu antenler genellikle özdeş ve aynı örüntülere, kazançlara sahip olmalıdır. Bu şartlarda farklı yönlere bakan iki antenin aldığı sinyallerin genlik analizi ile genlik karşılaştırma yöntemi kullanılarak geliş

yönü bulunabilmektedir [26]. Genlik karşılaştırma yönteminde dört veya daha fazla anten kullanılarak alınan sinyallerin anten ışınma örüntüsünden etkilenen genliklerinin birbirine göre oranlanması sonucu yön tespiti yapılabilmektedir [15]. Genlik karşılaştırma metodunda hata azaltma algoritmaları, ya da farklı hata düzeltme teknikleri kullanılmadığı durumlarda SNR'a bağlı olarak ortalama 30, 40 derece hata oluşabilmektedir [39]. Sinyalin tek bir kaynaktan geldiği düşünülürse yön bulma operasyonları için MLE (Maximum Likelihood Estimation, En Büyük Olabilirlik Kestirimi) yöntemi ile geliş açısı kestirimi yapılabilmektedir [38]. Yön bulma performansının doğruluğu kullanılan anten sayısına bağlıdır. Ancak anten sayısının artması hem maliyeti hem de antenlerin yerleştirileceği alanı daraltmaktadır. Uçak gövdesi düşünüldüğü zaman fazla anten koymak pek mümkün olmamaktadır. MLE tekniği ile gerçekleştirilen 6 sektörlü toplam 18 antenli genlik karşılaştırma metodu sonucunda 15 dB SNR altında ortalama 5 derece MSE hata oluştuğu gözlemlenmiştir [38].

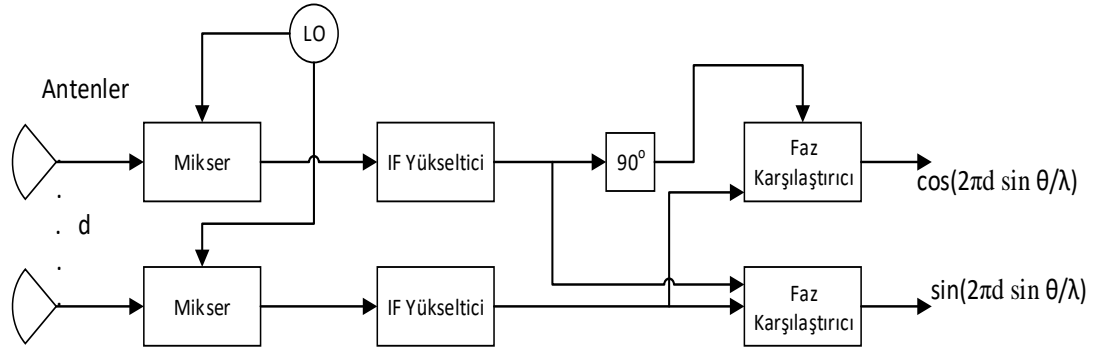
3.4.4 Faz karşılaştırma yöntemi

Pasif yön bulma sistemleri interferometre yöntemi ile iki ya da daha fazla antenin aldığı sinyallerin frekans ve faz gibi karakteristik özelliklerini karşılaştırarak aldığı sinyallerin yön bilgilerini elde etmeyi amaçlamaktadır [27]. Pasif yön bulma sistemleri sinyal kaynağı hakkında bilgi sağlamak amacıyla farklı antenlere gelen sinyaller üzerinde interferometre teknikleri uygulamaktadır. Teorik olarak aralarında çeyrek dalga boyu ile yarım dalga boyu arasında mesafe olan iki anten, bir sinyal kaynağından gelen sinyalin yönünü bulabilmektedir [6]. Antenlerle aynı düzlemdeki bir hedeften gelen sinyalin geliş yansıma açısı θ , antenler arasındaki uzaklık d ve radar sinyalinin dalga boyu λ ise iki ayrı antenden alınan sinyallerin faz farkı Denklem (3.1)'de gösterildiği gibidir.

$$\Delta\phi = 2\pi d \frac{\sin\theta}{\lambda} \quad (3.1)$$

İnterferometre yönteminin çözünürlüğü, antenlerin arasındaki mesafeye bağlıdır. Kullanılan yön bulma antenlerinin sayısı arttıkça, interferometre çözünürlüğü de arttığı için daha hassas ve yüksek doğrulukta yön tespiti yapılabilmektedir [26]. İki anten için yalnızca bir yön analiz edilebilmektedir, N antenli bir yön bulma sisteminde $N - 1$ adet sinyal yönü kestirilebilmektedir [42]. Ancak yön bulma

antenlerinin genel olarak uçak, gemi gibi araçlara yerleştirileceği düşünüldüğü zaman bazı kısıtlar ortaya çıkmaktadır. Bu kısıtlar, antenlerin yerleşim konfigürasyonları ile doğrudan ilişkilidir. Şekil 3.6'da aralarındaki mesafenin d olduğu, sinyalin dalga boyunun λ olduğu ve sinyalin ϑ açısından geldiği varsayımları kullanılarak oluşturulan iki antenli faz karşılaştırma metodunun mimari yapısı gösterilmiştir [3].



Şekil 3. 6 : Faz karşılaştırma sistem yapısı.

Faz karşılaştırmanın genlik karşılaştırma ve zaman farkı gibi tekniklere göre avantajı, daha hassas sonuçlar vermesi ve daha güvenilir olmasıdır. Ancak genlik karşılaştırmaya göre donanımsal karmaşıklık daha fazladır. Yerleşim yapısı da belirsizliği önlemek için gelen sinyalin frekansına bağlıdır. Örneğin 25 MHz frekansındaki sinyaller için kare formunda dizilmiş anten yerleşim yapısında antenler arası mesafelerin 3 m olması gerekmektedir [42]. 12 GHz frekansa sahip bir sinyalin, interferometre yöntemi kullanılarak 1.25 cm den daha az aralıklarla yerleştirilen antenler ile zaman farkı yönteminden daha yüksek doğrulukta geliş yönü hesaplanabilmektedir [10]. Faz karşılaştırma yönteminde doğruluk antenler arası mesafelerle ilişkilidir. Antenler arası mesafelerin artması frekansa bağlı olarak faz karşılaştırma yönteminde oluşan belirsizliklerin sayısının artmasına neden olmaktadır [6]. Bu belirsizlikler faz karşılaştırma yönteminin birden çok geliş açısı hesaplaması sonucu oluşmaktadır. Bu belirsizliklerin engellenmesi için antenlerin arasındaki mesafenin gelen sinyalin dalga boyunun yarısından küçük olması gerekmektedir [26]. Uçaklar için genel kullanımda, farklı noktalardaki antenler tarafından interferometre yapılması istenmektedir. Bunun sebebi, çoklu geliş açısı ölçümlerinde hedefin mesafesinin ve pozisyonunun bulunabilmesidir. Sonuç olarak uygun

kullanım şartları sağlandığı takdirde faz karşılaştırma ile gerçekleştirilen yön bulma sistemlerinin avantajı daha hassas ve güvenilir sonuçlar vermesidir [38].

3.4.5 Hüzme Oluşturma Metodu

Son yıllarda yön bulma sistemleri genel olarak 360 derece kapsama sağlayabilen düzgün dairesel dizi yapılarına sahip anten yerleşimleri yerine düzgün doğrusal dizi ve düzgün karesel dizi yapılarına sahip anten yerleşimleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir [6]. Düzgün karesel dizi her yönden yayın alamayan yapısı nedeniyle tam bir kapsama sağlayamamaktadır. Düzgün doğrusal dizilerin yönlenmiş deseni yatay eksen boyunca döndürülmektedir. Düzgün karesel dizilerle karşılaştırıldığında düzgün doğrusal diziler, kenarda kalan bir eleman olmadığından ve karşılıklı kavrama etkilerine karşı daha az hassas olduğundan düzgün doğrusal dizilerin elemanları birbirinin eşleniği bir ışın deseni göstermektedir [43].

Sinyalin geliş açısı kestirimi yapılırken klasik hüzme oluşturma tekniklerinin zayıf çözünürlüğü nedeniyle yüksek çözünürlüklü algoritmalara ihtiyaç duyulmuştur. Yüksek çözünürlüklü bu algoritmalar MUSIC (Multiple Signal Classification), Min-Norm, ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques), SAGE (Space – Alternating Generalized Maximisation – Expectation) olarak sıralanabilmektedir [6]. MUSIC metodu, asimptotik olarak etkili kestirimler verdiği için popüler bir teknik olmuştur. MUSIC algoritması dizi ölçümlerinden sinyal alt uzayını kestirmekte, ardından çeşitli diziler ve kestirilen sinyal alt uzayı arasındaki kesişmelerden parametrelere ulaşmaktadır [40]. MUSIC metoduna çok benzeyen ancak bazı avantajlara sahip olan diğer yüksek çözünürlüklü yön bulma metodu ESPRIT'dir. Bu metod temelinde var olan veri modelinden istifade ederek yüksek çözünürlüklü kestirimler oluşturabilmektedir. Bu algoritmalarda, düzgün doğrusal diziye gelen sinyallerin kestirimi yapılırken antenler arasındaki mesafe dalga boyunun yarısından büyük olursa belirsizlikler oluşabilmektedir. Bu belirsizlikler faz karşılaştırma metodunda da sıklıkla görülen problemlerdir. Antenler arası mesafelerin yeterince açılmaması ve yüksek frekanslar, sinyalin geliş açısı kestiriminde birden çok kestirim oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle faz karşılaştırma metodunda, bu tezde de bahsedildiği üzere iki faz anteni yerine üç faz anteni kullanılması ve genlik karşılaştırma sonucunun faz karşılaştırma işleminde

kullanılması gibi çözümler ile belirsizliklerin giderilmesi amaçlanmaktadır [25], [32], [38].

4. YÖN BULMA (YB) TEKNİKLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Yön bulma sistemlerinde hedefin yönünü bulabilmek amacıyla kullanılan sinyal işleme algoritmaları çok büyük önem taşımaktadır. Bu algoritmaların seçimi, uygulama sırasında çözünürlük, tepki süresi ve doğruluk oranları gibi, sistemin performansını etkileyen karakteristik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu etkiler neticesinde, sistemlerin çalıştıracağı algoritmalar istenen sonuçlara göre değişiklik gösterebilmektedir. Örneğin; bir hedefin varlığı araştırılıyorsa sistemin tepki süresi, çözünürlük bilgisine göre daha büyük önem arz etmektedir. Bu amaç için kullanılacak algoritma, hızlı cevap verebilen ve hızlı sinyal işleme kapasitesine sahip işlemciler için uygun olarak seçilmelidir. Eğer hedefin yönü ya da hedefin hızı gibi bilgiler araştırılıyorsa, seçilecek sinyal işleme algoritması yüksek çözünürlük elde etme amacına uygun olarak seçilmelidir.

Yön bulma sistemlerinde birçok farklı algoritma kullanılmaktadır. Amaçlarına göre genlik karşılaştırma tekniklerinde en büyük olabilirlik kestirimi, kuzey-doğu oranı ve en güçlü iki ya da en güçlü üç genlik seçimi algoritmaları sıkça kullanılan algoritmalarlardır. Faz karşılaştırma tekniğinde ise oluşan belirsizliklerin giderilmesi için genlik karşılaştırma sonucu elde edilen açı kestirimi kullanılarak bir arama aralığı belirlenmektedir. Bu arama aralığı belirsizliklere neden olan birden fazla yapılan açı kestirimlerinin sayısını azaltmaktadır. Bunun sonucunda genlik ve faz karşılaştırma teknikleri birlikte kullanılarak düşük hata oranları ile açı kestirimi yapılabilmektedir.

4.1 Anten Örüntüsü

Yön bulma sistemlerinde kullanılan antenler ve bu antenlerin özellikleri yön bulma sistemlerinin başarısı açısından çok büyük önem taşımaktadır. Pratik sistemlerde anten kazançları çalışma frekansına göre değişiklik göstermektedir. Ancak bu çalışmada anten örüntüleri Denklem (4.1)'de gösterildiği gibi düzgün Gaussian

olarak modellenmiştir. Anten örüntüsü oluşturulurken dikkat edilmesi gereken nokta, 3 dB ve 10 dB hüzme genişliklerindeki kazançlardır. Şekil 4.1a’da oluşturulan anten örüntüsünde, yarım dalga (3dB) hüzme genişliği 60 derece, 10 dB hüzme genişliği 120 derece ve minimum kazanç 40 dB olarak ayarlanmıştır.

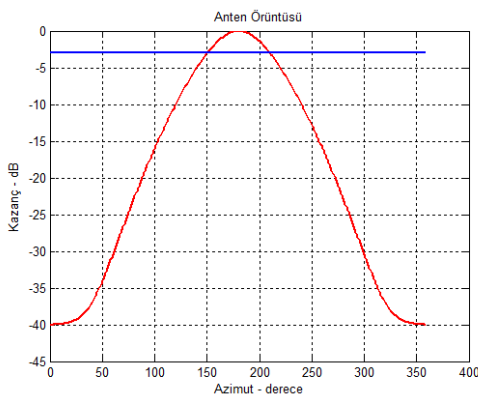
$$y = a + \frac{b}{1+e \left[\frac{(x-c)}{d} \right]^2} e^{-\frac{(1-e)}{2} \left[\frac{(x-c)}{d} \right]^2} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)’de verilen formülde yer alan sabit katsayılar Çizelge 4.1’ de sıralanmıştır.

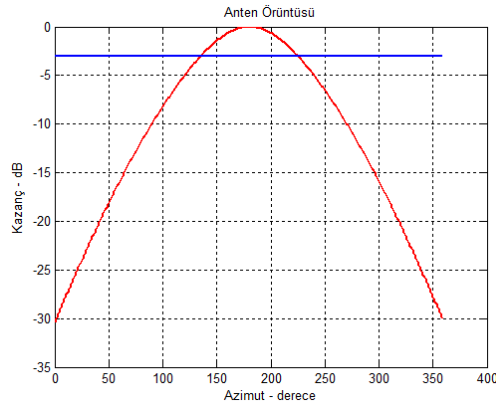
Çizelge 4. 1 : Anten örüntüsü katsayıları.

a	9.9×10^{-5}
b	0.9999
c	180
d	28.7382
e	0.4218

Denklem (4.1)’de verilen formülasyon kullanıldığı takdirde Şekil 4.1’de gösterildiği gibi bir anten örüntüsü ortaya çıkmaktadır. Anten diziliminde özdeş antenler kullanıldığı varsayıldığından; bu örüntü, kullanılan her bir anten için aynı özelliği göstermektedir.



(a)



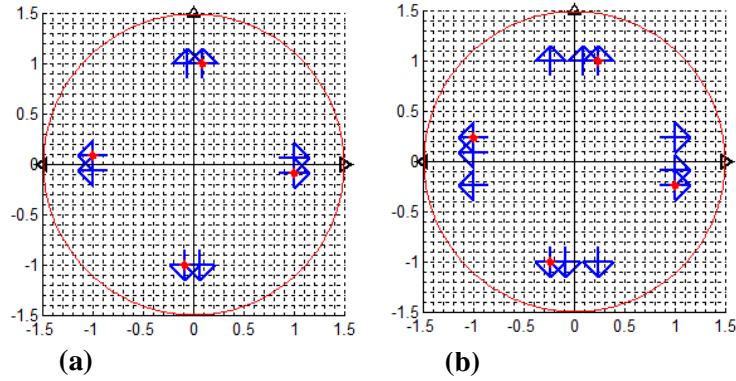
(b)

Şekil 4. 1 : 3dB hüzme genişliği (a) 60 derece, (b) 90 derece olan anten örüntüsü.

Şekil 4.1a’da verilen anten örüntüsünde 10 dB hüzme genişliğinin 120 derece ve 3 dB hüzme genişliğinin ise 60 derece olduğu görülmektedir. Hüzme genişliği değiştiği zaman anten örüntüsü ve anten kazançları da değişmektedir. Örneğin 360 derece yanca (azimut) kapsama sağlayan 4 sektörlü bir yön bulma yapısında, 3dB hüzme genişliği 90 derecedir. Böyle bir yapıda kullanılan anten örüntüsü Şekil 4.1b’de gösterilmiştir.

4.2 Standart Anten Yerleşim Senaryoları

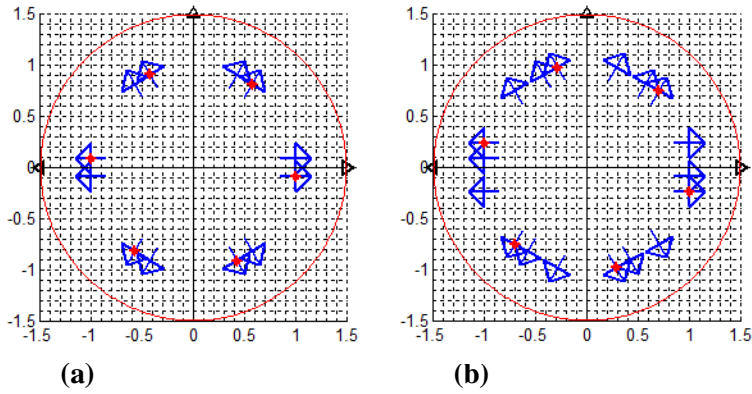
Bu çalışmada uygulanan genlik karşılaştırma metodu, farklı sektörlerle oluşturulan anten dizilim senaryolarının performansını analiz etmektedir. Bu analiz sonucunda farklı anten yerleşimlerinin yön bulma doğruluğunu nasıl etkilediği gözlemlenmiştir. Bu tez çalışmasında genlik karşılaştırma metoduyla gerçekleştirilen yön bulma işleminde, 4 sektör 8 anten, 4 sektör 12 anten, 6 sektör 12 anten, 6 sektör 18 anten, 8 sektör 16 anten ve 8 sektör 24 anten şeklinde dizilen yön bulma yapıları kullanılmıştır. Şekil 4.2 – 4 arasında verilen şekiller bu anten yerleşim senaryolarını göstermektedir. 4 sektörlü anten yerleşim yapıları Şekil 4.2, 6 sektörlü anten yerleşim yapıları Şekil 4.3, 8 sektörlü anten yerleşim yapıları Şekil 4.4 ve bu antenlerin bakış açıları sırasıyla Çizelge 4.2, 4.3 ve 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 2: 4 sektörlü (a) 8 antenli, (b) 12 antenli yerleşim yapısı.

Çizelge 4. 2 : 4 sektörlü yapıda anten bakış açıları.

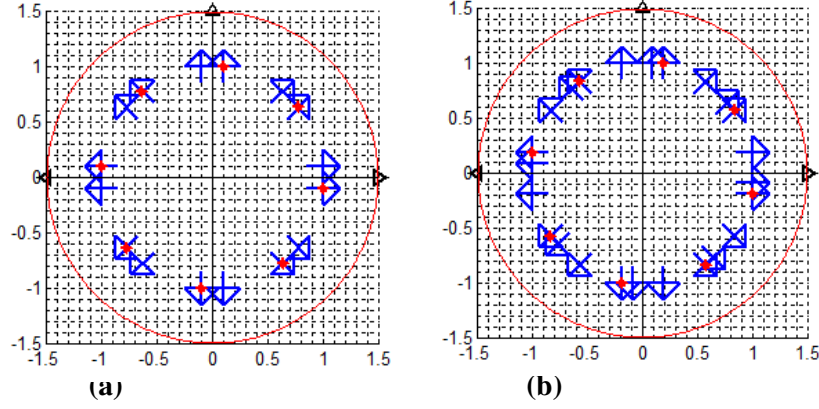
<i>Sektör Numarası</i> (4 sektörlü yapı)	<i>Baktığı Yön</i> (derece)
1	0
2	90
3	180
4	270



Şekil 4. 3: 6 sektörlü (a) 12 antenli, (b) 18 antenli yerleşim yapısı.

Çizelge 4. 3 : 6 sektörlü yapıda anten bakış açıları.

<i>Sektör Numarası</i> (6 sektörlü yapı)	<i>Baktığı Yön</i> (derece)
1	0
2	60
3	120
4	180
5	-120
6	-60

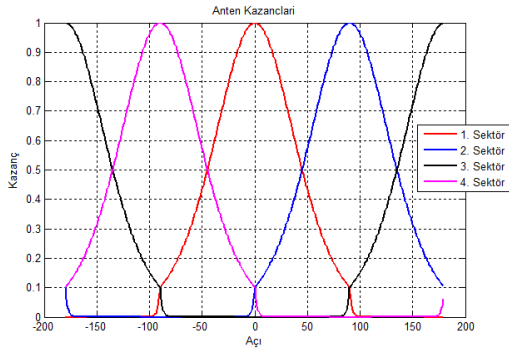


Şekil 4. 4: 8 sektörlü (a) 16 antenli, (b) 24 antenli yerleşim yapısı.

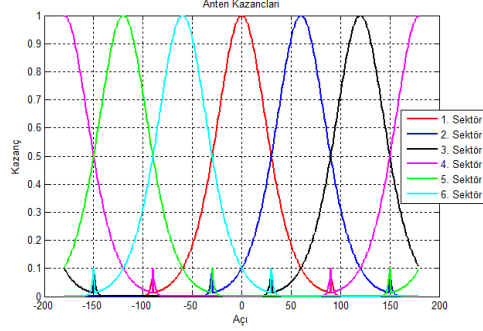
Çizelge 4. 4 : 8 sektörlü yapıda anten bakış açıları.

<i>Sektör Numarası (8 sektörlü yapı)</i>	<i>Baktığı Yön (derece)</i>
1	0
2	45
3	90
4	135
5	180
6	-135
7	-90
8	-45

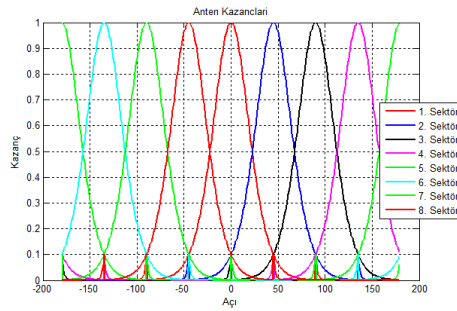
Yukarıda verilen yön bulma yapılarında her bir sektördeki komşu antenler 5 cm, uzak olan üçüncü anten ise 17.5 cm aralıklarla yerleştirilmiştir. Ayrıca her bir sektörün orijine uzaklığı 1 m olacak şekilde ayarlanmıştır. Yön bulma sistemlerinde, farklı anten yerleşim senaryoları için gelen sinyaller alınırken anten örüntülerine bağlı olarak farklı anten kazançları ile alınmaktadır. Hem sinyalin geldiği yön hem de antenlerin baktığı yöne bağlı olarak oluşan farklı anten kazançları 4,6 ve 8 sektörlü anten yapıları için Şekil 4.5’ de gösterilmiştir.



(a)



(b)

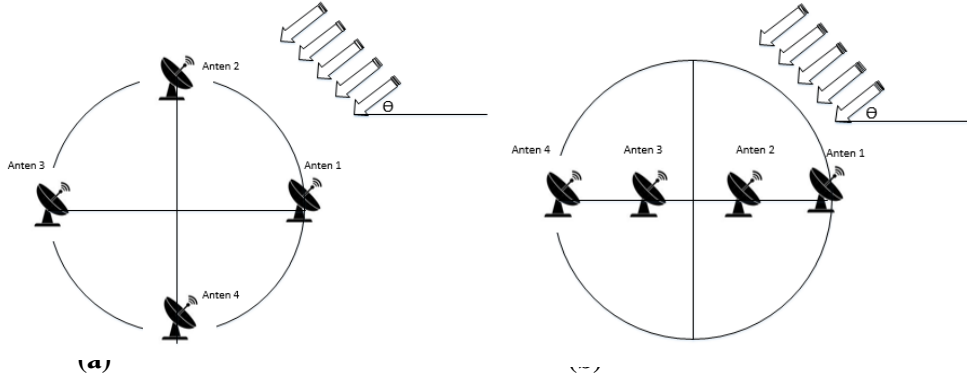


(c)

Şekil 4. 5: Anten kazançları (a) 4 sektörlü, (b) 6 sektörlü, (c) 8 sektörlü yerleşim yapıları.

4.3 Genlik Karşılaştırma

Aşağıda verilen Şekil 4.6'da dairesel ve doğrusal olarak yerleştirilmiş antenlerle oluşturulan yön bulma yapıları gösterilmiştir. Bu antenlerin özdeş ve eşit aralıklarla yerleştirildiği varsayımı yapılarak genlik karşılaştırma algoritması ile yön bulma işlemi gerçekleştirilmiştir.

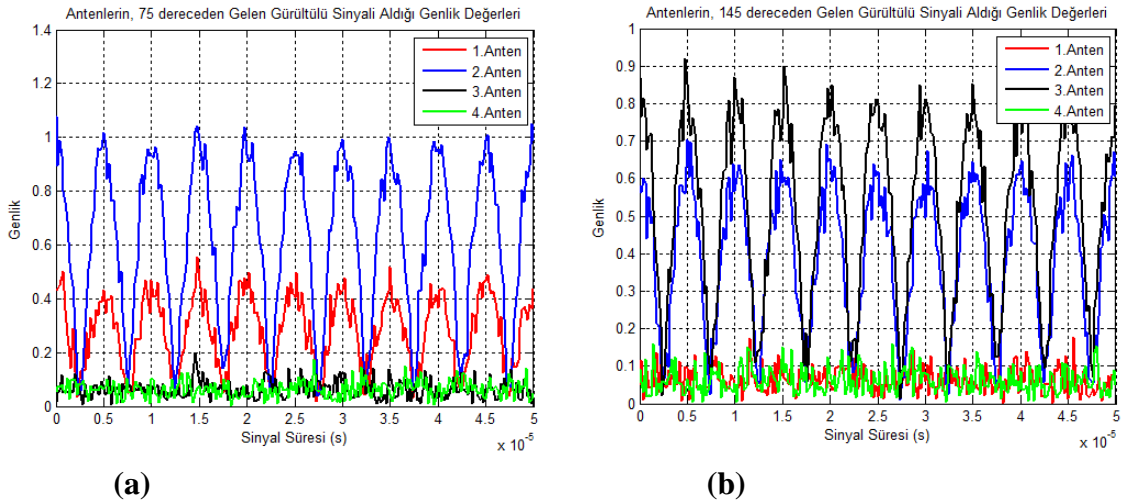


Şekil 4. 6: 4 antenli yön bulma sistemleri (a) dairesel, (b) doğrusal.

Şekil 4.6a'da gösterilen dairesel yerleşim yapısına sahip yön bulma sisteminde, antenlerin aldığı sinyal Denklem (4.2)'de belirtilmiştir.

$$s_i = AR_i(\theta - \theta_i) + n_i \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)'deki A gelen sinyalin genliğini, θ gelen sinyalin geliş açısını, R_i i . Antenin örüntüsünü, θ_i i . Antenin açılal pozisyonunu, n_i alıcıdaki gürültüyü göstermektedir. Farklı yönlerden gelen sinyallerin antenler tarafından, 20 dB SNR değerinde eklenen gürültü ve antenlerin baktığı yönler ile belirlenen anten kazançlarına bağlı olarak aldığı sinyallerin genlik ölçümleri Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Antenlerin Şekil 4.2b'de verildiği gibi yerleştirildiği düşünülürse, en yüksek genlik, sinyalin geliş açısına en yakın bakış açısına sahip olan anten tarafından ölçülmektedir.



Şekil 4. 7: (a) 75 dereceden, (b) 145 dereceden gelen tehdit sinyalinin antenlerde oluşturduğu genlik farkları.

Şekil 4.7' de verilen şekillerde 4 sektörlü yerleşim yapısı için Çizelge 4.2'de gösterilen anten bakış açıları ve tehdit sinyalin geliş yönüne bağlı olarak değişen genlik farkları gösterilmiştir. Eğer sinyal Şekil 4.7a'da gösterildiği gibi 1.bölgeden geliyorsa en yüksek genliği 1. ve 2. Antenler alırken, 3. ve 4. Antenler çok düşük oranlarda genlik değeri almaktadır.

4.3.1 En büyük olabilirlik kestirimi (Maksimum Likelihood Estimation, MLE)

Bu bölümde genlik karşılaştırma yöntemlerinden birisi olan en büyük olabilirlik kestirimi kullanılarak, Denklem (4.2)'deki gelen sinyal s_i üzerinden θ 'nın kestirimi yapılmıştır. Bu noktada gelen sinyalin gürültüsü, ortalaması sıfır varyansı σ^2 olan beyaz Gauss olarak modellenmiştir. Ortalaması sıfır, varyansı σ^2 olan Gaussian rastgele değişkeninin yoğunluk fonksiyonu Denklem (4.3)'de gösterildiği gibidir.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} \quad (4.3)$$

Rastgele değişkenler kendi aralarında bağımsız olduğu için her Gaussian rastgele değişkeni için yoğunluk, birleşik yoğunluk fonksiyonu olarak hesaplanabilmektedir. Birleşik yoğunluk fonksiyonları Denklem (4.4)'de belirtilmiştir.

$$f(A, \theta) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\frac{-(s_i - AR_i(\theta - \theta_i))^2}{2\sigma^2}} \quad (4.4)$$

Sinyalin geliş açısı θ nın bulunabilmesi amacıyla uygulanan, Denklem (4.4)'de verilen birleşik yoğunluk fonksiyonunu en büyük yapan, en büyük olabilirlik kestirimi Denklem (4.5)'de verilmiştir.

$$\theta = \underset{\theta}{\operatorname{argmax}} (f(A, \theta)) \quad (4.5)$$

En büyük olabilirlik fonksiyonu monoton bir fonksiyon olduğu için, en büyük olabilirlik fonksiyonunun maksimumu, negatif logaritmasının minimumuna eşittir. Sabit terimler ortadan kaldırıldığı zaman Denklem (4.4) ve Denklem (4.5), Denklem (4.6)' da gösterildiği gibi tekrar yazılabilmektedir.

$$J(A, \theta) = \sum_{i=0}^{N-1} (s_i - AR_i(\theta - \theta_i))^2 \quad (4.6)$$

J Fonksiyonunun minimize edilmesiyle sinyalin geliş açısı (θ) kestirimi Denklem (4.7)'de yapılmıştır.

$$\theta = \underbrace{\operatorname{argmin}}_{\theta} (J(A, \theta)) \quad (4.7)$$

En büyük olabilirlik kestirimi gelen sinyalin genliği A ve gelen sinyalin geliş açısı θ nın bir fonksiyonudur. Fonksiyonun türevi alınıp sıfıra eşitlenirse, fonksiyonun minimum noktası bulunabilmektedir. Denklem (4.6)'nın A üzerinden türevi Denklem (4.8)' de verilmiştir.

$$\frac{\partial J(A, \theta)}{\partial A} = \sum_{i=0}^{N-1} \left(-2s_i R_i (\theta - \theta_i) + 2AR_i^2 (\theta - \theta_i) \right) \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial J(A, \theta)}{\partial A} = 0 \quad (4.9)$$

$$\hat{A} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (s_i R_i (\theta - \theta_i))}{\sum_{i=0}^{N-1} R_i^2 (\theta - \theta_i)} \quad (4.10)$$

Denklem (4.6)'de verilen J fonksiyonunda A yerine yazıldığı zaman Denklem (4.11)' de verilen eşitlik elde edilmektedir.

$$J(\theta) = \sum_{i=0}^{N-1} s_i^2 - \frac{[\sum_{i=0}^{N-1} s_i R_i (\theta - \theta_i)]^2}{\sum_{i=0}^{N-1} R_i^2 (\theta - \theta_i)} \quad (4.11)$$

Denklem (4.11)'de verilen ifadenin θ ya göre minimize edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle θ 'nın fonksiyonu olmayan ilk terim elenerek, Denklem (4.12)'de verilen ifade elde edilmektedir.

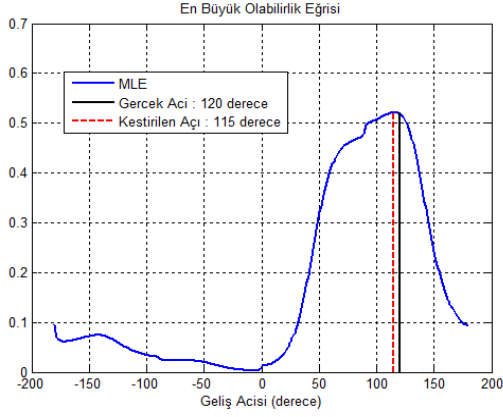
$$M(\theta) = \frac{[\sum_{i=0}^{N-1} s_i R_i (\theta - \theta_i)]^2}{\sum_{i=0}^{N-1} R_i^2 (\theta - \theta_i)} \quad (4.12)$$

Denklem (4.12)'de verilen $M(\theta)$ ifadesinin maksimize edilmesiyle sinyalin geliş açısı kestirimi gerçekleştirilmiş olacaktır.

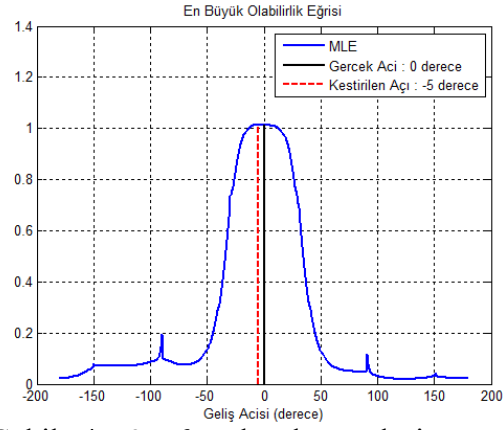
$$\theta = \underbrace{\operatorname{argmax}}_{\theta} (M(\theta)) \quad (4.13)$$

Denklem (4.12)' de verilen en büyük olabilirlik eğrisi ve Denklem (4.13)' de verilen sinyalin geliş açısı kestirimleri 4 ve 6 sektörlü anten yerleşim yapıları için Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da görsel olarak ifade edilmiştir. Şekillerde, en büyük olabilirlik eğrisi,

sinyalin geliş açısı ve yukarıda açıklanan denklemler yardımıyla sinyalin kestirilen geliş açısı; farklı sektörler ve farklı dizilim yapıları için bir arada gösterilmiştir. En büyük olabilirlik eğrisi ve açı kestirimleri 20 dB SNR ve 8 GHz frekans altında incelenmiştir.



Şekil 4. 8: 4 sektörlü yerleşim yapısı kullanılarak 120 dereceden gelen sinyal için MLE.



Şekil 4. 9: 6 sektörlü yerleşim yapısı kullanılarak 0 dereceden gelen sinyal için MLE.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da, bu bölümde açıklanan, sinyalin geliş yönünün genlik karşılaştırma metoduyla tespit edilebilmesi için en büyük olabilirlik kestiriminin en büyük değeri verdiği noktanın kullanılması kavramı incelenmiştir. MLE eğrisinin maksimum değeri aldığı açı değeri, açı kestirim sonucunu vermektedir.

4.3.2 Kuzey - doğu oranı

Genlik karşılaştırma tekniğinin uygulanabileceği diğer bir algoritma kuzey-doğu oranı algoritmasıdır. Bu algoritma Denklem (4.2)' de verilen, antenlere gelen sinyallerin birbirine oranlanması mantığına dayanmaktadır. Şekil 4.6a'da gösterildiği gibi dizilen antenlerin bakış açılarının farklı olmasından kaynaklı olarak; antenlerin aldığı genlikler Şekil 4.7' de gösterildiği gibi farklı olacaktır. Kuzey – Doğu oranı algoritması ile genlik karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla antenlerin aldığı genlik farkları kullanılmaktadır. Bu metot ile antenlerin aldığı genlikler üzerinde vektörel toplama ve çıkarma işlemleri yapılarak sinyalin geliş yönü kestirilebilmektedir. Denklem (4.2) antenlerin aldığı sinyalleri göstermektedir. Denklem (4.14) ve Denklem (4.15)'de verilen denklemlerde, antenlerin aldığı genliklerin üzerinde yapılan vektörel işlemler gösterilmektedir. Denklem (4.14) yön bulma yapısının kuzey yönünde aldığı genlikleri, Denklem (4.15) ise doğu yönünde aldığı genlikleri

göstermektedir. S_{k_i} ve S_{d_i} i . Antenin kuzey ve doğu yönlerindeki genlik bileşenini, N yön bulma sisteminde kullanılan anten sayısını, i anten numarasını ve θ_i i . antenin baktığı yönü belirtmektedir.

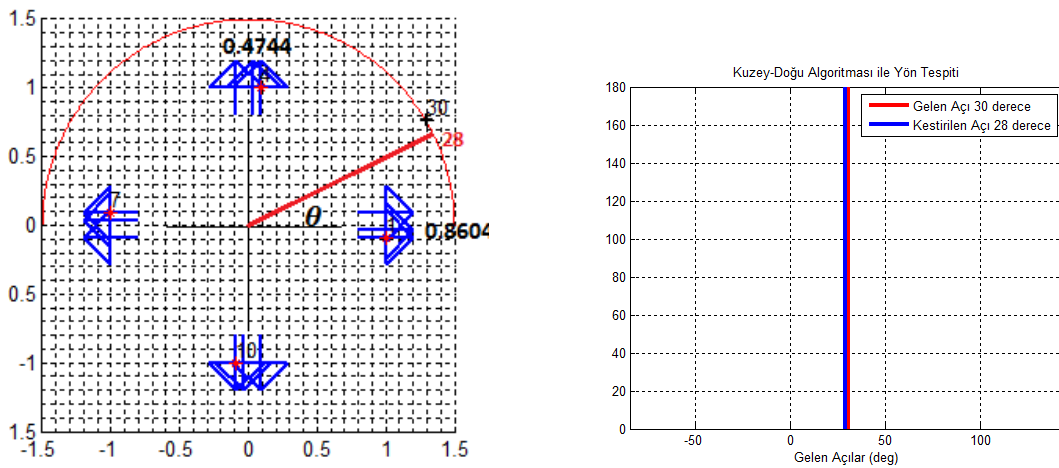
$$s_{k_i} = s_i \sin(\theta_i) \quad (4.14)$$

$$s_{d_i} = s_i \cos(\theta_i) \quad (4.15)$$

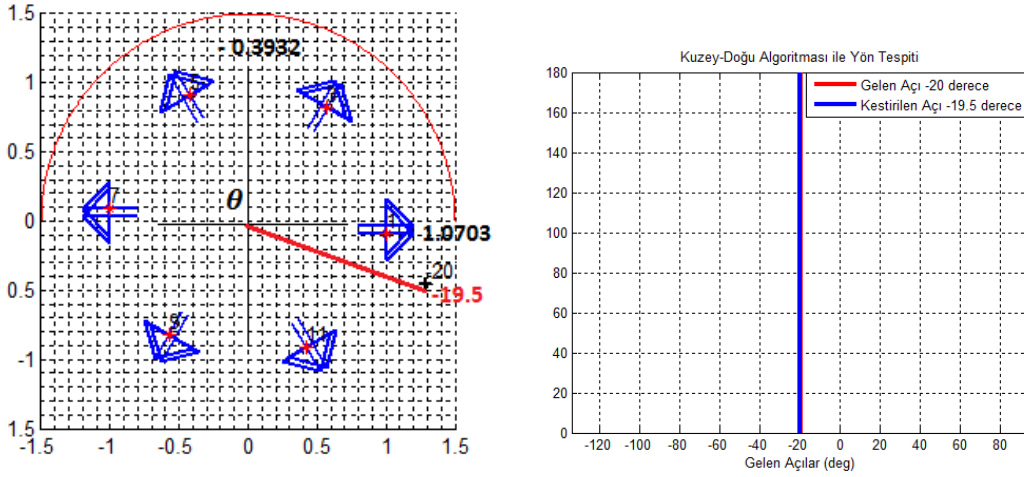
$$\hat{\theta} = \tan^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^N s_{k_i}}{\sum_{i=1}^N s_{d_i}} \right] \quad (4.16)$$

Kuzey doğu oranı algoritması, Denklem (4.14) ve (4.15)' de verilen ifadeler ile kuzey ve doğu yönlerindeki bileşke genlik değeri her bir anten için hesaplanmaktadır. Denklem (4.16) kuzey ve doğu yönlerindeki bileşke genlikler kullanılarak yön kestiriminin nasıl yapıldığını göstermektedir.

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de 20 dB SNR ve 8 GHz frekans değerinde alınan sinyaller üzerinde kuzey-doğu oranı algoritması uygulanarak gelen sinyalin yön kestirimi yapılmıştır. Sektörlerde bulunan faz antenleri aynı yöne baktığı için ve aralarında 5 cm gibi kısa bir mesafe olduğu için genlikleri eşit oranda aldığı varsayımı yapılabilmektedir. Bu nedenle genel olarak genlik karşılaştırma metotlarında her bir sektörden bir tane referans anten seçilmekte ve bu referans antenler kullanılarak yön bulma algoritmaları uygulanmaktadır. Kırmızı renk ile işaretlenmiş antenler seçilen referans antenleridir.



Şekil 4. 10: 4 sektörlü yerleşim yapısında 30 dereceden gelen sinyal için Kuzey Doğü Oranı algoritması ile açı kestirimi.



Şekil 4. 11: 6 sektörlü yerleşim yapısında -20 dereceden gelen sinyal için Kuzey Doğu Oranı algoritması ile açı kestirimi.

4.3.3 En güçlü iki genlik kullanımı

Antenlerin aldığı en güçlü iki genlik kullanılarak gerçekleştirilen yön bulma işlemi temel olarak kuzey - doğu algoritması ile benzerlik göstermektedir. Bu algoritmanın tek farkı alınan sinyallerden elde edilen genliklerin en yüksek olduğu 2 antenin kullanılmasıdır. Bu yaklaşımın avantajı gürültü etkisinin kuzey – doğu oranından daha az hesaba katılacak olmasıdır. Kuzey - doğu oranında kullanılan tüm antenlerin aldığı gürültülü sinyallerin genlikleri hesaba katılmaktadır, ancak en güçlü iki genlik kullanımı algoritmasında sadece en yüksek genliği alan iki anten kullanıldığı için diğer antenlerde oluşan gürültü genlikleri yön bulma performansını etkilememektedir. Denklemler 4.17 – 4.21’de en güçlü iki genlik kullanımı algoritması açıklanmaktadır. Şekil 4.6a’ da gösterilen dairesel dizimli yön bulma yapısı kullanıldığı takdirde her bir antenin aldığı genlik Denklem (4.2)’ de gösterilmiştir. Denklem (4.2) kullanılarak Denklem (4.17) ve Denklem (4.18)’ de en yüksek genliği alan iki anten seçimi yapılmıştır.

$$s_{\max 1} = \max (s_{1,2,\dots,N}) \quad (4.17)$$

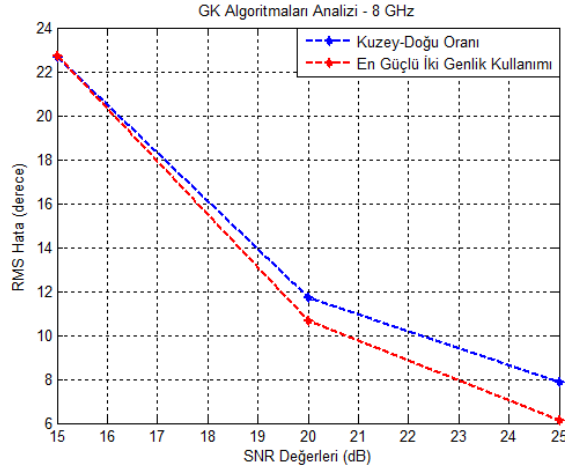
$$s_{\max 2} = \max (s_{1,2,\dots,N-1}) \quad (4.18)$$

$$s_k = s_{\max 1} \sin(\theta_{\max 1}) + s_{\max 2} \sin(\theta_{\max 2}) \quad (4.19)$$

$$s_d = s_{\max 1} \cos(\theta_{\max 1}) + s_{\max 2} \cos(\theta_{\max 2}) \quad (4.20)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{s_k}{s_d} \right] \quad (4.21)$$

Yukarıda verilen denklemlerde s_{max1} en büyük genliği alan ilk anteni, s_{max2} en büyük genliği alan ikinci anteni; buna bağlı olarak θ_{max1} en büyük genliği alan ilk antenin baktığı yönü, θ_{max2} ise en büyük genliği alan ikinci antenin baktığı yönü ifade etmektedir. Şekil 4.12, 4 sektörlü yerleşim senaryosunda kullanılan genlik karşılaştırma yöntemi için uygulanan Kuzey – Doğu oranı algoritması ile En Güçlü İki Genlik kullanımı algoritmasının; 8 GHz frekansta 100 Monte Carlo denemesi yapılarak oluşturulan farklı SNR değerlerine göre değişen ortalama hata değerlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir.



Şekil 4. 12: 4 sektörlü yerleşim yapısı için Kuzey Doğu Oranı ile En Güçlü İki Genlik Kullanımı algoritmalarının farklı SNR değerlerinde karşılaştırılması.

Çizelge 4. 5: 4 sektörlü yerleşim yapısında Kuzey Doğu Oranı ile En Güçlü İki Genlik Kullanımı algoritmalarının farklı SNR'larda RMS hata değerleri.

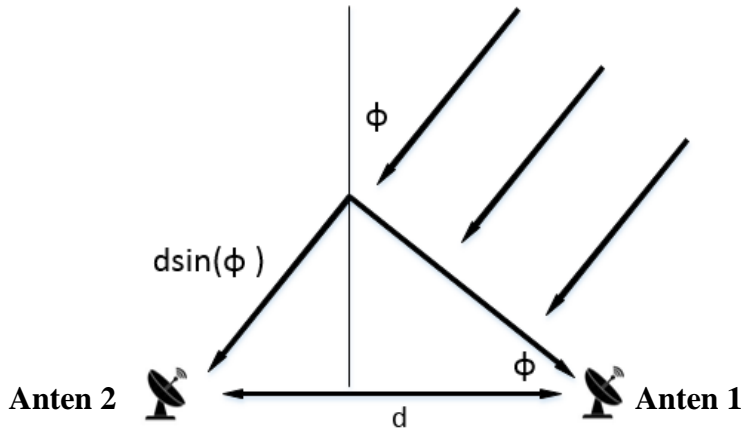
SNR (dB)	Kuzey-Doğu Algoritması	En Güçlü İki Genlik Algoritması
15	22.6517	22.6962
20	11.7012	10.6509
25	7.8847	6.1309

Şekil 4.12'de kuzey – doğu oranı algoritması ile en güçlü iki genlik kullanımı algoritmalarının ortalama RMS Hata değerleri gösterilmiştir. En güçlü iki genlik kullanımı algoritması kullanıldığı zaman gürültünün yön bulma sistemlerinin başarımına etkisi daha az olmaktadır. Tehdit sinyalinin geldiği açığa göre bazı antenler gelen sinyalin genliğini yüksek, bazı antenler düşük değerde almaktadır.

Tüm antenler alıcı kanalında gürültüden etkilendiği için temel olarak gürültülü bir genlik seviyesine sahip olmaktadır. Tüm antenlerin yerine sadece en yüksek genliği alan iki anten kullanıldığı takdirde çok düşük genlik seviyesinde ki antenlere gelen gürültülü genlikler kullanılmamaktadır. Bu nedenle de Şekil 4.12’de gösterildiği gibi en yüksek iki genlik kullanımı algoritması kullanıldığı zaman farklı SNR değerlerinde oluşan ortalama RMS Hata değerlerinde yaklaşık 1.5 derecelik iyileşme görülmektedir.

4.4 Faz Karşılaştırma (İnterferometre)

Faz karşılaştırma (İnterferometre) analizleri için Şekil 4.13’de gösterilen iki özdeş antenli doğrusal dizilimli interferometrik yapı kullanılmıştır. Bu yapıda sinyal 1.Antene geldikten sonra $d \sin(\phi)$ kadar daha yol alıp 2.Antene gelmektedir. Bu gecikme, antenlere gelen sinyaller arasında bir faz farkı oluşturmaktadır.



Şekil 4. 13: İnterferometrik üçgen yapısı.

Sinyalin antenlere ϕ açısından geldiğini düşündüğümüz zaman, 1.Antenin aldığı sinyal s_1 , 2.Antenin faz farkıyla aldığı sinyal s_2 , Denklem (4.22) ve Denklem (4.23)’de gösterilmiştir.

$$s_1 = Ae^{j\theta} g(\phi) + n_1 \quad (4.22)$$

$$s_2 = Ae^{j\theta} e^{j\Psi} g(\phi) + n_2 \quad (4.23)$$

A gelen sinyalin genliğini, θ gelen sinyalin fazını, Ψ anten 1 ve anten 2 ye gelen sinyaller arasındaki faz farkını, $g(\phi)$ anten örüntüsünü ve n_1 ve n_2 sırasıyla

antenlerin gürültüsünü göstermektedir. Denklem (4.22) ve Denklem (4.23)'de verilen antenlerin aldığı sinyal ifadelerinden çıkarılan faz farkı bilgisini Denklem (4.24)'deki gibi tanımlarsak antenler arasındaki faz farkını daha rahat analiz edebiliriz.

$$h(\phi) = e^{j\psi} g(\phi) \quad (4.24)$$

Denklem (4.22); Denklem (4.23) ve Denklem (4.24)'deki ifadeler kullanılarak tekrar yazılırsa antenlere gelen sinyaller s_1 ve s_2 aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir.

$$s_1 = Ae^{j\theta} g(\phi) + n_1 \quad (4.25)$$

$$s_2 = Ae^{j\theta} h(\phi) + n_2 \quad (4.26)$$

Eklenen gürültü, Beyaz Gauss olarak modellenmiştir. Bu gürültü örnekleri birbirinden bağımsız ve σ^2 varyansına sahiptir. Ortalaması sıfır, varyansı σ^2 olan Gaussian dağılımlı rastgele değişkenin yoğunluk fonksiyonu Denklem (4.3)'de verilmiştir. Şekil 4.13'de verilen iki antenli yapıda, iki bağımsız rastgele değişken bulunmaktadır. Her bir Gaussian rastgele değişkenin çarpımı, bu iki bağımsız rastgele değişkenin birleşik yoğunluk fonksiyonunu vermektedir. Şekil 4.13'de verilen iki antenli yapının olasılık yoğunluk fonksiyonu; gelen sinyalin genliğine (A), gelen sinyalin fazına (θ) ve gelen sinyalin geliş açısına (ϕ) bağlı olarak Denklem (4.27)'de belirtilmiştir.

$$f(A, \theta, \phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{|s_1 - Ae^{j\theta} g(\phi)|^2}{2\sigma^2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{|s_2 - Ae^{j\theta} h(\phi)|^2}{2\sigma^2}} \quad (4.27)$$

Denklem (4.27) yine bir en büyük olasılık kestirimi problemine dönüşmüştür. Sinyalin geliş açısını (ϕ) bulabilmek için Denklem (4.27)'de verilen iki antenli faz karşılaştırma yapısının olasılık yoğunluk fonksiyonunun ($f(A, \theta, \phi)$) maksimize edilmesi gerekmektedir. Denklem (4.28)'de sinyalin geliş açısının ifadesi gösterilmiştir.

$$\phi = \underbrace{\operatorname{argmax}}_{\phi} (f(A, \theta, \phi)) \quad (4.28)$$

Logaritma monoton bir fonksiyon olduğu için, Denklem (4.27)'de verilen olasılık yoğunluk fonksiyonunun maksimize edilmesi ile olasılık fonksiyonunun negatif logaritmasının minimize edilmesi aynı sonucu verecektir. Denklemlerdeki sabit

terimler çıkarıldığında en büyük olabilirlik fonksiyonu Denklem (4.29)'de belirtildiği gibi tanımlanabilmektedir.

$$J(A, \theta, \phi) = |s_1 - Ae^{j\theta} g(\phi)|^2 + |s_2 - Ae^{j\theta} h(\phi)|^2 \quad (4.29)$$

Denklem (4.29)'de verilen en büyük olabilirlik problemi, $J(A, \theta, \phi)$ ifadesinin minimize edilmesiyle çözülebilmektedir. Sinyalin geliş açısı (ϕ) Denklem (4.30)'da gösterildiği gibi bulunabilmektedir.

$$\phi = \underbrace{\text{argmin}}_{\phi} (J(A, \theta, \phi)) \quad (4.30)$$

Denklem (4.29)'de verilen $J(A, \theta, \phi)$ ifadesi A , θ , ve ϕ parametrelerinin bir fonksiyonudur. Sinyalin geliş açısının kestirimi için A ve θ üzerinden türev alıp sıfıra eşitleyerek ekstremum noktalarının bulunması gerekmektedir. Denklem (4.31) A üzerinden türev işlemini, Denklem (4.33) ise θ üzerinden türev işlemini göstermektedir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(A, \theta, \phi)}{\partial A} &= 2A |g(\phi)|^2 + 2A |h(\phi)|^2 - 2\text{Re} \{s_1 e^{-j\theta} g^*(\phi)\} \\ &\quad - 2\text{Re} \{s_2 e^{-j\theta} h^*(\phi)\} = 0 \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$\hat{A} = \frac{\text{Re} \{s_1 e^{-j\theta} g^*(\phi)\} + \text{Re} \{s_2 e^{-j\theta} h^*(\phi)\}}{|g(\phi)|^2 + |h(\phi)|^2} \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(A, \theta, \phi)}{\partial \theta} &= -\frac{\partial}{\partial \theta} \left[(s_1 e^{-j\theta} g^*(\phi) + s_1^* e^{j\theta} g(\phi)) \right] \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial \theta} \left[(s_2 e^{-j\theta} h^*(\phi) + s_2^* e^{j\theta} h(\phi)) \right] = 0 \end{aligned} \quad (4.33)$$

İfadeyi sanal ve reel kısımlarını ayrı ayrı yazarak daha basitleştirirsek aşağıdaki eşitlikler elde edilmektedir.

$$\text{Im} \{e^{-j\theta} (s_1 g^*(\phi) + s_2 h^*(\phi))\} = 0 \quad (4.34)$$

$$s_1 g^*(\phi) + s_2 h^*(\phi) = C e^{j\theta + jc\pi} \quad (4.35)$$

Sinyalin geliş açısının bulunmasından önce sinyalin fazının kestirimi yapılmalıdır. Denklem (4.36) sinyalin faz kestirimini göstermektedir.

$$\hat{\theta} = \arg (s_1 g^*(\phi) + s_2 h^*(\phi)) \quad (4.36)$$

Denklem (4.36)'de ifade edilen faz kestirimi, Denklem (4.32)'de ifade edilen genlik kestiriminde yerine koyulursa, genlik kestirimi Denklem (4.37)'de belirtildiği gibi olacaktır.

$$\hat{A} = \frac{|s_1 g^*(\phi) + s_2 h^*(\phi)|}{|g(\phi)|^2 + |h(\phi)|^2} \quad (4.37)$$

Denklem (4.37)'de belirtilen \hat{A} ifadesi, Denklem (4.29)'da belirtilen en büyük olabilirlik fonksiyonunda yerine koyulursa $J(A, \theta, \phi)$ ifadesi Denklem (4.38)'de gösterilen ifade ortaya çıkmaktadır.

$$J(A, \theta, \phi) = |s_1|^2 + |s_2|^2 - \frac{|s_1 g^*(\phi) + s_2 h^*(\phi)|^2}{|g(\phi)|^2 + |h(\phi)|^2} \quad (4.38)$$

Karmaşık sinyallerin büyüklüğü sabit olduğu ve DC değer teşkil ettiği için, sabit ve negatif değerleri denklemden çıkarılırsa Denklem (4.39)'da gösterilen en büyük olabilirlik fonksiyonu elde edilmektedir.

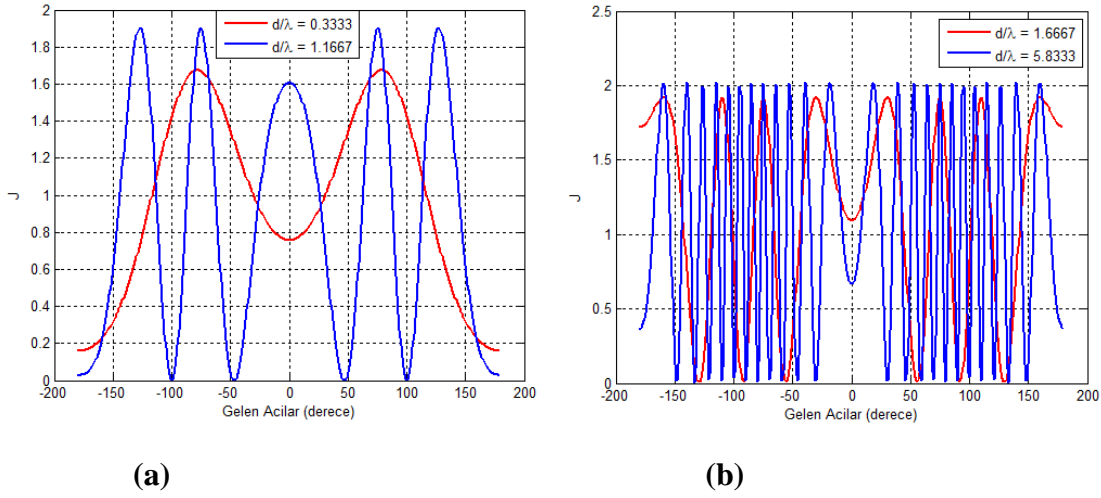
$$J'(\phi) = \frac{|s_1 g^*(\phi) + s_2 h^*(\phi)|^2}{|g(\phi)|^2 + |h(\phi)|^2} \quad (4.39)$$

Faz karşılaştırma metodu kullanılarak sinyalin geliş açısı ϕ , en büyük olabilirlik fonksiyonu $J'(\phi)$ nin maksimize edilmesi ile bulunmaktadır.

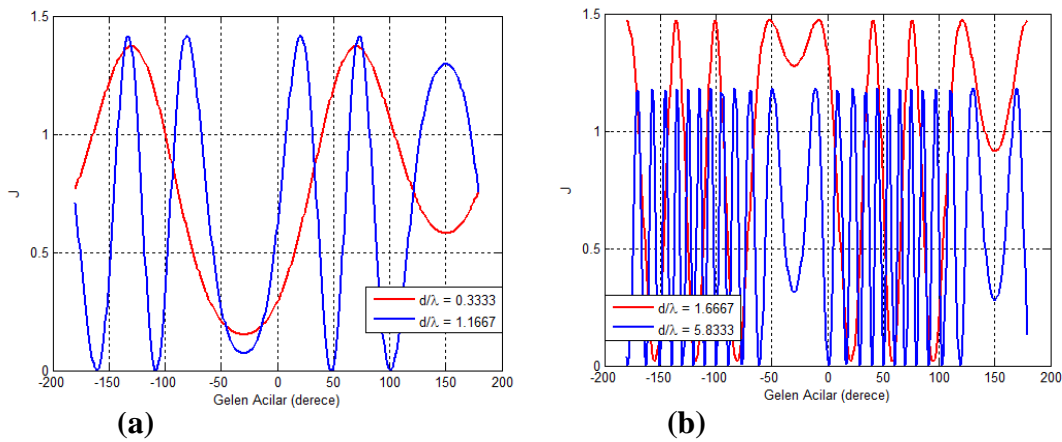
$$\phi = \underset{\phi}{\operatorname{argmax}} \left[\frac{|s_1 g^*(\phi) + s_2 h^*(\phi)|^2}{|g(\phi)|^2 + |h(\phi)|^2} \right] \quad (4.40)$$

Faz karşılaştırma sisteminde belirsizlik oluşmadan açı kestirimi yapabilmek için antenler arası mesafenin, en yüksek frekansın dalga boyunun yarısından yani $\frac{\lambda}{2}$ den küçük olması gerekmektedir [26]. Örneğin 12 GHz frekansta bu mesafeler yaklaşık 1 cm olmaktadır. Antenlerin fiziksel yapıları düşünüldüğünde 1 cm gibi kısa aralıklarla yerleştirmenin mümkün olamayacağı sonucu çıkarılmaktadır. Bu durumda ileriki analizlerde gösterileceği gibi yön bulma operasyonlarında açı kestirimleri yapılırken bazı belirsizlikler oluşmaktadır. Faz karşılaştırma metodunda, yön bulma antenleri tarafından alınan sinyallerden geliş açısı hesaplanabilmesi için $J(A, \theta, \phi)$ fonksiyonunun maksimize edilmesi gerektiği Bölüm 4.4'de belirtilmiştir. Bu bölümde J vektörü farklı geliş açıları için çizdirilmiş ve frekansa bağlı olarak değişen

$\frac{d}{\lambda}$ oranının J vektörüne etkisi gözlemlenmiştir. 4 sektörlü 12 antenli yön bulma yapısı için gerçekleştirilen analizler Şekil 4.14’ de, 6 sektörlü 18 antenli yön bulma yapısı için Şekil 4.15’ de gösterilmiştir. Her bir sektörde 3 anten bulunması faz anten sayısının 2 olduğu anlamını taşımaktadır. Benzetimlerde mavi renk, referans antene uzak olan (17.5 cm) anten ile yapılan faz karşılaştırmayı, kırmızı renk ise referans antene yakın olan (5 cm) komşu anten ile yapılan faz karşılaştırmayı göstermektedir. Benzetimler 2, 10 GHz frekans, 20 dB SNR ve 75 dereceden gelen sinyal için 4 ve 6 sektörlü anten yapıları üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. 14: 4 sektör 12 antenli yön bulma yapısında (a) 2GHz, (b) 10 GHz frekansta 75 dereceden gelen sinyal için J vektörü.

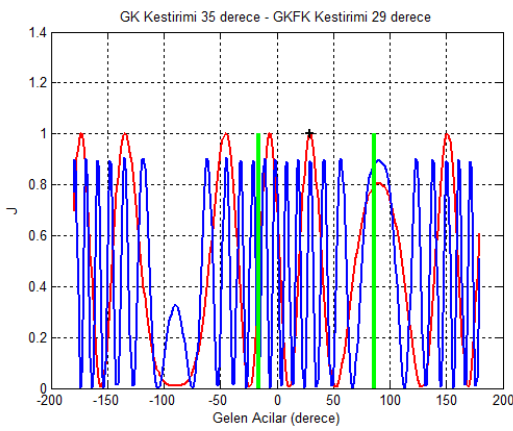


Şekil 4. 15: 6 sektör 18 antenli yön bulma yapısında (a) 2GHz, (b) 10 GHz frekansta 75 dereceden gelen sinyal için J vektörü.

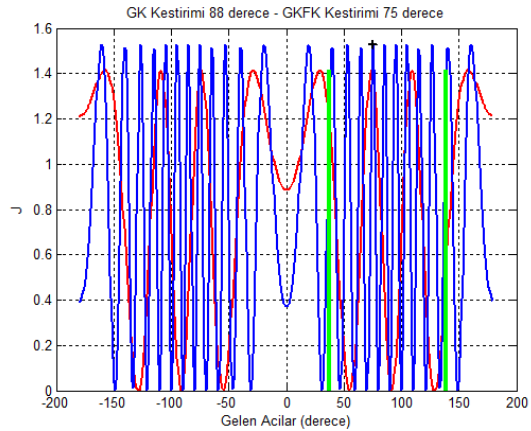
Faz karşılaştırma işlemi için oluşturulan J vektörleri yukarıdaki şekillerde farklı anten yerleşimlerinde ve farklı frekanslarda gösterilmiştir. Bu vektörün maksimum değeri Bölüm 4.4' de gösterildiği üzere faz karşılaştırma işlemi sonucu gerçekleştirilen açı kestirimlerini vermektedir. Dikkat edilirse bu vektörlerin birden fazla maksimum noktası oluşmaktadır. Bu maksimum noktaların her biri faz karşılaştırma metodunun gerçekleştirdiği açı kestirimleridir. Birden fazla açı kestirimi yön belirsizliğine neden olmaktadır. Şekil 4.14 ve Şekil 4.15' de verilen şekillere baktığımız zaman yüksek frekanslarda birden fazla maksimum nokta olduğu görülmektedir ki buda yüksek frekanslarda faz karşılaştırma işleminde yön belirsizliklerinin arttığı anlamına gelmektedir. Bölüm 3.4.4'de anlatıldığı gibi antenler fiziksel özellikleri nedeniyle yeterli aralıklarda yerleştirilemediği için yön bulma operasyonlarında birden fazla açı kestirimlerinin neden olduğu yön belirsizlikleri oluşmaktadır. Bu belirsizliklerin çözülebilmesi için bu tezde genlik karşılaştırma metodu, faz karşılaştırma metoduyla birlikte birden fazla interferometrik çift kullanılarak ele alınmıştır. Anten sayısının artması bu belirsizlikleri giderebilmektedir. Örneğin 5 cm aralıklarla yerleştirilmiş faz antenlerin yanına; 1. antene (referans anten) daha uzak 15 cm gibi bir konuma üçüncü bir anten yerleştirmek bu belirsizlikleri giderebilmektedir. Yön belirsizliklerinin nasıl giderildiği ve faz karşılaştırma tekniği ile yön bulma performansının nasıl değiştiği Şekil 4.16 ve 17'de verilen analizlerde gösterilmiştir. Genlik karşılaştırma metodu ile kestirilen yöne bağlı olarak belirlenen bir arama aralığı ile yön belirsizlikleri çözülebilmektedir. GK sonucu elde edilen açığa bağlı olarak bakılan aralıkta, hem yakın antenin hem de uzak antenin faz karşılaştırma sonucu oluşturdukları J vektörlerinin en büyük değerlerine bakılmaktadır. Şekil 4.16 ve 17 arasında verilen şekillerde gösterildiği gibi bu değerlerin birbirine en yakın olduğu maksimum nokta kullanılarak bir açı kestirimi elde edilmektedir. Faz karşılaştırma metodu ile genlik karşılaştırma metodu birlikte kullanıldığı takdirde açı kestirim hataları yaklaşık 1.5 derecenin altına indiği için hassas ve yüksek doğrulukta yön bulma operasyonu gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 4.16 ve 17'de verilen şekillerde gelen açı, kestirilen açı ve genlik karşılaştırma sonucu kestirilen açığa bağlı olarak oluşturulan arama aralığı belirtilmiştir.

Benzetimler, 20 dB SNR, 10 GHz frekans, 4 sektörlü 12 antenli, 6 sektörlü 18 antenli yerleşim yapıları kullanılarak incelenmiştir. Anten yerleşim yapısında her sektörde

seçilen referans antene, 5 cm uzaklıkta komşu faz anteni, 17.5 cm uzaklıkta uzak faz anteni yerleştirilerek oluşturulan 3 anten yardımıyla, 4 sektörlü yapı için 30, 75 ve 6 sektörlü yapı için 80 ve 50 dereceden gelen sinyallerin yön kestirimi, genlik faz karşılaştırma tekniği kullanılarak yapılmıştır. Şekillerde yeşil çizgiler, genlik karşılaştırma sonucu elde edilen açı kestirimine bağlı olarak oluşturulan tarama aralığını belirtmektedir. Bu tarama aralığı aşağıdaki şekillerde gösterilen yön belirsizliklerinin ortadan kalkmasını sağlamaktadır. Siyah renkli yıldız ise, referans antene komşu ve uzak olan antenlerin kestirdiği açıların kesiştiği noktayı belirtmektedir.

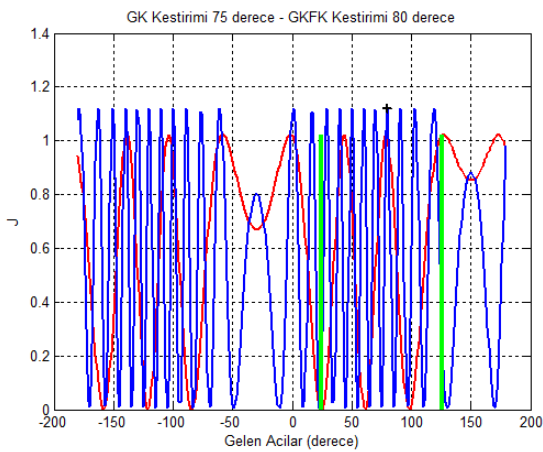


(a)

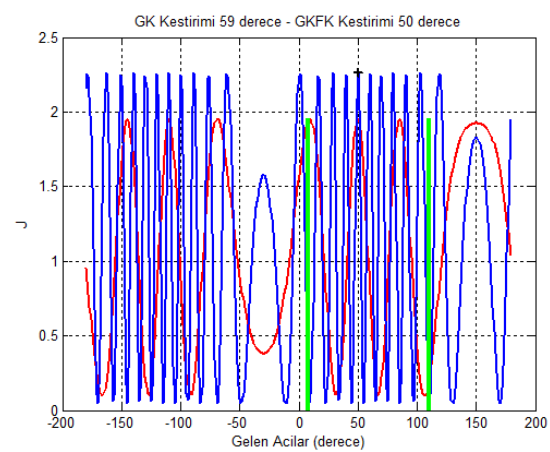


(b)

Şekil 4. 16: 4 sektör 12 antenli yön bulma yapısında (a) 30 dereceden, (b) 75 dereceden gelen sinyalin genlik faz karşılaştırma tekniği ile kestirimi



(a)



(b)

Şekil 4. 17: 6 sektör 18 antenli yön bulma yapısında (a) 80 dereceden, (b) 50 dereceden gelen sinyalin genlik faz karşılaştırma tekniği ile kestirimi

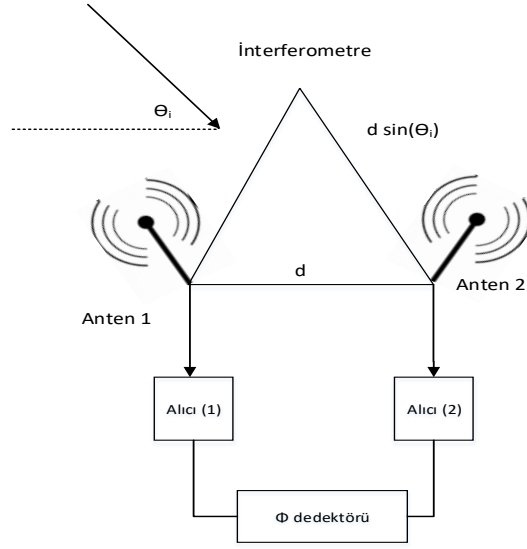
Şekil 4.16 ve Şekil 4.17' den görülebileceği gibi faz karşılaştırma yöntemi ile oluşan belirsizlikler, genlik karşılaştırma yöntemi ile elde edilen açı kestirimine bağlı olarak belirlenen bir arama aralığı içerisinde; genlik ve faz kestirimlerinin birbirine en yakın olduğu maksimum nokta bulunarak çözülebilmektedir. Bu belirsizliklerin çözülebilmesi için genlik ve faz karşılaştırma teknikleri birlikte kullanılmaktadır.

4.5 Kırıklı Anten Yapılarında Hibrit Genlik Faz Karşılaştırma

Hibrit genlik faz karşılaştırma tekniği, 100 MHz frekansa sahip cosinüs olarak modellenen tehdit sinyalinin genlik ve faz değerlerinin FFT yardımıyla elde edilerek genlik ve faz karşılaştırma tekniklerinin uygulanması ile gerçekleştirilmektedir. Hibrit teknik, kırıklı anten yapıları ile kullanıldığı takdirde, kullanılan anten sayısı konusunda büyük oranda esneklik sağlamaktadır. İdeal anten örüntüleriyle oluşturulmuş yön bulma yapılarında; 4, 6 ve 8 sektörlü anten yapıları kullanılmaktadır. Bu anten yapıları her bir sektörde, 2 ya da 3 adet aynı yöne bakan antenler ile oluşturulmaktadır. Bu antenlerin sayısı faz karşılaştırma tekniğinde oluşan belirsizlik probleminin çözülmesi amacıyla üç olarak seçilebilmektedir. Oluşturulan yön bulma yapılarında kullanılan faz anteni sayısına bağlı olarak; 4 sektör için 8 ya da 12, 6 sektör için 12 ya da 18 ve 8 sektör için 16 ya da 24 adet anten kullanılmaktadır. Kırıklı anten yapıları ise sektörün baktığı yön ile aynı yöne bakan antenlerin, bakış yönleri değiştirilerek oluşturulmaktadır. Bu yapılarda az sayıda anten kullanılarak geniş kapsama alanları sağlanabilmektedir. Temel olarak kırıklı anten yapılarıyla oluşturulan yön bulma sistemlerinde kullanılan hibrit genlik faz karşılaştırma tekniğinde, farklı yönlere bakan iki anten kullanılarak 180 derece kapsama sağlanabilmekte ve bilinen yön bulma yapıları ile birbirine yakın açı kestirim hataları oluşturulabilmektedir.

4.5.1 Kırıklı anten yapılarında hibrit genlik faz karşılaştırma yönteminin matematiksel olarak modellenmesi

Hibrit sistemler kullanılarak genlik ve faz karşılaştırma teknikleri yardımıyla açı kestirimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu sistemlerde antenler tarafından alınan 100 MHz frekansa sahip cosinüs olarak modellenen sinyallerin FFT dönüşümü yapılarak en büyük değeri elde edilmekte ve bu değer kullanılarak gelen sinyalin genlik bilgisi elde edilmektedir.

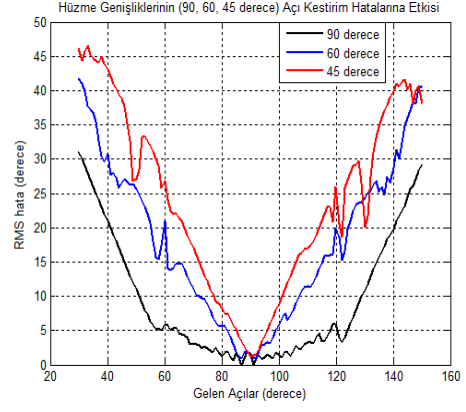
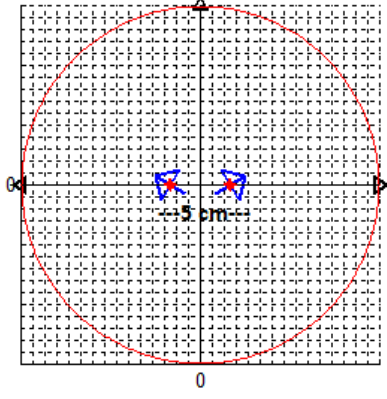


Şekil 4. 18: Kırıklı anten yapısı genlik faz karşılaştırma.

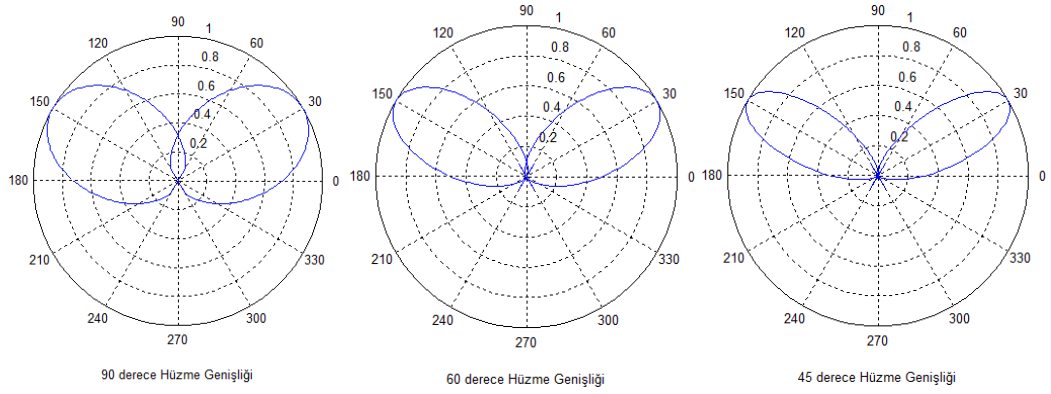
Şekil 4.18’de kırıklı antenler ile oluşturulmuş yön bulma yapısı gösterilmiştir. Bu sistem için de genlik ve faz karşılaştırma algoritmaları Bölüm 4.3.1 ve Bölüm 4.4’de matematiksel olarak modellendiği şekilde kullanılmıştır.

4.5.1.1 Kırıklı yapıda hibrit sistem analizi

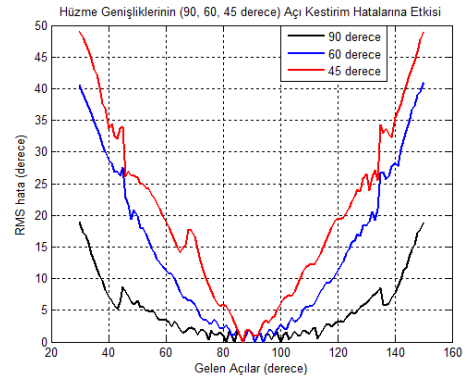
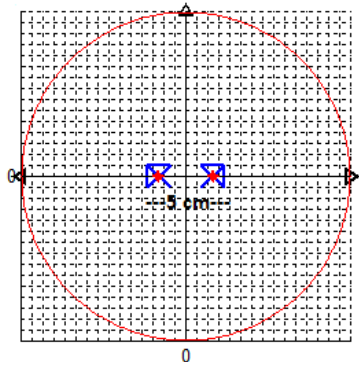
Şekil 4.19 – 26 arasında, 30 – 150, 45 – 135, 60 – 120 ve 75 – 105 derecelere bakan 5 cm aralıklı antenler kullanılarak oluşturulan kırıklı yön bulma yapıları için; 8 GHz frekansta 25 dB SNR da 100 Monte Carlo denemesi yapılarak, antenlerin farklı hüzmeye genişliklerine sahip olduğu durumlarda hibrit genlik faz karşılaştırma tekniği uygulanmış ve RMS hata sonuçları gösterilmiştir. Bu analiz sonucunda antenlerin 0 – 180 derece arasındaki kapsamayı en iyi 90 derece hüzmeye genişliklerine sahip olduğu durumlarda gerçekleştirdiği RMS hata analizleriyle gösterilmiştir. Yapılan benzetimlerde hataların daha rahat analiz edilebilmesi amacıyla yön bulma sistemi 30 – 150 derece arasını tarayacak şekilde ayarlanmıştır.



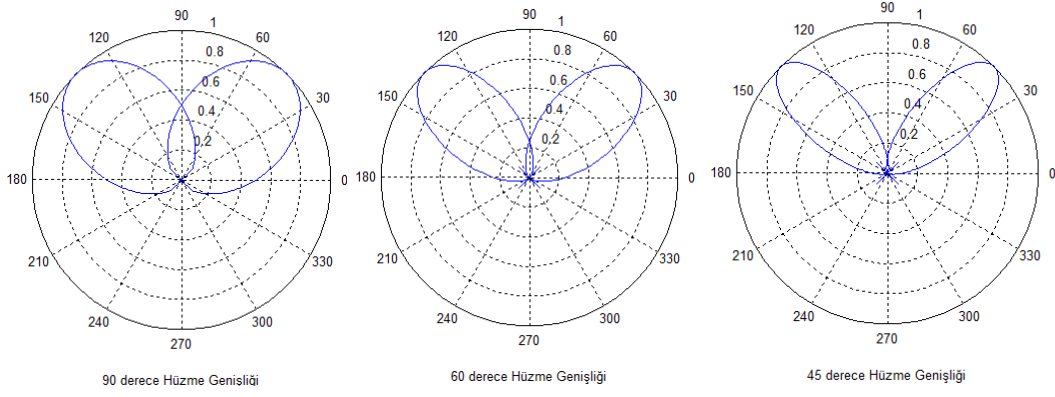
Şekil 4. 19: 30 - 150 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının farklı hüzme genişlikleri ile açı kestirim performansı.



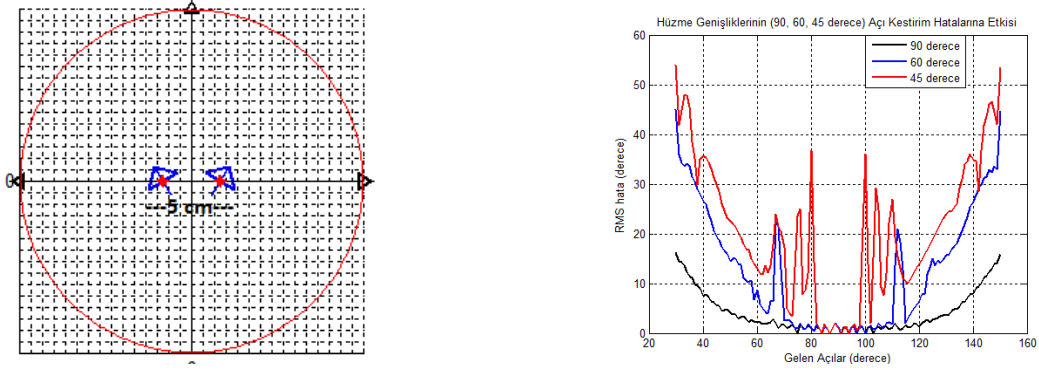
Şekil 4. 20: 30 - 150 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının farklı hüzme genişlikleri.



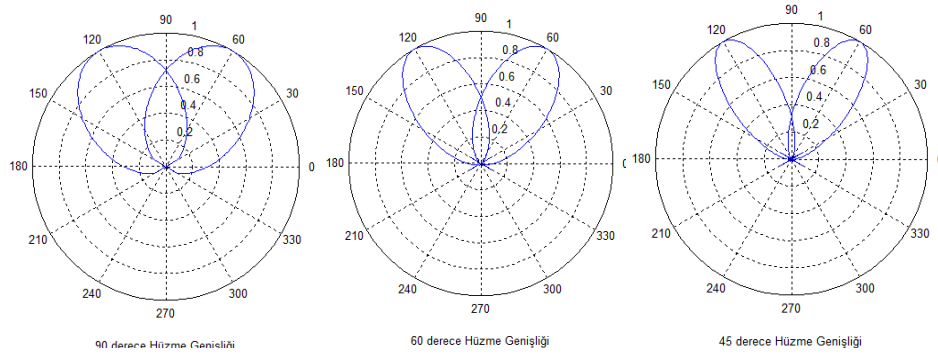
Şekil 4. 21: 45 - 135 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının farklı hüzme genişlikleri ile açı kestirim performansı.



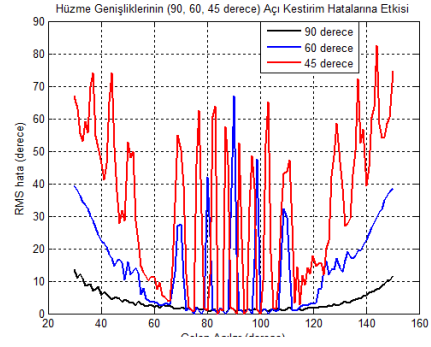
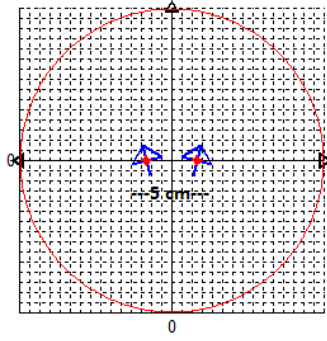
Şekil 4. 22: 45 - 135 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının farklı hüzme genişlikleri.



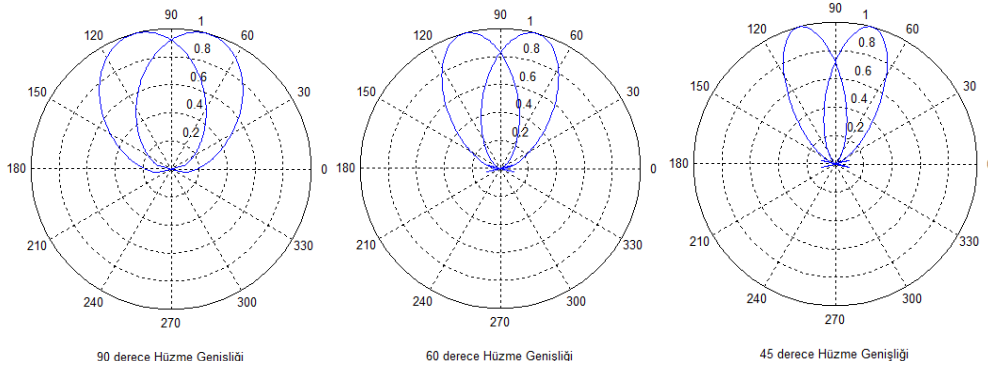
Şekil 4. 23: 60 - 120 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının farklı hüzme genişlikleri ile açılı kestirim performansı.



Şekil 4. 24: 60 - 120 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının farklı hüzme genişlikleri.



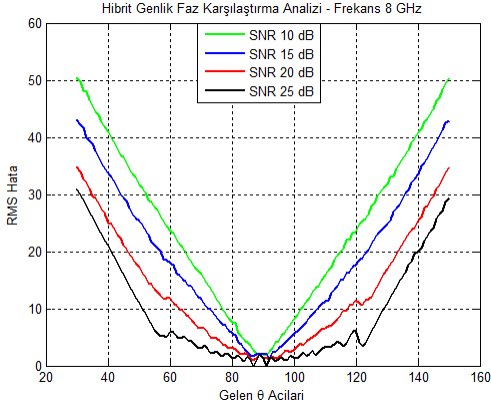
Şekil 4. 25: 75 - 105 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının farklı hüzme genişlikleri ile açılı kestirim performansı.



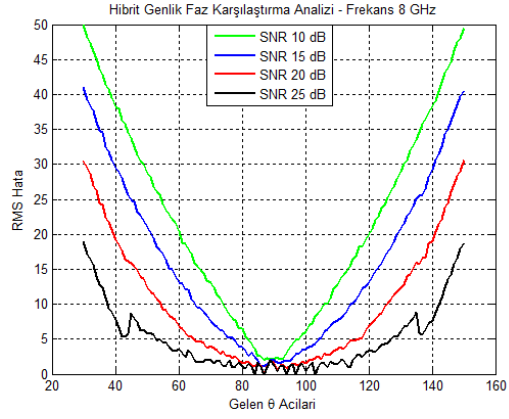
Şekil 4. 26: 75 - 105 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının farklı hüzme genişlikleri.

Yukarıdaki analizlerden antenlerin hüzme genişliklerinin 0 – 180 arasını tarayabilecek ve optimal kazancı sağlayabilecek şekilde, kırıklı antenlerin aralarındaki açılardan bağımsız olarak 30 – 150 derece arasından gelen tehdit sinyalleri için 90 derece olduğu ve en düşük hata ile yön kestirimini bu şekilde gerçekleştirdiği görülmüştür.

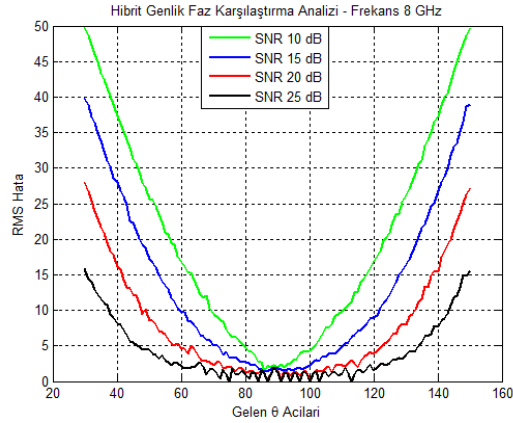
Şekil 4.27’ de 10, 15, 20 ve 25 dB SNR ve 8 GHz frekans altında 30 – 150, 45 – 135, 60 – 120 ve 75 – 105 derecelere bakan kırıklı anten yapılarının hibrit genlik faz karşılaştırma sonucu yaptığı RMS hata sonuçları gösterilmiştir.



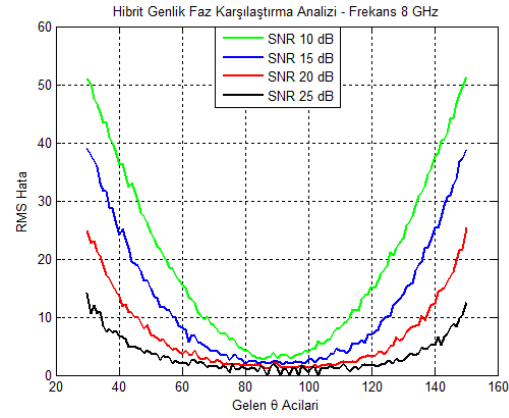
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4. 27: (a) 30 - 150, (b) 45 - 135, (c) 60 - 120, (d) 75 - 105 derecelere bakan kırıklı antenlerle oluşturulan yön bulma yapılarının RMS hata analizi.

Bölüm 4.3 ve 4.4’ de, 4 ve 6 sektörlü yön bulma yapıları için gerçekleştirilen genlik ve faz karşılaştırma teknikleri sonucu oluşan açı kestirim hataları ayrı ayrı gösterilmiştir. Şekil 4.27’ de gösterilen şekiller ise farklı yönlere bakan kırıklı yapıya sahip iki antenli hibrit genlik faz karşılaştırma tekniğinin farklı SNR değerlerinde gerçekleştirdiği açı kestirim hatalarını göstermektedir. Açı hatalarının 30 – 150 derece arasında gelen sinyaller için, bilinen yöntemlerle benzerlik gösterdiği ve SNR değeri arttıkça azaldığı görülebilmektedir. Şekillerden, antenler arasındaki açılardan azalmasının daha geniş aralıkta yüksek doğrulukta yön kestirimi yapılmasını sağladığı görülmektedir. 30 – 150 derecelere bakan antenlerden oluşan yön bulma sisteminde ortalama 5 derece hata 70 ile 110 derece arasında yapılırken; 60 – 120 derecelere bakan antenlerden oluşan yön bulma sisteminde 55 ile 125 arasında, 75 – 105 derecelere bakan antenlerden oluşan yön bulma sisteminde ise yaklaşık 40 ile 140 derece arasında yapılmaktadır. Bölüm 5.3’de farklı yönlere bakan kırıklı yapıya

sahip antenlerin bakış açılarının ve aralarındaki açının yön bulma performansına etkilerini incelemek amacıyla analizler yapılmıştır.

5. ANALİZ

Yapılan çalışmaların analizleri için bu bölümde, farklı anten yerleşim senaryoları oluşturabilmek amacıyla ilk olarak bir benzetim ortamı hazırlanmıştır. Bu benzetim ortamı farklı anten yerleşim senaryolarını oluşturup farklı SNR ve frekans değerleri için genlik ve faz karşılaştırma analizlerini gerçekleştirmek amacıyla kullanılmıştır. Genlik karşılaştırma metotlarından en büyük olabilirlik kestirimi, kuzey – doğu oranı ve en güçlü iki genlik kullanım metotları incelenmiş farklı SNR değerleri için hata analizleri yapılmıştır. Bölüm 4’ de belirtildiği üzere kullanılan anten örüntülerinin ideal olduğu varsayımı yapılarak düzgün Gaussian olarak modellenmiştir. Benzetimlerde 15, 20 ve 25 dB SNR değerleri için 4, 6 ve 8 sektörlü anten yerleşim yapıları kullanılmıştır. Aynı sektörde bulunan antenler aynı yöne baktıkları için gelen sinyalleri aynı kazançlar ile almaktadır, bu nedenle sektörlerde yer alan antenlerin sayısı genlik karşılaştırma için benzetim sonuçlarını etkilememektedir. Faz karşılaştırma ile oluşan belirsizlikler, Bölüm 4.4’ de detaylıca açıklandığı şekilde genlik karşılaştırma sonucu yapılan açı kestirimleri kullanılarak çözüldüğü için faz karşılaştırma tekniği genlik faz karşılaştırma olarak da değerlendirilebilmektedir. Genlik ve genlik-faz karşılaştırma tekniklerinin farklı SNR ve yerleşim yapıları için analizleri ileriki bölümlerde incelenmiştir.

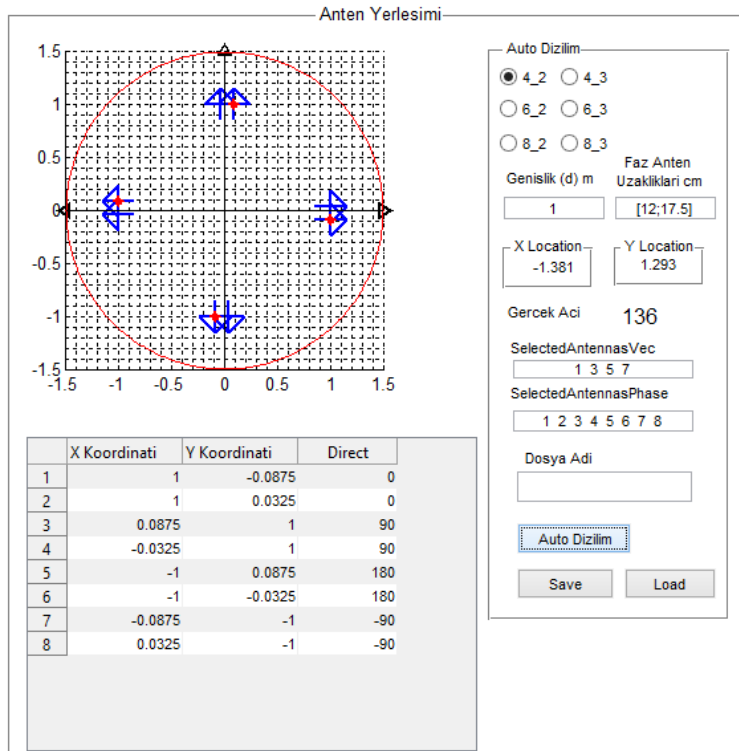
5.1 Genlik ve Faz Karşılaştırma Benzetimleri

Genlik ve faz karşılaştırma benzetimlerinde, farklı anten dizilimleri kullanılarak farklı SNR ve farklı frekans değerleri için oluşturulan yön bulma sistemlerinin performansları incelenmiştir. Antenlerin ideal ve özdeş olduğu varsayımı yapılmıştır. Kullanılan antenler 360 derece azimut kapsamaya ve aynı anten örüntülerine sahiptir. Ek olarak, genlik karşılaştırma tekniğinde kullanılan en büyük olabilirlik kestirimi, kuzey – doğu oranı ve en güçlü iki genlik kullanımı gibi algoritmaların hata analizleri de farklı SNR ve farklı sektör sayıları için incelenmiştir. Faz Karşılaştırma (interferometre) yöntemi sistem akış diyagramı açısından genlik karşılaştırma metoduyla hemen hemen aynıdır. Faz karşılaştırma her bir sektörde iki ya da üç

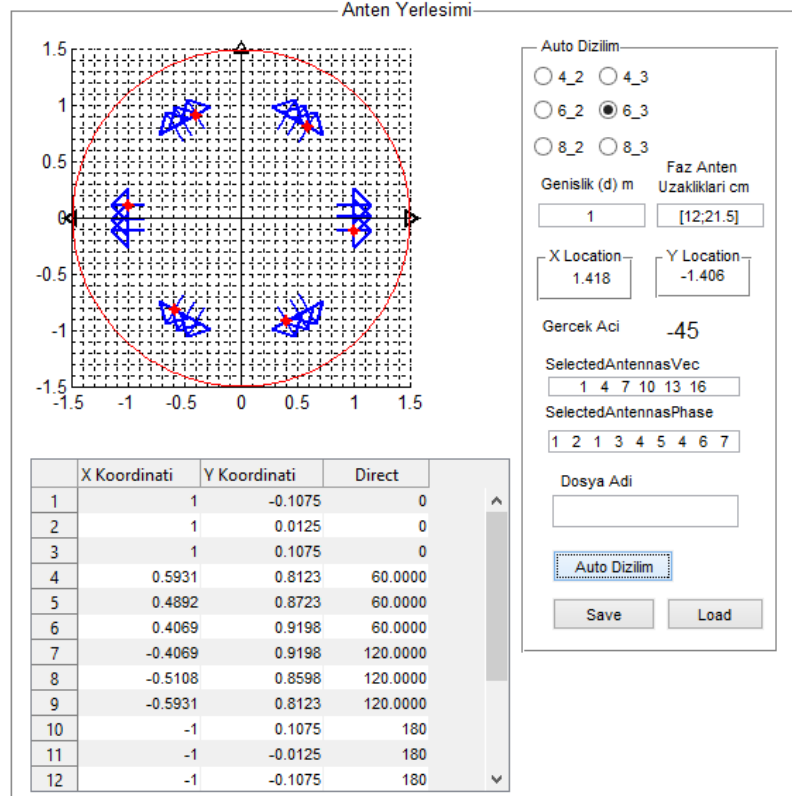
anten kullanılarak gerçekleştirilmektedir. İki antenli yapılarda oluşan belirsizliklerin giderilmesi amacıyla bazı ikili anten yapılarında, ikinci antenden daha uzak mesafeye bir üçüncü anten yerleştirilmektedir.

5.1.1 Benzetim ortamı

Yön bulma sistemlerinde genlik ve faz karşılaştırma analizlerinin yapılacağı anten yerleşimleri için gerekli benzetim ortamı, Matlab GUI ile Şekil 5.1’de verildiği gibi oluşturulmuştur. Bu arayüz ile standart 4, 6 ve 8 sektörlü, her bir sektörde 2 ya da 3 anten kullanılan anten yerleşim geometrileri oluşturulabilmektedir. Bunun dışında manual olarak, standart geometriler dışında anten pozisyonları ve bakış açıları girilerek özel anten yerleşim geometrileri oluşturulabilmekte ve kaydedilebilmektedir. Ayrıca bu arayüz kullanılarak oluşturulan ya da harici olarak alınmış anten yerleşim verileri LOAD butonu ile benzetim ortamına yüklenebilmektedir. Bu arayüz ile oluşturulan anten yerleşim geometrileri ile genlik karşılaştırma yapacak antenlerin seçimi ve faz karşılaştırma yapacak faz antenleri SelectedAntennasVec ve SelectedAntennasPhase blokları içerisinde belirtilebilmektedir.



Şekil 5. 1: 4 sektör 8 anten seçilerek oluşturulmuş anten yerleşim geometrisi



Şekil 5. 2: 6 sektör 18 anten seçilerek oluşturulmuş anten yerleşim geometrisi

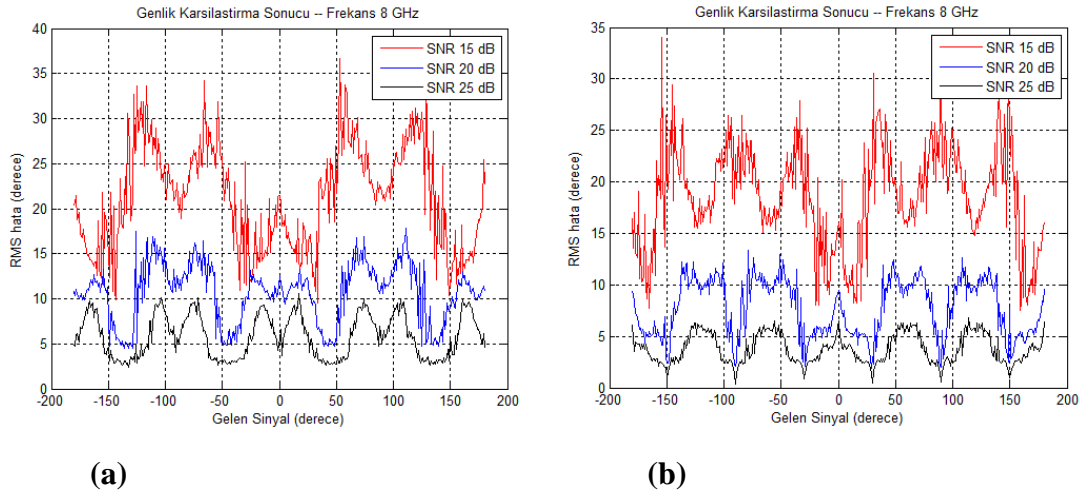
5.2 Genlik Karşılaştırma Analizleri

Genlik karşılaştırma analizleri için Şekil 5.1’de verilen arayüz ile anten yerleşim geometrileri oluşturulmuştur. Bu geometriler için yön bulma analizleri en büyük olabilirlik kestirimi, kuzey doğu oranı algoritması ve en güçlü iki genlik kullanımı algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

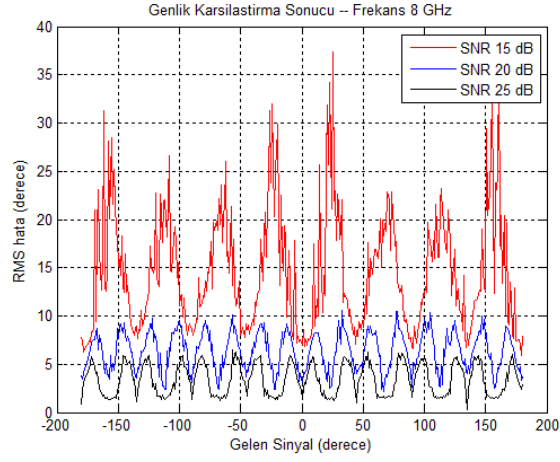
5.2.1 En büyük olabilirlik kestirimi (Maksimum Likelihood Estimation, MLE)

Bölüm 4.3.1’ de anlatılan sinyalin geliş yönünün genlik karşılaştırma metoduyla tespit edilmesi için en büyük olabilirlik kestiriminin maksimum değeri verdiği noktanın kullanılması yönteminin analizi yapılmıştır. MLE eğrisinin en büyük değeri, sinyalin geliş yönünün kestirimini ifade etmektedir. Hata analizi için 4, 6 ve 8 sektörlü anten yerleşim yapıları kullanılarak farklı SNR ve frekanslar için hata değerleri gözlemlenmiştir. Şekil 5.3’de verilen şekillerde RMS (Root Mean Square, Karekök Ortalama) hataları farklı SNR ve sektör sayıları için analiz edilmiştir. Şekil 4.2b’ de verilen 4 sektörlü, her sektörde 3 anten bulunan yön bulma yapısı için SNR a bağlı hata analizi yapılmıştır. Genlik karşılaştırma metodunda gelen sinyalin çok uzaktan, aralarında 5 cm olan antenlere geldiği düşünüldüğünde aynı sektörde

bulunan antenler sinyali aynı güçte alacağı için sektörlerde bulunan anten sayısının yön bulma performansına bir etkisi olmamaktadır. Bu nedenle benzetimlerde farklı sektörler kullanılacak ve her sektörde 2 ya da 3 anten olması, genlik karşılaştırma tabanlı yön bulma performansını etkilemeyecektir. Yapılan analizlerde 360 derece kapsama sağlanabilmesi için, 4 sektörlü yapılar için 3 dB hüzme genişliği 90° , 6 sektörlü yapılar için hüzme genişliği 60° ve 8 sektörlü yapılar için hüzme genişliği 45° olan antenler kullanılmıştır. Arama Aralığı -180 derece ile 180 derece arasında 1 derece çözünürlükte olup 100 Monte Carlo denemesi yapılarak benzetimler gerçekleştirilmiştir. SNR 15 dB, 20 dB ve 25 dB; frekans 8 GHz olarak ayarlanmıştır. Bu özellikler göz önüne alınarak, farklı SNR değerleri için genlik karşılaştırma tekniği uygulanması sonucu oluşan hata sonuçları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. $-180 - 180$ derece aralığında 1 derece çözünürlükle gelen tehdit sinyalinin kestirim analizi için gerçekleştirilen 100 Monte Carlo denemesi yapılarak oluşturulan 4, 6 ve 8 sektörlü yapıya ait genlik karşılaştırma algoritması sonucunda her bir gelen açı için kestirim sonuçları Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



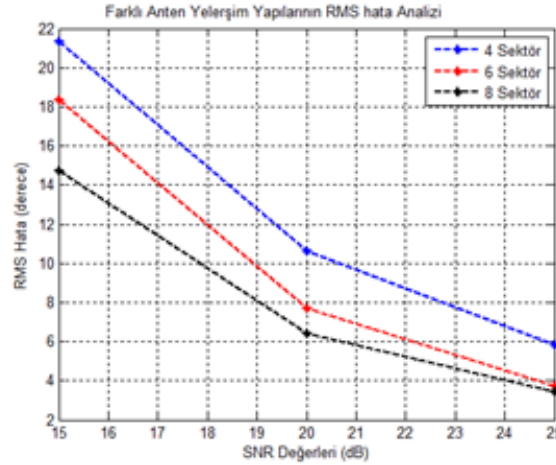
Şekil 5. 3: (a) 4 sektörlü, (b) 6 sektörlü, (c) 8 sektörlü yön bulma sistemlerinde MLE sonucu oluşan RMS hata.



(c)

Şekil 5.3 (Devam): (a) 4 sektörlü, (b) 6 sektörlü, (c) 8 sektörlü yön bulma sistemlerinde MLE sonucu oluşan RMS hata.

Sektörel bazda farklı anten yerleşim yapılarının 8 GHz frekansta farklı SNR değerleri için gerçekleştirilen RMS hata analizi Şekil 5.4 ve ortalama hata değerleri Çizelge 5.1’ de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi her üç dizilimde de SNR arttıkça ortalama hata azalmaktadır. Ayrıca sektör sayısı da ortalama hatayı azaltan diğer bir faktördür. Sektör sayısı arttıkça daha fazla anten kullanılmaktadır ve kullanılan bu antenlerin hüzme genişliği daha dardır. Örneğin 4 sektörlü anten yerleşim yapısı için 90° , 6 sektörlü yerleşim yapısı için 60 derece hüzme genişliğine sahip antenler kullanılmaktadır. Daha dar hüzme genişliğine sahip daha fazla anten kullanılması yön bulma doğruluğunu arttırmakta ve bu nedenle de RMS hata değerleri düşmektedir.



Şekil 5. 4: Farklı sektör sayılarının ortalama RMS hataya etkisi.

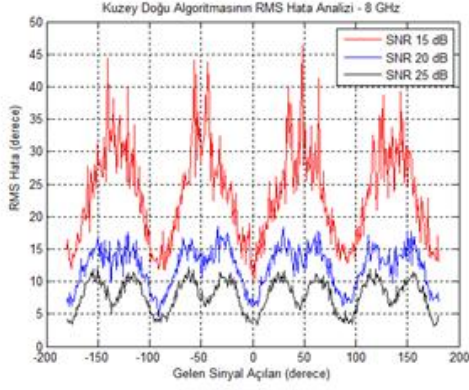
Çizelge 5. 1 : MLE sonucu farklı sektörlerin ortalama RMS hata değeri.

SNR (dB)	4 Sektör Ortalama RMS Hata	6 Sektör Ortalama RMS Hata	8 Sektör Ortalama RMS Hata
15	21.3030	18.3402	14.7210
20	10.6542	7.6770	6.3981
25	5.8037	3.7517	3.4192

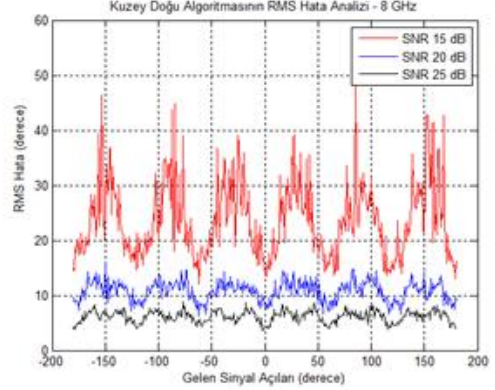
Şekil 5.4 ve Çizelge 5.1’ de gösterilen analizler genlik karşılaştırma tekniklerinden en büyük olabilirlik kestirimi algoritması ile yön bulma işleminin başarımını göstermektedir. Genlik karşılaştırma hatasının SNR ile değiştiği kolaylıkla görülebilmektedir. 25 dB SNR değerinde 4 sektörlü yön bulma yapısının genlik karşılaştırma hatası yaklaşık 6 derece olarak ölçülmektedir. Genlik karşılaştırma performansını etkileyen diğer parametre ise antenlerin yerleşim konfigürasyonudur. Sektör sayısı arttıkça yön bulma sistemi daha yüksek başarımlarda yön kestirimi gerçekleştirebilmektedir. Çizelge 5.1’ de 8 sektörlü anten yapısı ve 25 dB SNR değerine baktığımız zaman yön bulma hatasının yaklaşık 3.5 derece olduğu görülmektedir. Ancak unutulmamalıdır ki sektör sayısının artması aynı zamanda kullanılan anten sayısının da artması anlamına gelmektedir. Bu da ek maliyet ve antenleri yerleştirecek alan bulma gibi sıkıntılar doğurabilmektedir.

5.2.2 Kuzey – doğu oranı

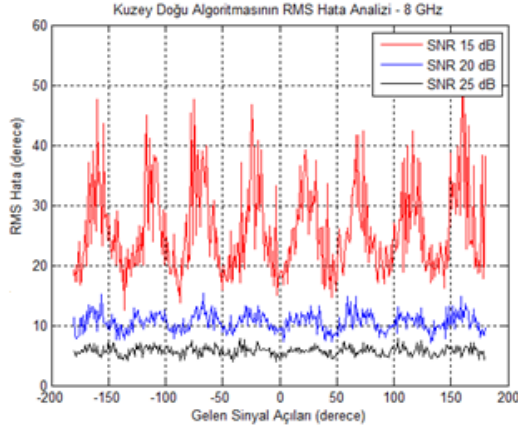
Kuzey – Doğu oranı algoritması ile genlik karşılaştırma tekniği ideal anten örüntüleri için kullanılan bir tekniktir. Bu bölümde 8 GHz frekans, 15, 20 ve 25 dB SNR değerleri altında 4, 6 ve 8 sektörlü yerleşim yapıları için kuzey doğu oranı algoritması ile genlik karşılaştırma sonucu oluşan RMS hata analizi yapılmıştır.



(a)

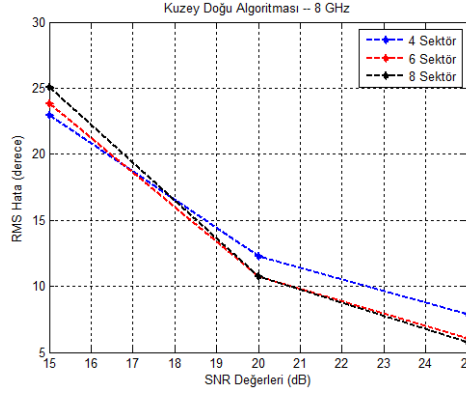


(b)



(c)

Şekil 5. 5: (a) 4 sektörlü, (b) 6 sektörlü, (c) 8 sektörlü yön bulma sistemlerinde Kuzey Doğu Oranı algoritması sonucu oluşan RMS hata.



Şekil 5. 6: Kuzey - Doğu Oranı sonucu Farklı sektör sayılarının ortalama RMS hataya etkisi.

Çizelge 5. 2 : Kuzey - Doğu oranı sonucu farklı sektörlerin ortalama RMS hata değeri.

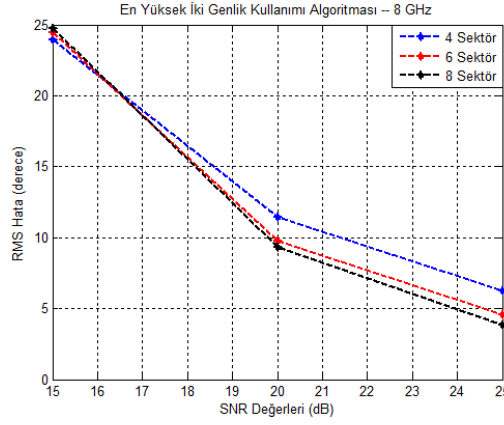
SNR (dB)	4 Sektör Ortalama RMS Hata	6 Sektör Ortalama RMS Hata	8 Sektör Ortalama RMS Hata
15	22.9589	23.8444	25.0956
20	12.2470	10.7282	10.7381
25	7.8922	6.0894	5.7905

Kuzey doğu oranı algoritması incelendiği zaman SNR arttıkça hata oranının azaldığı görülebilmektedir. Ayrıca sektör sayısı da hata oranını etkilemektedir. Sektör sayısı arttıkça daha çok anten ve daha dar hüzmeye sahip anten kullanıldığı için daha doğru genlik kestirimi yapılabilmektedir. Ancak sektör sayısının etkisi en büyük olabirlik kestiriminde olduğu kadar değildir. Çizelge 5.2’ de sektör sayısının artmasıyla hata değerleri yaklaşık 1, 2 derece azalmaktadır. Sektör sayısı artırıldığı zaman MLE algoritmasında hata oranlarındaki azalma 3 derece mertebelerindeyken; kuzey – doğu algoritmasında bu etki görülememektedir. Bunun nedeni sinyali alan her antenin kuzey ve doğu yönündeki bileşenlerinin kullanılarak yön bulma operasyonuna dahil olmasıdır.

5.2.3 En güçlü iki genlik kullanımı

En güçlü iki genlik kullanımı metodu kuzey – doğu algoritmasının çalışma yapısına çok benzemektedir. Farklı olarak tüm antenler yerine, en yüksek genliği alan iki anten kullanılmaktadır. Böylece diğer antenlerde gürültü nedeniyle oluşan gücün sebep olduğu etki engellenmektedir. En güçlü iki genlik kullanımı, yön bulma

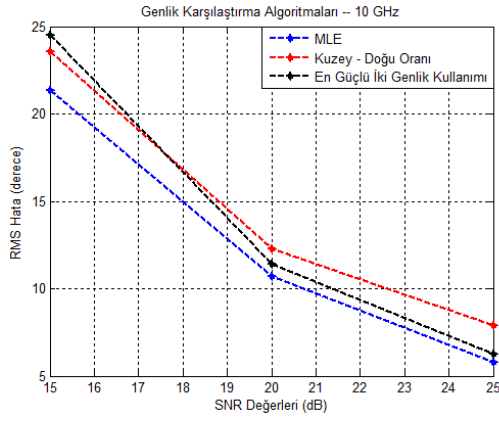
sistemlerinde kullanılan genlik karşılaştırma algoritmalarından kuzey – doğu algoritmasına göre daha düşük açı kestirim hatası yapmaktadır. Şekil 5.7, 8 GHz frekansta her sektörde 3 anten bulunduğu durumda sektör sayısının farklı SNR değerlerinde yön bulma performansına etkisini göstermektedir.



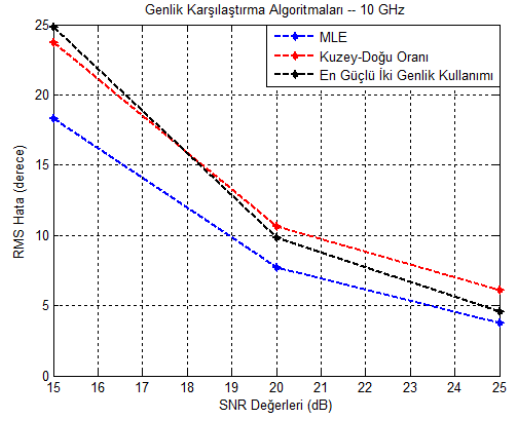
Şekil 5. 7: En Güçlü İki Genlik Kullanımı sonucu farklı sektörlerin ortalama RMS hataya etkisi.

Çizelge 5. 3 : En Güçlü İki Genlik Kullanımı sonucu farklı sektörlerin ortalama RMS hata değeri.

SNR (dB)	4 Sektör Ortalama RMS Hata	6 Sektör Ortalama RMS Hata	8 Sektör Ortalama RMS Hata
15	23.9149	24.4877	24.7343
20	11.4532	9.7820	9.2986
25	6.2653	4.5883	3.8247



(a)



(b)

Şekil 5. 8: (a) 4 sektör 12 antenli, (b) 6 sektör 18 antenli yön bulma yapılarında genlik karşılaştırma algoritmalarının analizi.

Çizelge 5. 4 : 4 sektör 12 antenli yerleşim yapılarında Genlik Karşılaştırma algoritmalarının ortalama RMS hata değerleri.

SNR (dB)	En Büyük Olabilirlik Kestirimi	Kuzey – Doğu Oranı	En Güçlü İki Genlik Kullanımı
15	21.3507	23.5532	24.5038
20	10.6879	12.2821	11.4214
25	5.7796	7.8739	6.2792

Çizelge 5. 5 : 6 sektör 18 antenli yerleşim yapılarında Genlik Karşılaştırma algoritmalarının ortalama RMS hata değerleri.

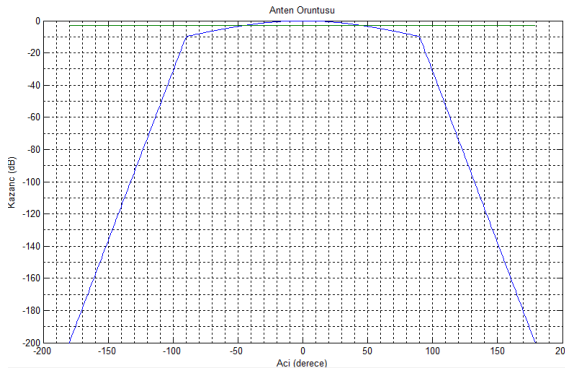
SNR (dB)	En Büyük Olabilirlik Kestirimi	Kuzey – Doğu Oranı	En Güçlü İki Genlik Kullanımı
15	18.3235	23.7096	24.7917
20	7.6886	10.6389	9.8140
25	3.7752	6.0950	4.6021

Şekil 5.8, Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5’ de gösterilen analizler; 4, 6 sektör her sektörde 3 anten bulunan yön bulma yapıları kullanılarak 10 GHz frekansta 15, 20 ve 25 dB SNR değerlerinde oluşturulmuş sinyalin geliş açısı kestirimleri sonucu oluşan RMS hata oranlarını göstermektedir. Analizler, genlik karşılaştırma metotlarından en

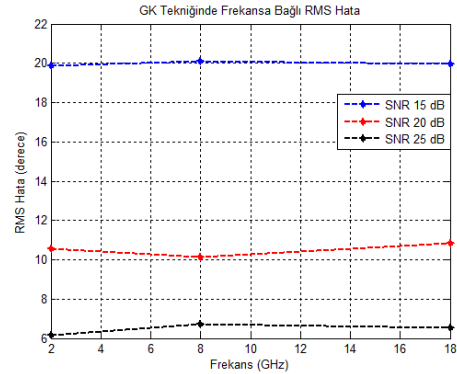
büyük olabilirlik kestirimi, kuzey doğu oranı ve en güçlü iki genlik kullanımı algoritmalarının farklı sektörler ve farklı SNR değerleri için birbirleriyle karşılaştırılması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda sektör sayısından bağımsız olarak en büyük olabilirlik kestirimi algoritmasının diğer iki algoritmadan daha yüksek başarımlarda açı kestirimi yaptığı görülmektedir. En güçlü iki genlik kullanımı algoritması ile de kuzey – doğu oranı algoritmasından Bölüm 5.2.2 ve Bölüm 5.2.3'de belirtilen sebeplerden dolayı ortalama 1.5 derece daha az hata ile açı kestirimi yapıldığı görülmektedir. Algoritmaların ortalama RMS hata değerleri 4 ve 6 sektörlü yapılar için Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'de gösterilmiştir.

5.2.4 Frekansın genlik karşılaştırma tekniğine etkisi

Yön bulma sistemlerinde açı kestirim hatasını etkileyen bir diğer parametre de frekans parametresidir. Frekans, eğer anten örüntüsü frekanstan bağımsız ise genlik karşılaştırma yöntemlerinin sonuçlarına bir etki göstermemektedir. Bunun sebebi sektörlerde bulunan antenlerin özdeş olması ve frekans ile değişmeyen aynı örüntüye sahip olmasıdır. Şekil 5.10, 4 sektörlü anten yapıları için oluşturulmuş 15, 20 ve 25 dB SNR değerleri kullanılarak 2, 8 ve 18 GHz frekanslarındaki ortalama hata değişimini göstermektedir.



Şekil 5. 9: 4 sektörlü yerleşim yapısı için frekanstan bağımsız anten örüntüsü.



Şekil 5. 10: İdeal anten örüntüleriyle oluşturulmuş 4 sektörlü yerleşim yapıları için frekansın ortalama RMS hataya etkisi.

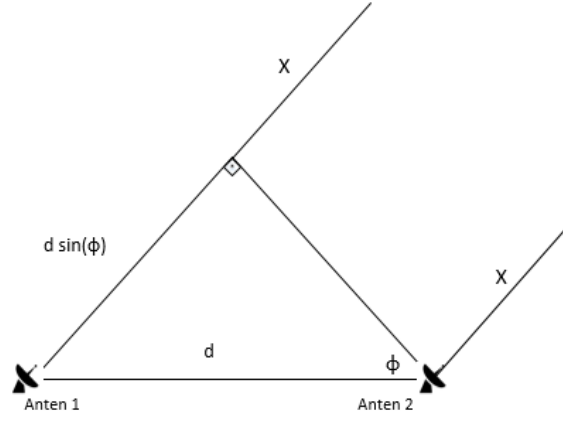
Çizelge 5. 6 : İdeal anten örüntüleriyle oluşturulmuş 4 sektörlü yerleşim yapıları için frekansa göre ortalama RMS hata değerleri.

Frekans (GHz)	SNR	SNR	SNR
	15 dB Ortalama RMS hata	20 dB Ortalama RMS hata	25 dB Ortalama RMS hata
2	19.8745	10.5779	6.1724
8	20.1025	10.1470	6.7482
18	19.9714	10.8196	6.5217

Frekansın genlik karşılaştırma tekniğinde oluşturduğu etkiyi görebilmek için gerçeğe yakın ve frekansa bağımlı anten örüntüleri ile oluşturulmuş anten yapıları kullanılmalıdır. Bu tarz sistemlerde farklı frekans değerlerinde oluşturulan anten örüntüleri ile antenlerin aldığı kazançlar da farklı olacağı için, frekansın genlik karşılaştırma sistemlerindeki etkisi daha rahat görülebilecektir.

5.3 Faz Karşılaştırma Analizleri

Faz karşılaştırma metodunda sıklıkla kullanılan interferometrik yapı Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Bu yapıda, aralarında d kadar uzaklık bulunan iki özdeş, aynı örüntülere sahip anten yer almaktadır. Bu iki antenle oluşturulan interferometre yapısında faz farkının oluşma sebebi, Şekil 5.11’de gösterilen interferometre yapısında Anten 2 ye gelen sinyalin, Anten 1’ e göre $d \sin(\phi)$ kadar daha yol kat ettikten sonra ulaşmasıdır. Eğer tehdit sinyali antenlere eşit mesafede gelirse faz farkı sıfır olmaktadır [26].



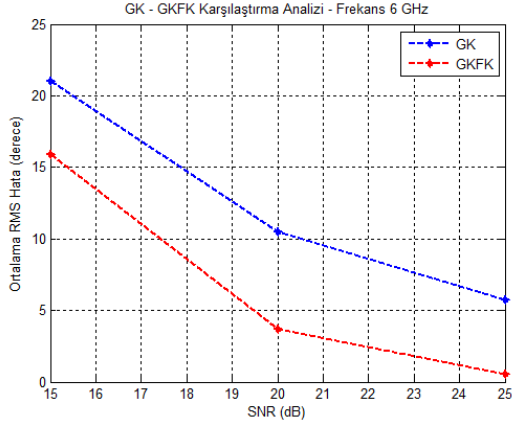
Şekil 5. 11: İnterferometrik yapı.

Şekil 5.11’de gösterilen interferometrik yapıda iki anten arasında oluşan faz farkı Denklem (5.1) ile verilmektedir.

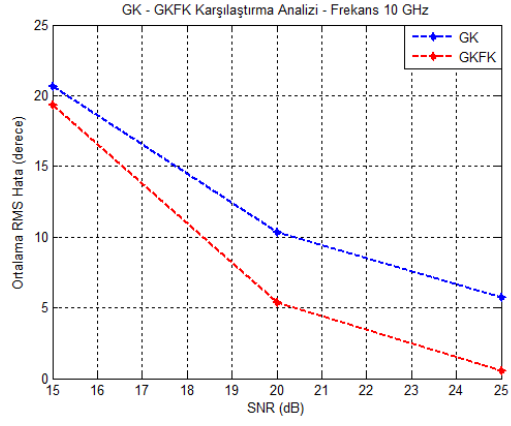
$$\Delta\theta = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin(\phi) \quad (5.1)$$

5.3.1 Genlik ve genlik faz karşılaştırma metotlarının karşılaştırılması

Faz karşılaştırma işlemi sonrasında Bölüm 4.4’ de gösterilen yön belirsizlikleri oluşmaktadır. Bu yön belirsizlikleri, genlik karşılaştırma sonucu kestirilen açıyı ve bu açığa bağlı olarak oluşturulan bir tarama aralığını kullanarak çözülebilmektedir. Faz karşılaştırma daha hassas ve daha yüksek doğrulukta yön kestirimi yapabildiği için yüksek hassasiyet gerektiren durumlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 5.12 ve 13’de farklı sektörler için SNR ve frekans değişimlerinde GK ve GKFK performansı analiz edilmiştir. Yapılan benzetimlerde 4 sektörlü 12 antenli ve 6 sektörlü 18 antenli yön bulma yapıları kullanılmıştır. Frekans 6 ve 10 GHz olarak ayarlanmıştır.



(a)



(b)

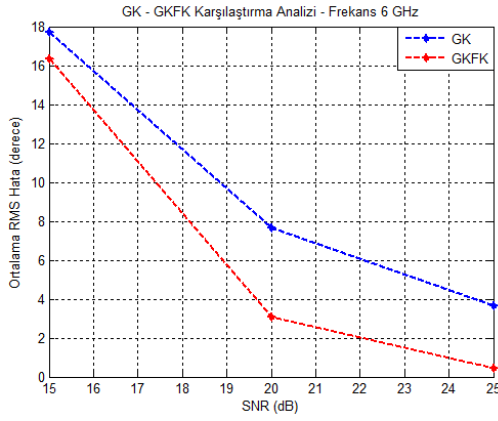
Şekil 5. 12: 4 sektörlü yapısı için (a) 6 GHz, (b) 10 GHz frekansta GK ve GKFK analizi.

Çizelge 5. 7: 4 sektörlü yerleşim yapısı için 6 GHz frekansta GK GKFK ortalama RMS hata değerleri.

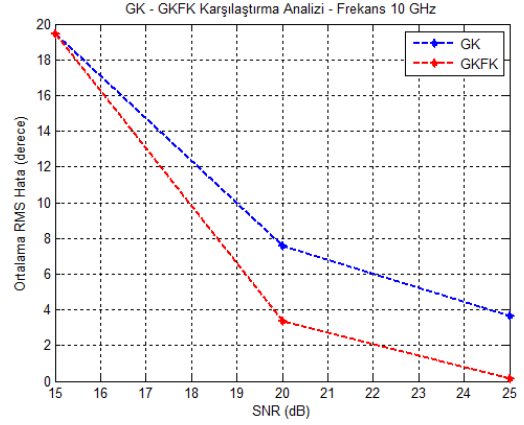
SNR (dB)	Genlik Karşılaştırma Ortalama RMS hata	Genlik - Faz Karşılaştırma Ortalama RMS hata
15	21.0124	15.9299
20	10.5111	3.6653
25	5.7037	0.5582

Çizelge 5. 8: 4 sektörlü yerleşim yapısı için 10 GHz frekansta GK GKFK ortalama RMS hata değerleri.

SNR (dB)	Genlik Karşılaştırma Ortalama RMS hata	Genlik - Faz Karşılaştırma Ortalama RMS hata
15	20.6837	19.3681
20	10.3596	5.4092
25	5.7239	0.5382



(a)



(b)

Şekil 5. 13: 6 sektörlü yapısı için (a) 6 GHz, (b) 10 GHz frekansta GK ve GKFK analizi.

Çizelge 5. 9: 6 sektörlü yerleşim yapısı için 6 GHz frekansta GK GKFK ortalama RMS hata değerleri.

SNR (dB)	Genlik Karşılaştırma Ortalama RMS hata	Genlik - Faz Karşılaştırma Ortalama RMS hata
15	17.7078	16.3446
20	7.6631	3.0804
25	3.6398	0.4607

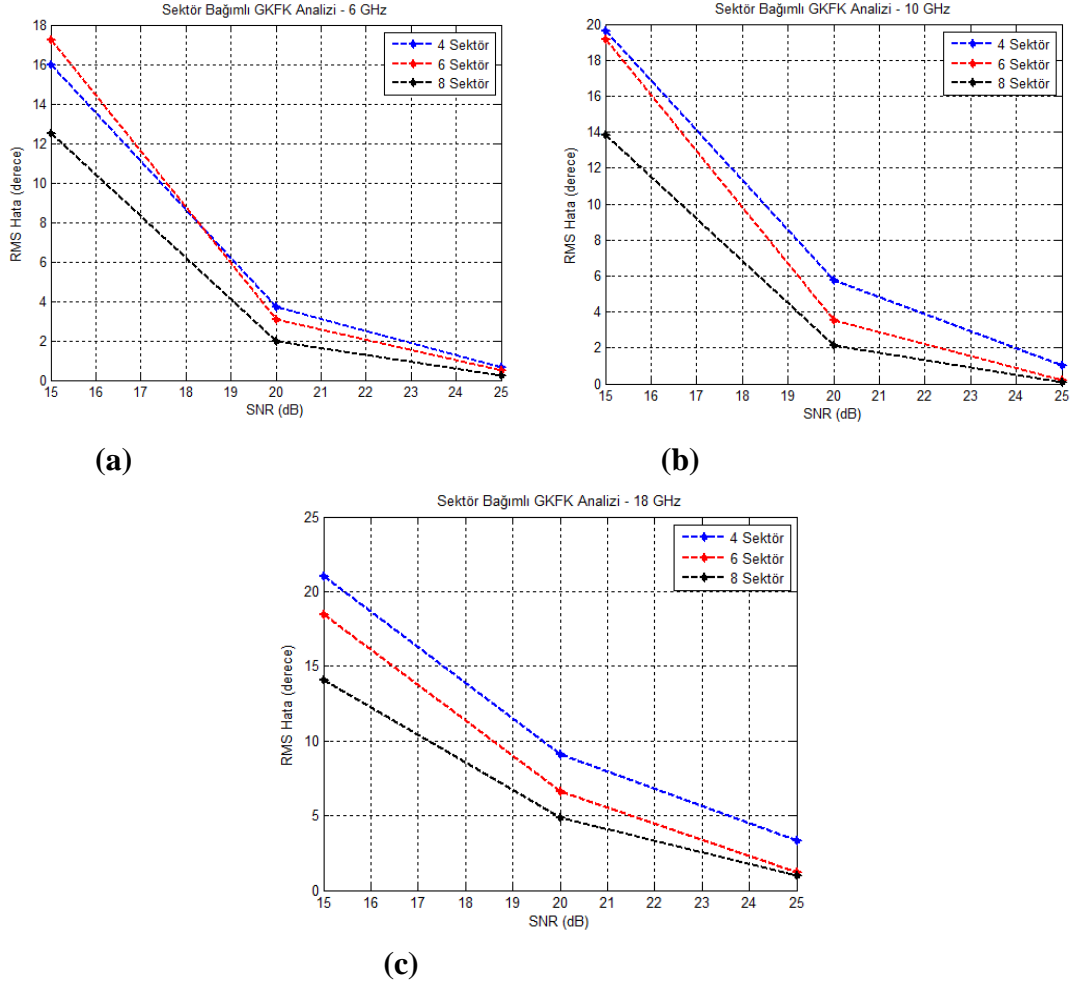
Çizelge 5. 10: 6 sektörlü yerleşim yapısı için 10 GHz frekansta GK GKFK ortalama RMS hata değerleri.

SNR (dB)	Genlik Karşılaştırma Ortalama RMS hata	Genlik - Faz Karşılaştırma Ortalama RMS hata
15	19.4219	19.4320
20	7.5920	3.3503
25	3.6655	0.1629

Frekans arttıkça faz karşılaştırma tekniğinin performansı açı belirsizlikleri tam olarak çözülemediğinden dolayı düşmektedir.

5.3.2 Genlik faz karşılaştırma metodunun sektörel bağımlılığı

6, 10 ve 18 GHz frekans değerlerinde, 15, 20 ve 25 dB SNR değerlerinde, 4 sektör 12 antenli, 6 sektör 18 antenli ve 8 sektör 24 antenli yön bulma yapılarında farklı sektörlerin GKFK yöntemine etkisi Şekil 5.14’de analiz edilmiştir.



Şekil 5. 14: (a) 6 GHz, (b) 10 GHz, (c) 18 GHz frekansta farklı sektörlerin GKFK tekniğine etkisi.

Çizelge 5. 11: Farklı frekans ve sektörler için GKFK tekniğinde ortalama RMS hata değerleri.

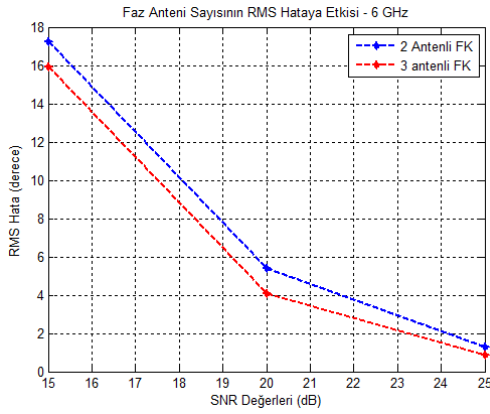
Frekans (GHz)	SNR (dB)	4 Sektör	6 Sektör	8 Sektör
6	15	15.9594	17.2164	12.4881
	20	3.7243	3.0847	1.9609
	25	0.6830	0.5030	0.2513
10	15	19.6414	19.1668	13.8384
	20	5.7534	3.5465	2.1606
	25	0.9981	0.1876	0.0660
18	15	21.0030	18.4927	14.0612
	20	9.1041	6.5800	4.8371
	25	3.3495	1.2401	0.9801

Yapılan benzetimler frekans, SNR ve farklı anten yerleşimleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.11'e bakıldığı zaman, SNR değerinin faz karşılaştırma metodunun doğruluğunu arttırdığı görülebilmektedir. Genlik karşılaştırma metodunda olduğu gibi faz karşılaştırma metodunda da yüksek SNR'da faz karşılaştırma hata değerlerinin düştüğünü ve sektör sayısı arttıkça RMS hata değerinin azaldığını görebilmekteyiz. Frekans değişimlerine bakarsak, frekansın artması interferometre yönteminde yön bulma doğruluğunu azaltmaktadır. Bunun nedeni, yüksek frekanslarda Bölüm 4.4'de gösterildiği gibi çok fazla açı belirsizliği olduğu için tam olarak çözülememesidir.

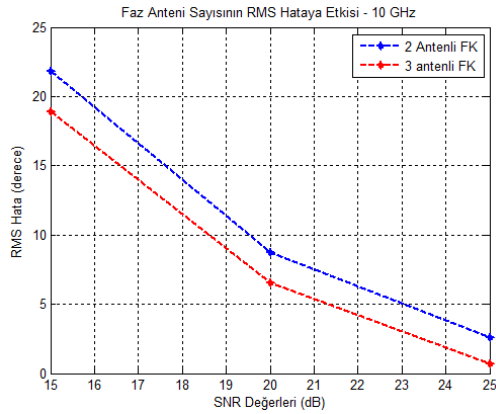
5.3.3 Genlik faz karşılaştırma metodunda kullanılan faz anteni sayısının etkisi

Faz karşılaştırma yöntemi sonucunda; antenlerin istenilen aralıklarla yerleştirilememesi sorunundan kaynaklı olarak oluşan belirsizlik probleminin çözümlerinden birisi kullanılan faz anteni sayısının artırılmasıdır. Fiziksel kısıtlardan dolayı $\frac{\lambda}{2}$ den daha küçük aralıklarla yerleştirilemeyen anten sistemlerinde, interferometre yapılacak üçüncü bir anten daha sisteme dâhil edilebilmektedir.

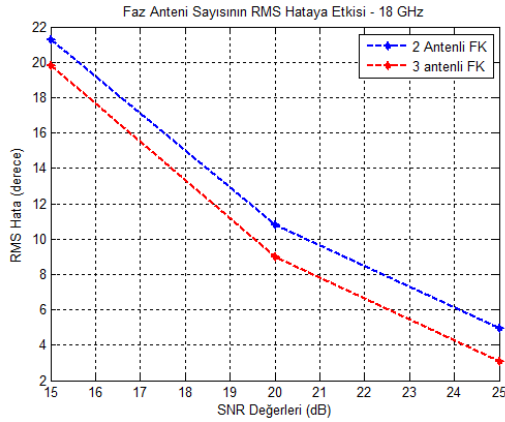
Bölüm 4.2’de, Şekil 4.2a; 4 sektörlü 8 antenli, Şekil 4.2b; 4 sektörlü 12 antenli yerleşim yapılarını göstermektedir. 4 sektör 8 antenli yerleşim yapısında her bir sektörde aralarında 5 cm bulunan iki anten kullanılmaktadır. 12 antenli yapıya dikkat edersek, her sektörde aralarında 5 cm olan antenlerin yanında referans antenden 17.5 cm uzaklıkta başka bir anten daha kullanılmaktadır. Bu 3. Anten, oluşan belirsizliklerin çözülebilmesi amacıyla yerleştirilmektedir. Şekil 5.15’de kullanılan üçüncü antenin RMS hata değerlerine etkisi incelenmiştir.



(a)



(b)

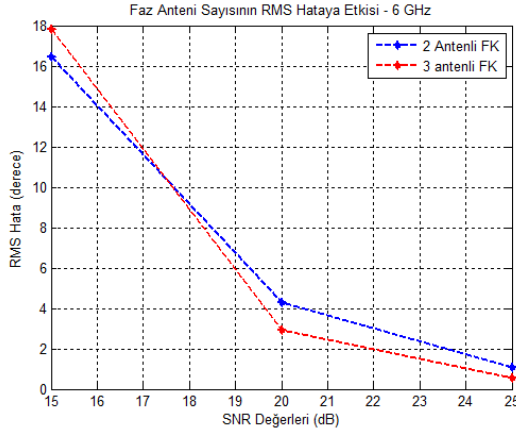


(c)

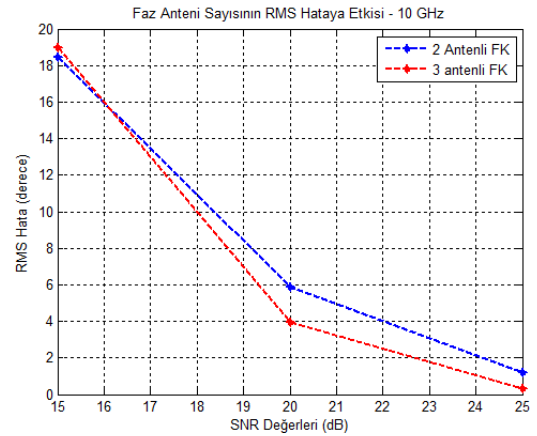
Şekil 5. 15: 4 sektörlü yerleşim yapısında (a) 6 GHz, (b) 10 GHz, (c) 18 GHz frekansta gerçekleştirilen GKFK için faz anten sayısının etkisi.

Çizelge 5. 12: 4 sektörlü yerleşim yapısında farklı frekanslarda 2 ve 3 antenle GKFK tekniğinde oluşan ortalama RMS hata değerleri.

Frekans (GHz)	SNR (dB)	2 Anten Ortalama RMS hata	3 Anten Ortalama RMS hata
6	15	17.2141	15.9217
	20	5.3872	4.1010
	25	1.2643	0.8516
10	15	21.8328	18.8861
	20	8.7601	6.5529
	25	2.6226	0.6777
18	15	21.2645	19.7922
	20	10.8178	9.0044
	25	4.9688	3.0914

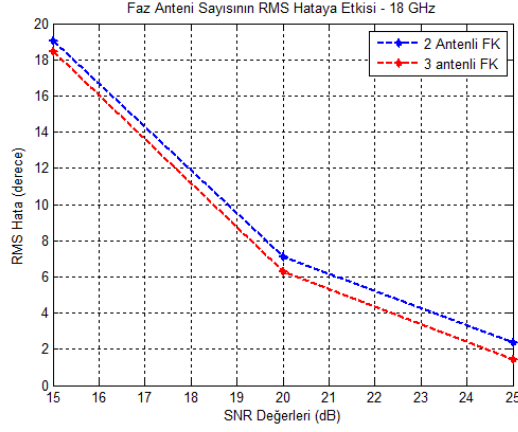


(a)



(b)

Şekil 5. 16: 6 sektörlü yerleşim yapısında (a) 6 GHz, (b) 10 GHz, (c) 18 GHz frekansta gerçekleştirilen GKFK için faz anten sayısının etkisi.

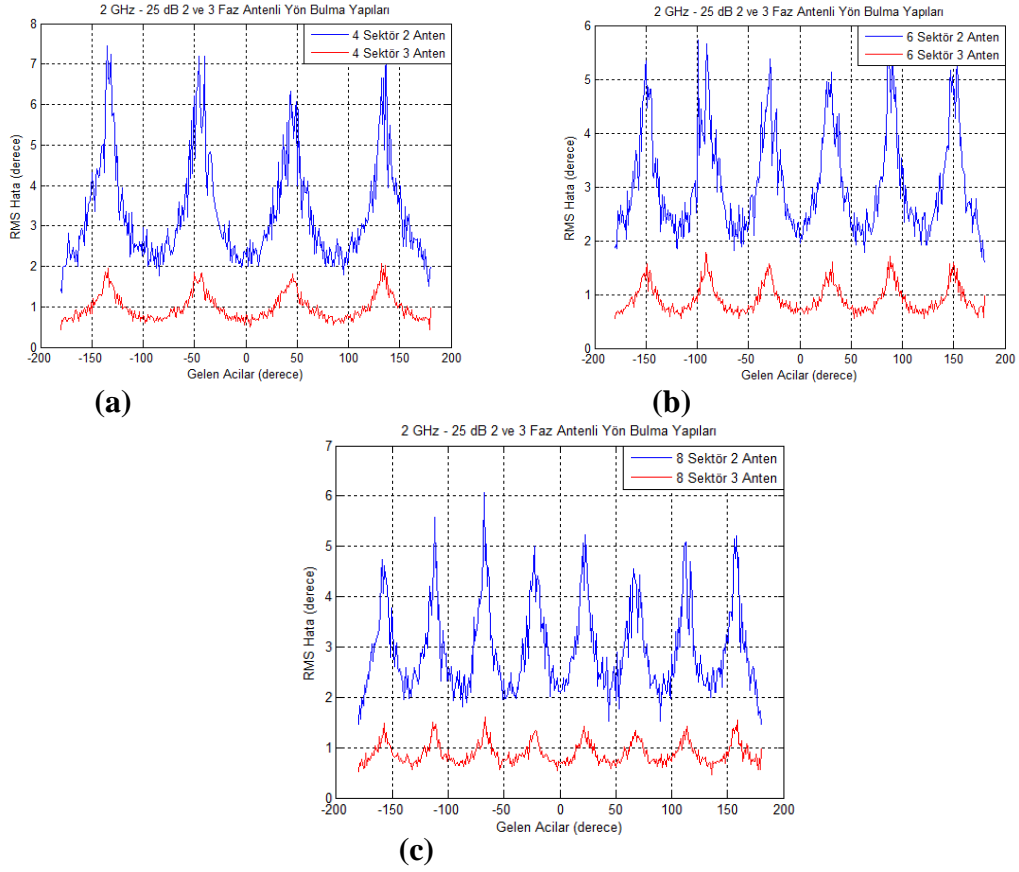


(c)

Şekil 5.16 (Devam): 6 sektörlü yerleşim yapısında (a) 6 GHz, (b) 10 GHz, (c) 18 GHz frekansta gerçekleştirilen GKFK için faz anten sayısının etkisi.

Çizelge 5. 13: 6 sektörlü yerleşim yapısında farklı frekanslarda 2 ve 3 antenle GKFK tekniğinde oluşan ortalama RMS hata değerleri.

Frekans (GHz)	SNR (dB)	2 Anten Ortalama RMS hata	3 Anten Ortalama RMS hata
6	15	16.4427	17.8237
	20	4.3123	2.9062
	25	1.0721	0.5406
10	15	18.4418	18.9872
	20	5.8734	3.9635
	25	1.1987	0.3385
18	15	19.0302	18.4230
	20	7.1130	6.2590
	25	2.3600	1.4527



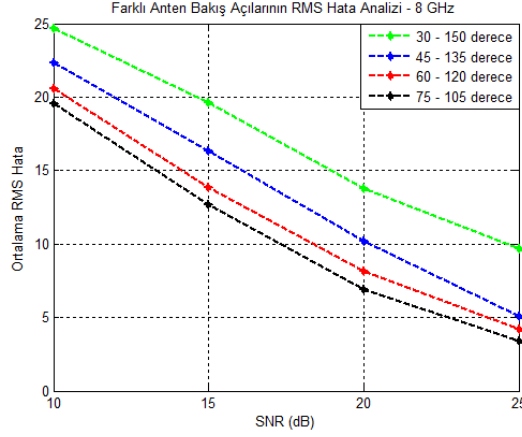
Şekil 5. 17: (a) 4 sektör, (b) 6 sektör, (c) 8 sektör 2 GHz frekansta GKFK yönteminde faz anten sayısının etkisi.

Faz karşılaştırma yönteminde yüksek frekanslarda birden fazla yön kestirimi nedeniyle oluşan yön belirsizliklerine bağlı yön bulma hataları oluşmaktadır. Bu yön belirsizliklerinin çözülmesi amacıyla gerçekleştirilen yöntemlerden birisi de üçüncü bir faz anteni kullanımıdır. Gerçekleştirilen benzetimlerde, referans antene 5 cm uzaklıkta komşu bir faz anteni, referans antene 17.5 cm uzaklıkta başka bir komşu faz anteni olarak iki adet faz anteni kullanılmıştır. Bu benzetimler sonucunda 4, 6 ve 8 sektörlü anten yapılarında iki ve üç faz antenli yön bulma hataları analiz edilmiştir. Benzetim farklı SNR ve farklı frekans değerleri için tekrarlanmıştır. Sonuç olarak faz karşılaştırma yönteminde, oluşan belirsizliklerin giderilmesi için uygulanan 3. anten yerleştirme işlemiyle; belirsizlikler azaltılarak yön bulma performansı artırılmıştır.

5.4 Kırıklı Yapılarda Hibrit Genlik Faz Karşılaştırma Benzetimleri

Bölüm 4.5’de gerçekleştirilen analizler sonucunda hüzm genişlikleri 90 derece olarak seçilen kırıklı anten yapıları kullanılarak oluşturulan yön bulma sistemlerinde gerçekleştirilen açı kestirimlerinin 10, 15, 20 ve 25 dB SNR değerlerindeki analizleri

Şekil 5.18’de gösterilmiştir. Kırıklı yapıya sahip antenler kullanılarak iki antenle tarama aralığına bağlı olarak yüksek performans sağlayan yön bulma operasyonları gerçekleştirilebilmektedir. Gerçekleştirilen analizlerde kırıklı yapıdaki antenler, 30 – 150, 45 – 135, 60 – 120 ve 75 – 105 derecelere bakacak şekilde ayarlanarak 0 – 180 arasında tarama sağlanmış; 30 – 150 derece arasında gelen sinyallerin kestirimleri için ortalama RMS hataları incelenmiştir.



Şekil 5. 18: Kırıklı yapılarda farklı bakış açılarının hibrit GKFK yönteminde ortalama RMS hataya etkisi.

Çizelge 5. 14: Kırıklı yapılarda farklı bakış açılarının hibrit GKFK yönteminde ortalama RMS hata değerleri.

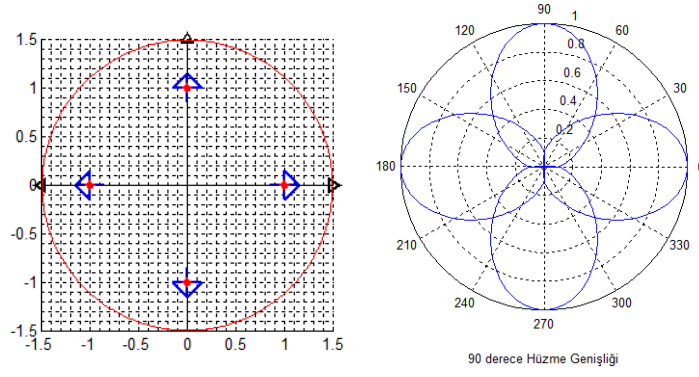
Anten Bakış Açıları	SNR 10 dB	SNR 15 dB	SNR 20 dB	SNR 25 dB
30 – 150 Derece	24.7027	19.6581	13.7668	9.6560
45 – 135 Derece	22.3569	16.3028	10.2121	5.0634
60 – 120 Derece	20.5468	13.8214	8.1144	4.1784
75 – 105 Derece	19.5857	12.6896	6.8883	3.4220

Şekil 5.18’de kırıklı yapıya sahip antenlerle oluşturulan yön bulma yapılarının hata analizi gösterilmiştir. Antenler farklı açılara baktırılarak oluşturulan sistemlerde ortalama RMS hataları karşılaştırılmıştır. 75 – 105 derecelere bakan antenlerle

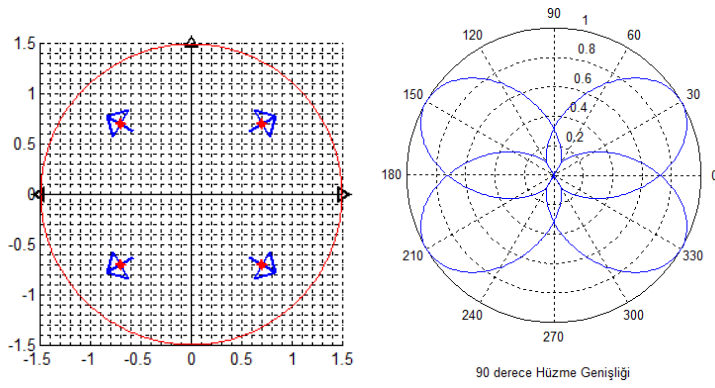
oluşturulan sistemde yön bulma performansının diğer sistemlere göre daha iyi olduğu gösterilmiştir. Antenler arası açıların çok fazla olması daha az açıdan yüksek doğrulukta yön kestirimi yapılması nedeniyle, kestirim hatasını arttırmaktadır. Antenler arasındaki açılar azladıkça 30 – 150 derece arasında hüzmeye genişliğine bağlı olarak daha çok açıdan daha yüksek doğrulukta yön kestirimi yapılmaktadır.

5.5 Farklı Anten Yerleşim Senaryoları

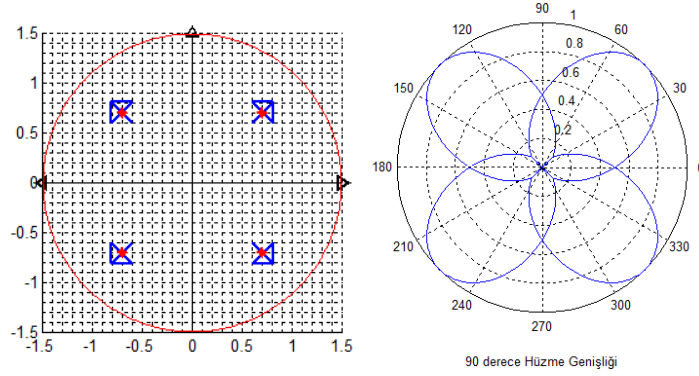
4,6 ve 8 sektörlü anten yapılarında her bir sektörde iki ya da üç adet faz anteni kullanılarak oluşturulan Bölüm 4.3’ de gösterilen yön bulma sistemlerinde, farklı SNR değerlerinde oluşan açı kestirim hataları Bölüm 5.1’ de analiz edilmiştir. Bu yapılarla her bir sektörde kullanılan antenler aynı yöne bakmakta ve özdeş anten örüntülerine sahip olmaktadır. Antenler arasında 5 cm gibi kısa bir mesafe olduğu ve tehdit sinyalinin çok uzaktan geldiği düşünüldüğü zaman, genlik karşılaştırma ile yön bulma operasyonlarında gerçekleştirilen açı kestirimleri için her sektörden bir referans anten seçmek tüm antenleri seçmekle aynı sonucu doğurmaktadır. Sektörlerde bulunan aynı yöne bakan antenler gelen sinyali aynı genlik ve kazanç ile almaktadırlar. Yön bulma sistemlerinde farklı anten yerleşimlerinin ortalama açı kestirim hatalarını nasıl etkilediği bu bölümde analiz edilmiştir. Her bir sektörde bulunan referans antenlerin bakış yönleri değiştirilerek tehdit unsurlarından gelen sinyalleri farklı kazançlarla, dolayısıyla farklı genliklerle almaları sağlanmıştır. Bu yerleşimlerde kullanılan antenler Çizelge 5.15’de gösterilen farklı açılara baktırılarak sabit bakış açılı sistemlerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar 15, 20 ve 25 dB SNR, 8 GHz frekans, 4 ve 6 sektörlü yapılar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.19 – 23 arasında verilen şekillerde farklı anten bakış açılarıyla oluşturulmuş 4 sektörlü farklı dizilimler ve hüzmeye genişlikleri gösterilmiştir.



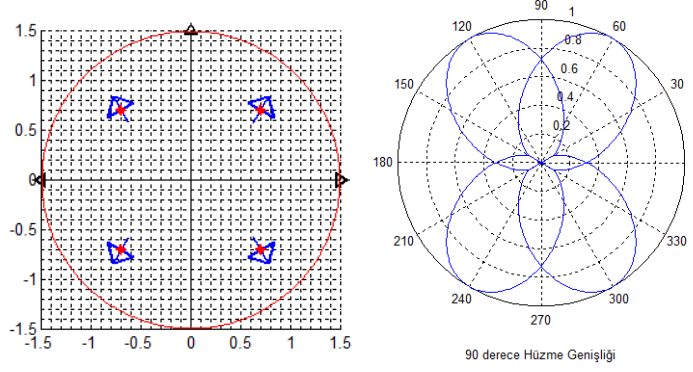
Şekil 5. 19: Standart 4-sektör yön bulma yapısı Dizilim 0.



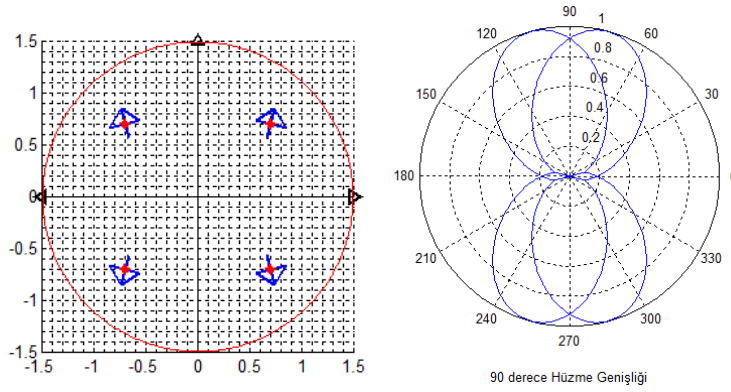
Şekil 5. 20: Farklı anten bakış açıları ile oluşturulmuş 4-sektör yön bulma yapısı Dizilim 1.



Şekil 5. 21: Farklı anten bakış açıları ile oluşturulmuş 4-sektör yön bulma yapısı Dizilim 2.



Şekil 5. 22: Farklı anten bakış açıları ile oluşturulmuş 4-sektör yön bulma yapısı Dizilim 3.



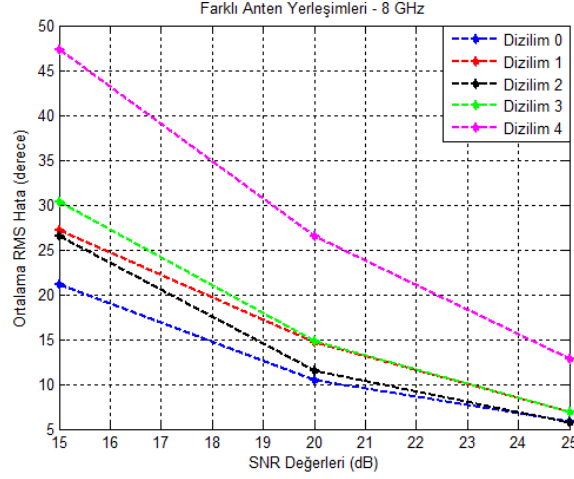
Şekil 5. 23: Farklı anten bakış açıları ile oluşturulmuş 4-sektör yön bulma yapısı Dizilim 4.

Çizelge 5. 15: 4 sektörlü yön bulma yapısında farklı anten bakış açıları.

Yön Bulma Yapısı	Anten 1 Bakış Açısı (derece)	Anten 2 Bakış Açısı (derece)	Anten 3 Bakış Açısı (derece)	Anten 4 Bakış Açısı (derece)
Dizilim 0	0	90	180	270
Dizilim 1	30	150	-150	-30
Dizilim 2	45	135	-135	-45
Dizilim 3	60	120	-120	-60
Dizilim 4	75	105	-105	-75

4 sektörlü ve Çizelge 5.15’de gösterilen bakış açılarına sahip antenlerle oluşturulan yön bulma yapıları için genlik karşılaştırma tekniklerinden en büyük olabilirlik

kestirimi algoritması sonucu oluşan ortalama RMS hata analizi Şekil 5.24’de gösterilmiştir.



Şekil 5. 24: 4 sektörlü farklı anten yerleşim yapılarının yön kestirim hatası.

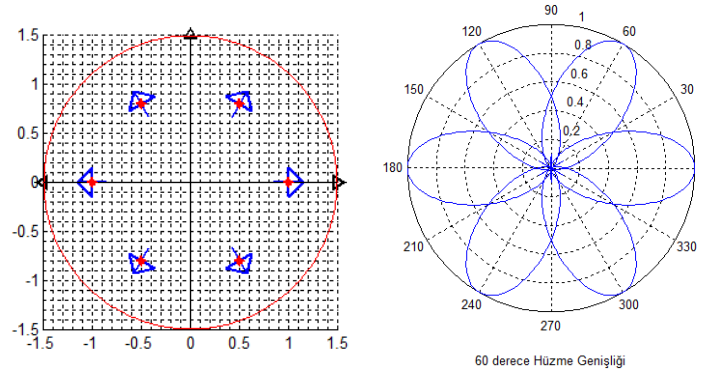
Çizelge 5. 16: 4 sektörlü farklı anten yerleşim yapılarının yön kestirim hatası değerleri.

Anten Yerleşimleri (4 anten)	SNR 15 dB Ortalama RMS hata (derece)	SNR 20 dB Ortalama RMS hata (derece)	SNR 25 dB Ortalama RMS hata (derece)
Dizilim 0 (Sabit Yerleşim)	21.0541	10.4590	5.7910
Dizilim 1	27.1288	14.6947	6.9144
Dizilim 2	26.5635	11.5507	5.7599
Dizilim 3	30.3745	14.8247	6.8989
Dizilim 4	47.3513	26.4742	12.7734

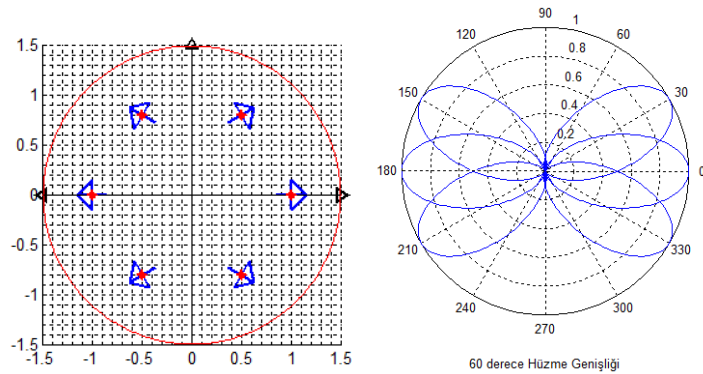
Şekil 5.24 ve Çizelge 5.16’da 4 sektörlü farklı anten bakış açılarıyla oluşturulmuş yön bulma sistemleri için, farklı SNR değerleri altında genlik karşılaştırma tekniklerinden en büyük olabilirlik kestirimi analizi yapılmış, oluşan ortalama RMS hata değerleri analiz edilmiştir. Farklı yerleşimler her bir antenin sırasıyla 30 derecelik, 45 derecelik, 60 derecelik ve 75 derecelik bakış açılarına bakacak şekilde ayarlandığı ve 360 derece tarama yaptığı görülmektedir. Bu analizler sonucunda her bir dizilimin hüzmeye genişliklerine bakılırsa; taradıkları alanlar kapsamında Dizilim 0 ve Dizilim 2 ile; Dizilim 1 ve Dizilim 3’ün birbirinin tamamlayıcısı şeklinde olduğu

görülmektedir. Bu noktada birbirinin tamamlayıcısı olarak Dizilim 0 – Dizilim 2 ve Dizilim 1 – Dizilim 3 çiftleri için 360 derecelik bir tarama alanı içerisinde; aynı aralık genişliğinde farklı açılarda yüksek doğrulukta yön kestirimi yaptığı söylenebilmektedir. Çizelge 5.15’de verildiği şekilde Dizilim 0 – Dizilim 2 için 0 ve 45 dereceye bakan antenler; Dizilim 1 – Dizilim 3 için ise 30 ve 60 dereceye bakan antenler denebilir ki bu da bu dizilim çiftlerinin, Şekil 5.19 – 23 arasında verilen hüzme grafiklerinde de belirtildiği üzere birbirinin tümleyeni olduğunu ve birbirine çok yakın doğrulukta yön kestirimi yaptığını göstermektedir.

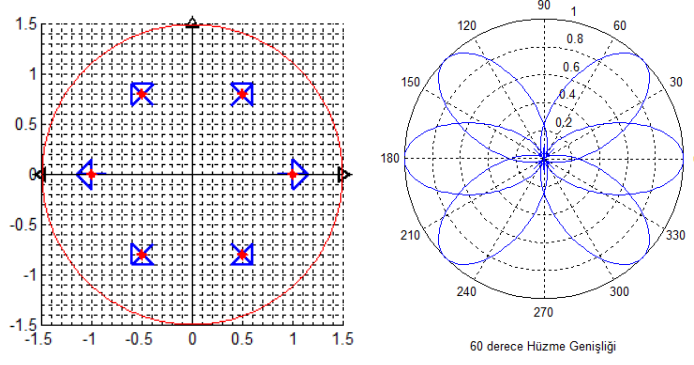
Şekil 5.25 – 28 arasında farklı anten bakış açıları ile oluşturulan 6 sektörlü yön bulma sistemleri ve antenler Çizelge 5.17’de gösterildiği gibi baktırılarak oluşturulan hüzme genişlikleri gösterilmiştir.



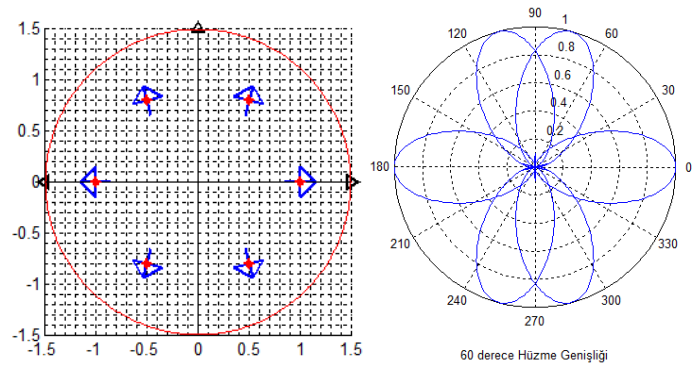
Şekil 5. 25: Standart 6-sektör yön bulma yapısı Dizilim 0.



Şekil 5. 26: Farklı anten bakış açıları ile oluşturulmuş 6-sektör yön bulma yapısı Dizilim 1.



Şekil 5. 27: Farklı anten bakış açıları ile oluşturulmuş 6-sektör 6-sektör 6-sektör yön bulma yapısı Dizilim 2.

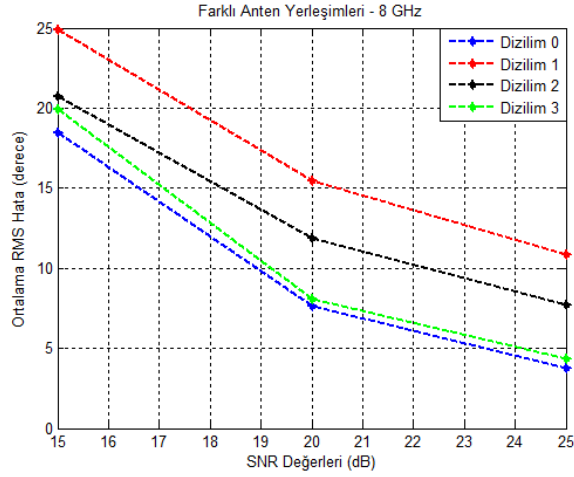


Şekil 5. 28: Farklı anten bakış açıları ile oluşturulmuş 6-sektör 6-sektör 6-sektör yön bulma yapısı Dizilim 3.

Çizelge 5. 17: 6 sektörlü yön bulma yapısında farklı anten bakış açıları.

Bakış Açısı (derece)	Dizilim 0	Dizilim 1	Dizilim 2	Dizilim 3
Anten 1	0	0	0	0
Anten 2	60	30	45	75
Anten 3	120	150	135	105
Anten 4	180	180	180	180
Anten 5	-120	-150	-135	-105
Anten 6	-60	-30	-45	-75

6 sektörlü ve Çizelge 5.17’de gösterilen bakış açılarına sahip antenlerle oluşturulan yön bulma yapısı için genlik karşılaştırma tekniklerinden en büyük olabilirlik kestirimi algoritması sonucu oluşan ortalama RMS hata analizi Şekil 5.29’da gösterilmiştir.



Şekil 5. 29: 6 sektörlü farklı anten yerleşim yapılarının yön kestirim hatası.

Çizelge 5. 18: 6 sektörlü farklı anten yerleşim yapılarının yön kestirim hatası değerleri.

Anten Yerleşimleri (4 anten)	SNR 15 dB Ortalama RMS hata (derece)	SNR 20 dB Ortalama RMS hata (derece)	SNR 25 dB Ortalama RMS hata (derece)
Dizilim 0 (Sabit Yerleşim)	18.4559	7.6494	3.7612
Dizilim 1	24.8796	15.4510	10.8271
Dizilim 2	20.7062	11.8655	7.7399
Dizilim 3	19.9071	8.0892	4.3838

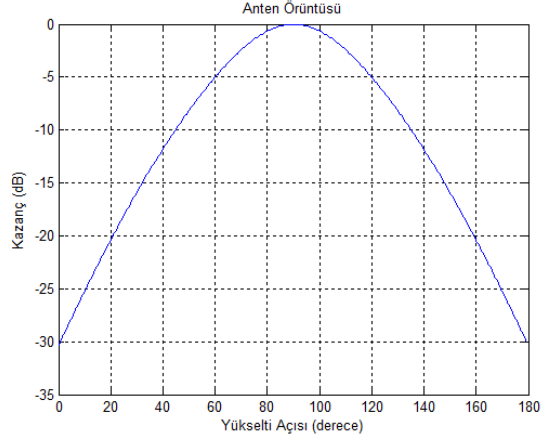
Şekil 5.25 – 28 arasında gösterilen sistemlerin genlik karşılaştırma tekniklerinden en büyük olabilirlik kestirimi sonucu 15, 20 ve 25 dB SNR ve 8 GHz frekans altında yön bulma hataları Şekil 5.29 ve Çizelge 5.18’de gösterilmiştir. Yapılan analizler sonucunda; 4 sektörlü yerleşim analizleri için anlatılan kavramların, 6 sektörlü anten yerleşim yapıları içinde geçerli olduğu; tarama aralığını hüzmeye yapılarıyla birlikte en optimal tarayabilen anten yerleşim sisteminin en az hatayla yön kestirimi yapabileceği anlaşılmaktadır. Dizilim 0 ve Dizilim 3 yön bulma yapıları ile daha geniş alandan gelen tehdit sinyallerinin daha yüksek kazançlarla alındığı, bu nedenle daha az hata ile yön kestirimi yapıldığı görülmektedir.

5.6 Sistemsel Hata Analizleri

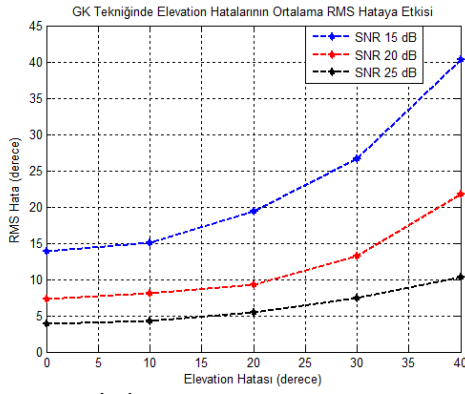
Radar uyarıcı sistemleri en önemli elektronik destek sistemlerinden bir tanesidir. Bu sistemler genellikle uçak ya da gemi platformları üzerine entegre edilerek hedef sistemlerin yönünü bulmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu tezde, uçak platformları üzerine yerleştirilen farklı dizilim kombinasyonlarına sahip anten yerleşim yapıları kullanılarak tehdit oluşturan radar sistemlerinin yönünü bulmak amacıyla gerçekleştirilen çalışmalar incelenmiştir. Uçak platformları üzerine yerleştirilen farklı sektör ve dizilim yapılarına sahip antenlerden oluşan yön bulma sistemleri, tehdit radarlarından gelen sinyalleri alırken bazı ölçüm hataları yapabilmektedir. Bu hatalar çevresel faktörlerden meydana gelebileceği gibi, anten yapısı, kanal yapısı ve elektronik sistemlerin doğasından kaynaklanan hatalar da olabilmektedir.

5.6.1 Yükselti (Elevation) açısı hataları

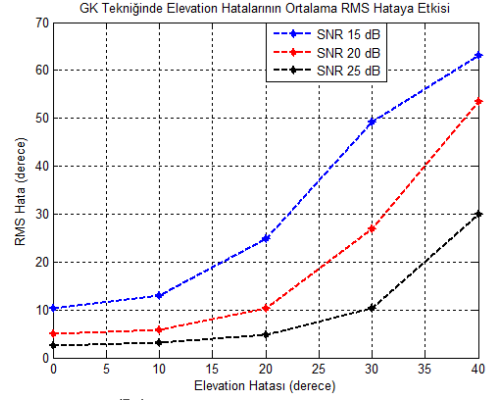
Uçak platformları üzerine yerleştirilmiş anten sistemleri ile yön bulma operasyonu gerçekleştirilirken azimuth ve elevation açıları tarama yapılmaktadır. Azimuth açısı uçağın yatay ekseninde yaptığı hareketlere bağlı olarak değişirken; elevation açıları uçağın dikeyde yaptığı hareketlere bağlı olarak değişmektedir. Elevation hataları, uçak platformlarında bulunan yön bulma sistemlerinin, gelen sinyalin anten düzlemine göre farklı bir yükselti açısından gelmesinden dolayı oluşmaktadır. Şekil 5.31 ve 32’de verilen şekillerde 4 sektör 12 antenli, 6 sektör 18 antenli, 8 sektör 24 antenli yön bulma yapıları kullanılarak; 15, 20, 25 dB SNR’da, 10 GHz frekansta gelen sinyallerin antenler tarafından alınırken, 0, 10, 20, 30 ve 40 derece elevation hatası yaptığı durumlarda, elevation hatasının GK ve GKFK teknikleri ile yön bulma performansına etkileri incelenmiştir. Şekil 5.30’da antenlerin yükselti yönündeki anten örüntüsü gösterilmiştir.



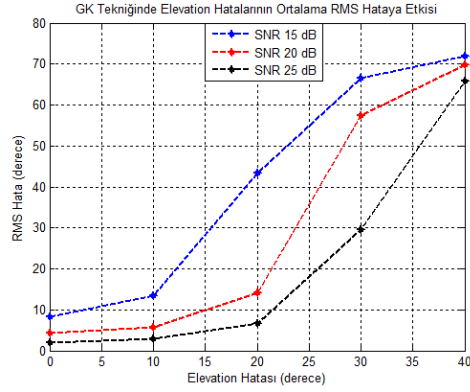
Şekil 5. 30: Yükselti yönündeki anten örüntüsü.



(a)

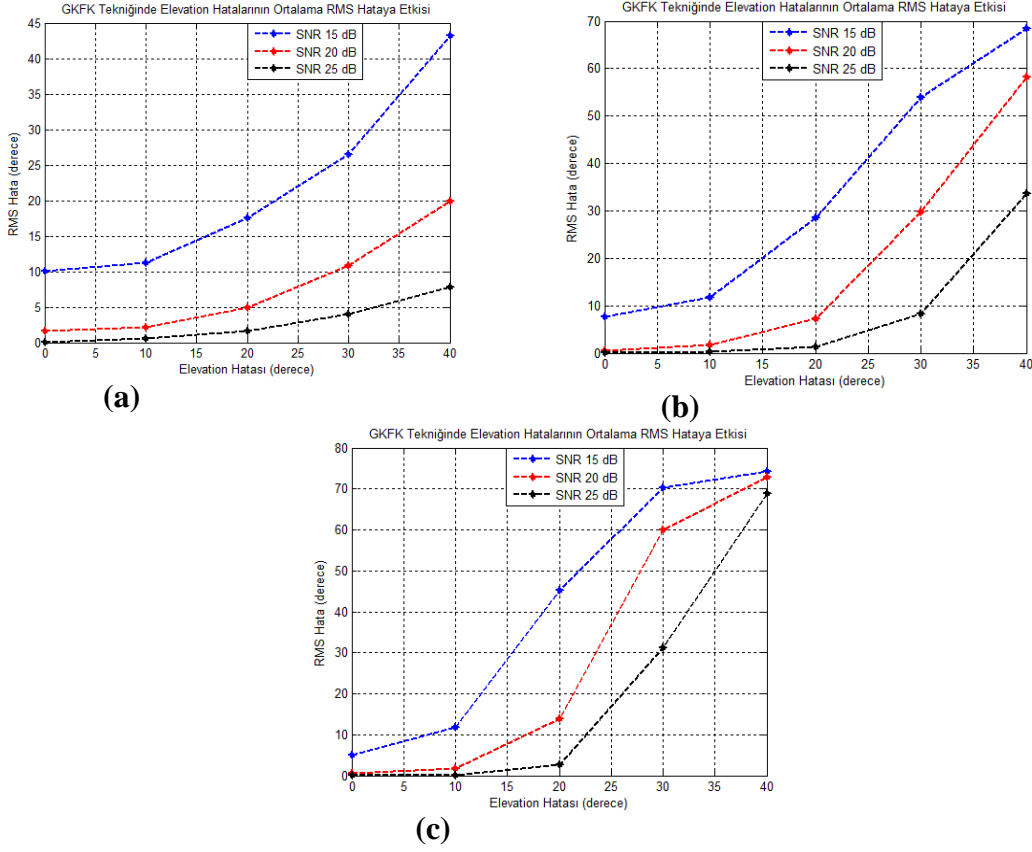


(b)



(c)

Şekil 5. 31: (a) 4 sektörlü, (b) 6 sektörlü, (c) 8 sektörlü yerleşim yapıları için GK tekniğinde elevation hatalarının etkisi.



Şekil 5. 32: (a) 4 sektörlü, (b) 6 sektörlü, (c) 8 sektörlü yerleşim yapıları için GK tekniğinde elevation hatalarının etkisi.

Yükseliş (elevation) açısının $\mp 0, 10, 20, 30$ ve 40 derece değişmesiyle oluşan hatalı ölçümler 4, 6 ve 8 sektörlü yapılarda Şekil 5.31 ve 32’de genlik ve genlik faz karşılaştırma teknikleri için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Elevation hatası arttıkça açı kestirim hataları da artmaktadır. Sektör sayısı arttıkça elevation hatasından kaynaklı olarak yanlış ölçüm yapan anten sayısı da arttığı için açı kestirim hataları da artmaktadır. Örnek olarak Şekil 5.31a’da 4 sektörlü yerleşim yapısı için 20 dB SNR’da yükselti hatası yokken 7 derece olan RMS yanca açı kestirim açısı 30 derece elevation hatasında, ortalama 14 derece olarak gözlemlenmektedir. Tehdit sinyalinin çok uzaktan geldiği düşünüldüğünde yükselti hatasının yaklaşık 20 dereceye kadar sistemin açı kestirim hatasını çok fazla etkilemediği de görülmektedir.

5.6.2 Genlik faz uyumsuzluk hataları

Yön bulma sistemlerinde, tehdit unsurlarından gelen sinyallerin alınarak genlik ve faz karşılaştırma teknikleri ile analiz edilmesi amacıyla belirli dizilimlere sahip anten yapıları kullanılmaktadır. Bu antenler tehdit sinyallerini, baktıkları yönlere bağlı

olarak oluşan belirli kazanç değerleri ile almaktadır. Genlik ve/veya faz uyumsuzluk problemleri, antenlere gelen sinyallerin RF kanallardan sonra ölçüm hataları nedeniyle beklenen değerden farklı değerler olarak ölçülmesi sonucu oluşmaktadır. Bu uyumsuzluk problemleri genlik ve faz karşılaştırma teknikleri ile yön bulma operasyonlarında yapılan açı kestirimlerini olumsuz yönde etkileyen önemli bir sorun teşkil edebilmektedir. Denklem 5.4’de uyumsuzluk problemi modellenmektedir:

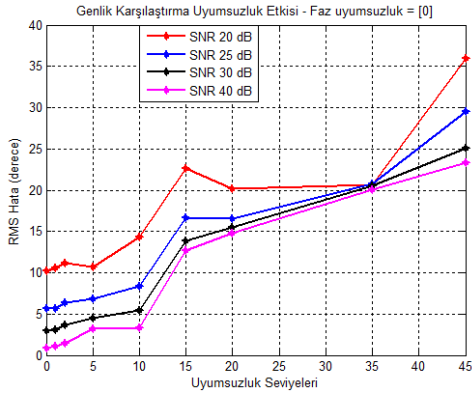
$$m = 10^{\frac{(G_m \xi_N - \frac{G_m}{2})}{20}} e^{\frac{j2\pi}{180} (\frac{G_{p_m}}{2} \xi_N - \frac{G_{p_m}}{4})} \quad (5.4)$$

Denklem 5.4’de m (Mismatch) hem genlik hem de fazdaki uyumsuzluğu, G_m uyumsuzluk seviyesini, ξ_N kullanılan her anten için 0 ile 1 arasında üretilen standart uniform dağılıma sahip rastgele sayı, G_{p_m} ise faz uyumsuzluk seviyesini göstermektedir. Elde edilen uyumsuzluk (m) gelen sinyali Denklem (5.5)’de gösterildiği gibi etkilemektedir. s_i i . Antene gelen sinyali, R_i i . Anten için anten kazancı, n_i i . Antendeki karmaşık gürültü ve m_i i . Anten için uyumsuzluk değerini göstermektedir. Bu durumda elde edilen ölçüm

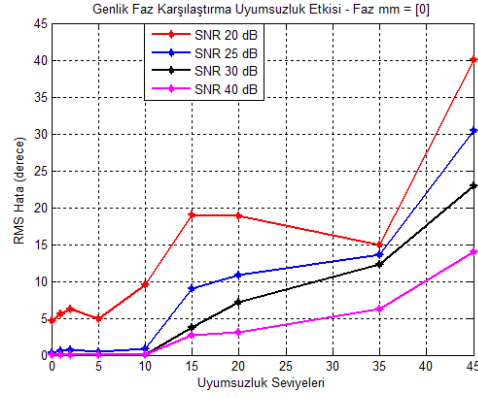
$$s_{i\text{kanal}} = (s_i R_i m_i) + n_i \quad (5.5)$$

Şeklinde modellenmektedir.

Şekil 5.33 ve 34’de 4 sektörlü 12 antenli yön bulma yapılarında genlik ve faz uyumsuzluklarının yön bulma performansına etkisi düşük 20, 25 dB ve yüksek 30, 40 dB SNR’ da, 10 GHz frekansta analiz edilmiştir. Analizler düşük ve yüksek uyumsuzluk seviyelerinin düşük ve yüksek SNR değerleri altında, genlik ve genlik faz karşılaştırma teknikleri sonucu oluşan açı kestirim hatalarına etkisini göstermektedir. Şekil 5.33 sadece genlik uyumsuzluk seviyelerinin etkisini, Şekil 5.34 ise hem genlik hemde faz uyumsuzluk seviyelerinin yön bulma performansına etkisini göstermektedir. Yapılan analizlerde genlik uyumsuzluk seviyeleri (G_m) 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 35, ve 45; faz uyumsuzluk seviyeleri (G_{p_m}) ise 0, 1, 3, 7, 12, 17, 25, 40 ve 45 olarak seçilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5. 33: Genlik uyumsuzluk seviyeleri 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 35, ve 45 faz uyumsuzluk seviyesi 0 iken (a) GK, (b) GKFK analizi.

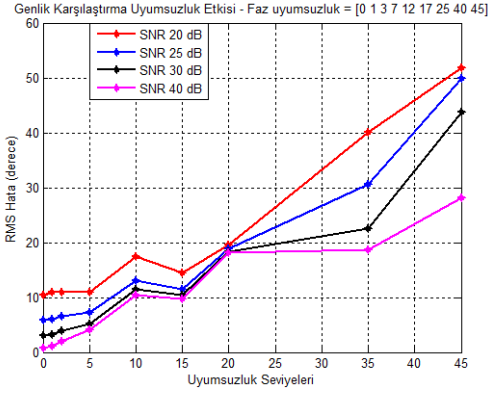
Çizelge 5. 19: Genlik uyumsuzluk seviyeleri 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 35, ve 45 faz uyumsuzluk seviyesi 0 iken GK sonucu oluşan ortalama RMS hata

Genlik Uyumsuzluk Seviyeleri	20 dB SNR	25 dB SNR	30 dB SNR	40 dB SNR
0	10.1976	5.6386	3.0135	0.9255
1	10.6279	5.7123	3.1465	1.0931
2	11.1721	6.4027	3.6963	1.4817
5	10.7516	6.8114	4.5614	3.2641
10	14.3512	8.3042	5.4346	3.3826
15	22.6145	16.7082	13.9177	12.6992
20	20.1626	16.5001	15.5531	14.7758
35	20.5854	20.7365	20.5830	20.0494
45	36.0125	29.5347	25.1255	23.3250

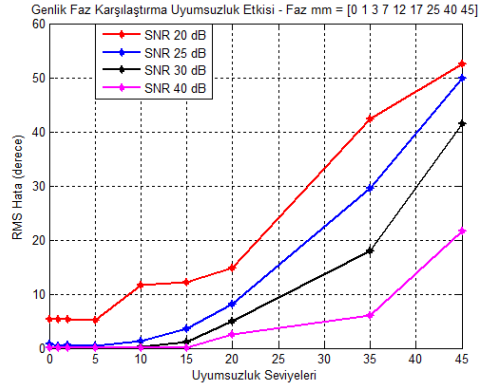
Çizelge 5. 20: Genlik uyumsuzluk seviyeleri 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 35, ve 45 faz uyumsuzluk seviyesi 0 iken GKFK sonucu oluşan ortalama RMS hata

Genlik Uyumsuzluk Seviyeleri	20 dB SNR	25 dB SNR	30 dB SNR	40 dB SNR
0	4.6372	0.3681	0.0685	0.0137
1	5.6323	0.5937	0.1260	0.0137
2	6.1928	0.6780	0.0164	0.0137
5	4.9349	0.4112	0.0724	0.0137
10	9.4947	0.9098	0.0760	0.0137
15	19.0788	8.9984	3.7514	2.7532
20	18.8955	10.8382	7.1390	3.0668
35	14.8901	13.6598	12.3219	6.1980
45	40.0614	30.5019	22.9946	13.9940

Şekil 5.33 ve Çizelge 5.19, 20'de gösterilen analiz sonuçları ile genlik uyumsuzluklarının genlik ve genlik faz karşılaştırma tekniği sonucu oluşan açı kestirim hatalarına etkisi gözlemlenmiştir. Düşük genlik uyumsuzluk seviyelerinin açı kestirim hatalarını çok az etkilediği; bu seviyelerin 10 ve daha yüksek olduğu durumlarda ise açı kestirim hatalarının arttığı görülmektedir. Bu uyumsuzluk kazançları ile oluşturulan katsayılar gelen sinyalle çarpıldığı zaman, sinyalin genlik ve faz değerinde çok küçük bir aralıkta etki göstermektedir. Sinyalin genlik ve faz değerinde oluşan bu küçük değişiklikler belirtilen SNR değerleri ile oluşturulan gürültü içinde kaybolmaktadır. Bu nedenle uyumsuzluk etkisi genlik karşılaştırma sonucu yön bulma performansını 1 derece seviyelerinde etkilemektedir. Daha yüksek uyumsuzluk seviyelerinde ise açı kestirim hatalarındaki artışın daha yüksek olduğu görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5. 34: Genlik uyumsuzluk seviyeleri 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 35, ve 45; faz uyumsuzluk seviyeleri ise 0, 1, 3, 7, 12, 17, 25, 40 ve 45 iken (a) GK, (b) GKFK analizi.

Çizelge 5. 21: Genlik uyumsuzluk seviyeleri 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 35, ve 45; faz uyumsuzluk seviyeleri ise 0, 1, 3, 7, 12, 17, 25, 40 ve 45 iken GK sonucu oluşan ortalama RMS hata.

Uyumsuzluk Seviyeleri		20 dB SNR	25 dB SNR	30 dB SNR	40 dB SNR
GK	FK				
0	0	10.4051	5.8397	3.1297	3.1297
1	1	11.0297	6.0096	3.2867	3.2867
2	3	10.9342	6.5735	4.0219	4.0219
5	7	11.0335	7.3083	5.2445	5.2445
10	12	17.4631	13.1091	11.5144	11.5144
15	17	14.4378	11.5014	10.4262	10.4262
20	25	19.5857	18.7945	18.2975	18.2975
35	40	40.0100	30.6620	22.4653	18.6965
45	45	51.8345	49.9239	43.7668	28.2391

Çizelge 5. 22: Genlik uyumsuzluk seviyeleri 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 35, ve 45; faz uyumsuzluk seviyeleri ise 0, 1, 3, 7, 12, 17, 25, 40 ve 45 iken GKFK sonucu oluşan ortalama RMS hata.

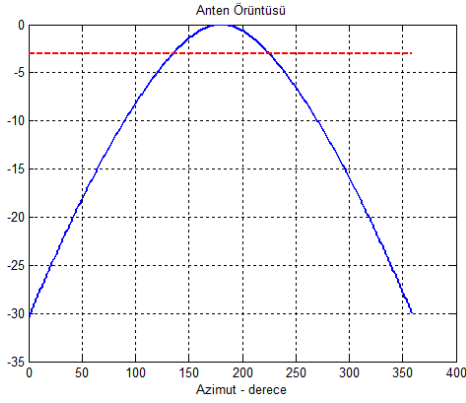
Uyumsuzluk Seviyeleri		20 dB SNR	25 dB SNR	30 dB SNR	40 dB SNR
GK	FK				
0	0	5.2812	0.7359	0.0164	0.0137
1	1	5.4167	0.3758	0.0939	0.0137
2	3	5.3128	0.6966	0.1272	0.0137
5	7	5.1726	0.4480	0.0484	0.0137
10	12	11.7035	1.2646	0.2146	0.0203
15	17	12.1363	3.6051	1.1841	0.1214
20	25	14.9005	8.1163	4.9778	2.5380
35	40	42.4536	29.6183	17.9105	6.0858
45	45	52.5890	49.8490	41.5305	21.6478

Şekil 5.34 ve Çizelge 5.21, 22’de gösterilen analiz sonuçları genlik uyumsuzluklarının yanında faz uyumsuzluk seviyelerinin de dâhil edilmesiyle birlikte uygulanan genlik ve genlik faz karşılaştırma teknikleri sonucu oluşan açı kestirim hatalarını göstermektedir. Analiz sonuçları, düşük uyumsuzluk seviyelerinde genlik ve faz uyumsuzluklarının açı kestirim hatalarına etki etmediği; genlik uyumsuzlukların 20, faz uyumsuzluklarının 25 olduğu durumlardan itibaren hataların arttığını göstermektedir. Örneğin; genlik uyumsuzluk seviyesini 35, faz uyumsuzluk seviyesinin 0 olduğu durumda genlik faz karşılaştırma tekniği sonucu oluşan ortalama açı kestirim hatalarının 25 dB SNR altında 13.6598 derece olduğu; genlik uyumsuzluk seviyelerinin 35, faz uyumsuzluk seviyelerinin ise 40 olduğu durumda genlik faz karşılaştırma tekniği sonucu oluşan açı kestirim hatalarının 25 dB SNR altında 29.6183 olduğu görülmüştür.

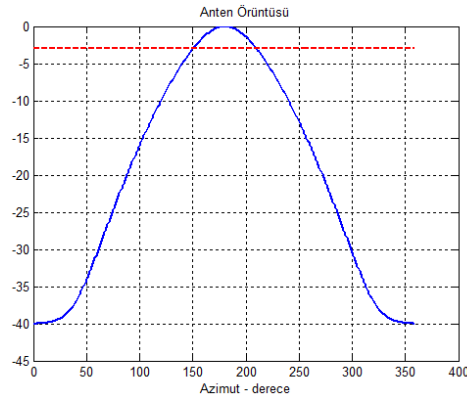
5.6.3 Bozuk anten örüntüsü

4, 6 ve 8 sektörlü anten yapıları için oluşturulan anten örüntüleri Bölüm 4.1’de detaylı olarak gösterilmiştir. Bu bölümde Gaussian olarak modellenen, 3 dB hüzmeye genişliği 90 ve 60 derece olan 4 ve 6 sektörlü anten yapılarına ait anten örüntülerinin tam Gaussian olmayıp üzerinde bazı anten örüntülerindeki bilinmezlikler, salınımlar olarak modellendiğinde genlik karşılaştırma tekniği sonucu yön bulma

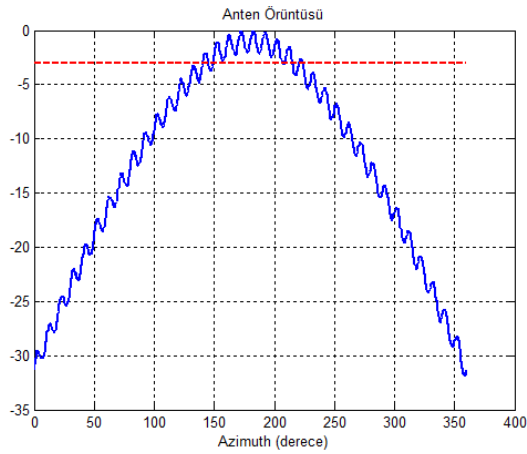
performansına etkisi analiz edilmiştir. Analizler 8 GHz frekansta 15, 20 ve 25 dB SNR değerleri için gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.35 ve 5.36, 4 ve 6 sektörlü anten yapılarının 3 dB hüzmeye genişlikleri 90 ve 60 derece olan düzgün Gaussian anten örüntüsünü, Şekil 5.37 ve 5.38 ise aynı özelliklerde ancak düzgün Gaussian olmayan salınımlı anten örüntülerini göstermektedir.



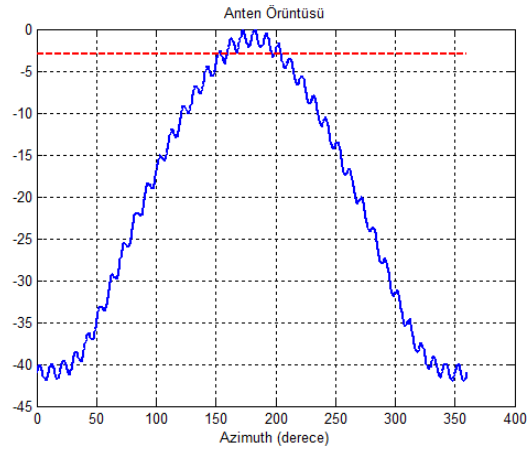
Şekil 5. 35: 3 dB hüzmeye genişliği 90 derece olan 4 sektörlü Gaussian anten örüntüsü.



Şekil 5. 36: 3 dB hüzmeye genişliği 60 derece olan 6 sektörlü Gaussian anten örüntüsü.

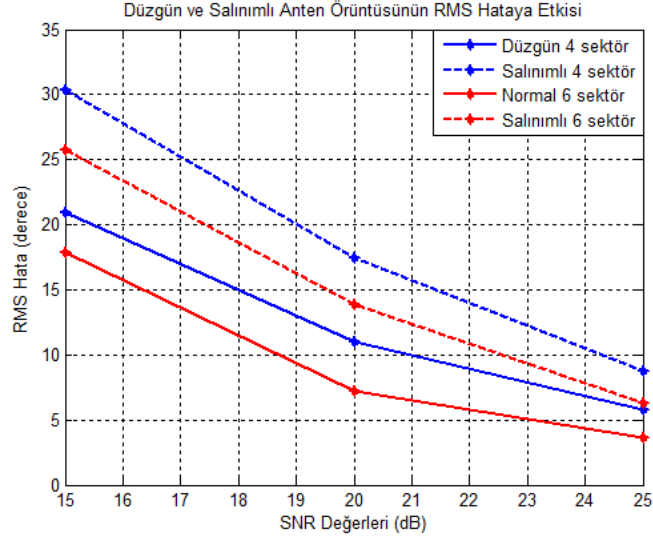


Şekil 5. 37: 3 dB hüzmeye genişliği 90 derece olan 4 sektörlü salınımlı anten örüntüsü.



Şekil 5. 38: 3 dB hüzmeye genişliği 60 derece olan 6 sektörlü salınımlı anten örüntüsü.

Şekil 5.39, yukarıda gösterilen örüntülere sahip antenlerden oluşan yön bulma sistemlerinin açı kestirim hatalarını göstermektedir



Şekil 5. 39: Düzgün ve salımlı anten örüntüleri için 4 ve 6 sektörlü yapılarda ortalama RMS hata.

Çizelge 5. 23: Düzgün ve salımlı anten örüntülerinin 4 ve 6 sektörlü anten yapılarında oluşturduğu ortalama RMS hata değerleri.

	Normal 4 sektör	Bozuk 4 sektör	Normal 6 sektör	Bozuk 6 sektör
15 dB SNR	20.9535	30.3031	17.8889	25.6979
20 dB SNR	11.0294	17.4779	7.1769	13.8206
25 dB SNR	5.7774	8.7698	3.6637	6.3245

Anten örüntüsü düzgün bir gauss olarak modellendiği zaman farklı SNR değerlerinde oluşan yön kestirim hataları Çizelge 5.23’de gösterilmiştir. Anten örüntüsü üzerinde bazı salınımlar olduğu zaman anten kazançları da bu doğrultuda değişmektedir. Anten kazançlarında ki bu değişiklikler, bozulmalar açığı kestirim hatalarını Şekil 5.39 ve Çizelge 5.23’de gösterildiği gibi arttırmaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada elektronik harp tekniklerinin detayları incelenmiş ve kullanım amaçlarına göre sınıflandırılmıştır. Elektronik harp sistemlerinin önemi, avantajları ve kullanım alanları detaylandırılarak örneklerle açıklanmıştır. Pasif yön bulma sistemlerinde yön bulma amacıyla sıklıkla kullanılan genlik ve faz karşılaştırma algoritmaları analiz edilmiştir. Bu algoritmaların kullanılacağı yön bulma sistemleri geniş çapta ele alınarak farklı anten yerleşim sistemleri oluşturulmuş ve yön bulma performansları analiz edilmiştir. Genlik ve faz karşılaştırma tekniklerinin sektörel, SNR ve frekans bağımlılığı incelenmiştir. Anten yerleşimlerinin yön bulma sistemlerindeki önemini vurgulamak amacıyla standart 4, 6, 8 sektörlü yerleşimlerin yanında kırıklı anten yapıları ve farklı anten yerleşimleri açıklanarak detaylı olarak analiz edilmiştir. Çalışmada genlik karşılaştırma tekniği sonucu oluşan açı kestirim hatalarını iyileştirmek ve yön bulma performansını arttırmak amacıyla kullanılan faz karşılaştırma tekniğinde; oluşan belirsizliklerin sebepleri araştırılmış ve çözüm önerileri sunulmuştur. Matlab ortamında yapılan benzetimlerde, yön bulma sistemlerinde kullanılan antenlerin ideal ve frekanstan bağımsız örüntülere sahip olduğu varsayılmış ve tüm analizler bu varsayımlar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında, gerçek durumlar göz önüne alınarak donanım tasarım yapılacağı zaman ortaya çıkabilecek, elektronik sistemlerin doğasından ve çevresel faktörlerden kaynaklanan sistem hatalarından yüzeysel olarak bahsedilmiş ve yön bulma performansına etkisi incelenmiştir.

6.1 Standart Anten Yerleşim Geometrileri

Standart anten yerleşimleri Bölüm 4.2’de gösterilen 4, 6 ve 8 sektörlü anten yerleşim yapılarıdır. Bu yerleşim yapılarında yön kestirimi gerçekleştirebilmek amacıyla genlik ve faz karşılaştırma algoritmaları farklı SNR ve sektör sayılarına göre analiz edilmiştir.

6.1.1 Genlik karşılaştırma sonuçları

Genlik karşılaştırma tekniği pratik ve uygulanabilir bir yön bulma tekniğidir. Çok yüksek çözünürlük gerektirmeyen durumlarda yön bulma amacı doğrultusunda kullanılan bu teknik için en büyük olabilirlik kestirimi, kuzey doğu oranı metodu ve en güçlü iki genlik kullanımı algoritmaları kullanılmaktadır. Bu algoritmaların analizi, 4, 6 ve 8 sektörlü anten yerleşim yapıları için 15, 20, 25 dB SNR ve 10 GHz frekans altında gerçekleştirilmiş ve ortalama RMS hata sonuçları Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 6. 1 : Genlik karşılaştırma algoritmaları.

Sektör Sayısı	SNR (dB)	En Büyük Olabilirlik Kestirimi	Kuzey – Doğu Oranı	En Güçlü İki Genlik Kullanımı
4 Sektör	15	21.3507	23.5532	24.5038
	20	10.6879	12.2821	11.4214
	25	5.7796	7.8739	6.2792
6 Sektör	15	18.3235	23.7096	24.7917
	20	7.6886	10.6389	9.8140
	25	3.7752	6.0950	4.6021
8 Sektör	15	14.7024	25.1480	24.8046
	20	6.6420	10.4120	9.3041
	25	3.4019	5.5984	3.9724

En büyük olabilirlik kestirimi, kuzey doğu oranı ve en güçlü iki genlik kullanımı algoritmalarının genlik karşılaştırma açı kestirim performansı, 4 sektör 12 anten, 6 sektör 18 anten ve 8 sektör 24 anten kullanılarak oluşturulan yön bulma yapıları için 15, 20, 25 dB SNR ve 10 GHz frekansta karşılaştırılmıştır. Çizelge 6.1’de en yüksek performans ile açı kestiriminin en büyük olabilirlik kestirimi ile yapıldığı görülmektedir. Sektör sayısı ve SNR değeri açı kestirim performansını arttıran; frekans değeri ise anten örüntülerinin aynı frekansta oluşturulması ve antenlerin özdeş olması nedeniyle genlik karşılaştırma tekniğinde yön bulma performansını etkilemeyen parametrelerdir.

6.1.2 Genlik faz karşılaştırma sonuçları

Faz karşılaştırma tekniği daha yüksek çözünürlüğe sahip yön kestirimleri yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Genlik karşılaştırma tekniğine göre daha karmaşık bir yapıya sahip olan bu yöntem, çok düşük hata ile açı kestirimi yapabilmektedir. Faz karşılaştırma tekniği uygulanırken her sektörden bir referans anten seçilmekte ve bu referans antene komşu olan diğer anten veya antenler ile arasındaki faz farkı kullanılmaktadır. Antenler arasında mesafe olduğu için alınan sinyaller arasında bir faz farkı meydana gelmektedir. Faz karşılaştırma tekniğinin sorunsuz uygulanabilmesi için antenler arasındaki mesafelerin sinyalin dalga boyunun yarısından küçük olması gerekmektedir. Bu şart, fiziksel kısıtlar nedeniyle genellikle sağlanamamaktadır. Bu nedenle faz karşılaştırma tekniği sonucu birden fazla yön kestirimi nedeniyle oluşan yön belirsizlikleri meydana gelmektedir. Bu belirsizliklerin giderilmesi amacıyla referans antene komşu faz anteninin yanına, biraz daha uzak mesafede ikinci bir faz anteni yerleştirilmesi, genlik karşılaştırma sonucu elde edilen genlik kestirimine bağlı olarak bir tarama aralığı belirlenerek genlik karşılaştırma sonucunun kullanılması gibi yöntemler incelenmiştir. Bu yöntemler kullanılarak, faz karşılaştırma tekniği sonucu oluşan belirsizlikler giderilmiş ve yaklaşık 1 dereceden daha az hata ile açı kestirimleri yapılabilmektedir. Çizelge 6.2’de belirsizliklerin giderilmesi için kullanılan bu iki yöntem sonucu oluşan ortalama RMS hata değerleri 15, 20, 25 dB SNR’da, 8 GHz frekansta, 4, 6 ve 8 sektörlü yerleşim yapıları için gösterilmiştir.

Çizelge 6. 2 : Genlik karşılaştırma faz karşılaştırma analizi.

Sektör Sayısı	SNR (dB)	MLE GK Sonucu	GKFK Sonucu 2 Faz Anten	GKFK Sonucu 3 Faz Anten
4 Sektör	15	21.1526	20.1341	18.4854
	20	10.7536	7.8117	5.5060
	25	5.7825	1.6665	0.9005
6 Sektör	15	18.4555	17.5047	17.4719
	20	7.6427	5.0240	4.0119
	25	3.7965	0.9769	0.2780
8 Sektör	15	14.5084	12.9804	11.9510
	20	6.3502	2.5045	2.1148
	25	3.3656	0.8166	0.1373

Çizelge 6.2'den görüldüğü gibi sektörlerde 3 anten kullanılarak oluşturulan yön bulma sistemleri ile faz karşılaştırma tekniği uygulandığı zaman belirsizlikler ortadan kaldırılarak yüksek SNR değerlerinde çok düşük hata oranı ile açı kestirimleri yapılmaktadır.

6.3 Farklı Anten Yerleşim Sonuçları

Standart anten dizilimlerinde Bölüm 4.2'de belirtildiği üzere 4 sektörlü yapılar için sektörlerde bulunan antenler 0, 90, 180 ve -90 derecelere, 6 sektörlü yapılarda ise 0, 60, 120, 180, -120, -60 derecelere bakmaktadır. Yön bulma sistemleri bu bakış açılarıyla 0 – 360 derece arasını antenlerin hüzmeye genişliklerine bağlı olarak belirli kazanç değerleriyle taramaktadır. Bu bakış açılarına sahip antenlerin baktığı açıları sırasıyla 30, 45, 60 ve 75 derece değiştirilerek oluşturulan yön bulma sistemlerinin genlik karşılaştırma tekniklerinden en büyük olabilirlik kestirimi algoritması kullanarak gerçekleştirdiği açı kestirim hatası analizleri yapılmış ve farklı bakış açılarının yön bulma performansına etkisi incelenmiştir.

Çizelge 6. 3 : Farklı anten bakış açıları ile GK analizi.

Sektör Sayısı	Anten Bakış Açıları	Genlik Karşılaştırma		
		SNR 15 dB	SNR 20 dB	SNR 25 dB
4 Sektör	Dizilim 0, 0	21.0541	10.4590	5.7910
	Dizilim 1, 30	27.1288	14.6947	6.9144
	Dizilim 2, 45	26.5635	11.5507	5.7599
	Dizilim 3, 60	30.3745	14.8247	6.8989
	Dizilim 4, 75	47.3513	26.4742	12.7734
6 Sektör	Dizilim 0, 60	18.4559	7.6494	3.7612
	Dizilim 1, 30	24.8796	15.4510	10.8271
	Dizilim 2,45	20.7062	11.8655	7.7399
	Dizilim 3, 75	19.9071	8.0892	4.3838

Farklı anten bakış açılarıyla oluşturulan yön bulma sistemleriyle 4 ve 6 sektör için 8 GHz frekansta, 15, 20, 25 dB SNR’larda gerçekleştirilen açı kestirimleri Çizelge 6.3’de gösterilmiştir. Farklı anten yerleşimlerinin en büyük olabilirlik kestirimi ile gerçekleştirdiği genlik karşılaştırma tekniği sonucu oluşan açı kestirim hatalarına göre en düşük hata ile açı kestirimlerini standart dizilimlerin gerçekleştirdiği görülmektedir. 0 – 360 derece arasını hüzmeye genişliklerine bağlı olarak tarayan antenlerden oluşan yön bulma sistemlerinde; düşük hata ile açı kestirimi yapabilmek için Bölüm 5.5’de anlatıldığı gibi tarama alanına hâkim bir hüzmeye, kazanç yapısı gerekmektedir. Bölüm 5.5’de verilen anten hüzmeye yapılarına bakıldığında zaman, 4 sektörlü anten yerleşim yapıları için, 75 derece döndürülmüş antenlerin örüntü yapılarının geniş bir aralıkta yüksek kazanç sağlayamadığı bu nedenle yüksek hata oranları ile açı kestirimleri gerçekleştirdiği görülmektedir. 4 sektörlü yön bulma sisteminin 90 derece hüzmeye genişliğine sahip antenlerden, 6 sektörlü yön bulma sisteminin 60 derece hüzmeye genişliğine sahip antenlerden oluştuğu ve yön bulma sisteminin 0 – 360 derece arasından gelen tehdit sinyaller üzerinde açı kestirimi yapacağı durumlarda; en düşük hata ile açı kestirimi 4 ve 6 sektörlü yapıların her ikisi içinde standart anten yerleşimleri ile sağlanmaktadır.

6.4 Kırıklı Yapıya Sahip Yön Bulma Sistemlerinde Hibrit Genlik Faz Karşılaştırma Sonuçları

Kırıklı yapılar antenlerin belirli açılara baktırılmasıyla oluşturulan yapılardır. Bu sistemlerde kullanılan anten çiftleri 30 – 150, 45 – 135, 60 – 120 ve 75 – 105 derecelere bakacak şekilde 0 – 180 derece arasına hakim olarak ayarlanmıştır. Hibrit genlik faz karşılaştırma tekniğinde, kırıklı yapıdaki 5 cm aralıklı anten çifti, aldığı sinyalin genlik bilgisini FFT olarak elde etmektedir. FFT'nin en büyük değeri, sinyali alan antenin o frekansa karşılık ölçtüğü genlik değerini vermektedir [32]. Kırıklı anten yapıları kullanılarak oluşturulan yön bulma sistemlerinde belirli bir tarama aralığı için gerçekleştirilen hibrit genlik faz karşılaştırma tekniği sonucu oluşan ortalama RMS hataları Çizelge 6.4'de 8 GHz frekans ve farklı SNR değerleri için gösterilmiştir.

Çizelge 6. 4: Kırıklı yapılarda hibrit genlik faz karşılaştırma sonuçları.

Anten Bakış Açıları	SNR 10 dB	SNR 15 dB	SNR 20 dB	SNR 25 dB
30 – 150 Derece	24.7027	19.6581	13.7668	9.6560
45 – 135 Derece	22.3569	16.3028	10.2121	5.0634
60 – 120 Derece	20.5468	13.8214	8.1144	4.1784
75 – 105 Derece	19.5857	12.6896	6.8883	3.4220

Kırıklı yapılar ile yüksek doğrulukta açı kestirimi sağlanabilmesi için, Bölüm 5.4'de anlatıldığı gibi tarama alanına bağlı olarak antenlerin geniş bir alanda yüksek kazanç sağlayabilecek örüntülere sahip olması gerekmektedir. Kırıklı antenlerin bakış açıları geniş alandan yüksek kazanç alabilecek geometride olmalıdır. Çizelge 6.4'de 75 – 105 derecelere bakan kırıklı antenler ile oluşturulan yön bulma sisteminin 30 – 150 derece arasından gelen sinyaller üzerinde en az hata ile açı kestirimi yaptığı görülmektedir. Bunun nedeni Bölüm 4.5'de gösterilen 75 – 105 derecelere bakan antenlerin 90 derecelik hüzmeye yapılarının 30 – 150 derece arasından gelen tehdit sinyallerini optimal kazanç ile alabilmesidir.

Kırıklı anten yapıları ile oluşturulan sistemler ile 2 anten kullanılarak tarama aralığına bağlı olarak en büyük olabilirlik kestirimine yakın doğrulukta açı kestirimi yapılabilmektedir. Ancak genel yapı itibariyle hibrit sistemler, hedefin konumu bilindiği durumlarda, özellikle o bölgede bir tarama aralığı oluşturarak açı kestirimi yapılacağı durumlarda avantaj sağlamaktadır.

6.5 Sistemsel Hata Sonuçları

Tezde incelenen diğer bir durum ise yön bulma performansını etkileyen elektronik sistemlerin doğasından kaynaklanan bazı ölçüm hatalarıdır. Yön bulma sistemlerinin en önemli bileşenlerinden birisi de antenlerdir. Antenler tehdit sinyalini alarak, alıcı kanallar boyunca işlem birimlerine analiz edilmesi amacıyla iletmektedir. Antenler bu sinyalleri, bazı çevresel faktörlerden ve elektronik sistemlerin yapısından kaynaklanan hatalar ile alabilmektedir. Yapılan bu ölçüm hataları yükseliş (elevation) hataları olarak Bölüm 5.6.1’de, genlik faz uyumsuzluk hataları olarak Bölüm 5.6.2’de ve anten örüntüsünün salınımlı olduğu durumlarda oluşan hatalar olarak Bölüm 5.6.3’de detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan analizlerde oluşan bu hataların açı kestirim performansını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bu hatalar genellikle donanım tasarımlarında oluşmakta ve ciddi olarak incelenmesi gerekmektedir. Benzetimlerde yapılan bazı varsayımlar ve sistem tasarımındaki esneklikler bu hataların etkisini teorik hesaplamalar için azaltabilmektedir. Ancak gerçek sistemlerde bu hatalar çözülmezse ciddi yön kestirim hatalarıyla karşılaşılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Tsui, J.**, (2005). Microwave Receivers with Electronic Warfare Applications, The Institution of Engineering and Technology.
- [2] **Neri, F.**, (2006). Introduction to Electronic Defense Systems, SciTech Publishing, Inc., Norwood, MA.
- [3] **Skolnik, M.I.**, (2001). Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill, Inc., New York, NY.
- [4] **Siouris, G.M.**, (2004). Missile Guidance and Control Systems, Springer Science & Business Media.
- [5] **Adamy, D.L.**, (2001). EW 101: A First Course in Electronic Warfare, Artech House, Inc.
- [6] **Erisev, S.P.**, (2006). Yön Bulmada (YB) Sinyal İşleme Teknikleri: Genel Bir Yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [7] **Richards, M.A., Scheer, J.A., Holm, W.A.**, (2010). Principles of Modern Radar: Basic Principles. SciTech Pub., Inc.
- [8] **Wiegand, R.J.**, (1991). Radar Electronic Countermeasures System Design, Artech House, Inc., Norwood, MA.
- [9] **Martino, A.D.**, (2012). Introduction to Modern EW Systems, Artech House Radar Library.
- [10] U.S. Department of Defense, (2000). Electronic Warfare Fundamentals, Kindle Edition.
- [11] **Bayar, M.**, (1992). Elektronik İstihbarat, Uzmanlık Tezi, Milli Savunma Bakanlığı SSM., Ankara.
- [12] **Anderson, R.**, (2001). Security Engineering: A Guide to Building Dependable Distributed Systems, John Wiley & Sons, Inc.
- [13] “Kosova Savaşı”, (2015). Wikipedia, the free encyclopedia. Erişim tarihi: 11-Kasım.
- [14] “Körfez Savaşı”, (2015). Wikipedia, the free encyclopedia. Erişim tarihi: 11-Kasım.

- [15] **Schleher, D.C.**, (1999). *Electronic Warfare in The Information Age*, Artech House, Inc., Norwood, MA.
- [16] **Nalci, M.**, (13 Ekim 2015). *Falkland Savaşı*, *Pusula Dergisi*, 63, erişim adresi: <http://www.dho.edu.tr/pusula/63/falkland.html>, erişim tarihi.
- [17] “Falkland War”, (2015). *Wikipedia, the free encyclopedia*. Erişim tarihi: 14-Ekim.
- [18] **Welch, M., Pywell, M.**, (2012). *Electronic Warfare Test and Evaluation*, NATO Science and Technology Organization.
- [19] **Schleher, D.C.**, (1993). *Introduction to Electronic Warfare*, Artech House, Inc., Norwood, MA.
- [20] **Schlesinger, R.J.**, (1961). *Principles of Electronic Warfare*, Peninsula Publishing, California.
- [21] **Özçelik, M.**, (2006). *Elektronik Harp ve Sinyal Karıştırması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [22] **Dinç, V.**, (2010). *Elektronik Harp Teknikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [23] **Wiley, R.G.**, (1985). *Electronic Intelligence: The Interception of Radar Signals*, Artech House, Inc., Norwood, MA.
- [24] *Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook*, (2012). Naval Air Warfare Center, CA, USA.
- [25] **Guerin, D., Jackson S., and Kelly, J.**, (2012). *Passive Direction Finding*, Phd Thesis, Worcester Polytechnic Institute, MIT Lincoln Laboratory, Worcester, MA, ABD.
- [26] **İpek, A.V.**, (2006). *Implementation of A Direction Finding Algorithm on an FPGA Platform*, Phd Thesis, Middle East Technical University, Ankara.
- [27] **Lipsky, S.E.**, (2003). *Microwave Passive Direction Finding*, SciTech Publishing, Inc., Raleigh, NC.
- [28] **Balakrishnan, S. N., A. Tsourdos, and B. A. White**, (2012). *Advances in Missile Guidance, Control, and Estimation*, CRC Press, NW.
- [29] **Cherniakov, M.**, (2008). *Bistatic Radars: Emerging Technology*, John Wiley & Sons, Inc., UK.
- [30] **Evirgen, E.A.**, (2001). *Direction Finding With a Uniform Circular Array Placed on a Moving Platform*, Ms. Thesis, Middle East Technical University, Ankara.

- [31] **Koç, A.T.**, (1996). Direction Finding with a Uniform Circular Array via Single Snapshot Processing, Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Ankara.
- [32] **Orduyilmaz, A., Serin, M., Yildirim, A., Ceyhan, K., and Gurbuz, A.C.**, (Mayıs 2015). Hybrid phase amplitude direction finding method, 23th in Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) of the IEEE, Malatya, Türkiye, 109-112.
- [33] **Sherman, S.M.**, (1984). Monopulse Principles and Techniques, Artech House, Inc., Dedham, MA.
- [34] **Leonov, A.I., Formichev, K. I.**, (1986). Monopulse Radar. Norwood: Artech House.
- [35] **Bonefačić, D., Jančula, J., and Majurec, N.**, (2007). Model of a Monopulse Radar Tracking System for Student Laborator., Radioengineering, 16(3), 63.
- [36] **Vu, T.B. and Rathinam, M.**, (1988). Direction Finding with Null Steering at Baseband Using Digital Signal Processors: A Computer Simulation, Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE, 254-257.
- [37] **Goryn, D. and Kaveh, M.**. (1988). Neural Networks for Narrowband and Wideband Direction Finding, Acoustics, Speech, and Signal Processing International Conference, IEEE, 2164-2167.
- [38] **Orduyilmaz, A., Serin, M., Gurbuz, A. C., and Yildirim, A.**, (2014). Passive Direction Finding Using Amplitude and Phase Comparison Techniques, 22nd in Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) of the IEEE, Trabzon, Türkiye, 935-938.
- [39] **Gregoire, D.G. and Singletary, G.B.**, (1989). Advanced ESM AOA and Location Techniques, in Aerospace and Electronics Conference NAECON, IEEE, 917-924.
- [40] **Smith, S.W.**, (1997). The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, California Technical Publishing.
- [41] **Gurgel, K.W., Antonischki, G., Essen, H.H., & Schlick, T.**, (1999). Wellen Radar (WERA): a new ground-wave HF radar for ocean remote sensing, Coastal Engineering, 37(3), 219-234.
- [42] **Tan, C.M., Beach, M.A., and Nix, A.R.**, (2002). Problems with direction finding using linear array with element spacing more than half wavelength, 1st Annual COST Workshop, 273.

- [43] **Roy, R., Paulraj, A., and Kailath, T.**, (Nisan 1986). Direction-of-Arrival Estimation by Subspace Rotation Methods – ESPRIT, In Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE, International Conference on ICASSP '86, Volume 11, 2495 – 2498.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Kıvanç Ceyhan
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 26.07.1991 / İZMİR
E-posta : kivanceyhan@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2016, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2016 - halen	HAVELSAN EHSİM A.Ş	Sistem Mühendisi
2015	ORTADOĞU MÜHENDİSLİK A.Ş	Sistem Mühendisi
2015	TURKCELL İLETİŞİM HİZMETLERİ A.Ş	Network Data Center Engineer

YABANCI DİL: İngilizce, Rusça

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Orduyilmaz, A., Serin, M., Yildirim, A., Ceyhan, K., and Gurbuz, A.C.,** (Mayıs 2015). Hybrid phase amplitude direction finding method, 23th in Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) of the IEEE, Malatya, Türkiye, 109-112.