

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

YAKIN ALAN ÖLÇÜMLER İLE RADAR
KESİT ALANI HESAPLANMASI

Okyanus TULGAR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE

2013

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

YAKIN ALAN ÖLÇÜMLER İLE RADAR
KESİT ALANI HESAPLANMASI

Okyanus TULGAR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
Prof. Dr. Ahmet Arif ERGİN

GEBZE
2013



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 14/01/2013 tarih ve 2013/02.... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 22/01/2013... tarihinde tez savunma sınavı yapılan Okyanus TULGAR'ın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Ahmet Arif ERGİN

ÜYE

: Prof. Dr. Yunus Emre ERDEMLİ

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Köksal HOCAOĞLU

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: YAKIN ALAN ÖLÇÜMLER İLE RADAR KESİT ALANI HESAPLANMASI

YAZAR ADI : OKYANUS TULGAR

Radar kesit alanı (RKA), uzak alandaki bir nesnenin elektromanyetik dalgaları yansıtma miktarının ölçütüdür. Belirli bir bant genişliğinde uzak alan şartının sağlanması için gerekli olan mesafe, pratik uygulamalarda RKA ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesini zorlaştırmaktadır. Bu sorunu çözebilmek amacıyla, bu çalışmada yakın alan yapay açıklıklı radar (YAR) ölçümlerinden uzak alan RKA hesabına imkân sağlayan, tomografi veya denklem sistemi çözümü temelli algoritmalar geliştirilmiştir. RKA hesabının hatası, menzil profillerinin çözünürlüğü ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle, menzil profilleri hızlı Fourier dönüşümü (HFD; *FFT*) yerine matris kalem metodu (MKM) veya bant geçiren matris kalem metodu (BGMKM) kullanılarak sonsuz çözünürlükle elde edilmiştir. Saçıcı merkezlerin tespiti için YAR görüntüleme veya denklem sistemi çözümü kullanılmıştır. Yakın alan YAR görüntüleme için menzil profilleri çembersel geri-izdüşüm (ÇGİ) veya lineer olmayan denklem sistemi çözümü algoritmalarına tabi tutulmuştur. ÇGİ algoritmasının sebep olduğu sayısal gürültüler RKA hatasını arttırmaktadır. Gürültülü YAR görüntüsünden saçıcı merkezlere yönelik özellik çıkartımı; süreksizlik tespiti, histogram temelli Otsu eşikleme ve bağlantılı bileşen analizi (BBA) basamaklarına sahip olan, hem yakın hem de uzak alan YAR görüntüsüne uygulanabilen bir görüntü bölütleme (GB) algoritması ile yapılmıştır. Bölütlenmiş YAR görüntüsünden elde edilen saçıcı merkezlerin konum değerleri ve kompleks yansıtıcılıkları RKA hesabında kullanılmıştır. Bu tezde geliştirilen RKA hesaplama algoritmaları MATLAB ile oluşturulan uzak veya yakın alandaki yapay veriler ve ASEMLAB’da toplanan gerçek veriler ile test edilmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki hesaplanan RKA değerleri ile teorik değerler arasında yakın benzerlik vardır. Özellikle MKM, BGMKM ve GB algoritmaları RKA hatasını etkili şekilde azaltmaktadır. Bunlara ek olarak, belirli şartlar altında denklem sistemi çözümü tomografi temelli algoritmaya göre daha yüksek doğruluğa sahiptir.

SUMMARY

THESIS TOPIC: RADAR CROSS SECTION CALCULATION WITH NEAR FIELD MEASUREMENTS

AUTHOR NAME: OKYANUS TULGAR

Radar cross section (RCS) is a quantity of the amount of electromagnetic back scattering from an object in the far-field zone. In a specific bandwidth, the required distance for the far-field criterion makes difficult the implementation of the practical RCS measurements. In this study, tomography or equation system solution based algorithms that allow far-field RCS calculation from near-field synthetic aperture radar (SAR) measurements are developed. There is a close relationship between RCS error and range profile resolution. For this reason, instead of using fast Fourier transform (FFT), range profiles are obtained by using matrix pencil method (MPM) or band pass matrix pencil method (BPMPM) with infinite resolution. For the detection of the scattering centers, SAR imaging or equation system solution are used. The range profiles are subjected to the circular back-projection (CBP) and non-linear system of equation solving algorithms for the near-field SAR imaging. The numerical noises that are caused by the CBP increase the RCS error. A feature extraction for the scattering centers from the noisy SAR image is done with an image segmentation (IS) algorithm, which is composed of the following steps; discontinuity detection, histogram based local Otsu thresholding and connected component analysis, can be utilized to both near-field and far-field SAR image. The obtained position and complex reflectivity of the scattering centers from the segmented SAR image is used for the RCS calculation. The developed RCS calculation algorithms in this thesis were tested with near or far-field synthetic data that were constructed in MATLAB and real data that are collected in the ASEMLAB. The results show that, there are close similarities between theoretical and calculated RCS values. Especially, MPM, BPMPM, and IS algorithms decrease the RCS error efficiently. In addition to these, under certain circumstances the equation system solution has better accuracy than the tomography based algorithm.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince tez konuma yönelik kullanılacak yöntemlerin belirlenmesinde, tez çalışmalarına uygulanmasında ve geliştirilen algoritmaların gerçek verilerle gerçekleştirilmesinde bana sağladığı imkânlardan, gösterdiği özenden, duyduğu güvenden ve sonuç odaklı çalışmaya yönelik kazandırdığı özelliklerden dolayı minnettar olduğum saygı değer danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet Arif ERGİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmada geliştirilen algoritmaların gerçekleştirilmesi için ölçüm gereçlerinin kurulmasında gösterdikleri değerli yardımlardan dolayı ASEMLAB çalışanları Sayın Araş. Gör. Kadir DURGUT, Ömer Faruk KİP, Gökhan KÖSE ve Hasan ERCİYAS'a teşekkür ederim.

Eğitim hayatım süresince bana her zaman güvenen, ellerinden gelen tüm imkânları sağlayan aileme ve manevi desteklerini esirgemeyen kıymetli arkadaşlarım Sezgi YIKILMAZÇINAR ve Araş. Gör. Nur ÜTKÜR'e teşekkür etmeyi borç bilirim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Konusu, Amacı ve Önemi	1
1.2. Konunun Tarihçesi ve Yöntemlerin Belirlenmesi	2
1.3. Tezin Katkısı	7
2. YAPAY AÇIKLIKLI RADAR	9
2.1. Saıcı Merkez Modeli	9
2.2. S Parametreleri ve Ölçüm Verileri	12
3. AYRIK MENZİL PROFİLLERİ	15
3.1. Ayrık Fourier Dönüşümü	15
3.2. Matris Kalem Metodu	19
3.3. Bant Geçiren Matris Kalem Metodu	24
3.3.1. Sonsuz Dürtü Cevaplı Filtreleme	24
3.3.2. Sonlu Dürtü Cevaplı Filtreleme	27
3.4. AFD ile MKM Karşılaştırması	28
3.4.1. AFD (HFD) Simülasyonu	29
3.4.2. MKM Simülasyonu	30
3.5. MKM ile BGMKM Karşılaştırması	32
4. YAR GÖRÜNTÜLEME	34

4.1. Geri-İzdüşüm	34
4.1.1. Uzak Alan Geri-İzdüşüm	34
4.1.2. Yakın Alan Geri-İzdüşüm	36
4.2. Denklem Sistemi Çözümü	38
4.2.1. Uzak Alan	38
4.2.2. Yakın Alan	40
4.3. Simülasyonlar	40
5. YAR GÖRÜNTÜ BÖLÜTLEME	46
5.1. Süreksizlik Tespiti	46
5.2. Otsu Eşikleme	47
5.3. Bağlantılı Bileşen Analizi ve Özellik Çıkartımı	50
5.4. Simülasyonlar	51
5.4.1. Sobel Maskesi ile Süreksizlik Tespiti	51
5.4.2. Otsu Metodu ile Eşikleme	52
5.4.3. Bağlantılı Bileşen Analizi ile Saçıcıların Tespiti	53
6. RKA HESAPLARI VE SİMÜLASYONLAR	57
6.1. Saıcı Merkezler ile RKA Hesabı	57
6.2. Simülasyonlar	58
6.2.1. GKGİ ile RKA Hesabı	58
6.2.1.1. Uzak Alan	58
6.2.1.2. Yakın Alan	59
6.2.2. Denklem Sistemi Çözümü ile RKA Hesabı	61
6.2.2.1. Uzak Alan	61
6.2.2.2. Yakın Alan	62
7. ALGORİTMALARIN GERÇEKLENMESİ	66
7.1. Ölçüm Verilerinin Toplanması	66
7.2. Ayrık Menzil Profilleri	68

7.3. YAR Görüntüleme	72
7.4. RKA Hesapları	76
8. SONUÇLAR	86
9. KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ	90

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
x	Çapraz Menzil (m)
y	Menzil (m)
ϕ	Azimut Açısı (derece)
θ	Elevasyon Açısı (derece)
ν	Hedef Koordinat Sisteminde Menzil Profili (m)
R_0	Anten ile Hedef Koordinat Sistemi Arasındaki Uzaklık (m)
$\mathbf{R}_i$	Anten ile Saçıcı Merkez Arasındaki Uzaklık Vektörü (m)
$\mathbf{r}_i$	Saçıcı Merkez Vektörü (m)
M	Saçıcı Merkez Sayısı
a_i	Kompleks Yansıtıcılık
η_1	Gelen Dalganın Bulunduğu Ortamın Karakteristik Empedansı (Ω)
η_2	Malzemenin Karakteristik Empedansı (Ω)
ϕ_r	Yansıyan Dalganın Normal ile Yaptığı Açısı (derece)
ϕ_t	İletilen Dalganın Normal ile Yaptığı Açısı (derece)
f	Frekans (Hz)
c	Işık Hızı (m/s)
R_ϕ	ϕ Azimut Açısındaki Menzil Profili (m)
k_v	Frekans Değişkeni (1/m)
Δk_v	Frekans Değişkeni Adım Aralığı (1/m)
$f(x, y)$	Nokta Saçıcı Fonksiyonu
β	Dönüşüm Uzayı Parametresi
N	Menzil ve Frekans Nokta Sayısı
n'	Menzil Uzayındaki Örnek İndisi
n	Frekans İndisi
ζ	Menzil Vektörü (m)
$\Delta\zeta$	Menzil Çözünürlüğü (m)

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
BG	Bant Genişliği (Hz)
z	Kutup Noktası
m	Sıfır Noktasına Taşınmış Frekans İndisi
L	Kalem Parametresi
$\dagger$	Pseudo Inverse
$H(z)$	Filtre Kazancı
H	Filtre Matrisi
q	Filtre Derecesi
$\mathbf{W}(\mathbf{r})$	Menzil Uzayında Pencereleme Fonksiyonu Vektörü
X	Çapraz Menzil Izgarası (m)
Y	Menzil Izgarası (m)
Δx	Çapraz Menzildeki Izgara Çözünürlüğü (m)
Δy	Menzildeki Izgara Çözünürlüğü (m)
R_{i,ϕ_α}	ϕ_α Açısındaki Ayrık Menzil Profili (m)
$p_{k,l,\alpha}$	k,l İndisli Pikselin α İndisli Bakış Doğrultusuna Dik İzdüşümü (m)
$n_{i,\alpha}(x_k, y_l)$	i İndisli Saçıcıya ve α İndisli Bakış Doğrultusuna Ait Dikey Çizgi
$S_{ff}(x_k, y_l)$	Uzak Alan Yapay Açıklıklı Radar Görüntüsü
$\mathbf{p}$	Piksel Vektörü (m)
$\mathbf{R}_0$	Ölçüm Mesafesi Vektörü (m)
$r_{k,l,\alpha}$	k,l İndisli Pikselin Oluşturduğu Çemberin Yarıçapı (m)
$c_{i,\alpha}(x_k, y_l)$	i İndisli Saçıcıya ve α İndisli Bakış Doğrultusuna Ait Çember
$S_{nf}(x_k, y_l)$	Yakın Alan Yapay Açıklıklı Radar Görüntüsü
$\mathbf{P}$	Konum Matrisi (m)
Θ	Açı Matrisi (derece)
$\mathbf{V}$	Hedef Koordinat Sistemindeki Ayrık Menzil Profilleri Matrisi (m)
$\Lambda(s, t)$	Maske Matrisi
T	Otsu Eşik Seviyesi

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
N_n	Toplam Küme Sayısı
$f'(x, y)$	Bölütlenmiş Yapay Açıklıklı Radar Görüntüsü
$R(x, y)$	(x, y) Pikselinin Bakış Doğrultusuna Radon Dönüşümü (m)
a'_i	Hesaplanan Saçıcı Merkezlerin Yansıtıcılık Değeri
$\sigma(f, \phi)$	Frekans ve Açıya Bağlı Radar Kesit Alanı (dBm ²)
λ	Dalga Boyu (m)
R_{ff}	Uzak Alan Şartı (m)
D	Ölçüm Alınan Cismin Boyutu (m)
τ	Grup Gecikmesi
f'	Kaydırılmış Frekans Vektörü (Hz)
$[\mathbf{F}]$	Veri Matrisi
$[\mathbf{F}_g]$	Geciktirilmiş Veri Matrisi
dB	Desibel
dBm ²	Desibel (m ²)

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
RKA	Radar Kesit Alanı (<i>RCS</i>)
YAR	Yapay Açıklıklı Radar (<i>SAR</i>)
TYAR	Ters Yapay Açıklıklı Radar (<i>ISAR</i>)
HFD	Hızlı Fourier Dönüşümü (<i>FFT</i>)
MKM	Matris Kalem Metodu (<i>MPM</i>)
BGMKM	Bant Geçiren Matris Kalem Metodu (<i>BPMPM</i>)
Gİ	Geri-İzdüşüm (<i>Back-Projection</i>)
ÇGİ	Çembersel Geri-İzdüşüm (<i>Circular Back-Projection</i>)
BBA	Bağlantılı Bileşen Analizi (<i>Connected Component Analysis</i>)
GB	Görüntü Bölütleme (<i>Image Segmentation</i>)

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
YGB	Yapay Açıklıklı Radar Görüntü Bölütleme
ASEMLAB	Açık Saha Elektromanyetik Laboratuvarı
RCS	Radar Cross Section
SAR	Synthetic Aperture Radar
FFT	Fast Fourier Transform
MPM	Matrix Pencil Method
BPMPM	Band Pass Matrix Pencil Method
CBP	Circular Back-Projection
IS	Image Segmentation
APSW	Approximate Prolate Spheroidal Wave
NUFFT	Nonuniform Fast Fourier Transform
PTRD	Projected Target Reflectivity Density
FIR	Finite Impulse Response
EM	Elektromanyetik
RSM	Radar Soğurucu Malzeme
EAO-HFD	Eşit Aralıklı Olmayan Hızlı Fourier Dönüşümü (<i>NUFFT</i>)
NYF	Nokta Yayılma Fonksiyonu (<i>Point Spread Function</i>)
HÇK	Hızlı Çembersel Konvolüsyon (<i>Fast Cyclical Convolution</i>)
KKD	Kutupsal-Kartezyen Dönüşümü
TRD	Ters Radon Dönüşümü (<i>Inverse Radon Transform</i>)
TÇRD	Ters Çembersel Radon Dönüşümü
KGİ	Kalem Geri-İzdüşüm
GKGİ	Geliştirilmiş Kalem Geri-İzdüşüm
YYKD	Yaklaşık Yayımlı Küresel Dalga (<i>APSW</i>)
SDC	Sonlu Dürtü Cevabı (<i>Finite Impulse Response, FIR</i>)
ŞG	Şartlı Genleşme (<i>Conditional Dilation</i>)
YE	Yapılandırıcı Eleman (<i>Structuring Element</i>)
WD	Watershed Dönüşümü

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
TBB	Tepe Bölge Bölütleme
STM	Süreksizlik Tespit Maskesi
EKKH	En Küçük Karesel Hata (<i>Least Squares</i>)
AFD	Ayrık Fourier Dönüşümü (<i>Discrete Fourier Transform</i>)
TAFD	Ters Ayrık Fourier Dönüşümü
FD	Fourier Dönüşümü
TFD	Ters Fourier Dönüşümü
THFD	Ters Hızlı Fourier Dönüşümü
TDA	Tekil Değer Ayrışımı (<i>Singular Value Decomposition</i>)
İGO	İşaret Gürültü Oranı
İHYY	İzdüşümlü Hedef Yansıtıcılık Yoğunluk (<i>PTRD</i>)
GVA	Grup Varyansı Arası (<i>Between Group Variance</i>)
YKGİ	Yakın Alan Kalem Geri-İzdüşüm

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. YAR ölçüm sistemi.	9
3.1. HFD menzıl profili.	29
4.1. Ters Radon dönüşümü.	35
4.2. Ters çembersel Radon dönüşümü.	37
4.3. Uzak alan Gİ ile oluşturulan YAR görüntüsü.	41
4.4. Yakın alan Gİ ile oluşturulan YAR görüntüsü.	42
4.5. Lineer denklem sistemi ile oluşturulan uzak alan YAR görüntüsü.	42
4.6. Lineer denklem sistemi ile hesaplanan saçıcı konumları.	43
4.7. Lineer olmayan denklem sistemi ile oluşturulan yakın alan YAR görüntüsü.	43
4.8. Lineer olmayan denklem sistemi ile hesaplanan saçıcı konumları.	44
4.9. THFD ve Gİ ile oluşturulan uzak-alan YAR görüntüsü.	44
5.1. Eşitlik (5.3) uzak alan YAR görüntüsü.	51
5.2. Eşitlik (5.3) yakın alan YAR görüntüsü.	52
5.3. Otsu metodu sonucunda elde edilen uzak alan YAR görüntüsü.	52
5.4. Otsu metodu sonucunda elde edilen yakın alan YAR görüntüsü.	53
5.5. Bölütlenmiş uzak alan YAR görüntüsü.	53
5.6. Bölütlenmiş yakın alan YAR görüntüsü.	54
6.1. Uzak alan ölçümler ile 10.5 GHz frekansında hesaplanan RKA değerleri.	58
6.2. Uzak alan ölçümler ile 0^0 açısında hesaplanan RKA değerleri.	59
6.3. Yakın alan ölçümler ile 10.5 GHz frekansında hesaplanan RKA değerleri.	59
6.4. Yakın alan ölçümler ile 0^0 açısında hesaplanan RKA değerleri.	60
6.5. Lineer denklem sistemi çözümü ile 10.5 GHz frekansında hesaplanan RKA değerleri.	61
6.6. Lineer denklem sistemi çözümü ile 0^0 açısında hesaplanan RKA değerleri.	61
6.7. Lineer olmayan denklem sistemi çözümü ile 10.5 GHz frekansında hesaplanan RKA değerleri.	62
6.8. Lineer olmayan denklem sistemi çözümü ile 0^0 açısında hesaplanan RKA değerleri.	62
6.9. İki farklı açıdaki uzak alan YAR ölçümleri ile 10.5 GHz frekansında hesaplanan RKA değerleri.	64

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.10. İki farklı açıdaki uzak alan YAR ölçümleri ile 0^0 açısında hesaplanan RKA değerleri.	65
7.1. TYAR ile ölçüm alınan cisim.	66
7.2. THFD ile 0^0 açısındaki uzak-alan menzil profili.	68
7.3. THFD ile 0^0 açısındaki yakın-alan menzil profili.	69
7.4. Uzak-alan için Bartlett-Hann penceresi kazanç ve faz grafikleri.	70
7.5. Yakın-alan için Bartlett-Hann penceresi kazanç ve faz grafikleri.	70
7.6. Uzak-alan durumu için 0^0 azimut açısında BGMKM ile hesaplanan ayırık menzil profili.	71
7.7. Yakın-alan durumu için 0^0 azimut açısında BGMKM ile hesaplanan ayırık menzil profili.	72
7.8. KGİ ile oluşturulan uzak-alan YAR görüntüsü.	73
7.9. GKGİ ile oluşturulan uzak-alan YAR görüntüsü.	73
7.10. YKGİ ile oluşturulan yakın-alan YAR görüntüsü.	74
7.11. GKGİ ile oluşturulan yakın-alan YAR görüntüsü.	74
7.12. Lineer denklem sistemi ile oluşturulan uzak-alan YAR görüntüsü.	75
7.13. Lineer olmayan denklem sistemi ile oluşturulan yakın-alan YAR görüntüsü.	75
7.14. Uzak-alan verileri ile RKA hesabı sonuçları, $\phi \in (-10^0, 0^0)$.	77
7.15. Uzak-alan verileri ile RKA hesabı sonuçları, $\phi \in (0^0, 10^0)$.	77
7.16. Yakın-alan verileri ile RKA hesabı sonuçları, $\phi \in (-10^0, 0^0)$.	78
7.17. Yakın-alan verileri ile RKA hesabı sonuçları, $\phi \in (0^0, 10^0)$.	78
7.18. Uzak-alan GKGİ ile yakın-alan GKGİ karşılaştırması, $\phi \in (-10^0, 0^0)$.	79
7.19. Uzak-alan GKGİ ile yakın-alan GKGİ karşılaştırması, $\phi \in (0^0, 10^0)$.	79
7.20. Lineer denklem sistemi ile lineer olmayan denklem sisteminin karşılaştırılması, $\phi \in (-10^0, 0^0)$.	80
7.21: Lineer denklem sistemi ile lineer olmayan denklem sisteminin karşılaştırılması, $\phi \in (0^0, 10^0)$	80
7.22. Lineer denklem sistemi ile uzak-alan GKGİ arasındaki RKA farkı.	81
7.23. Uzak-alan GKGİ ile yakın-alan GKGİ arasındaki RKA farkı.	81
7.24. Lineer denklem sistemi ile yakın-alan GKGİ arasındaki RKA farkı.	82
7.25. Lineer olmayan denklem sistemi ile yakın-alan GKGİ arasındaki RKA farkı.	82

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.26. Lineer denklem sistemi ile lineer olmayan denklem sistemi arasındaki RKA farkı.	83
7.27. Uzak-alan GKGI ve ölçüm sonuçları $\phi \in (-10^0, 0^0)$.	84
7.28. Uzak-alan GKGI ve ölçüm sonuçları $\phi \in (0^0, 10^0)$.	84

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Saçıcı merkezlerin yansıtıcılık ve menzil değerleri	29
3.2. AFD, HFD sonuçları	30
3.3. MKM sonuçları	31
3.4. MKM hatası	31
3.5. Farklı İGO değerleri ile tespit edilen saçıcı merkez sayıları	32
4.1. Hedef koordinat sistemindeki yansıtıcılık ve konum değerleri	41

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Konusu, Amacı ve Önemi

RKA bir cismin problem uzayındaki elektromanyetik (EM) dalgaları yansıtmı miktarını belirten, tanım olarak uzak alanda ifade edilen bir ölçüttür [1]. Problem uzayındaki EM dalgalar hedefte akım indüklemekte ve bu sebeple hedef kaynak görevi görerek ters EM yayılımına sebep olmaktadır. Hedeften saçılan EM dalgalar radar sistemleri ile izlenerek hedefin algılanması gerçekleştirilmektedir. Cisimlerin radarda görünme miktarını azaltmak için çeşitli radar soğurucu malzemeler (RSM) geliştirilmektedir. RSM'lerin ortak özelliği, ortamda bulunan EM dalgaların bir miktarını soğurması ve bu sayede kaplandığı cisimlerin EM yayılımını azaltmasıdır. RSM ile kaplı cisimlerin radarda görünme miktarının belirlenmesi amacıyla RKA ölçümleri veya hesaplamaları yapılmaktadır [2].

Pratik uygulamalarda RKA ölçümlerinin yapılabilmesi için uzak alan şartının sağlandığı durumda hedeften yansıyan EM dalgalarının örneklenmesine ihtiyaç vardır. Bu amaca yönelik kullanılan sistemlerden ikisi YAR ve ters yapay açıklıklı radar (TYAR)'dır. YAR ölçüm sistemlerinde sabit bir hedef etrafında radar anteni döndürülerek, belirli bakış açılarında hedeften yansıyan EM dalgalar örneklenmektedir. Alternatif olarak, sabit bir radar anteni kullanılarak radar anteninin döndürülmesi yerine TYAR tekniği ile cismin döndürülmesi ölçüm düzeneğinin kurulmasını kolaylaştırmaktadır. Fakat kütlesi yüksek hedeflerin döndürülmesi fiziksel imkânlardan dolayı zor olabilmekte ve bu durumda yakın alan ölçümleri yapılarak radar anteninin döndürülmesi ölçüm sistemlerinin kurulmasında önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Ayrıca ölçüm sahası, radar anteninin huzme genişliği ve gücüne bağlı olarak ölçüm verilerine eklenen çevre gürültüsü ve istenmeyen diğer yansımalar uzak alan ölçümlerinde etkisini daha fazla gösterebilmektedir.

Uzak alan şartının ölçüm ortamında sağlanması büyük problemlere neden olabilmektedir. Örneğin, en yüksek boyutu 15 m olan bir cismin (F16 savaş uçağı) 10 GHz frekansında uzak alan gereksinimi 15 km'dir. Bu sebeple, söz konusu cismin

RKA ölçümlerinin yapılabilmesi için en az 15 km uzunluğa sahip ölçüm sahası gerekmektedir. Bu durumda arazi ve güç problemleri ortaya çıkmaktadır.

YAR ve TYAR ölçüm sistemlerinde kullanılan network analizörün örnekleme sayısı ve bant genişliği, ölçülen S parametrelerinin hedefteki geri yansımayı sayısal verilerle doğru temsil edebilme miktarı bakımından kritik öneme sahiptir. Temel örnekleme kriteri olarak, ölçüm alınan S parametrelerinin menzildeki hedefleri doğru örnekleme için Nyquist koşulu sağlanmalıdır. Bu koşulun sağlanma gereksinimi uzak alanda problemlere sebep olabilmektedir. Örneğin, hedef üzerindeki saçıcı bölgelerin tespitindeki belirsizlik menzil çözünürlüğü ile yakın ilişkiye sahiptir. Menzil çözünürlüğünü arttırmak amacıyla bant genişliğinin yüksek tutulması, ölçülebilen en yüksek menzil sınırının azalmasına ve hedef üzerindeki saçıcı merkezlerin tespit edilememesine neden olabilmektedir. Bunun önüne geçmek için, bant genişliği artırılması durumunda örnekleme sayısı da arttırılmaktadır. Fakat örnekleme sayısının arttırılması beraberinde işlem yükünün yükselmesini de getirmektedir. Ayrıca, ölçümlerde kullanılabilecek bant genişliği ve örnekleme sayısı, ölçüm gereçlerinin donanım özellikleri ile sınırlıdır. Yakın alan ölçümlerinde örnekleme gereken en yüksek menzil değerinin uzak alana göre daha az olmasına bağlı olarak, belirli bir menzil çözünürlüğünde daha az nokta sayısı ile Nyquist koşulu sağlanabilmektedir.

Uzak alan yaklaşımlı ölçüm sistemlerinin beraberinde getirdiği problemlerden dolayı bu çalışmada yakın alan YAR ölçümleri ile uzak alan RKA hesabının yapılması amaçlanmaktadır.

1.2. Konunun Tarihçesi ve Yöntemlerin Belirlenmesi

Yakın alan ölçümlerinden uzak alan RKA hesabı konusunda literatürde önerilen yöntemlerden biri, kompleks değerli yakın alan YAR görüntüsünden RKA hesabıdır [3]-[5]. YAR ölçüm sistemi ile belirli açılarda toplanan verilerin frekans noktaları kutupsal dizilime sahiptir. [3]'de kutupsal dizilimli yakın alan ölçüm verilerinden YAR görüntüsü oluşturma ve uzak alan RKA hesabı için eşit aralıklı olmayan hızlı Fourier dönüşümü (EAO-HFD) kullanılmıştır. EAO-HFD algoritması

ölçüm verileri üzerinde interpolasyon işlemi ve HFD gerektirmektedir. İnterpolasyon işleminin hatası ve HFD'nin sınırlı örnekleme noktası ile gerçekleştirilmesi, nokta yayılma fonksiyonunun (NYF) oluşturulan YAR görüntüsü üzerindeki bozucu etkisini arttırmakta ve görüntünün bulanıklaşmasına sebep olmaktadır. Görüntü üzerinde beliren bu sayısal gürültüler RKA hatasını arttırmaktadır. [4]'de kutupsal dizilimli verilerle yakın alan YAR görüntüleme için kullanılan hızlı çembersel konvolüsyon (HÇK) algoritmasının performansı incelenmiştir. HÇK algoritması ile Kartezyen dizilimli görüntü elde edilebilmesi için tek boyutlu interpolasyon işlemi gerekmekte, bu sebeple NYF'nin görüntü üzerindeki bozucu etkisi [3]'deki yöntemle göre azalmaktadır. Ayrıca HÇK'nın performansı, örneklenen açı sayısı ile yakın ilişkiye sahiptir. Bu durum ölçüm süresini uzatmaktadır. [4]'de aynı zamanda kutupsal-Kartezyen dönüşümü (KKD) gerektirmeyen bir görüntüleme algoritması da verilmiştir. Bu algoritmanın performansı HÇK ile karşılaştırılarak her iki algoritmanın RKA hatası belirtilmiştir. Fakat bu algoritma da interpolasyon işlemi (açı boyutunda) gerektirmekte ve dolayısıyla interpolasyon işleminin getirdiği hatalar bu algoritmada da kendisini göstermektedir. Aynı makalede kutupsal görüntüden direkt olarak RKA hesabına imkân sağlayan bir algoritma daha incelenmiştir. Bu algoritma da HÇK işlemi gerektirmekte, fakat Kartezyen görüntü elde etmek için kullanılan interpolasyon işlemine gerek duymadığı için RKA hatasının azalmasına imkân sağlamaktadır. Fakat HÇK algoritmasında kullanılan sınırlı açı ve banttaki HFD işlemleri NYF'nin YAR görüntüsü ve RKA hatası üzerindeki bozucu etkisini sürdürmesine sebep olmaktadır. [5]'de kutupsal dizilimli verilerden yakın alan YAR görüntüsü oluşturmak için ters çembersel Radon dönüşümü (TÇRD) kullanılmıştır. TÇRD algoritması, her bir bakış açısındaki menzil profillerine ihtiyaç duymaktadır. Menzil profillerinin elde edilmesi işleminde meydana gelen Gibbs olayı ve sayısal gürültülerin etkisini azaltmak için Hamming penceresi kullanılmıştır. Pencereleme fonksiyonunun ana huzme genişliğinin dar olması için, kullanılan pencerenin uzunluğu arttırılmaktadır. Bu sebeple, toplanan verinin faz gecikmesi artmakta ve saçıcı merkezlerin kompleks değerli yansıtıcılıklarının fazı yanlış tespit edilmektedir. Ayrıca, ana huzmenin dar olması yan huzmelerin kazancını arttırmakta, bu sebeple menzilde gerçekte olmayan hedefler belirlemektedir. Bahsedilen bu durum herhangi bir uzay dönüşümünde pencereleme fonksiyonlarının kullanılması sırasında sıklıkla karşılaşılan önemli bir problemdir [6]. TÇRD algoritması aynı zamanda görüntüleme penceresinin ayrıklaştırılması ve her bir piksel üzerinde interpolasyon işlemi

gerektirmektedir. Bu sebeple TÇRD algoritmasının neden olduğu hatalar yine YAR görüntüsünde bulanıklığa ve yalancı hedeflerin belirmesine sebep olmaktadır. [5]'de elde edilen yakın alan YAR görüntüleri incelendiğinde, NYF'nin ana huzme genişliğinin saçıcı merkez etrafında sayısal gürültülere (kümelere) sebep olduğu görülmektedir. TÇRD'nin sebep olduğu bu sayısal gürültüler, görüntüden elde edilen RKA değerlerinin hatasını arttırmaktadır.

Uzak veya yakın alan YAR görüntülemeye uyarlanabilen geri-izdüşüm (Gİ) algoritması, kutupsal dizilimli verilerden Kartezyen görüntü elde etmek için kullanılan, geniş uygulama alanına sahip bir görüntü oluşturma tekniğidir. Gİ algoritmasının uzak alan YAR görüntüleme için formülleştirilmesi [7]'de yapılmıştır. Uzak alan ölçüm verilerinden Gİ ile YAR görüntüsünün elde edilmesi [8]'de $O(N^3)$ işlem yükü ile gerçekleştirilmiştir. Günümüze kadar Gİ algoritmasının işlem yükünü azaltan çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir [9]-[11]. Gİ algoritması tıpkı TÇRD gibi KKD gerektirmemektedir. Bu nedenle KKD işleminin görüntü kalitesindeki bozucu etkisi Gİ'de mevcut değildir. Fakat Gİ tıpkı TÇRD gibi görüntü penceresini ayırıklaştırma ve her piksel üzerinde interpolasyon işlemi gerektirmektedir. Bu işlemler YAR görüntüsünün kalitesini düşürmekte ve yalancı hedeflerin belirmesine sebep olmaktadır.

Tomografi temelli RKA hesaplamaları NYF'nin YAR görüntüsü üzerindeki bozucu etkilerine oldukça duyarlıdır. Daha yüksek kaliteli YAR görüntüleme, daha az hatalı RKA hesabına imkân sağlamaktadır. [12]'de uzak alan varsayımı altında Gİ algoritması ile oluşturulacak olan YAR görüntüsünün kalitesini arttırmak amacıyla kalem geri-izdüşüm (KGİ) algoritması literatürde ilk defa tanıtılmıştır. Öncelikle, Gİ algoritmasının ihtiyaç duyduğu ayırık menzil profilleri BGMKM kullanılarak sonsuz çözünürlükle elde edilmiştir. BGMKM'nin ihtiyaç duyduğu filtre türü için yaklaşık yayımlı küresel dalga (YYKD; *approximate prolate spheroidal wave, APSW*) fonksiyonu kullanılmıştır. Bu sayede, menzilde ilgilenilen bölge üzerine odaklanılarak MKM'nin gürültü performansı artırılmıştır. BGMKM ile elde edilen uzak alandaki ayırık menzil profilleri ters Radon dönüşümü (TRD) ile Gİ algoritmasına tabi tutularak uzak alan YAR görüntüsü oluşturulmuştur. Elde edilen görüntüler standart Gİ algoritması ile kıyaslanarak KGİ'nin özellikle menzil yönünde sonsuz çözünürlük sağladığı, çapraz menzildeki sayısal gürültülerin de önemli

miktarda azaldığı gösterilmiştir. [13]'de KGİ'nin filtreleme aşamasında YYKD fonksiyonu yerine sonlu dürtü cevabı (SDC) filtresi kullanılmıştır. SDC filtreli bu algoritma da standart Gİ algoritmasından daha yüksek kaliteli YAR görüntüsü oluşturmaktadır.

Bu tezde, KGİ'nin uzak alan YAR görüntüsünün kalitesi üzerine sağladığı gelişim bir GB algoritması ile daha da ilerletilerek geliştirilmiş kalem geri-izdüşüm (GKGİ) algoritması ilk defa tanıtılacaktır. Öyle ki, GKGİ algoritması KGİ algoritmasından farklı olarak hem menzil hem de çapraz menzilde sonsuz çözünürlük sağlamaktadır. Bu sayede tomografi temelli RKA hesaplama algoritması hatasının önemli miktarda azaltılabildiği gösterilecektir. YAR görüntü bölütleme (YGB) literatürde yeni değildir. [14]'de morfolojik yapıya sahip şartlı genleşme (ŞG) algoritması kullanılarak YAR görüntüsündeki nesnelerin arka plandan ayrılması sağlanmıştır. ŞG uygun yapılandırıcı elemana (YE) ihtiyaç duymaktadır. Seçilen YE'nin geometrik şekline bağlı olarak fazla bölütleme (yalancı hedef oluşumu) veya görüntü üzerindeki tepe bölgelerinin (saçıcı merkezlerin) kaybedilmesi gerçekleşebilir [15]. [16]'da süreksizlik tespiti için kullanılan Watershed dönüşümü (WD)'nin geliştirilmiş bir versiyonu tepe bölge bölütleme (TBB) işleminde kullanılmıştır. TBB işleminin ihtiyaç duyduğu eşikleme seviyesi kullanıcı tanımlı olarak belirlenmiştir. Fakat eşikleme seviyesinin değeri, yalancı hedef belirmesi veya saçıcı merkezlerin kaybedilmesine doğrudan etki etmektedir. Görüntü üzerindeki saçıcı merkezler ile arka plan arasındaki karışımı en aza indiren bir otomatik eşikleme işlemi, GB işleminin performansını iyileştirmekte ve dolayısıyla RKA hatasını azaltmaktadır. [17]'de Otsu tarafından histogram temelli bir otomatik eşikleme algoritması geliştirilmiştir. Otsu yöntemi, görüntü histogramının birbirinden ayrıştırılabilir birden çok gruptan meydana geldiğini varsaymaktadır. Bu iki grubun birbirine karışmasından kaynaklanan hatayı en düşük seviyeye getiren eşik seviyesi tespit edilerek kullanıcı tanımlı olmayan otomatik eşikleme gerçekleştirilmiştir. Otsu'nun geliştirdiği bu yöntem görüntü işlemede geniş uygulama alanına sahip olmakla birlikte, yakın zamanda reel değerli YAR görüntüsüne de uygulanmıştır. [18]'de lineer yapıya sahip bazı süreksizlik tespit operatörleri kullanılarak görüntü üzerindeki süreksizlik bölgelerinin kuvvetlendirilmesi sağlanmıştır. Ardından, Otsu eşikleme ile görüntü üzerinden arka plan kaldırılmıştır. Bu sayede reel değerli YGB işlemi gerçekleştirilmiştir. Fakat tomografi temelli RKA hesabı, saçıcı merkezlerin

konum ve yansıtıcılık değerlerini barındıran kompleks değerli YAR görüntüsüne ihtiyaç duymaktadır. Günümüze kadar YGB, temel olarak daha az hatalı hedef belirleme için daha temiz görüntü elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Fakat, YGB'nin tomografi temelli RKA hatasına etkisi bu tezde ilk defa incelenmiştir. GKGİ algoritmasında TBB işlemi herhangi bir YE kullanımına gerek duymayan süreksizlik tespit maskesi (STM) kullanılarak yapılmıştır. Bu sayede YE'nin bölütleme işleminin hatası üzerindeki etkisi bu çalışmada mevcut değildir. STM ile keskinleştirilmiş görüntüden arka planın kaldırılması Otsu eşikleme ile yapılmıştır. Saçı merkezlerin konumu, BBA'nın grupladığı her tepe bölgesinde en yüksek piksel değerinin bulunduğu konuma eşit alınmıştır. Fazla bölütlemeyi engellemek için, BBA ile tespit edilen saçıcı merkezlerin doğrusal veya çembersel Radon dönüşümü alınarak, BGMKM ile hesaplanan ayırık menzil profillerine en yakın olanlar dikkate alınıp, geri kalanlar atılmıştır. Saçı merkezlerin YAR görüntüsündeki piksel değerlerine ise, ilgili saçıcı merkez için BGMKM ile hesaplanan kompleks yansıtıcılık değeri atanmıştır. Bu sayede tepe bölgelerindeki sayısal gürültülerin filtrelenmesi ve yansıtıcılık hatasının azaltılması hedeflenmiştir. Kullanılan bu YGB yöntemi ile YAR görüntüsünden saçıcı merkezlere yönelik özellik çıkartımı yapılmış olup hem menzilde hem de çapraz menzilde sonsuz çözünürlük sağlanmıştır. Ayrıca [12]'de KGİ algoritması ile sadece menzilde sonsuz çözünürlüklü uzak alan YAR görüntüsü oluşturulmuş olup, bu algoritmanın RKA hesaplama performansı incelenmemiştir. Bu tezde, GKGİ ile tespit edilen saçıcı merkezler RKA hesabında kullanılmıştır ve bu algoritmanın RKA hatasına etkisi sayısal sonuçlarla gösterilmiştir.

GKGİ, uzak alan ölçümleri için [12]'de tanıtılmış olan KGİ algoritmasının geliştirilmiş versiyonu olsa da, GKGİ aynı zamanda yakın alan ölçümlerinden YAR görüntüleme ve uzak alan RKA hesabına da uygulanabilmektedir. Algoritmanın sadece Gİ aşamasını TÇRD ile değiştirerek yakın alan YAR görüntüleme gerçekleştirilmiştir. Aynı YGB algoritması ile tomografi temelli RKA hesabının ihtiyaç duyduğu saçıcı merkezlere yönelik konum ve kompleks yansıtıcılık değerleri elde edilmiştir. Yakın alan durumu için GKGİ algoritmasının YAR görüntüleme ve RKA hesaplama performansı sayısal sonuçlarla gösterilmiştir.

Bu çalışmada YAR görüntüleme ve RKA hesabı için geliştirilen yöntemlerden biri de denklem sistemi çözümüdür. Her bir bakış açısında uzak alanda MKM veya BGMKM ile elde edilen sonsuz çözünürlüklü ayrık menzil profilleri ölçüm alınan açı sayısı kadar lineer denklem çözümü belirtmektedir. Bu sistemin kökleri saçıcı merkezlerin konumu olmak üzere, değerleri en küçük karesel hata (EKKH) optimizasyonu ile elde edilmiştir. Yakın alan varsayımında ise sonsuz çözünürlüklü menzil profilleri lineer olmayan denklem sistemi belirtmektedir. Söz konusu denklem sisteminin kökleri hesaplanarak saçıcı merkezlerin konumu tespit edilmiştir. Saıcı merkezlerin yansıtıcılıkları ise yine MKM veya BGMKM ile elde edilen genlik değerleri ile tespit edilmiştir. Geliştirilen bu denklem sistemi çözümleri ile uzak veya yakın alan durumları için oluşturulan YAR görüntüler ve direkt hesaplanan RKA değerleri sayısal sonuçlarda gösterilmiştir.

1.3. Tezin Katkısı

Literatürde uzak veya yakın alan ölçümleri için önerilmiş olan tomografi temelli RKA hesapları saçıcı merkez özelliklerine ihtiyaç duymaktadır. [12]'de KGİ ile yüksek çözünürlüklü uzak alan YAR görüntüsü oluşturulmasına rağmen, oluşturulan görüntüden özellik çıkartımı ve RKA hesabı üzerinde çalışılmamıştır. Bu tezde ilk defa tanıtılan GKGİ algoritması ile yüksek çözünürlüklü uzak veya yakın alan YAR görüntüsü oluşturulmasına ek olarak, bu algoritmanın RKA hesabına katkısı da simülasyon ve gerçek ölçüm sonuçları ile gösterilmiştir. Ayrıca, KGİ algoritması sadece uzak alan durumu için geçerli olduğundan yakın alan verilerine uygulanamamaktadır. Bu sebeple, KGİ algoritması ile yakın alan verilerinden YAR görüntüleme veya RKA hesabı yapılamamaktadır. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak yakın alan verilerine MKM veya BGMKM ilk defa uygulanmıştır. Bu sebeple, MKM veya BGMKM ile yakın alanda ayrık menzil profilleri sonsuz çözünürlükle bu çalışmada literatürde ilk defa elde edilmiştir. Dolayısıyla, bu saçıcı merkezlerden Gİ ile yüksek çözünürlüklü yakın alan YAR görüntüsü oluşturulması ve bu görüntüden RKA hesaplanması bu çalışmada ilk defa yapılmıştır.

MKM veya BGMKM ile elde edilmiş ayrık menzil profillerinden yüksek çözünürlüklü YAR görüntüsü oluşturma veya direkt olarak RKA hesabına imkân

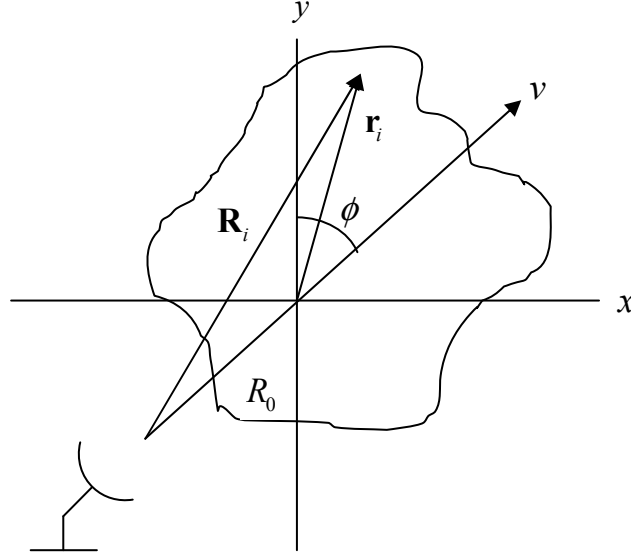
sağlayan denklem sistemi çözümleri bu çalışmada literatürde ilk defa yapılmıştır. Bu sayede literatürde ilk defa hem menzilde hem de çapraz menzilde sonsuz çözünürlüklü uzak veya yakın alan YAR görüntüsü oluşturulmuştur. Bu yöntem ile elde edilen saçıcı merkezler kullanılarak yapılan RKA hesabının doğruluğu belirli şartlar altında oldukça yüksektir.

Geleneksel yöntemler kullanılarak uzak veya yakın alanda oluşturulmuş kompleks değerli bir YAR görüntüsü NYF sebebiyle sayısal gürültülere sahiptir. Bu gürültüleri azaltmak ve görüntüdeki bir nesne hakkında veri çıkartımı yapmak için literatürde çeşitli GB algoritmaları mevcuttur. Fakat YAR görüntüsü üzerindeki GB algoritmalarının tomografi temelli RKA hesabına katkısı bu tezde literatürde ilk defa gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, YGB işlemi RKA hesabının hatasını önemli miktarda azaltmaktadır.

RKA ölçümleri, ilgilenilen tüm açılardaki yansıtıcılık değerlerine ihtiyaç duymaktadır. Örneğin, $\pm 15^\circ$ açı aralığında 0.1° hassasiyetli RKA ölçümlerinin yapılabilmesi için 301 farklı açıda ölçüm alınması gerekmektedir. Fakat bu çalışmada geliştirilen algoritmalar, aynı açı hassasiyeti ile RKA hesabının yapılabilmesi için toplamda sadece 2 farklı açıda ölçüme ihtiyaç duymaktadır. Bu sayede ölçüm süresi yaklaşık 150 kat azalmaktadır. Bu tezde geliştirilen algoritmaların bir diğer katkısı ise ölçümlerde kullanılan bant genişliği ve frekans sayısı üzerinedir. RKA ölçümlerindeki uzay dönüşümü işlemlerinin çözünürlüğü, kullanılan network analizörün ve antenlerin bant genişliği ile sınırlıdır. Ölçümlerdeki hatayı azaltmak amacıyla bant genişliğinin yüksek tutulması, ölçüm cihazlarının maliyetini ve ölçüm süresini önemli miktarda arttırmaktadır. Bu tezde geliştirilen algoritmalar kullanılarak, sınırlı bant genişliği ve örnek sayısı ile sonsuz çözünürlüklü saçıcı merkez tespiti ve yüksek doğruluklu RKA hesabı yapılmaktadır. Bu sayede, ölçümler için gerekli olan cihazların maliyeti ve ölçüm süresi önemli miktarda azalmaktadır.

2. YAPAY AÇIKLIKLI RADAR

Yapay açıklıklı radarlar, problem uzayındaki muhtemel hedefler tarafından yansıtılan EM dalgaları örnekleyen, işleyen ve amaca yönelik anlamlı bilgi haline getiren sistemlerdir. Aktif YAR sistemlerinde verici anten ile problem uzayına EM dalgaları gönderilir. Ardından alıcı antene gelen sinyaller işlenerek problem uzayındaki hedefler hakkında bilgiler elde edilir. Bu çalışmada Şekil 2.1’deki YAR ölçüm sistemi, saçıcı merkezlerin tespiti amacıyla kullanılmıştır. Burada x çapraz menzili, y menzili, ϕ azimut açısını, v belirli bir açıdaki menzil değerini, R_0 anten ile hedef koordinat sistemi arasındaki uzaklığı, R_i anten ile saçıcı merkez arasındaki uzaklık vektörünü, r_i ise saçıcı merkez vektörünü belirtmektedir.



Şekil 2.1. YAR ölçüm sistemi.

2.1. Saıcı Merkez Modeli

Bu çalışmada saçıcı merkezlerin problem uzayındaki konum ve yansıtıcılık değerlerinin ifade edilmesi için [12]’de verilen nokta saçıcı modeli kullanılmıştır.

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^M a_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i). \quad (2.1)$$

Bu modele göre belirli bir açıda menzil yönündeki nokta saçıcılar,

$$p(v) = \sum_{i=1}^M a_i \delta(v - v_i) \quad (2.2)$$

ifadesine sahiptir [12]. Eşitlik (2.2)'ye göre toplam M adet saçıcı merkez menzilde v_i konumuna, a_i kompleks yansıtıcılık değerine sahiptir.

Şekil 2.1'deki ölçüm sistemi, küresel koordinat sisteminin xy düzleminde düşünülebilir. Eşitlik (2.2)'yi Kartezyen düzlemde ifade edebilmek için,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi & \cos \theta \\ \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi & -\sin \theta \\ -\cos \phi & \sin \phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

dönüşüm matrisi kullanılabilir [19]. Buradaki koyu renkli ifadeler birim vektörleri göstermektedir. Bu durumda belirli bir açıdaki menzil vektörü,

$$\mathbf{v} = \sin \theta \sin \phi \mathbf{x} + \sin \theta \cos \phi \mathbf{y} + \cos \theta \mathbf{z} \quad (2.4)$$

eşitliğine sahip olur. Hedef üzerindeki her bir saçıcı merkez vektörü nokta saçıcı modeline göre Kartezyen düzlemde iki boyutlu konum vektörü belirtmektedir.

$$\mathbf{r}_i = x_i \mathbf{x} + y_i \mathbf{y}. \quad (2.5)$$

Problem uzayının xy düzleminde olmasından dolayı elevasyon açısı $\theta = 90^\circ$ olarak düşünülebilir. Bu durumda (2.2)'de görülen menzil yönündeki nokta saçıcılar Kartezyen koordinat sisteminde,

$$p(x, y) = \sum_{i=1}^M a_i \delta(x - x_i \sin \phi) \delta(y - y_i \cos \phi) \quad (2.6)$$

ifadesinde görüldüğü gibi gösterilebilir. Eşitlik (2.6) gereğince belirli bir azimut açısındaki menzil profili, her bir saçıcı merkezin bakış doğrultusuna Radon

dönüşümünden meydana gelmektedir [12]. Fakat bu model sadece düzlemsel dalga yayılımında (uzak alanda) geçerlidir. Yakın alanda küresel dalga yayılımı söz konusudur. Bu nedenle yakın alanda menzil profilleri saçıcı merkezlerin çembersel Radon dönüşümünden oluşmaktadır [5]. Buna göre yakın alan durumu için (2.2),

$$p(v) = \sum_{i=1}^M a_i \delta(v - |\mathbf{R}_i|) \quad (2.7)$$

ifadesine dönüşecektir. Eşitlik (2.1)'de verilmiş olan nokta saçıcı modeline göre, saçıcıların yansıtıcılık değerleri, gelen dalganın frekansına veya doğrultusuna bağlı değildir. Fakat gerçek uygulamalarda RSM'lerin yansıma katsayısı, tüm frekans bandında sabit değerli değildir. Öyle ki, ölçüm bant genişliğinin yeterince yüksek olduğu durumlarda RSM'lerin dispersif (frekans seçici) özellik göstermesinden dolayı, gelen dalgaların faz hızı frekansın fonksiyonu olmaktadır [20]. Bu sebeple, a_i değerleri tüm frekans bandında sabit olmayacaktır. Malzemelerin elektriksel özelliklerini ifade etmek için çeşitli dispersif modeller (Debye, Lorentz, Drude, vb.) geliştirilmiştir. Bu modellere göre, bağlı dielektrik veya manyetik geçirgenlikler ve dolayısıyla belirli bir banttaki harmoniklerin faz hızları frekans bağımlıdır [20]. Fakat YAR ölçümlerinde kullanılan bant genişliğinin yeterince dar olduğu durumlarda faz hızlarının yaklaşık sabit olması sebebiyle a_i yansıtıcılıklarının frekansın fonksiyonu olmadığı yaklaşımı, pratik uygulamalarda (2.1)'deki nokta saçıcı modelinin belirli bir hata dâhilinde kullanımına olanak sağlamaktadır.

Nokta saçıcı modelinin kullanımında dikkat edilmesi gereken bir diğer konu, yansıtıcılık değerlerinin açı bağımlı olmasıdır. Bir ortama gelen dalgaya ait yansıma katsayısı (2.8)'de verilmiştir [21]. Burada η_1 ve η_2 sırasıyla gelen dalganın bulunduğu ortamın ve malzemenin karakteristik empedansını göstermektedir. ϕ_r ve ϕ_t ise sırasıyla yansıyan ve iletilen dalgaların normal düzlemi ile yaptığı açı olmak üzere, aralarında Snell yasası ilişkisi vardır.

$$\Gamma = \frac{\eta_2 \cos \phi_r - \eta_1 \cos \phi_t}{\eta_2 \cos \phi_r + \eta_1 \cos \phi_t} \quad (2.8)$$

Malzemenin dispersif özelliklerinin (2.8)'e dâhil edilmesi halinde yansıma katsayısı,

$$\Gamma(\omega) = \frac{\sqrt{\frac{\mu_2(\omega)}{\epsilon_2(\omega)}} \cos \phi_r - \sqrt{\frac{\mu_1(\omega)}{\epsilon_1(\omega)}} \cos \phi_t}{\sqrt{\frac{\mu_2(\omega)}{\epsilon_2(\omega)}} \cos \phi_r + \sqrt{\frac{\mu_1(\omega)}{\epsilon_1(\omega)}} \cos \phi_t} \quad (2.9)$$

ifadesinde görüldüğü üzere frekans seçici hale gelecektir. Eşitlik (2.9) gereğince, RSM'nin elektriksel özellikleri ve kaplandığı hedefin geometrik özelliklerine bağlı olarak, YAR ölçümlerinde kullanılan bant genişliği ve azimut açıları, yansıma katsayılarının değerini değiştirecektir. Bu sebeple, (2.1)'de yansıtıcılıkların frekans ve açı bağımlı olmasından kaynaklanan hataları yeterince düşük seviyede tutacak bant genişliği ve açı aralığında ölçümler alınmalıdır.

2.2. S Parametreleri ve Ölçüm Verileri

Bu çalışmadaki YAR ölçümlerinde toplanan veriler, problem uzayındaki hedeflerden yansıyan EM dalgalarından, çevre yansımalarından ve gürültü bileşenlerinden oluşmaktadır. Alıcı antene gelen EM dalgaları örneklemek amacıyla ölçüm sisteminin S parametreleri ölçülmektedir. Bir sistemin S parametreleri, o sisteme ait saçılma matrisini oluşturmaktadır. Saçılma matrisi, (2.10)'da gösterildiği üzere belirli bir porttan verilen enerjiye karşılık yine belirli bir porttan alınan enerjinin ifade edilmesini sağlamaktadır. Toplam N porta sahip bir sisteme uygulanan gerilimlere karşılık, elde edilen çıkış gerilimleri,

$$\underbrace{\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix}}_{\text{Çıkış gerilimleri}} = \underbrace{\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2N} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix}}_{\text{Saçılma matrisi}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix}}_{\text{Giriş gerilimleri}} \quad (2.10)$$

ifadesine sahiptir. Saçılma matrisinin her bir S parametresini network analizör ile ölçebilmek için,

$$S_{mn} = \frac{V_m^-}{V_n^+}, \quad V_i^+ = 0, \quad i \neq m, n \quad (2.11)$$

ifadesi gereğince n ve m portları haricindeki diğer tüm portlardan geri yansıma olmaması (diğer portların uyumlu sonlandırılması) gerekmektedir [22]. Bu gereksinim sağlandığında m. porttan alınan gerilim,

$$V_m^- = S_{mn} V_n^+ \quad (2.12)$$

denklemini ile gösterilmektedir. Şekil 2.1'deki YAR ölçüm sisteminde kullanılan network analizörün m. portuna alıcı anten, n. portuna ise verici antenin bağlanması ve diğer tüm portların uyumlu sonlandırılması durumunda belirli bir bant genişliği ve azimut açısında ölçülen S parametresi,

$$S(\phi, k_v) = \int_x \int_y f(x, y) \cdot \frac{e^{-j2\pi k_v R_\phi}}{R_\phi^n} dy dx \quad (2.13)$$

integrali gereğince saçıcı fonksiyonunun tüm uzay üzerinden Fourier dönüşümünden meydana gelmektedir [3], [12]. Burada $k_v = 2f/c$ olmak üzere, ϕ azimut açısındaki menzil profili R_ϕ ile belirtilmektedir. Bu durumda S parametresi,

$$S(\phi, f) = \int_x \int_y f(x, y) \cdot \frac{e^{-j2\pi f \frac{2R_\phi}{c}}}{R_\phi^n} dy dx \quad (2.14)$$

halini almaktadır. Dikkat edilirse (2.14)'ün faz ifadesindeki $2R_\phi/c$ terimi dalga yayılımının gidiş-geliş süresidir.

Saçıcı merkezlere ait kullanılan model (2.13)'de yerine konursa (2.15)'de görüldüğü üzere, ölçüm verileri toplam saçıcı sayısı kadar eksponansiyel terimlerin toplamından oluşmaktadır [3], [12].

$$S(\phi, k_v) = \sum_{i=1}^M a_i \frac{e^{-j2\pi k_v R_{i,\phi}}}{R_{i,\phi}^n}. \quad (2.15)$$

Buradaki $R_{i,\phi}$ belirli bir azimut açısında i. saçıcıya ait menzil değerini göstermek üzere ölçüm mesafesi ve saçıcı konumları ile,

$$R_{i,\phi} = R_0 + x_i \sin \phi + y_i \cos \phi \quad (2.16)$$

$$R_{i,\phi} = \sqrt{R_0^2 + x_i^2 + y_i^2 + 2R_0 (x_i \sin \phi + y_i \cos \phi)} \quad (2.17)$$

eşitliklerindeki ilişkiye sahiptir [3], [12]. Burada, (2.16) sadece düzlemsel dalga yayılımında geçerli olmak üzere, bu ifade sadece uzak alan varsayımında kullanılmalıdır [12]. Eşitlik (2.17) ise her iki durum için genel bir ifade olmak üzere, hem uzak hem de yakın alanda kullanılabilir. Eşitlik (2.15)'in paydasındaki menzil profilinin kuvveti n , uzak alanda 1, yakın alanda ise 2 değeri almaktadır [3], [12].

Ölçüm verilerinden saçıcı merkezlere ait yansıtıcılık ve konum özelliklerinin tespiti için $f(x, y)$ nokta saçıcı fonksiyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaca yönelik, uzak veya yakın alanda menzil profillerinin elde edilmesi ve ardından iki boyutlu YAR görüntüsü oluşturulması bu çalışmada yapılacaktır. Dikkat edilirse $f(x, y)$ iki boyutlu uzayda kompleks değerli YAR görüntüsü ifade etmektedir [12].

Menzil profillerinin elde edilmesi için ölçüm verilerinde k_v frekans değişkeni üzerinden ayrık Fourier dönüşümü (AFD) kullanılabilir. AFD'nin daha hızlı versiyonu olan HFD ile de benzer sonuç elde edilebilir. Fakat AFD ve HFD'den daha yüksek doğruluğa sahip çeşitli sinyal işleme algoritmaları mevcuttur. Bir sonraki bölümde bu konu anlatılacaktır.

3. AYRIK MENZİL PROFİLLERİ

Bölüm 2.1’de bahsedildiği üzere bu çalışmada, problem uzayındaki muhtemel hedeflerin nokta saçıcılarıdan meydana geldiği varsayılmıştır. Saçıcı merkezlerden oluşturulacak olan YAR görüntüsünün menzil, çapraz menzil değerleri ve kompleks yansıtıcılıkları, her bir azimut açısında elde edilen ayrik menzil profillerinden tespit edilecektir. Bu nedenle, menzil profillerinin doğru hesaplanması, oluşturulacak YAR görüntüsünün kalitesini ve RKA hesabının güvenilirliğini doğrudan etkileyecektir.

3.1. Ayrik Fourier Dönüşümü

Fourier dönüşümünün zaman ve frekansta ayrik hali olan AFD veya HFD, ayrik sinyallerin harmonik bileşenlerini incelemek için birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşağıda α uzayındaki bir sürekli fonksiyonun harmonik bileşenleri cinsinden gösterilimi, ters Fourier dönüşümü (TFD) görülmektedir [19].

$$x(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\beta) e^{j2\pi\alpha\beta} d\beta. \quad (3.1)$$

Burada β dönüşüm uzayı parametresini, $X(\beta)$ ise $x(\alpha)$ fonksiyonunun harmonik bileşenlerinin kompleks genliklerini belirtmek üzere, bu genlikler (3.2)’de görüldüğü gibi Fourier dönüşümü (FD) ile ifade edilebilir [19].

$$X(\beta) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\alpha) e^{-j2\pi\alpha\beta} d\alpha. \quad (3.2)$$

YAR ölçümlerinde frekans uzayında toplanan verilerin ayrik olmasından dolayı menzil profillerinin elde edilmesi amacıyla, (3.2)’nin ayrik hali olan,

$$X[n] = \frac{1}{N} \sum_{n'=0}^{N-1} x[n'] e^{-j2\pi \frac{n'}{N-1} n} \quad (3.3)$$

ayrık Fourier dönüşümü (AFD) kullanılmalıdır [6]. Burada N menzil veya frekans nokta sayısını, n' menzil uzayındaki örnek indisini, n ise frekans indisini göstermektedir. Eşitlik (3.3)'ün YAR ölçüm verilerine uyarlanması bakımından, örnekleme ve frekans indisleri yerine frekans ve menzil vektörleriyle AFD işlemini ifade etmek, ölçüm verilerinden menzil profillerinin elde edilmesinde kolaylık sağlamaktadır.

$$X_{\phi}(k_v) = \frac{1}{N} \sum_{n'=0}^{N-1} x(\xi_0 + n' \Delta \xi) e^{-j2\pi k_v (\xi_0 + n' \Delta \xi)}. \quad (3.4)$$

Burada ξ_0 menzil vektörünün başlangıç değeri, Δk_v frekans uzayında toplanan verilerin örnekleme aralığı olmak üzere, ξ menzil vektörü

$$\xi = -\frac{1}{2\Delta k_v} : \Delta \xi : \frac{1}{2\Delta k_v} \quad (3.5)$$

ifadesi gereğince $\Delta \xi$ menzil çözünürlüğüne sahiptir. Elde edilen menzil profilinin belirsizliğini önemli miktarda etkileyen menzil çözünürlüğü,

$$\Delta \xi = \frac{1}{(N-1)\Delta k_v} \quad (3.6)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Frekans değişkeni k_v 'ye ait örnekleme aralığı; bant genişliği, frekans vektörü ve nokta sayısı cinsinden yazılıp (3.6)'da yerine konulduğunda,

$$\Delta k_v = \frac{2\Delta f}{c} = \frac{2BG}{c(N-1)} \quad (3.7)$$

$$\Delta \xi = \frac{c(N-1)}{2BG(N-1)} = \frac{c}{2BG} \quad (3.8)$$

eşitliğine göre menzil çözünürlüğü bant genişliği ile orantılıdır. Saçıncı merkezlerin konum tespitindeki belirsizliği azaltmak amacıyla menzil çözünürlüğünün

iyileştirilmesi gerekmektedir. Bunu sağlamak için bant genişliği arttırılmaktadır. Fakat bant genişliğinin artması, kompleks yansıtıcılık değerlerinin fazındaki belirsizliği azaltmamaktadır. Verici antenden gönderilen EM dalgalarına ait dalga boyu λ olmak üzere, frekansın en yüksek olduğu durumda dalga boyu en düşük değere sahiptir. Menzil çözünürlüğünü arttırmak amacıyla frekansın arttırılması dalga boyunu düşürmekte ve konum belirsizliğinin azalmasına karşılık faz hatası devam etmektedir. Bu durum AFD veya HFD kullanılarak kompleks yansıtıcılıkların bulunmasında önemli sorunlara sebep olmaktadır.

YAR ölçümlerinde, menzilde örneklenebilen en yüksek sınır değer,

$$\xi = -\frac{c(N-1)}{4BG} : \frac{c}{2BG} : \frac{c(N-1)}{4BG} \quad (3.9)$$

ifadesine göre bant genişliği ile azalmakta, frekans nokta sayısı ile artmaktadır. Bu durum uzak alan ölçümlerinde sorunlara neden olabilmektedir. Bant genişliği ve örnekleme sayısı ölçüm sistemlerinin donanım özellikleri ve hesap yükü ile sınırlıdır. Frekans uzayında toplanan verilerden menzil uzayına geçiş için,

$$x(\xi) = N \sum_{n=0}^{N-1} X_{\phi}(k_{v,0} + n\Delta k_v) e^{j2\pi\xi(k_{v,0} + n\Delta k_v)} \quad (3.10)$$

eşitliği gereğince ters AFD (TAFD) kullanılabilir. Burada $k_{v,0}$ frekans değişkeninin en düşük değeridir. Unutulmamalıdır ki, AFD ile TAFD arasında ikilik (duality) özelliği vardır [6]. Bu nedenle, ölçüm verilerinden AFD ile elde edilen menzil değerleri, olması gereken konum değerlerinin negatiftir. Bu çalışmanın geri kalanında TAFD yerine AFD tercih edilecektir. Fakat YAR görüntüleme ve RKA hesabı sırasında, AFD ile TAFD arasındaki ilişkiye dikkat edilmelidir. Ayrıca, AFD işleminin örtüşmesiz yapılabilmesi için tüm azimut açılarında menzil yönünde Nyquist koşulu sağlanmalıdır.

$$\max_{i,\phi} R_{i,\phi} \leq \frac{c(N-1)}{4BG}. \quad (3.11)$$

Burada i saçıcı merkez indisini göstermektedir.

TFD işlemi YAR ölçümlerinde $\pm\infty$ frekans aralığında sonsuz adet nokta gerektirdiği için nedensel bir ifade değildir. AFD'nin sınırlı bant genişliğinde yapılması menzıl uzayında sayısal gürültülere sebep olmaktadır. Sınırlı bantta toplanan ayrık veriler, $\pm\infty$ frekans aralığındaki sonsuz bant genişlikli işaretin dikdörtgen fonksiyonu ile çarpılması ile ifade edilebilir [6].

$$X_{\phi}(k_v) = \hat{X}_{\phi}(k_v) \Pi\left(\frac{ck_v}{2BG}\right). \quad (3.12)$$

Böylece, AFD ile elde edilen menzıl profilleri,

$$x(\xi) = \hat{x}(\xi) * \text{Sinc}\left(\xi \frac{2BG}{c}\right) \quad (3.13)$$

ifadesine göre ana huzme ve yan huzmelere sahiptir. Sinc fonksiyonundaki bant genişliği parametresi sonsuza yaklaştıkça, örnekleme işlemi ideale yakınsayacaktır.

$$\lim_{BG \rightarrow \infty} \hat{x}(\xi) * \text{Sinc}\left(\xi \frac{2BG}{c}\right) = \hat{x}(\xi) * \delta(\xi) = \hat{x}(\xi). \quad (3.14)$$

Pratik uygulamalarda bant genişliği sonsuz olamayacağı için örnekleme ideal olmayacaktır. Bu nedenle, belirli bir bant genişliğinde Sinc fonksiyonunun ana huzmesi menzıl çözünürlüğünü düşürmektedir. Ayrıca, yan huzmeler menzildeki diğer bileşenler için sayısal gürültü teşkil etmektedir. Buna bağlı olarak, yansıtıcılık değeri düşük olan saçıcılar, yüksek genlikli saçıcıların yanında gürültü seviyesinin altında kabul edilebilecektir. Bu bozucu etkileri azaltmak için çeşitli pencereleme fonksiyonları kullanılabilir. Bu durumda, örnek noktalarının AFD'si,

$$X_{\phi}(k_v) = \hat{X}_{\phi}(k_v) W(k_v) \quad (3.15)$$

$$x(\xi) = \hat{x}(\xi) * w(\xi) \quad (3.16)$$

ifadesine sahiptir [6]. Seçilen pencereleme fonksiyonunun şekline ve nokta sayısına bağlı olarak menzildeki ana huzme genişliğini daraltmak menzil çözünürlüğünü arttıracaktır. Fakat bu durum yan huzmelerin kazançlarını yükselterek gerçekte olmayan saçıcıların belirmesine sebep olabilecektir. Yan huzmelerin kazancını düşürmek ise ana huzmenin genişliğini arttıracak ve bu sebeple menzil çözünürlüğü düşecektir. Ana huzme genişliği ile yan huzme kazancı arasında sağlanması gereken bu denge, pencereleme fonksiyonlarının kullanımındaki temel karar verme aşamalarından biridir [6].

AFD veya HFD işlemlerinin sınırlı noktada yapılmasının getirdiği sorunlardan dolayı menzil profillerinde yapılan hatalar YAR görüntülemenin kalitesini ve RKA hesaplarının doğruluğunu azaltmaktadır. AFD veya HFD yerine MKM kullanımını tercih etmek, sınırlı örnek sayısı ve bant genişliğinde (nedensel sistemlerde) menzil profillerinin sonsuz çözünürlükle elde edilmesine imkân sağlamaktadır [23].

3.2. Matris Kalem Metodu

Matris kalem metodu, eksponansiyel değişim gösteren harmoniklerin toplamından oluşan sinyallerin kompleks genlik, kutup ve sönümleme faktörlerinin yüksek doğrulukla hesaplanmasını sağlamaktadır [23]. YAR ölçümlerinde toplanan veriler (2.15) gereğince sönümlemesiz olduğundan, bu konuda sönümleme faktörünün bulunması anlatılmayacaktır.

YAR ölçümlerinde toplanan veriler (3.17)'deki ifadeye sahiptir [12].

$$F_m = F((m + n_0)\Delta k_v) = \sum_{i=1}^M r_i z_i^m + w_m \quad (3.17)$$

$$r_i = b_i z_i^{n_0} \quad (3.18)$$

$$z_i = e^{-j2\pi R_{i,\phi}\Delta k_v}. \quad (3.19)$$

Burada m örnekleme indisini, n_0 bant geçiren bölgedeki sinyalin en düşük örnek indisini, M saçıcı merkez sayısını, w gürültü bileşenini, b_i ise i indisli saçıcıya ait eksponansiyelin kompleks genliğini göstermektedir. Örnekleme indisleri m ve n_0 arasında,

$$n_0 = \frac{\min k_v}{\Delta k_v}; \quad m = 0, 1, \dots, N - n_0 - 1 \quad (3.20)$$

ilişkisi vardır. Toplanan verilerden oluşturulmuş $[\mathbf{F}]$ matrisinin tekil değer ayrışımı (TDA), saçıcı merkez sayısının tespit edilmesine ve gürültü bileşenlerinin filtrelenmesine imkân sağlamaktadır [12].

$$[\mathbf{F}] = [\mathbf{f}_0 \mathbf{f}_1 \dots \mathbf{f}_L]_{(N-L) \times (L+1)} \quad (3.21)$$

$$\mathbf{f}_n = [F_n \ F_{n+1} \ \dots \ F_{N-L+n-1}]_{1 \times (N-L)}^T. \quad (3.22)$$

Burada L kalem parametresi olmak üzere, en etkili gürültü bastırma performansı için değeri $N/3 < L < N/2$ aralığında olmalıdır [12].

Eşitlik (3.21)'deki $[\mathbf{F}]$ matrisinin TDA'sı iki adet öz vektör matrisi ve bir adet tekil değer matrisinden oluşmaktadır [12].

$$[\mathbf{F}] = [\mathbf{U}][\mathbf{\Sigma}][\mathbf{V}]^H \quad (3.23)$$

Burada H kompleks eşlenik ile transpoz işlemlerinin ilgili matrise beraberce uygulanmasını ifade etmektedir. Hesaplanan $[\mathbf{\Sigma}]$ matrisinden son sütunun kaldırılması ile elde edilen kare matrisin diyagonal elemanları tekil değerleri vermektedir.

$$\sigma_1 > \sigma_2, \dots, \sigma_M > \sigma_{M+1}, \dots, \sigma_L. \quad (3.24)$$

Bunlardan en baskın ilk M tanesi saçıcı merkezlere, geri kalanlar ise gürültü bileşenlerine aittir [24]. Gürültü bastırma işlemi, en yüksek değerli M adet tekil değer ile filtrelenmiş $[\mathbf{F}]_f$ matrisinin yeniden oluşturulmasıyla yapılmaktadır [24].

$$[\mathbf{F}]_f = [\mathbf{U}]_f [\mathbf{\Sigma}]_f [\mathbf{V}]_f^H \quad (3.25)$$

$$[\mathbf{U}]_f = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_M] \quad (3.26)$$

$$[\mathbf{\Sigma}]_f = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M) \quad (3.27)$$

$$[\mathbf{V}]_f = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_M] \quad (3.28)$$

Eşitlik (3.23) gereğince $[\mathbf{\Sigma}]$ matrisinin tekil değer sayısı L tanedir. Bu nedenle, saçıcı merkez sayısının doğru tespit edilebilmesi ve gürültü bastırma işleminin yapılabilmesi için M sayısı $M \leq L \leq N - M$ koşulunu sağlamalıdır [23].

Matris kaleminin oluşturulması için kullanılacak olan $[\mathbf{F}_1]$ ve $[\mathbf{F}_2]$ matrisleri, $[\mathbf{F}]_f$ filtrelenmiş matrisin sırasıyla son ve ilk sütunlarının silinmesiyle elde edilmiş olsun. Bu durumda $[\mathbf{F}_1]$ ve $[\mathbf{F}_2]$ matrisleri arasında (3.29)'da görülen ilişki vardır.

$$[\mathbf{F}_2] - z[\mathbf{F}_1] = [\mathbf{Z}_1][\mathbf{R}]\{[\mathbf{Z}_0 - z[\mathbf{I}]]\}[\mathbf{Z}_2] \quad (3.29)$$

$$[\mathbf{Z}_1] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-L-1} & z_2^{N-L-1} & \dots & z_M^{N-L-1} \end{bmatrix}_{(N-L) \times M} \quad (3.30)$$

$$[\mathbf{Z}_2] = \begin{bmatrix} 1 & z_1 & \dots & z_1^{L-1} \\ 1 & z_2 & \dots & z_2^{L-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & z_M & \dots & z_M^{L-1} \end{bmatrix}_{M \times L} \quad (3.31)$$

$$[\mathbf{Z}_0] = \text{diag}[z_1, z_2, \dots, z_M] \quad (3.32)$$

$$[\mathbf{R}] = \text{diag}[r_1, r_2, \dots, r_M]. \quad (3.33)$$

Eşitlik (3.29)'un sağ yanında $z = z_i$, $i = 1, 2, \dots, M$ olması durumunda, matris kalemı olarak adlandırılan $[\mathbf{F}_2] - z[\mathbf{F}_1]$ ifadesinin rankı bir azalacaktır [12]. Bu sebeple (3.29)'daki matris eşitliğinin kökleri z_i değerlerini vermektedir.

$$[\mathbf{F}_2] - z[\mathbf{F}_1] = [\mathbf{0}]; \quad [\mathbf{F}_2] = z[\mathbf{F}_1]. \quad (3.34)$$

Burada $[\mathbf{F}_1]$ ve $[\mathbf{F}_2]$ kare olmayan iki matris olmak üzere, z_i değerlerinin bulunması (3.38)'de verilen öz değer bulma işlemi ile gerçekleştirilebilir [23].

$$[\mathbf{F}_1]^\dagger [\mathbf{F}_2] = z[\mathbf{I}] \quad (3.35)$$

$$[\mathbf{F}_1]^\dagger [\mathbf{F}_2] \mathbf{q} = z[\mathbf{I}] \mathbf{q} \quad (3.36)$$

$$[\mathbf{F}_1]^\dagger [\mathbf{F}_2] \mathbf{q} = z\mathbf{q}. \quad (3.37)$$

Eşitlik (3.37)'de z öz değerleri, $\mathbf{q}$ öz vektörleri belirtmektedir. Bu durumda saçıcı merkezlere ait z değerleri,

$$z_i = \text{eig}\left([\mathbf{F}_1]^\dagger [\mathbf{F}_2]\right), \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (3.38)$$

ifadesi ile hesaplanabilir [23]. Burada $\dagger$ Moore-Penrose ters alma işlemi olmak üzere değeri,

$$[\mathbf{F}_1]^\dagger = \left([\mathbf{F}_1]^H [\mathbf{F}_1]\right)^{-1} [\mathbf{F}_1]^H \quad (3.39)$$

eşitliği ile hesaplanabilir [24].

Eşitlik (3.38) ile elde edilen z_i değerleri (3.19)'da yerine konulursa, ϕ azimut açısındaki ayırık menzil profilleri,

$$R_{i,\phi} = -\frac{\angle z_i}{2\pi\Delta k_v}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (3.40)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. YAR görüntüsünün oluşturulması ve RKA hesaplarının yapılabilmesi için saçıcı merkezlerin konum bilgilerinin yanı sıra kompleks yansıtıcılık değerlerine de ihtiyaç vardır. Toplanan veriler matris formunda yazılırsa,

$$\begin{bmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_M \\ z_1^2 & z_2^2 & \cdots & z_M^2 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_M^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ \vdots \\ r_M \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

ifadesi oluşturulabilir [12]. Bu durumda (3.17) ve (3.18)'deki eksponansiyel terimlerin kompleks genlik değerleri,

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ \vdots \\ r_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_M \\ z_1^2 & z_2^2 & \cdots & z_M^2 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_M^{N-1} \end{bmatrix}^\dagger \begin{bmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_{N-1} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$b_i = \frac{r_i}{z_i^{n_0}}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (3.43)$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir. Saçıcıların kompleks yansıtıcılıkları (2.15) gereğince (3.44)'teki ifade ile hesaplanabilir.

$$a_i = b_i R_{i,\phi}^n. \quad (3.44)$$

TDA işlemi ile saçıcı merkez sayısının tespit edilebileceği ve veri matrisindeki gürültü bileşenlerinin bastırılabilceğinden bahsedilmiştir. Fakat veri matrisinin hasta dizilimli olması veya ölçüm verilerinde gürültü bileşenlerinin olması durumunda saçıcı merkezlere ait tekil değerlerden bazıları gürültü bileşenlerine karışabilir ve bu durumda bazı saçıcılar MKM sonucunda kaybedilmiş olabilir. Ayrıca (3.42)'deki ters alma işleminin hasta dizilimli matrislere duyarlı olmasından dolayı, TDA nedeniyle kaybedilen saçıcı merkezler (3.43) ile elde edilecek yansıtıcılıkların hatalı olmasına sebep olacaktır. Bu sorunları azaltmak amacıyla TDA işleminin performansını geliştirmek için BGMKM algoritması vardır.

3.3. Bant Geçiren Matris Kalem Metodu

Ölçüm verilerindeki çevre yankısı ve gürültü bileşenlerinin etkisini filtrelemek ve menzilde sadece saçıcı merkezlerin bulunduğu bölgeye odaklanmak, TDA işleminin performansını arttırmaktadır [25]. Söz konusu filtreleme işlemi, sonsuz dürtü cevaplı veya sonlu dürtü cevaplı filtreler kullanılarak yapılabilir.

3.3.1. Sonsuz Dürtü Cevaplı Filtreleme

Geri beslemeli bu filtreleme türünde çıkış sinyali $y(k)$, geçmiş çıkışlar ile geçmişten o ana kadar gelen giriş sinyallerinin lineer kombinasyonundan oluşmaktadır [6].

$$y(k) = \sum_{j=0}^J b_j x(j-k) - \sum_{i=1}^I a_i y(i-k). \quad (3.45)$$

Bu ifadenin ölçüm verileriyle gerçekleşmesi ileri yönlü işlem belirtmektedir. Bu sebeple çıkış sinyali, hem giriş sinyalinin kutuplarına hem de filtre transfer fonksiyonunun kutuplarına sahiptir [25]. Sonsuz dürtü cevaplı filtrenin çıkış sinyali MKM algoritmasına tabi tutulursa saçıcı merkezlere ait kutuplar ile filtre fonksiyonunun kutupları birbirine karışacaktır. Bu nedenle, giriş sinyalinin kutupları ile filtre kutuplarının birbirinden ayrılması gerekmektedir. Bu karışımı engellemek için [25]'de geri yönlü filtreleme algoritması geliştirilmiştir.

$$y(k) = \sum_{j=0}^J b_j x(j+k) - \sum_{i=1}^I a_i y(i+k). \quad (3.46)$$

Eşitlik (3.46)'daki geri yönlü işlem ile filtrenin kutuplarını birim çemberin dışında tutularak giriş sinyalinin kutupları ile transfer fonksiyonunun kutuplarının birbirinden ayrık olması sağlanmaktadır. Fakat bu ayrışımın yapılabilmesi için giriş sinyalinin kutupları birim çemberin içinde olmalıdır [25]. Ekspansiyel değişim gösteren nedensel bir $x(k)$ giriş sinyalinin Z dönüşümü,

$$x(k) = \sum_{i=0}^I \alpha_i^k e^{j\omega_i k} u(k) \xrightarrow{Z} \sum_{i=0}^I \frac{1}{1 - \alpha_i e^{j\omega_i} z^{-1}} \quad (3.47)$$

ifadesine sahiptir [6]. Eşitlik (3.47)'deki ifadenin kararlı olması için transfer fonksiyonunun Z düzlemindeki yakınsama bölgesi $|z| > |\alpha_i e^{j\omega_i}|$ eşitsizliğini sağlamalıdır [6].

$$|z| > |\alpha_i e^{j\omega_i}| = |\alpha_i| |e^{j\omega_i}| = |\alpha_i| \quad (3.48)$$

Filtre kutuplarının birim çemberin dışında olması için $|z| > 1$ şartı sağlanmalıdır. Bu durumda, (3.48) gereğince $|\alpha_i| < 1$ olmalıdır. Bu sebeple, geri yönlü filtreleme sadece sönümlü sinyaller için kullanılabilir [25]. Çıkış sinyalinin birim çemberin içinde kalan kısmı $y_x(k)$ olmak üzere,

$$y_x(k) = \sum_{j=0}^J b_j x(j+k) - \sum_{i=1}^I a_i y(i+k) \quad (3.49)$$

$$y_x(k) = \sum_{i=1}^M A_i z_i^k \quad (3.50)$$

$$A_i = R_i H(z_i) \quad (3.51)$$

ifadeleri ile geri yönlü filtreleme yapılmaktadır. Burada M ekspansiyel terim sayısı, R_i her bir ekspansiyel terimin genliği, $H(z_i)$ ise z_i noktasındaki filtre

kazancıdır [25]. Filtre tasarlanırken arzu edilen merkez frekansı ve bant genişliğine bağlı olarak filtrenin transfer fonksiyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Aşağıdaki işlemlerde geri yönlü filtrelemeye örnek vermek amacıyla, tasarımı kolaylaştırmak için filtre derecesi iki alınmıştır. Birim kazançlı, sonsuz dürtü cevaplı filtrenin kazancı,

$$H(z) = \frac{(z+1)(z-1)}{(z-re^{j\omega_0})(z-re^{-j\omega_0})} \quad (3.52)$$

ifadesine sahiptir. Burada ω_0 merkez frekansı, $r = 1/(1-BG)$ 'dir [25]. Filtrenin fark denklemini bulmak için (3.52) kanonik halde yazılırsa,

$$H(z) = \frac{1-z^2}{1-q_1z-q_2z^2}; \quad q_1 = \frac{2\cos\omega_0}{r}; \quad q_2 = -\frac{1}{r^2} \quad (3.53)$$

$$q_1 = 2(1-BG)\cos\omega_0; \quad q_2 = -(1-BG)^2 \quad (3.54)$$

eşitlikleri elde edilir. Giriş sinyalinin sönümlleme faktörü ve örnek sayısı yeterince yüksek olduğunda $x(k)$ ve $y(k)$ son örnekten sonra yaklaşık sıfır kabul edilebilir. Örnek sayısı N iken geri yönlü filtreleme işlemi,

$$y_x(N-1) \cong Kx(N-1) \quad (3.55)$$

$$y_x(N-2) \cong q_1y_x(N-1) + Kx(N-2) \quad (3.56)$$

$$y_x(k) = q_2y_x(k+2) + q_1y_x(k+1) + K(x(k) - x(k+2)); \quad 0 \leq k \leq N-3 \quad (3.57)$$

iterasyonları ile yapılabilir [25]. Burada K filtre kazancı olmak üzere birim kazançlı filtre için değeri 1'dir. Giriş sinyalinin sönümlü olmaması halinde (3.55) yazılamayacağı için (3.56) ve (3.57) geçerli olmayacaktır.

3.3.2. Sonlu Dürtü Cevaplı Filtreleme

Geri yönlü filtrelemenin sadece sönümlü sinyaller için kullanılabilmesi ve (3.55) ifadesinin neden olduğu hatadan dolayı sonsuz dürtü cevaplı filtreleme türü, YAR ölçüm verilerinin işlenmesinde sorunlara sebep olmaktadır. Saçıcılara ait konumların reel değerli olması sebebiyle ölçüm alınan S parametreleri (2.15) gereğince sönümlü olmayan eksponansiyellerin toplamından oluşmaktadır. Bu durumda, menzilde belirli bir bölgeye odaklanmak amacıyla sonlu dürtü cevaplı filtrenin tercih edilmesi daha uygundur. Ayrıca, bu filtre türünün geri besleme barındırmaması sebebiyle çıkış sinyalinde sadece giriş sinyalinin kutupları bulunmaktadır.

Giriş işaretinin nokta sayısı N olmak üzere, filtrelemenin lineer konvolüsyon ile yapılması halinde çıkış sinyalinin nokta sayısı $N + q - 1$ olacaktır. Bu sebeple filtre derecesinin yüksek olduğu durumda lineer konvolüsyon işlemi BGMKM'nin işlem yükünü arttıracaktır. Bu sorunla karşılaşmamak için [25]'de filtreleme işleminin dairesel konvolüsyon ile yapılması tercih edilmiştir.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h(q) & h(q-1) & h(q-2) & \cdots & h(0) \\ h(0) & h(q) & h(q-1) & \cdots & h(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ h(q-1) & h(q-2) & h(q-3) & \cdots & h(q) \end{bmatrix}_{(N-L) \times (N-L)} . \quad (3.58)$$

Eşitlik (3.58)'deki $\mathbf{H}$ matrisi dairesel konvolüsyon işleminde kullanılmaktadır. Bu eşitlikten görüldüğü üzere, matrisin ilk satırı filtrenin dürtü cevabının ters çevrilmiş halidir. Diğer satırlar ise bir önceki satırın birer indis sağa kaydırılmış halidir. Bu matrisin yazılabilmesi için, $N - L$ değerinin tek olduğu durumda filtre derecesi de $N - L$ olmalıdır. Aynı sebeple, $N - L$ değerinin çift olması halinde filtre derecesi $N - L - 1$ olmalıdır [25]. Dairesel konvolüsyon ile filtreleme işlemi,

$$[\mathbf{Y}_1] = \mathbf{H}[\mathbf{F}_1]; \quad [\mathbf{Y}_2] = \mathbf{H}[\mathbf{F}_2] \quad (3.59)$$

ifadeleri ile yapılabilir.

TDA ile gürültü bastırmanın yapılabilmesi ve saçıcı merkez sayısının tespit edilebilmesi için, $[\mathbf{Y}_1]$ ve $[\mathbf{Y}_2]$ matrislerinden TDA işlemine tabi tutulacak $[\mathbf{F}]'$ matrisi,

$$[\mathbf{F}]' = \left[[\mathbf{Y}_1], [\mathbf{Y}_2]_{\alpha, L} \right]_{(N-L) \times (L+1)} ; \quad \alpha = 1, 2, \dots, N-L \quad (3.60)$$

ifadesi ile oluşturulabilir. Bu aşamadan sonra $[\mathbf{F}]'$ matrisi MKM algoritmasına tabi tutularak menzilde sadece ilgilenilen bölgede bulunan saçıcı merkezlerin ayırık menzil profilleri elde edilebilir. Hesaplanan kompleks genlikler, filtre kazancı ile saçıcı merkezin yansıtıcılık değerlerinin çarpımına eşittir.

$$a'_i = H(z_i) a_i \quad (3.61)$$

Dairesel konvolüsyon işlemine alternatif olarak, ters hızlı Fourier Dönüşümü (THFD) ile hesaplanan menzil profilleri uygun bir pencereleme fonksiyonu ile çarpılarak da filtreleme yapılabilir. Bu durumda, TDA işlemine tabi tutulacak filtrelenmiş veriler,

$$[\mathbf{F}_f] = HFD_r \left\{ THFD_f \left\{ [\mathbf{F}] \right\} \cdot \mathbf{W}(\mathbf{r}) \right\} \quad (3.62)$$

haline gelecektir. Burada $\mathbf{W}(\mathbf{r})$, menzil uzayında pencereleme fonksiyonu vektörünü göstermektedir. Bu sayede, HFD ile frekans uzayına geçirilen filtrelenmiş verilerin nokta sayısı artmamaktadır.

3.4. AFD ile MKM Karşılaştırması

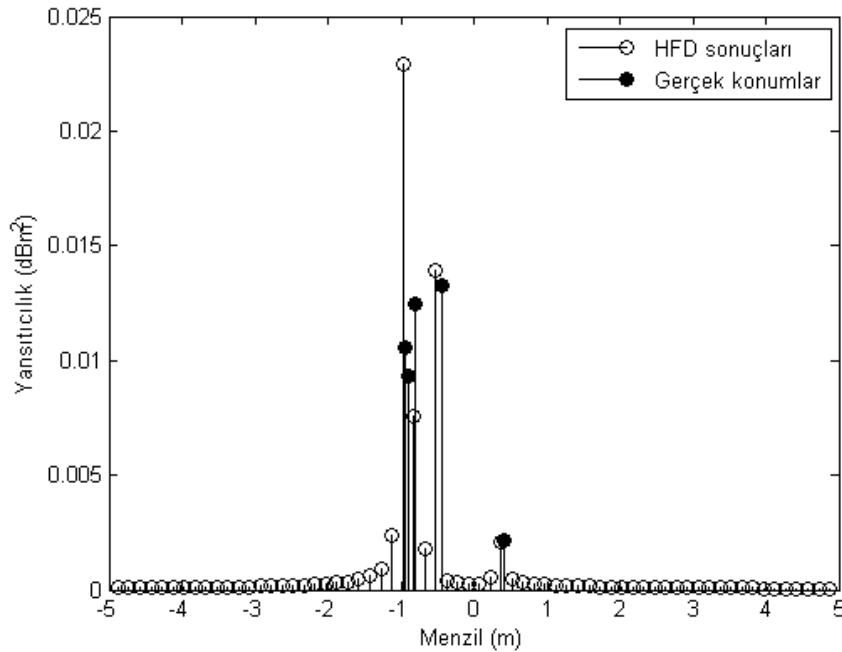
Bu başlık altında MATLAB programında üretilen gürültüsüz yapay ölçüm verilerinden AFD ve MKM ile menzil profilleri belirlenecektir. Çizelge 3.1'de ölçüm verileri oluşturulurken kullanılan saçıcıların hedef koordinat sistemindeki menzil ve yansıtıcılık değerleri görülmektedir.

Çizelge 3.1. Saçıcı merkezlerin yansıtıcılık ve menzil değerleri.

Saçıcı Num.	Yansıtıcılık	Menzil (m)
1	$(1,5761+j1,4188)10^{-3}$	0,4120
2	$(9,7059+j4,2176)10^{-3}$	-0,9363
3	$(9,5716+j9,1573)10^{-3}$	-0,4461
4	$(4,8537+j7,9220)10^{-3}$	-0,9076
5	$(8,0028+j9,5949)10^{-3}$	-0,8057

3.4.1. AFD (HFD) Simülasyonu

Çizelge 3.1’de verilen saçıcıların HFD ile menzil profillerinin bulunması amacıyla 10 GHz merkez frekansı ve 1 GHz bant genişliği kullanılmıştır. Dikdörtgen pencereleme fonksiyonu kullanılarak 256 noktalı HFD ile elde edilen menzil profili Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. HFD menzil profili.

Şekil 3.1’den görüleceği üzere HFD ile elde edilen menzil profili, tepe noktası saçıcı merkezlerin konumunda olan Sinc fonksiyonlarının menzil çözünürlüğü

aralığıyla örneklenmiş halinden meydana gelmektedir. Bant genişliğinin 1 GHz olması sebebiyle menzil çözünürlüğü 0.15 m'dir. Çizelge 3.1'de 2 ve 4 numaralı saçıcılar arasındaki konum farkı 0.0287 m'dir. Bu iki saçıcı arasındaki uzaklığın menzil çözünürlüğünden düşük olması sebebiyle HFD ile elde edilen menzil profilinde tek bir saçıcı merkez görünmektedir. Ayrıca, Sinc fonksiyonlarının yan huzmeleri, genlik değeri düşük saçıcıların tespit edilmesini zorlaştırmaktadır. HFD'nin sebep olduğu bir diğer sorun ise saçıcı merkezlerin kompleks yansıtıcılık değerlerinin yanlış tespit edilmesine neden olmasıdır. AFD ile elde edilen saçıcı merkezlerin konum ve yansıtıcılıkları Çizelge 3.2'de verilmiştir. Sonuçlara göre, tespit edilen saçıcı merkezlerin yansıtıcılık ve menzil değerlerinin hatalı olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.2. AFD, HFD sonuçları.

Saçıcı Num.	Yansıtıcılık	Menzil (m)
1	$(0,3494-j2,0253)10^{-3}$	0,3750
2,4	$(-1,4919-j1,7361)10^{-2}$	-0.9750
3	$(9,1684-j10,488)10^{-3}$	-0.5250
5	$(7,5058+j1,0240)10^{-3}$	-0.8250

3.4.2. MKM Simülasyonu

Çizelge 3.1'de verilen saçıcıların MKM ile yansıtıcılık ve menzil değerlerinin bulunması amacıyla yine 10 GHz merkez frekansı ve 1 GHz bant genişliği kullanılmıştır. Herhangi bir pencereleme fonksiyonu kullanmadan yapay oluşturulan veriler ile 256 noktada örnekleme yapılmıştır. TDA işlemi ile saçıcı merkez sayısını tespit etmek amacıyla (3.63) ifadesi kullanılmıştır. Kalem parametresi $L = 128$ alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. MKM sonuçları.

Saçıcı Num.	Yansıtıcılık	Menzil (m)
1	$(1,5761+j1,4188)10^{-3}$	0,4120
2	$(9,7059+j4,2176)10^{-3}$	-0,9363
3	$(9,5716+j9,1573)10^{-3}$	-0,4461
4	$(4,8537+j7,9220)10^{-3}$	-0,9076
5	$(8,0028+j9,5949)10^{-3}$	-0,8057

$$\frac{\sigma_k}{\sigma_{\max}} \geq 10^{-4}; \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (3.63)$$

Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.3'den görüldüğü üzere 4 haneli gösterimde MKM hatasız sonuç vermektedir. Hane sayısı 17 iken MKM'nin hatası Çizelge 3.4'de verilmiştir. Hata değerleri hesaplanırken (3.64) ifadesi kullanılmıştır.

$$\Delta_{\text{yansıtıcılık}} = a_{\text{üretilen}} - a_{\text{hesaplanan}}; \quad \Delta_{\text{menzil}} = |R_{\text{üretilen}} - R_{\text{hesaplanan}}| \quad (3.64)$$

Çizelge 3.4. MKM hatası.

Saçıcı Num.	Yansıtıcılık Hatası	Menzil Hatası (m)
1	$(-1,0593-j1,1376)10^{-14}$	$1,4988 \cdot 10^{-15}$
2	$(-1,6029+j2,0555)10^{-12}$	$5,1714 \cdot 10^{-13}$
3	$(1,2215-j1,6840)10^{-14}$	$3,6637 \cdot 10^{-15}$
4	$(-1,6490+j1,5391)10^{-12}$	$5,1891 \cdot 10^{-13}$
5	$(-6,5633+j1,0713)10^{-14}$	$1,0214 \cdot 10^{-14}$

MKM hata değerleri incelendiğinde bu algoritmanın 17 haneli işlem için en yüksek hatasının yansıtıcılıkta 10^{-12} , menzilde 10^{-13} mertebesindedir. MKM sadece ölçüm alınan uzay olan frekansta örnekleme gerektirdiği için menzil değerleri sonsuz çözünürlük ile elde edilmiştir.

3.5. MKM ile BGMKM Karşılaştırması

Bu başlık altında izelge 3.1’deki saçıcı merkezler kullanılarak MATLAB programında üretilen gürültülü ölçüm verileri ile MKM ve BGMKM’nin performansı karşılaştırılacaktır. BGMKM simülasyonlarında verilerdeki gürültü bileşenlerini filtrelemek amacıyla Hamming pencereleme fonksiyonlu, sonlu dürtü cevaplı filtre türü kullanılmıştır. Veriler yine 10 GHz merkez frekansı ve 1 GHz bant genişliği kullanılarak üretilmiştir. Filtre derecesini yükseltmek için 256 yerine 1601 noktada örnekleme yapılmış olup kalem parametresi $L = 800$ alınmıştır. Çizelge 3.5’de farklı işaret gürültü oranları (İGO) için MKM ve BGMKM ile tespit edilen saçıcı merkez sayıları görülmektedir.

Çizelge 3.5. Farklı İGO değerlerinde tespit edilen saçıcı merkez sayıları.

İGO (dB)	MKM	BGMKM
0	689	16
10	360	10
15	91	7
20	5	5
30	5	5

Çizelge 3.5’den görüldüğü üzere İGO değeri 20dB seviyesinin altına indiğinde her iki algoritma da saçıcı merkez sayısını yanlış bulmaktadır. Fakat BGMKM, verileri TDA işlemine tabi tutmadan önce n filtrelemeden geçirmesinden dolayı gürültülü veriler için MKM’ye göre daha yüksek performans sağlamaktadır.

Yansıtıcılık ve menzil değerlerinin belirlenmesinden sonra saçıcı merkezlerin iki boyutlu konumlarının tespit edilmesi amacıyla, Gİ kullanılarak YAR görüntüsü oluşturulmuştur. Saıcıların iki boyutlu konum tespiti için görüntü oluşturma gerektirmeyen denklem sistemi çözümü ile yüksek çözünürlükle YAR görüntüsü oluşturulmuştur. Bir sonraki bölümde YAR görüntüleme konusu anlatılacaktır.

4. YAR GÖRÜNTÜLEME

Bu çalışmanın konusu dahilinde olan tomografi temelli RKA hesaplamaları, menzil profillerinden uzak veya yakın alan YAR görüntüsü oluşturma işlemini gerektirmektedir. YAR ölçümleri uzak veya yakın alanda yapılabileceğinden, bu bölümde hem uzak hem de yakın alan YAR görüntüleme anlatılacaktır.

4.1. Geri-İzdüşüm

Geri-İzdüşüm, kutupsal frekans dizilimli ölçüm verilerinden Kartezyen görüntü oluşturmak için kullanılan bir algoritmadır. Bu algoritmanın KKD gerektirmemesi nedeniyle spektral uzayda herhangi bir interpolasyon işlemine ihtiyaç duymamaktadır. Dolayısıyla KKD'nin beraberinde getirdiği interpolasyon hataları bu algorithmada mevcut değildir.

Uzak alanda ölçüm alınırken uzaydaki düzlemsel dalga yayılımından dolayı izdüşümlü hedef yansıtıcılık yoğunluk (İHY) fonksiyonu (2.6)'ya göre, saçıcıların belirli bir ϕ azimut açısındaki menzil doğrultusuna dik izdüşümünün toplamından (Radon dönüşümünden) meydana gelmektedir [12]. Bu sebeple, uzak alan YAR görüntüleme için MKM veya BGMKM ile elde edilen ayrık menzil profilleri TRD işlemine tabi tutulmuştur.

Yakın alanda MKM veya BGMKM ile hesaplanan menzil değerleri, yarıçapı Şekil 2.1'deki R_i vektörünün boyu kadar olan dairelerin menzil çizgisini kestiği noktalardan meydana gelmektedir. Dolayısıyla yakın alan YAR görüntüsü oluşturmak için ayrık menzil profillerine TCRD işlemi uygulanmalıdır [5].

4.1.1. Uzak Alan Geri-İzdüşüm

Ayrık menzil profillerinden oluşturulacak YAR görüntüsü $S(x,y)$ matrisine, sırasıyla çapraz menzil ve menzilde X ve Y ızgaralarına, Δx ve Δy ızgara çözünürlüklerine sahip olsun. Her bir bakış açısındaki İHY fonksiyonu (4.1)'de

gösterildiği gibi menzil doğrulama işlemi ile i indisli saçıcı merkez için hesaplanabilir.

$$v_{i,\alpha} = R_{i,\phi_\alpha} - R_0; \quad i = 1, 2, \dots, M; \quad \alpha = 1, 2, \dots, \zeta. \quad (4.1)$$

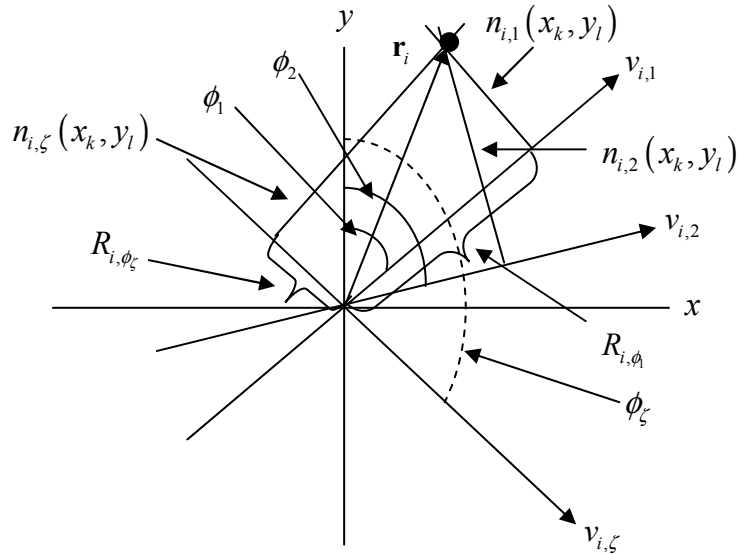
Burada ζ ölçüm alınan açı sayısını göstermektedir. YAR görüntüleme penceresindeki her pikselin ϕ azimut açısındaki menzil çizgisine dik izdüşümü,

$$p_{k,l,\alpha} = x_k \sin \phi_\alpha + y_l \cos \phi_\alpha \quad (4.2)$$

$$k = 1, 2, \dots, N_x; \quad l = 1, 2, \dots, N_y \quad (4.3)$$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_{N_x}]; \quad Y = [y_1, y_2, \dots, y_{N_y}]; \quad \phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_\zeta] \quad (4.4)$$

olarak ifade edilebilir. Burada N_x ve N_y sırasıyla çapraz menzil ve menzildeki ızgara nokta sayısıdır. TRD, Şekil 4.1'de gösterildiği gibi ϕ açısında hesaplanan her bir menzil noktasındaki bakış doğrultusuna dik çizgilerin tüm açılar üzerinden toplamı ile yapılmaktadır [12].



Şekil 4.1. Ters Radon dönüşümü.

Saçıcı merkezlere ait her bir dikey çizgi,

$$n_{i,\alpha}(x_k, y_l) = \begin{cases} a_i & ; |p_{k,l,\alpha} - v_{i,\alpha}| \leq \Delta/2 \\ 0 & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (4.5)$$

ifadesi ile belirlenebilir. Burada, a_i i indisli saçıcının kompleks yansıtıcılık değeri, $\Delta \leq \Delta x, \Delta \leq \Delta y$ 'dir. Eşitlik (4.5)'den görüleceği üzere, dikey çizgiler belirlenirken en yakın komşu kurallı interpolasyon işlemi yapılmaktadır. Uzak alan YAR görüntüsü, (4.5)'deki dikey çizgiler toplanarak oluşturulabilir.

$$S_{ff}(x_k, y_l) = \frac{1}{\zeta} \sum_{i=1}^M \sum_{\alpha=1}^{\zeta} n_{i,\alpha}(x_k, y_l). \quad (4.6)$$

Görüntü penceresindeki her piksel üzerinde yapılan interpolasyon işlemi, TRD ile oluşturulan uzak alan YAR görüntüsünde sayısal gürültülere sebep olmaktadır. Bu gürültüler YAR görüntüsünü bulanıklaştırmakta ve görüntü üzerinde ön işlem yapılmaksızın RKA hesabı yapılması halinde hatalı değerler elde edilmesine sebep olmaktadır.

4.1.2. Yakın Alan Geri-İzdüşüm

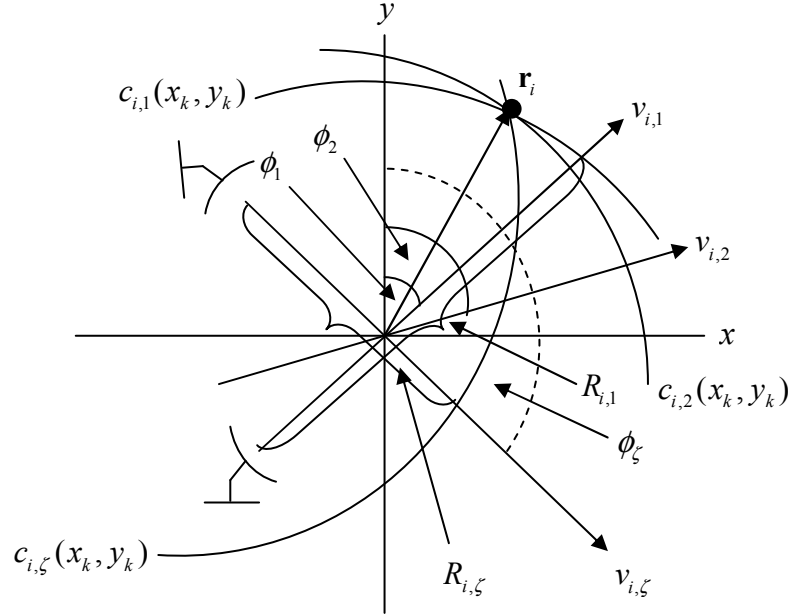
Radar anteni problem uzayının merkezinde konumlandırılmış olsun. Görüntü penceresindeki her pikselin anten koordinat sistemine göre yönü ve şiddeti vardır. Bu durumda, her piksel $\mathbf{p}$ vektörü belirtmektedir. Anten ile hedef koordinat sistemi arasındaki uzaklık vektörü $\mathbf{R}_0$ olmak üzere, görüntü penceresindeki her pikselin anten koordinat sisteminde oluşturduğu çemberin yarıçapı,

$$r_{k,l,\alpha} = |\mathbf{R}_0 + \mathbf{p}_{k,l}| \quad (4.7)$$

denkleminde sahiptir. Burada,

$$\mathbf{p}_{k,l} = x_k \mathbf{x} + y_l \mathbf{y}; \quad \mathbf{R}_0 = x R_0 \sin \phi_\alpha + y R_0 \cos \phi_\alpha \quad (4.8)$$

ifadeleri geçerlidir. TÇRD, Şekil 4.2’de gösterildiği gibi her bir saçıcı merkezin oluşturduğu çemberin ϕ açısındaki bakış doğrultusunu kestiği noktalardan çizilecek çemberlerin tüm açılar üzerinden toplamı ile ifade edilmektedir [5].



Şekil 4.2. Ters çembersel Radon dönüşümü.

Saçıcı merkezlere ait her bir çember,

$$c_{i,\alpha}(x_k, y_l) = \begin{cases} a_i & ; |r_{k,l,\alpha} - R_{i,\phi_\alpha}| \leq \Delta/2 \\ 0 & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (4.9)$$

ifadesi ile belirlenebilir. Yakın alan YAR görüntüsü, (4.9)’da verilen çemberlerin tüm açılar üzerinden toplamı ile oluşturulmaktadır.

$$S_{nf}(x_k, y_l) = \frac{1}{\zeta} \sum_{i=1}^M \sum_{\alpha=1}^{\zeta} c_{i,\alpha}(x_k, y_l). \quad (4.10)$$

Tıpkı uzak alan durumundakine benzer olarak, pikseller üzerinde yapılan en yakın komşu kurallı interpolasyon işlemi, TÇRD ile oluşturulan yakın alan YAR görüntüsünde sayısal gürültülere sebep olmaktadır.

4.2. Denklem Sistemi Çözümü

Ayrık menzil değerlerinden YAR görüntüsü oluşturmak amacıyla kullanılan Gİ algoritmasına alternatif olarak, bu tezin yazarı tarafından [26]'da lineer denklem çözümlü uzak alan YAR görüntüleme algoritması geliştirilmiştir. Benzer algoritma yakın alan YAR görüntülemeye de uyarlanabilmektedir. YAR ölçüm verilerinden sonsuz çözünürlük ile hesaplanan menzil ve yansıtıcılık değerleri, (2.16) ve (2.17) gereğince uzak veya yakın alanda denklem sistemi belirtmektedir. Bu denklem sisteminin çözümü saçıcı merkezlerin problem uzayındaki konumunu vermektedir. Saçıcıların kompleks yansıtıcılıkları ise MKM veya BGMKM ile belirlenmektedir. Elde edilen konum ve yansıtıcılık değerleri YAR görüntüsü oluşturmak amacıyla kullanılabileceği gibi, direkt olarak RKA hesabında da kullanılabilir. Bu başlık altında denklem sistemi çözümü ile yüksek çözünürlüklü YAR görüntüleme anlatılacaktır.

4.2.1. Uzak Alan

Uzak alanda sonsuz çözünürlük ile hesaplanan ayrık menzil değerleri (2.16) gereğince,

$$\begin{aligned}
 R_{1,i} &= R_0 + x_1 \sin \varphi + y_1 \cos \varphi \\
 R_{2,i} &= R_0 + x_2 \sin \varphi + y_2 \cos \varphi \\
 &\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\
 R_{M,i} &= R_0 + x_M \sin \varphi + y_M \cos \varphi
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

denklem sistemi ile ifade edilebilir. Burada, $i=1,2,\dots,\zeta$; $\varphi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_\zeta]_{1 \times \zeta}$ olmak üzere, (4.11) matris formunda yazılırsa,

$$\mathbf{R} = R_0 + \mathbf{P}\boldsymbol{\Theta} = \begin{bmatrix} R_{1,\phi_1} & R_{1,\phi_2} & \cdots & R_{1,\phi_\zeta} \\ R_{2,\phi_1} & R_{2,\phi_2} & \cdots & R_{2,\phi_\zeta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{M,\phi_1} & R_{M,\phi_2} & \cdots & R_{M,\phi_\zeta} \end{bmatrix}_{M \times \zeta} \tag{4.12}$$

elde edilir. Burada,

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots \\ x_M & y_M \end{bmatrix}_{M \times 2} ; \quad \mathbf{\Theta} = \begin{bmatrix} \sin \phi_1 & \sin \phi_2 & \dots & \sin \phi_\zeta \\ \cos \phi_1 & \cos \phi_2 & \dots & \cos \phi_\zeta \end{bmatrix}_{2 \times \zeta} \quad (4.13)$$

olmak üzere, (4.12)'den ölçüm mesafesi R_0 çıkarılırsa, hedef koordinat sistemindeki menzil matrisi,

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_{1,\phi_1} & v_{1,\phi_2} & \dots & v_{1,\phi_\zeta} \\ v_{2,\phi_1} & v_{2,\phi_2} & \dots & v_{2,\phi_\zeta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{M,\phi_1} & v_{M,\phi_2} & \dots & v_{M,\phi_\zeta} \end{bmatrix}_{M \times \zeta} ; \quad v_{i,\phi_j} = R_{i,\phi_j} - R_0 \quad (4.14)$$

ifadesine sahip olur. Bu durumda saçıcı merkezlerin konum matrisi,

$$\mathbf{P} = \mathbf{V}\mathbf{\Theta}^\dagger \quad (4.15)$$

işlemi ile hesaplanabilir.

Lineer denklem sistemi çözümü ile saçıcı merkez tespitinin belirsizliği, ölçümlerde kullanılan açı sayısı ile yakın ilişkiye sahiptir. xy düzleminde açı sayısının ikiden yüksek olduğu durumda (4.11) gereğince artık belirtilmiş denklem sistemi söz konusudur. Bu sistemin çözümü (4.15)'de verilmiştir. Artık belirtilmiş sistemde Moore-Penrose ters alma işlemi en küçük karesel hata optimizasyonu ile hesaplanmaktadır. Açı aralığının yeterince küçük olduğu durumda hasta dizilimli açı matrisi söz konusudur. Buna bağlı olarak, ters alma işleminde meydana gelebilecek olası hata saçıcı merkezlerin konumlarının yanlış tespit edilmesine neden olacaktır. Lineer denklem sistemi çözümü ile YAR görüntülemenin uzak alan Gİ algoritmasına göre temel dezavantajı ölçümlerde kullanılan açı aralığının yeterince yüksek olması gereğidir.

Ölçümlerde kullanılan açı sayısının ikiden az olduğu durumda (4.11) gereğince eksik belirtilmiş denklem sistemi söz konusudur. Denklem sistemindeki bilinmeyen sayısının denklem sayısından yüksek olduğu bu durumda saçıcı merkezlere yönelik sonsuz adet çözüm söz konusudur. Bu sebeple, saçıcı merkezlerin iki boyutlu uzayda doğru tespit edilebilmesi için açı sayısının en az iki olması gerekmektedir.

4.2.2. Yakın Alan

Yakın alanda sonsuz çözünürlük ile hesaplanan menzil değerleri (2.17) gereğince,

$$\begin{aligned} R_{1,i} &= \sqrt{R_0^2 + x_1^2 + y_1^2 + 2R_0(x_1 \sin \varphi + y_1 \cos \varphi)} \\ R_{2,i} &= \sqrt{R_0^2 + x_2^2 + y_2^2 + 2R_0(x_2 \sin \varphi + y_2 \cos \varphi)} \\ &\vdots \\ R_{M,i} &= \sqrt{R_0^2 + x_M^2 + y_M^2 + 2R_0(x_M \sin \varphi + y_M \cos \varphi)} \end{aligned} \quad (4.16)$$

denklem sistemi ile ifade edilebilir. Denklem sisteminin her iki tarafının karesi alınırsa,

$$\begin{aligned} x_1^2 + y_1^2 + 2R_0(x_1 \sin \varphi + y_1 \cos \varphi) + R_0^2 - R_{1,i}^2 &= 0 \\ x_2^2 + y_2^2 + 2R_0(x_2 \sin \varphi + y_2 \cos \varphi) + R_0^2 - R_{2,i}^2 &= 0 \\ &\vdots \\ x_M^2 + y_M^2 + 2R_0(x_M \sin \varphi + y_M \cos \varphi) + R_0^2 - R_{M,i}^2 &= 0 \end{aligned} \quad (4.17)$$

elde edilir. Görüldüğü üzere, yakın alan menzil değerlerinden oluşturulan (4.17)'nin kökleri saçıcıların konumunu vermektedir.

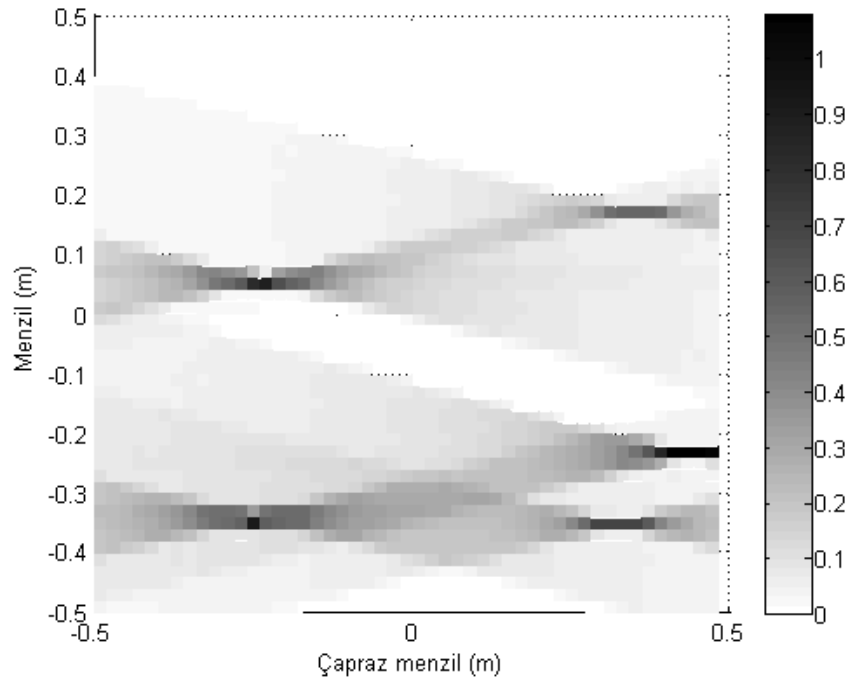
4.3. Simülasyonlar

Bu başlık altında uzak ve yakın alan YAR görüntüleme algoritmalarının performansını incelemek amacıyla Çizelge 4.1'deki saçıcı merkezler kullanılacaktır.

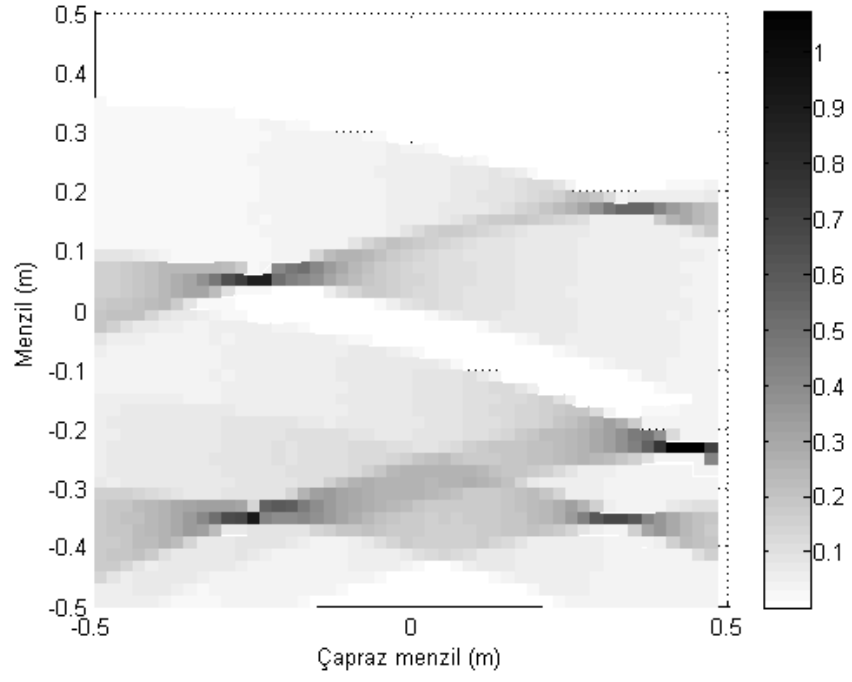
Çizelge 4.1. Hedef koordinat sistemindeki yansıtıcılık ve konum değerleri.

Saçıcı Num.	Yansıtıcılık	Menzil (m)	Çap. M. (m)
1	$0.3500 + j0.3517$	0.1593	0.3407
2	$0.1966 + j0.8308$	0.0472	-0.2457
3	$0.2511 + j0.5853$	-0.3614	0.3143
4	$0.6160 + j0.5497$	-0.3507	-0.2565
5	$0.4733 + j0.9172$	-0.2425	0.4293

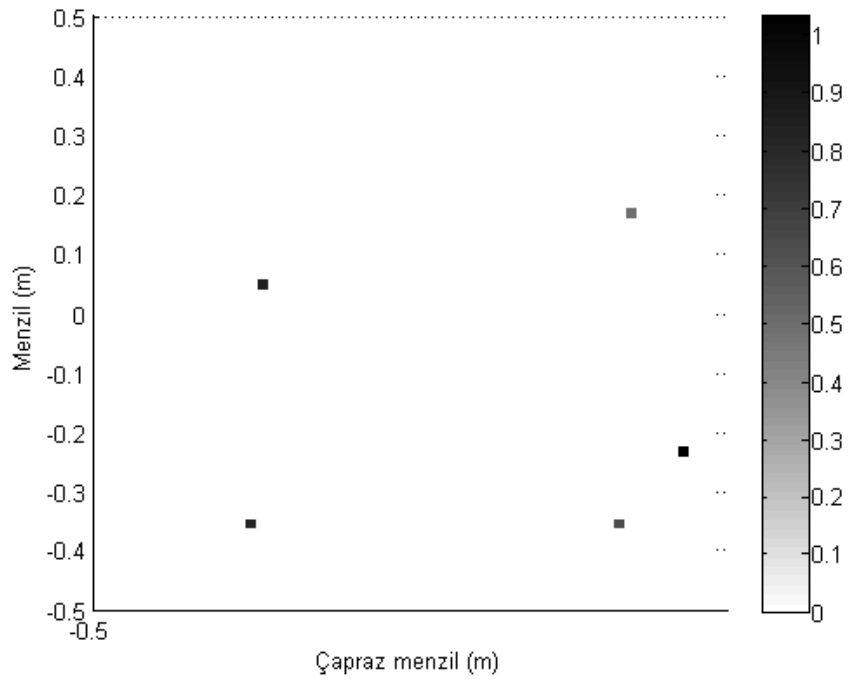
Uzak veya yakın-alan Gİ algoritmalarının neden olduğu sayısal gürültüleri göstermek amacıyla veriler gürültü eklenmeden oluşturulmuştur. Veriler 10 GHz merkez frekansı ve 1 GHz bant genişliğinde 512 noktada üretilmiştir. Kalem parametresi $L = 255$, görüntü penceresinin piksel sayısı 50×50 , azimut açısı için $\pm 15^\circ$ aralığında 301 nokta kullanılmıştır. Denklem sistemi çözümlerinde açı sayısı 60 alınmıştır.



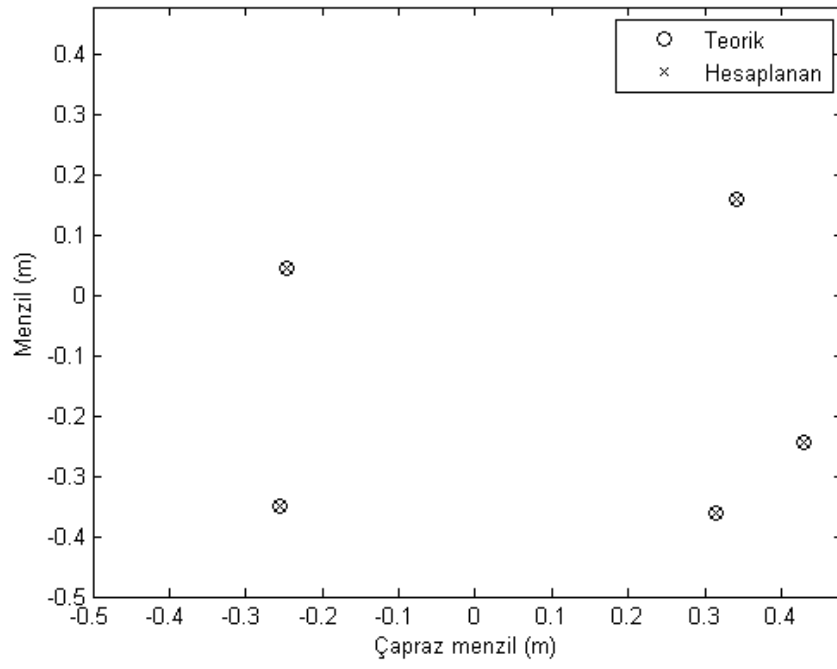
Şekil 4.3. Uzak alan Gİ ile oluşturulan YAR görüntüsü.



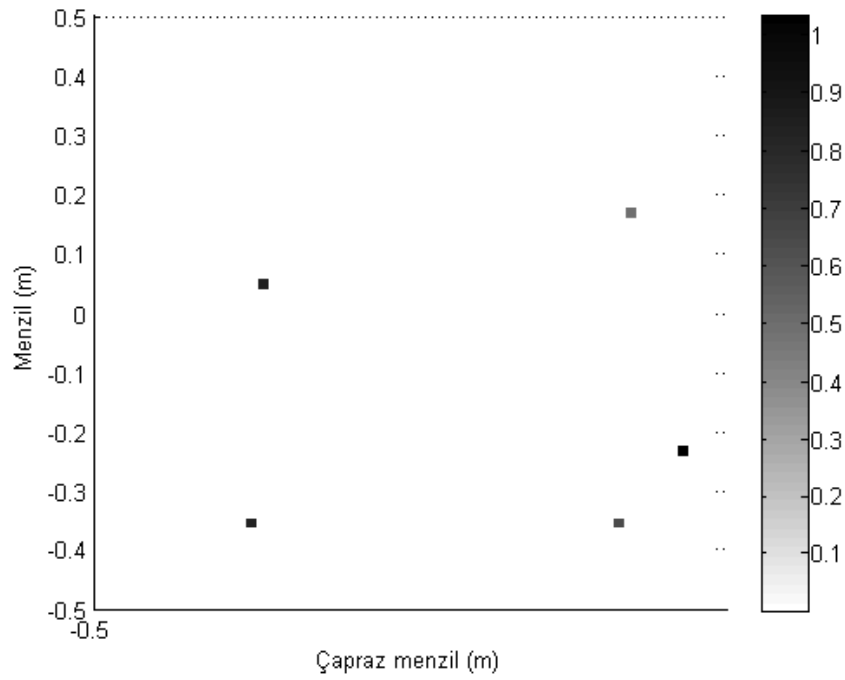
Şekil 4.4. Yakın alan Gİ ile oluşturulan YAR görüntüsü.



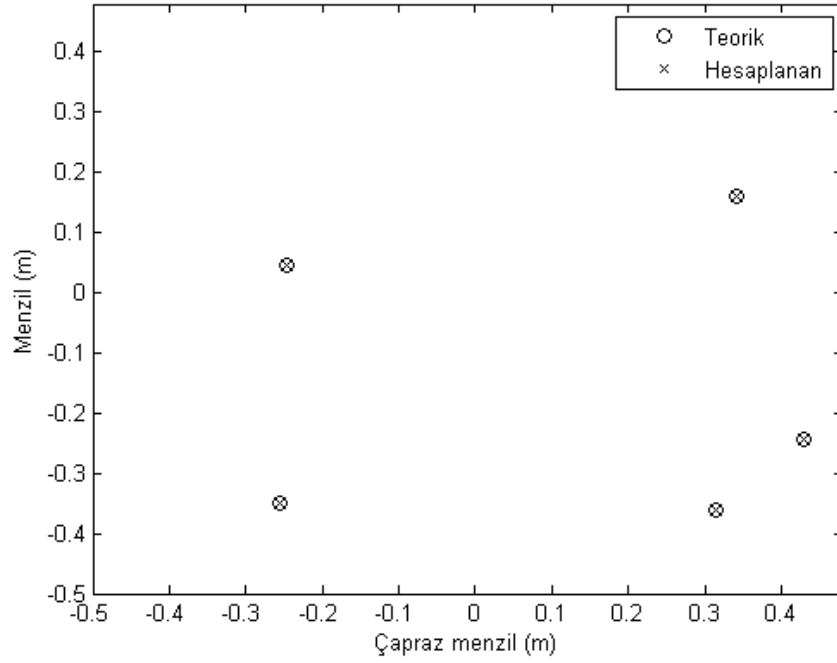
Şekil 4.5. Lineer denklem sistemi ile oluşturulan uzak alan YAR görüntüsü.



Şekil 4.6. Lineer denklem sistemi ile hesaplanan saçıcı konumları.

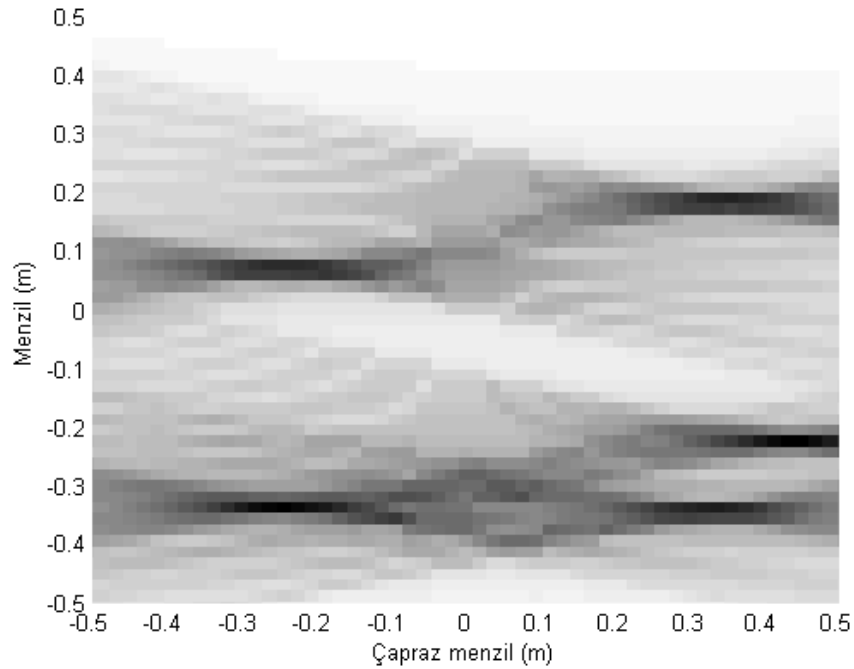


Şekil 4.7. Lineer olmayan denklem sistemi ile oluşturulan yakın alan YAR görüntüsü.



Şekil 4.8. Lineer olmayan denklem sistemi ile hesaplanan saçıcı konumları.

MKM'nin Gİ algoritmasına sağladığı iyileşmeyi göstermek için, Şekil 4.3'deki görüntü, MKM yerine THFD kullanılarak yeniden oluşturulmuştur. Bu amaca yönelik, THFD'nin menzil çözünürlüğünü yükseltmek için bant genişliği 1 GHz yerine 8 GHz (menzil çözünürlüğü 18.75 mm) alınmıştır.



Şekil 4.9. THFD ve Gİ ile oluşturulan uzak-alan YAR görüntüsü.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.9 karşılaştırıldığında, MKM yerine THFD kullanılırken 8 kat daha fazla bant genişliği kullanılmasına rağmen, MKM ve Gİ ile elde edilen uzak-alan YAR görüntüsü THFD ve Gİ ile elde edilenden daha yüksek kaliteye sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.3'deki görüntü penceresinin piksel sayısı kullanıcı tanımlıyken, Şekil 4.9'dakinin piksel sayısı, bant genişliğine bağlıdır. Ayrıca THFD'nin fazda sebep olduğu belirsizlik, Şekil 4.9'dan elde edilecek saçıcı merkez özellikleriyle hesaplanan RKA değerlerinin hatalı olmasına sebep olacaktır. Benzer problemler, THFD ve Gİ ile oluşturulacak yakın-alan YAR görüntüsünde de vardır.

Uzak veya yakın alan Gİ algoritmalarının sebep olduğu NYF'nin YAR görüntü üzerindeki bozucu etkileri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de görülmektedir. Görüntüdeki gürültü bileşenleri yalancı saçıcıların tespit edilmesine ve dolayısıyla RKA hatasının artmasına sebep olacaktır. Oluşturulan görüntüden saçıcı merkezlere yönelik özellik çıkartımı, YAR görüntüsünün kalitesini arttırmanın yanı sıra tomografi temelli RKA hesabının hatasını da azaltmaktadır. Bir sonraki bölümde, bu çalışmada kullanılan YGB algoritması anlatılacaktır.

5. YAR GÖRÜNTÜ BÖLÜTLEME

Uzak ve yakın alan Gİ algoritmalarının görüntü penceresindeki her piksel üzerinde gerektirdiği interpolasyon işlemine olan hassaslığı neticesinde oluşturulan YAR görüntüsünde sayısal gürültüler belirmektedir. Bu durum NYF'nin bozucu etkisini arttırarak YAR görüntüsünün kalitesini ve bu görüntüden tahmin edilecek RKA değerinin doğruluğunu düşürmektedir. Gürültülü görüntüden saçıcı merkezlere yönelik özellik çıkartımı, NYF'nin bozucu etkisini elimine etmekte yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada kullanılan YGB; süreksizlik tespiti, Otsu eşikleme, BBA ile tepe noktası tespiti aşamalarına sahiptir.

5.1. Süreksizlik Tespiti

Nokta saçıcı modeline göre saçıcı merkezler (2.1) formuna sahiptir. Bu sebeple saçıcı merkezlerin etrafındaki piksel değerlerinin süreksizliği diğer piksellere göre daha yüksektir. Ayırıt tespit algoritmaları, oluşturulan görüntü üzerindeki süreksizlik bölgelerinin belirlenmesi için kullanılmaktadır [15]. Görüntü işlemede bu amaca yönelik çeşitli algoritmalar mevcuttur. Bazı morfolojik operatörler bu amaçla kullanılabilir. Açma, koşullu açma ve benzeri morfolojik operatörler, süreksizlik bölgelerinin şekline uygun yapılandırıcı elemana ihtiyaç duyarlar [15]. Yapılandırıcı elemanın şekline bağlı olarak yalancı saçıcı merkez tespiti (fazla bölütleme) oluşmaması veya tepe bölgesi kaybı yaşamamak için bu çalışmada eğimsel süreksizlik tespiti tercih edilmiştir. Bu amaca yönelik kullanılacak Λ maske matrisi, $2\kappa + 1$ satır $2\lambda + 1$ sütun sayısına sahip olsun. Süreksizlik bölgeleri kuvvetlendirilmiş görüntü, Gİ ile oluşturulan YAR görüntüsü ile maske matrisinin korelasyonu ile elde edilebilir [15].

$$g(x, y) = \sum_{s=-\kappa}^{\kappa} \sum_{t=-\lambda}^{\lambda} \Lambda(s, t) |S(x+s, y+t)|. \quad (5.1)$$

YAR görüntüsündeki tepe bölgelerinin piksel değerlerini değiştirmeden arka planın görüntüden çıkarılabilmesi için ilk olarak (5.2)'de verilen ikili değerlere sahip görüntü oluşturulur.

$$\Omega_g(x_i, y_j) = \begin{cases} 1, & g(x_i, y_j) \geq \tau \\ 0, & g(x_i, y_j) < \tau \end{cases} \quad (5.2)$$

Burada τ süreksizlik bölgeleri kuvvetlendirilmiş görüntüde kalması arzu edilen bölgedeki en düşük piksel değeridir.

Orijinal YAR görüntüsündeki arka plan bileşenleri,

$$h_g(x, y) = S(x, y) \odot \Omega_g(x, y) \quad (5.3)$$

ifadesi ile kaldırılabilir. Burada, $\odot$ noktasal çarpım işlemi göstermektedir. Eşitlik (5.3)'teki görüntü, orijinal YAR görüntüsüne uygulanacak olan Otsu eşik seviyesinin belirlenmesinde kullanılacaktır. Bu sebeple, (5.2)'de τ değerinin seçiminden kaynaklanan gürültülerin etkileri Otsu eşikleme ile azaltılacaktır.

5.2. Otsu Eşikleme

Eşitlik (5.3)'de elde edilen görüntü, Otsu metodunun ihtiyaç duyduğu histogramın oluşturulmasında ve bu histogramda bulunan grupları birbirinden ayıran eşik seviyesinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Orijinal YAR görüntüsünün Otsu eşiklemesine direkt olarak tabi tutulması halinde saçıcı merkezlerin yanı sıra arka planda gürültü bileşenleri de olacaktır. Otsu metodunun performansını arttırmak amacıyla, öncelikle süreksizlik tespiti yapılmıştır. Ardından, süreksizlik bölgeleri kuvvetlendirilmiş görüntünün histogramı ile Otsu eşikleme yapılmıştır.

Otsu metodu, görüntünün birbirinden ayrılabilir histograma sahip gruplardan meydana geldiğini varsaymaktadır [17]. Bu varsayım tomografik RKA hesaplarında kullanılacak olan YAR görüntüsü için iyi bir yaklaşıma sahiptir. Çünkü (5.3) ile elde edilen görüntü, arka plan ve tepe bölgelerine denk düşen iki farklı gruptan meydana gelmektedir. Otsu metodu ile bu grupların histogramında meydana gelecek karışımı en aza indiren piksel değeri eşik seviyesi olarak belirlenmektedir.

Otsu metodu tam sayıya sahip I seviyeli görüntüler üzerine uygulanmaktadır. Bu sebeple görüntü üzerindeki her piksel değeri $[0, I - 1]$ aralığına genişletildikten sonra en yakın tam değere yuvarlanmıştır. Her bir grubun ortalama değeri,

$$\mu_1^T = \sum_{i=0}^T ip(i) / \sum_{i=0}^T p(i) \quad (5.4)$$

$$\mu_2^T = \sum_{i=T+1}^{I-1} ip(i) / \sum_{i=T+1}^{I-1} p(i) \quad (5.5)$$

ifadelerine sahiptir [15]. Burada T eşik seviyesi, $p(i)$ ise i değerli pikselin normalize edilmiş histogram değeridir. Grupların varyansı ve eş değeri varyansı,

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=0}^T (i - \mu_1^T)^2 p(i) / \sum_{i=0}^T p(i) \quad (5.6)$$

$$\sigma_2^2 = \sum_{i=T+1}^{I-1} (i - \mu_2^T)^2 p(i) / \sum_{i=T+1}^{I-1} p(i) \quad (5.7)$$

$$\sigma_T^2 = \sigma_1^2 \sum_{i=0}^T p(i) + \sigma_2^2 \sum_{i=T+1}^{I-1} p(i) \quad (5.8)$$

denklemleri ile hesaplanabilir [15]. Eşitlik (5.8), görüntüdeki grup ayrışımından kaynaklanan eş değeri varyansı (eşikleme hatasını) belirtmektedir. Bu nedenle (5.8)'i en düşük yapan T değeri, eşik seviyesi olarak alınmaktadır [15]. Herhangi bir grup ayrışımı yapılmadan hesaplanan varyans değeri eşik seviyesine bağlı değildir.

$$\sigma^2 = \sum_{i=0}^{I-1} (i - \mu)^2 p(i); \quad \mu = \sum_{i=0}^{I-1} ip(i). \quad (5.9)$$

Eşitlik (5.9), grup varyansı arası (GVA) terimi cinsinden,

$$\sigma^2 = \sigma_T^2 + \sigma_{GVA}^2 \quad (5.10)$$

$$\sigma_{\text{GVA}}^2 = q_1^T [\mu_1^T - \mu]^2 + q_2^T [\mu_2^T - \mu]^2; \quad q_1^T = \sum_{i=0}^T p(i); \quad q_2^T = \sum_{i=T+1}^{I-1} p(i) \quad (5.11)$$

ifadelerine sahiptir. Eşitlik (5.8)'i en düşük değerli yapan eşik seviyesi, (5.10) gereğince GVA terimini en yüksek değerli yapmaktadır. GVA teriminde bilinmeyen sayısını azaltmak amacıyla $q_2^T = 1 - q_1^T$ yazılırsa,

$$\sigma_{\text{GVA}}^2 = q_1^T [1 - q_1^T] [\mu_1^T - \mu_2^T]^2 \quad (5.12)$$

elde edilir. Eşik seviyesinin iteratif olarak belirlenmesi halinde güncelleme denklemleri,

$$q_1^{T+1} = q_1^T + p(T+1) \quad (5.13)$$

$$\mu_1^{T+1} = \frac{(T+1)p(T+1)}{q_1^{T+1}} + \sum_{i=0}^T \frac{ip(i)}{q_1^{T+1}} \quad (5.14)$$

$$\mu_1^{T+1} = \frac{(T+1)p(T+1)}{q_1^{T+1}} + \frac{q_1^T}{q_1^{T+1}} \mu_1^T; \quad \mu_2^{T+1} = \frac{\mu - q_1^{T+1} \mu_1^{T+1}}{q_2^{T+1}} \quad (5.15)$$

ifadelerine sahip olur. Bu durumda eşikleme algoritması,

$$\begin{aligned} \mu &= \sum_{i=0}^{I-1} ip(i); \quad q_1^0 = 0; \quad q_2^0 = 0 \\ q_1^T &= q_1^{T-1} + p(T); \quad q_2^T = 1 - q_1^T \\ \mu_1^T &= [q_1^{T-1} \mu_1^{T-1} + Tp(T)] / q_1^T; \quad \mu_2^T = [\mu - q_1^T \mu_1^T] / q_2^T \\ \sigma_{\text{GVA}}^2 &= q_1^T q_2^T [\mu_1^T - \mu_2^T]^2; \\ T &= \arg \max \sigma_{\text{GVA}}^2 \end{aligned}$$

ile kurulabilir. Bu çalışmada Otsu eşikleme için MATLAB programında bulunan *graythresh* komutu kullanılmıştır. Orijinal YAR görüntüsünden arka planın kaldırılabilmesi için ikili değerlere sahip bir görüntü oluşturulmalıdır.

$$M_g(x_i, y_j) = \begin{cases} 1, & h_g(x_i, y_j) \geq T \\ 0, & h_g(x_i, y_j) < T \end{cases} \quad (5.16)$$

Burada alt indis g, gray seviyeli görüntü matrisini ifade etmektedir. Bu sayede görüntü üzerinde sadece tepe bölgelerine odaklanılarak Otsu metodu ile eşikleme algoritmasının performansı arttırılmıştır. Gİ ile oluşturulan YAR görüntüsünden arka plan pikselleri (5.17)'deki ifade ile kaldırılabilir.

$$F(x, y) = S(x, y) \odot M_g(x, y). \quad (5.17)$$

5.3. Bağlantılı Bileşen Analizi ve Özellik Çıkartımı

Eşiklenmiş YAR görüntüsünde arka plan piksel değerleri sıfır olmasına rağmen saçıcı merkezlerin etrafında kümelenmiş gürültüler devam etmektedir. Bu kümelerin pikselleri, saçıcı merkezin bulunduğu konumda en yüksek değeri almaktadır. Bu sebeple, her bir kümenin sahip olduğu en yüksek piksel değeri, o kümeye ait saçıcı merkezin kompleks yansıtıcılık değerini, ilgili pikselin görüntü penceresindeki yeri ise saçıcı merkezin konumunu belirtmektedir. Eşiklenmiş görüntüden saçıcı merkezlerin belirlenmesi için her bir küme, BBA ile etiketlenmiştir. Bu işlem MATLAB programında *bwlabel* komutu ile yapılmıştır. BBA ile elde edilen matris $B(x, y)$ olmak üzere, her bir kümeden saçıcı merkezlere yönelik çıkarılan yansıtıcılık ve konum değeri için (5.18) kullanılabilir. Burada N_n toplam küme sayısını, $f'(x, y)$ bölütlenmiş YAR görüntüsünü belirtmektedir.

$$\begin{aligned} i &= 1, 2, \dots, N_x; j = 1, 2, \dots, N_y; n = 1, 2, \dots, N_n \\ (i_0, j_0) &= \arg \max \left| S(x_i, y_j) \right|, \\ x_n &= x_{i_0}; y_n = y_{j_0} \text{ ve } f'(x_{i_0}, y_{j_0}) = S(x_{i_0}, y_{j_0}) \text{ burada} \\ B(x_i, y_j) &= n \text{ ve } (\hat{i}, \hat{j}) \in (i, j) \end{aligned} \quad (5.18)$$

BBA sadece tomografi temelli RKA hesabının gerek duyduğu yansıtıcılık ve konum değerlerini belirlemekle kalmayıp, eşiklenmiş YAR görüntüsündeki gürültü

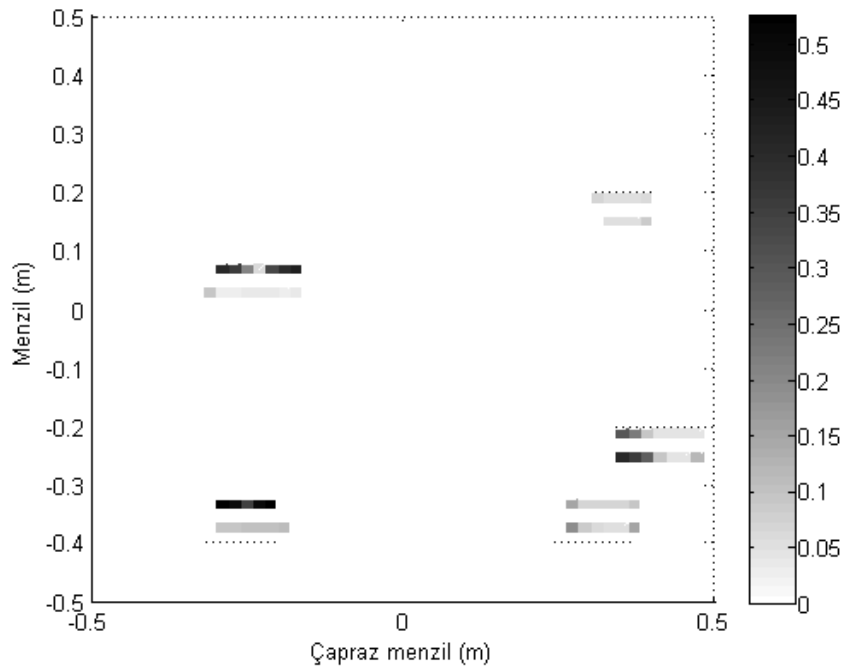
kümelerini de filtrelemektedir. Bu sebeple, geliştirilen YGB algoritması Gİ ile oluşturulan YAR görüntüsünün kalitesini de arttırmaktadır.

5.4. Simülasyonlar

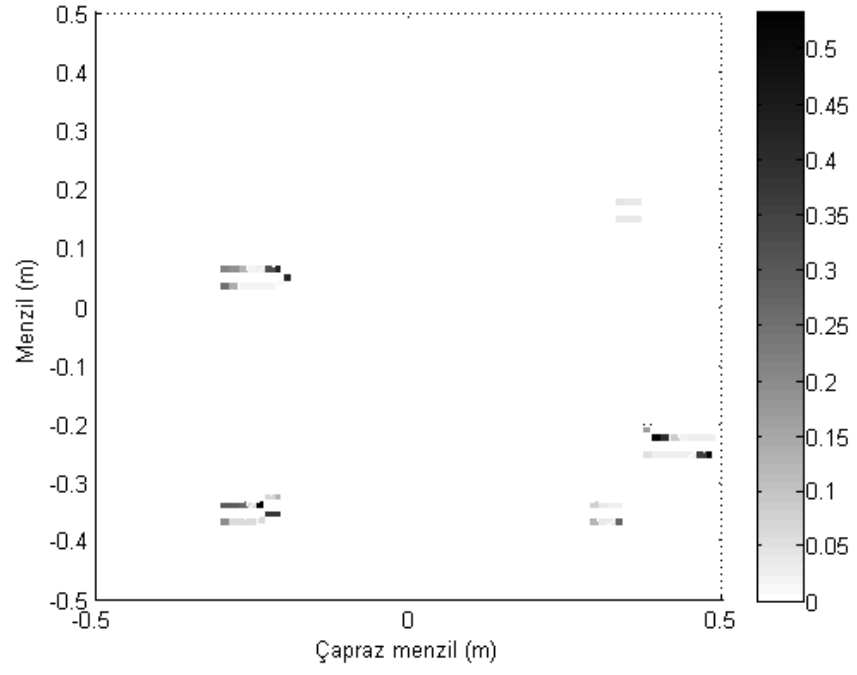
Bu başlık altında Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de oluşturulmuş olan sırasıyla uzak ve yakın alan YAR görüntülerinin bölütlenmesi yapılacaktır.

5.4.1. Sobel Maskesi ile Süreksizlik Tespiti

Süreksizlik tespiti için 3×3 Sobel maskesi kullanılmıştır. Benzer amaçla Laplacian, Prewitt ve benzeri diğer maskeler de kullanılabilir. Eşik seviyesi olarak en yüksek piksel değerinin $1/5$ katı alınmıştır. YAR görüntü penceresinin piksel sayısı uzak-alan durumunda 50×50 alınmıştır. Yakın-alan durumunda ise, saçıcı merkez kaybını engellemek amacıyla görüntü penceresinin piksel sayısı 70×70 alınmıştır.

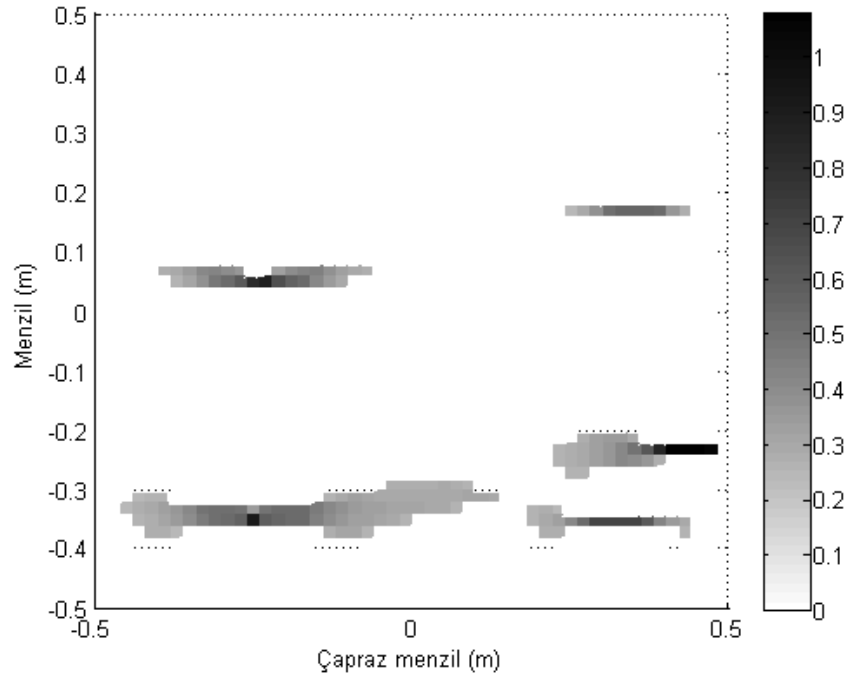


Şekil 5.1. Eşitlik (5.3) uzak alan YAR görüntüsü.

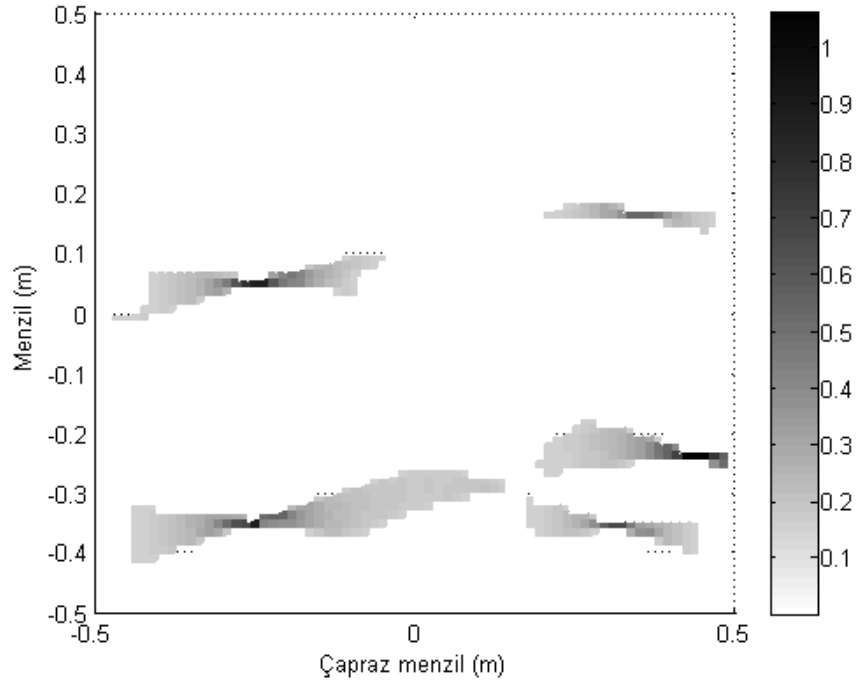


Şekil 5.2. Eşitlik (5.3) yakın alan YAR görüntüsü.

5.4.2. Otsu Metodu ile Eşikleme

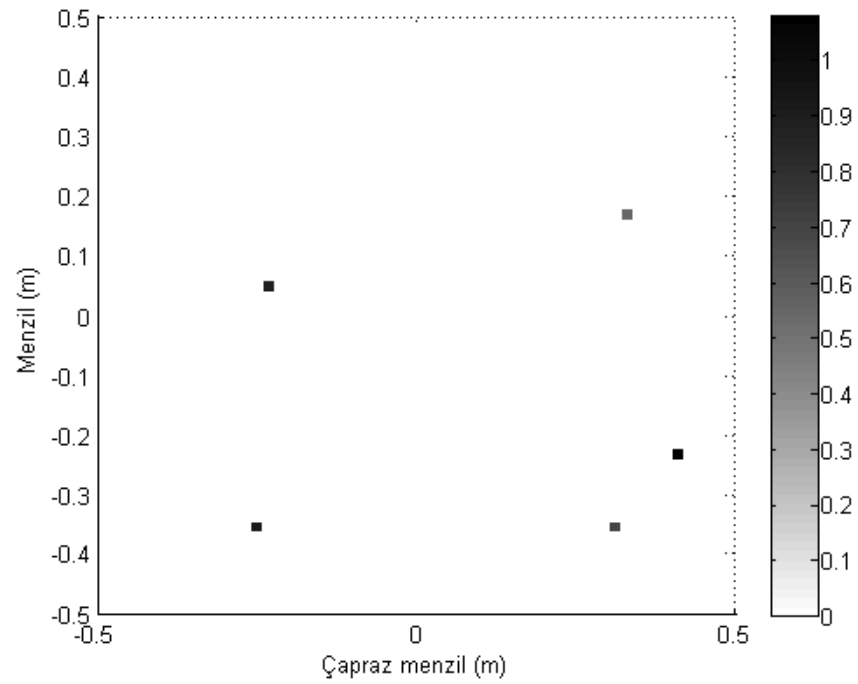


Şekil 5.3. Otsu metodu sonucunda elde edilen uzak alan YAR görüntüsü.

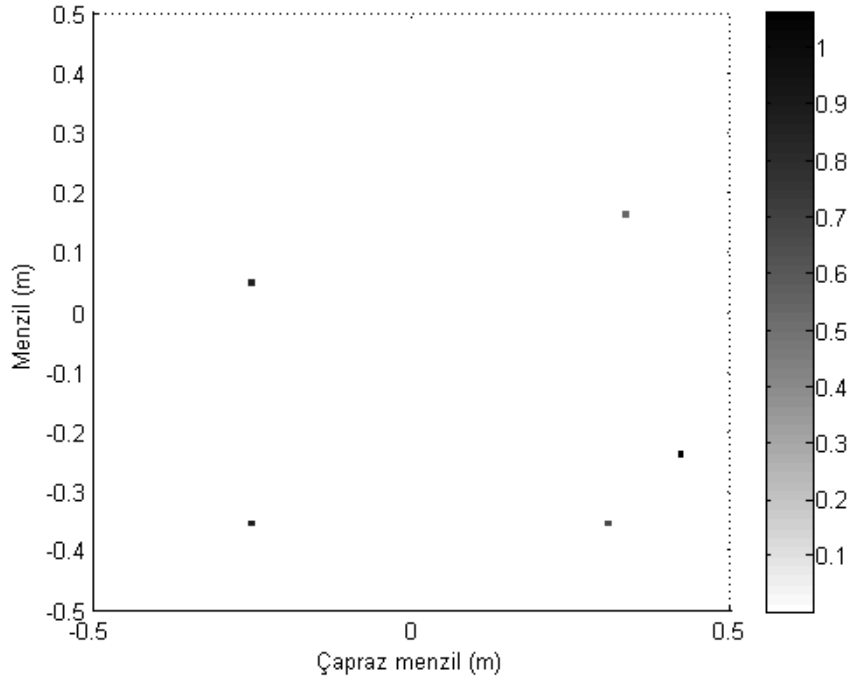


Şekil 5.4. Otsu metodu sonucunda elde edilen yakın alan YAR görüntüsü.

5.4.3. Bağlantılı Bileşen Analizi ile Saçıcıların Tespiti



Şekil 5.5. Bölütlenmiş uzak alan YAR görüntüsü.



Şekil 5.6. Bölütlenmiş yakın alan YAR görüntüsü.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 incelendiğinde, orijinal YAR görüntüsündeki saçıcıların sebep olduğu süreksizlik bölgeleri hariç, geri kalan piksel değerlerinin sıfır olduğu görülmektedir. Bu vasıta ile, elde edilen görüntüden oluşturulacak histogramın, tepe bölgeleri hakkında daha fazla bilgi taşıması sağlanmıştır.

Otsu metodu ile eşiklenmiş Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 incelendiğinde, bu metodun arka planı orijinal YAR görüntüsünden tamamen kaldıramadığı görülmektedir. Bu sebeple, saçıcı merkezlerin etrafında sayısal gürültü kümeleri oluşmuştur. Fakat bu kümeler birbiri ile bağlantılı bileşen oluşturduğu için, BBA ile her bir kümenin etiketlenmesi mümkündür. Bu kümeler içinden özellik çıkartımı neticesinde Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 elde edilmiştir. Görüldüğü üzere, bu çalışmada kullanılan YGB algoritması, Gİ ile oluşturulan gürültülü YAR görüntüsünün kalitesini önemli miktarda yükseltmektedir. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4, bölütlenmiş YAR görüntüleri ile karşılaştırıldığında, bu tezde geliştirilen KGİ algoritmasının YAR görüntülemeye olan katkısı açıkça görülmektedir. Öyle ki, [12]'de geliştirilen KGİ algoritması sadece menzilde sonsuz çözünürlük sağlarken, GKİ algoritması hem menzil hem de çapraz menzilde sonsuz çözünürlük sağlamaktadır. Üstelik GKİ algoritması hem uzak hem de yakın alan ölçümleri ile YAR görüntülemeye uygulanabilmektedir.

Görüntü penceresinin piksel sayısına, maske matrisinin satır veya sütun sayısına, τ değerinin seçimine ve saçıcıların genlik değerlerine bağlı olarak, Otsu metodu sonucunda bazı tepe bölgeler kaybedilebilir veya BBA sonrası fazla bölütleme meydana gelebilir. Bu problemleri engellemek için, Gİ ile YAR görüntüsü oluşturulurken,

$$n_{i,\alpha}(x_k, y_l) = \begin{cases} 1 & ; |p_{k,l,\alpha} - v_{i,\alpha}| \leq \Delta/2 \\ 0 & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (5.19)$$

$$c_{i,\alpha}(x_k, y_l) = \begin{cases} 1 & ; |r_{k,l,\alpha} - R_{i,\phi_\alpha}| \leq \Delta/2 \\ 0 & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (5.20)$$

ifadeleri kullanılabilir. Bu sayede genlik değeri düşük saçıcıların kaybedilmesi engellenmektedir.

Saçıcı merkezlerin birbirine yeterince yakın olduğu durumda Otsu ile elde edilen görüntüde bazı saçıcı merkezler aynı kümenin elemanı olabilir ve bu sebeple BBA sonrası saçıcı merkez kaybı olabilir. Bu sorunu en aza indirmek için görüntü penceresinin piksel sayısı yeterince yüksek seçilmelidir.

BBA ile konum tespiti yapılmasının ardından, her bir saçıcı merkezin uzak veya yakın alanda belirli bir açıdaki Radon dönüşümü $R(x, y)$ olsun. Bu değerlerden, BGMKM ile tespit edilen ayırık menzil değerlerine en yakın olanları,

$$R(x_i, y_i) = \min_i \{ R(x, y) - R_{i,\theta} \}; \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (5.21)$$

ifadesi ile tespit edilip geri kalanların atılması ile fazla bölütleme engellenebilir. Saçıcıların kompleks genlikleri ise,

$$a'_i = a_j \delta(i - j); \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (5.22)$$

eşitliği ile tespit edilebilir. Burada a_j BGMKM ile hesaplanan kompleks yansıtıcılıkları göstermektedir. Bu sayede, Gİ algoritmasının genliklerde meydana getirdiği interpolasyon hatası engellenmektedir.

6. RKA HESAPLARI VE SİMÜLASYONLAR

Bu bölüme kadar anlatılan konularda saçıcı merkezlerin kompleks yansıtıcılık değerlerinin ve problem uzayındaki menzil ve çapraz menzil değerlerinin mümkün oldukça yüksek doğrulukla elde edilmesi amaçlanmıştır. Çünkü, yakın alan ölçümlerinden RKA hesabına imkan sağlayan tomografi temelli yöntemler saçıcı merkezlerin konum ve yansıtıcılık değerlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu sebeple, uzak veya yakın alan ölçüm verileri BGMKM'ye tabi tutularak menzil yönündeki saçıcı merkezler (ayrık menzil profilleri) sonsuz çözünürlük ile tespit edilmiştir. Elde edilen bu saçıcılardan Gİ veya denklem sistemi çözümü ile uzak veya yakın alan YAR görüntüleri oluşturulmuştur. Gİ algoritmalarının sebep olduğu sayısal gürültüler YGB algoritması ile filtrelenerek görüntü üzerinden saçıcı merkezlere yönelik özellik çıkartımı yapılmıştır. Denklem sistemi çözümünde herhangi bir sayısal gürültü olmadığı için YGB algoritması kullanılmamıştır.

6.1. Saıcı Merkezler ile RKA Hesabı

RKA hesapları tanım olarak uzak alanda geçerli olmak üzere, değeri anten ile hedef koordinat sistemi arasındaki uzaklığa bağlı değildir. Bu sebeple, saçıcıların konum ve yansıtıcılık değerleri hedef koordinat sistemine göre hesaplanmıştır. Dolayısıyla, ölçüm mesafesinin RKA hesabına etkisi ortadan kaldırılmıştır. Toplam M adet saçıcıya sahip bir hedefin RKA değeri,

$$\sigma(f, \phi) = \left| \sum_{i=1}^M a_i e^{-j 4\pi \frac{f}{c} (x_i \sin \phi + y_i \cos \phi)} \right|^2 \quad (6.1)$$

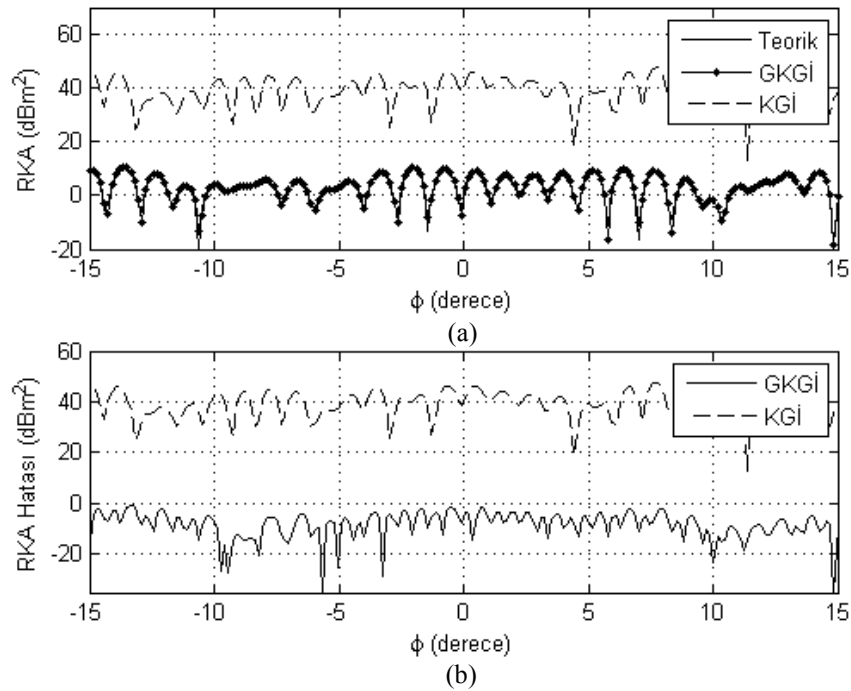
ifadesi ile hesaplanabilir [4]. Eşitlik (6.1) hem frekansın hem de azimut açısının fonksiyonu olmak üzere, kullanılan nokta saçıcı modelinde yansıtıcılık değerlerinin açının veya frekansın fonksiyonu olmaması nedeniyle, a_i değerleri tüm frekans ve açılarda sabit değerlidir. Bu varsayım, gerçek uygulamalarda kısmen geçerlidir. Bu sebeple açı aralığı ve ölçüm bant genişliği yeterince dar seçilmiştir.

6.2. Simülasyonlar

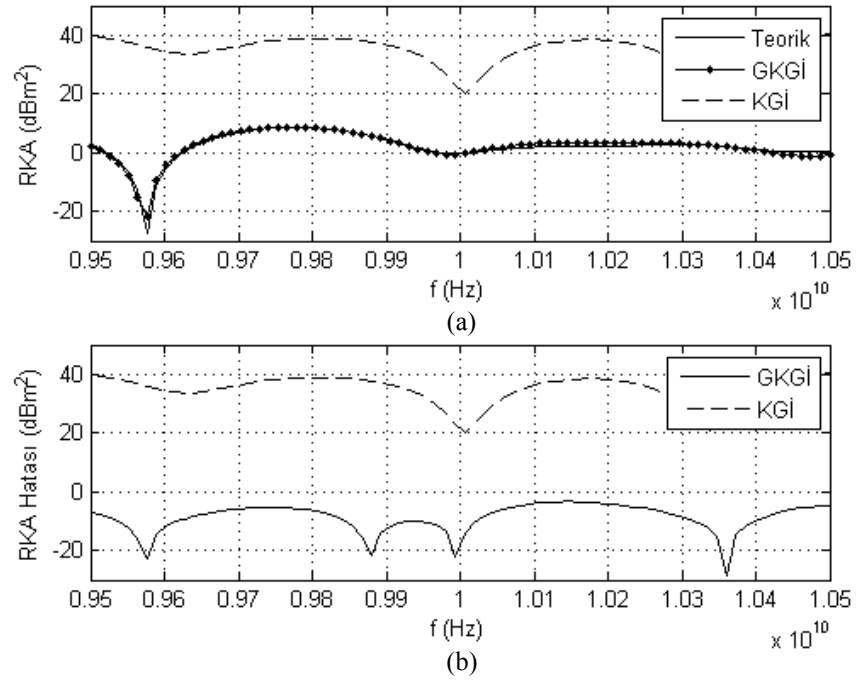
Bu başlık altında, GKGİ ve denklem sistemi çözümleri ile RKA hesaplarının hata performansı incelenecektir. [12]'de geliştirilen KGİ'nin yakın alan ölçümlerine uyarlanması için görüntü oluşturma aşamasındaki Gİ yerine ÇGİ kullanılarak yakın alan KGİ (YKGİ) algoritması elde edilmiştir. GKGİ ile RKA hesabı için Çizelge 4.1'deki saçıcı merkezler kullanılarak oluşturulan 2048×2048 piksel sayısına sahip uzak veya yakın alan YAR görüntülerinden RKA hesabı yapılmıştır. RKA'nın açıya bağlı değişim grafikleri -15° ile 15° aralığında 10.5 GHz frekansında çizilmiştir. RKA'nın frekansa bağlı değişim grafikleri ise 9.5 GHz ile 10.5 GHz arasında 0° azimut açısında çizilmiştir.

6.2.1. GKGİ ile RKA Hesabı

6.2.1.1. Uzak Alan

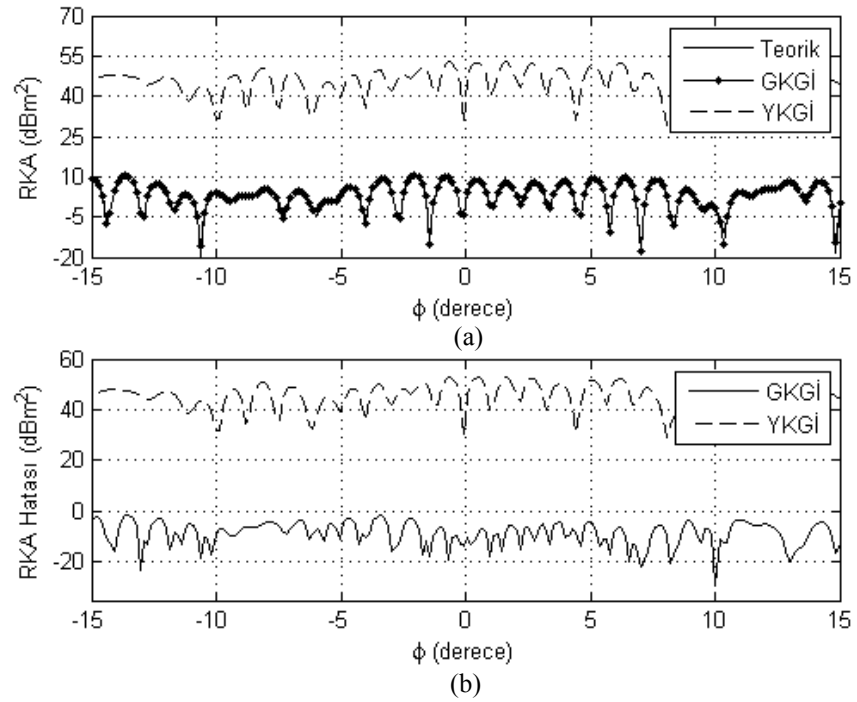


Şekil 6.1. Uzak alan ölçümler ile 10.5 GHz frekansında hesaplanan RKA değerleri.

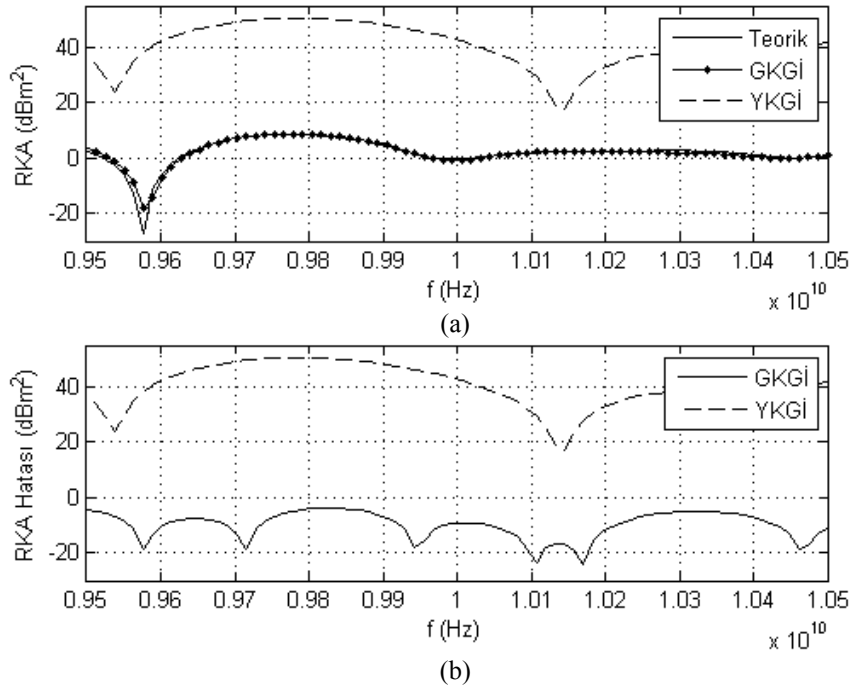


Şekil 6.2. Uzak alan ölçümler ile 0^0 açısında hesaplanan RKA değerleri.

6.2.1.2. Yakın Alan



Şekil 6.3. Yakın alan ölçümler ile 10.5 GHz frekansında hesaplanan RKA değerleri.



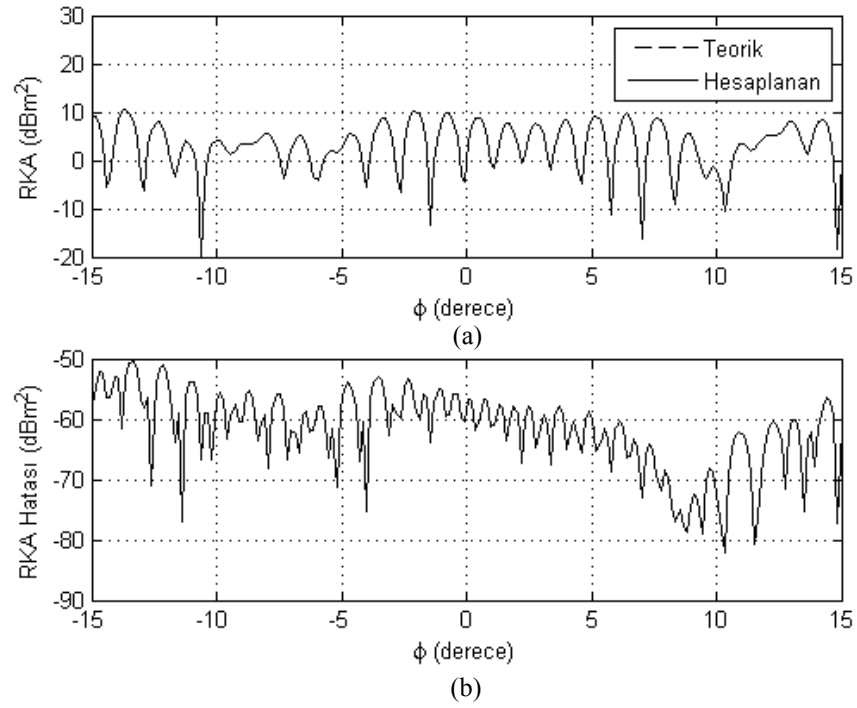
Şekil 6.4. Yakın alan ölçümler ile 0° açısında hesaplanan RKA değerleri.

Elde edilen grafikler incelendiğinde, bu tezde geliştirilen GKGİ algoritması ile hesaplanan RKA değerlerinin hatası KGİ ve YKGİ algoritmalarına göre daha azdır. Şekil 6.1 (a)'da uzak alan YAR ölçümleri ile farklı azimut açılarında hesaplanan RKA değerleri görülmektedir. GKGİ algoritması teorik RKA değerlerine yakın sonuçlar verirken, KGİ algoritması ile elde edilen RKA değerleri teoriğe göre daha yüksek çıkmıştır. Öyle ki, Şekil 6.1 (b)'ye göre KGİ algoritması en yüksek 50 dBm² hata verirken, GKGİ algoritması yaklaşık 53 dBm² iyileşme sağlayarak en yüksek -3 dBm² hata vermiştir. Şekil 6.2 incelendiğinde de benzer iyileşme görülmektedir. Şekil 6.2 (b)'ye göre GKGİ algoritmasının en yüksek hatası -5 dBm² kadardır.

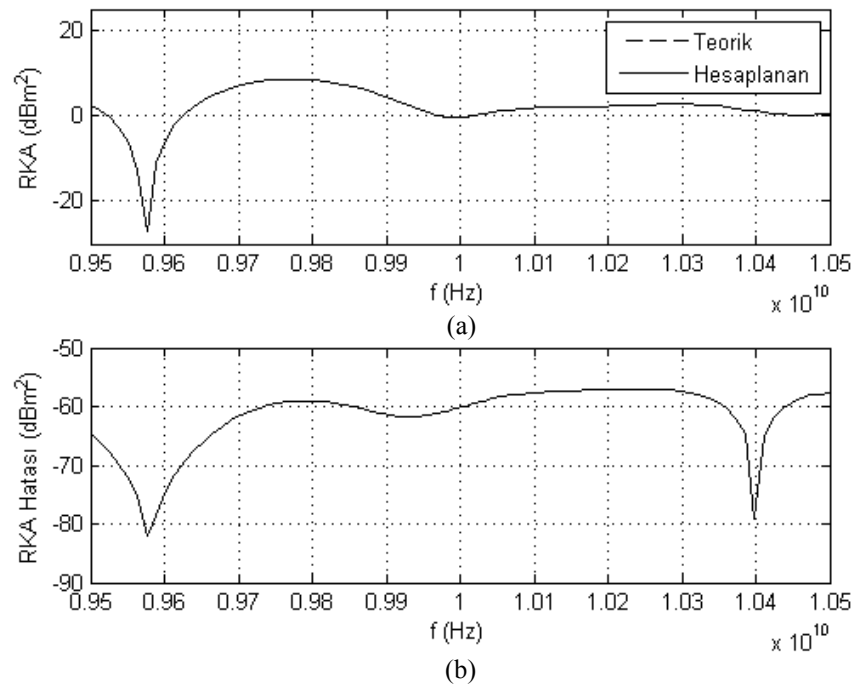
Yakın alan ölçümlerinden GKGİ ile hesaplanan RKA değerleri incelendiğinde uzak alandakine benzer durum söz konusudur. Şekil 6.3 (a)'ya göre farklı açılarda hesaplanan GKGİ ile teorik RKA değerleri birbirine yakinken, YKGİ ile elde edilen RKA değerleri teoriğe göre daha yüksektir. Şekil 6.3 (b)'de farklı frekanslarda her iki algoritmanın RKA hataları görülmektedir. GKGİ algoritmasının en yüksek hatası yaklaşık -3 dBm² iken, YKGİ algoritması için bu değer yaklaşık 50 dBm² kadardır. Şekil 6.4 (b)'ye bakıldığında, GKGİ algoritmasının YKGİ'ye yaklaşık 55 dBm² iyileşme sağladığı görülmektedir.

6.2.2. Denklem Sistemi Çözümü ile RKA Hesabı

6.2.2.1. Uzak Alan

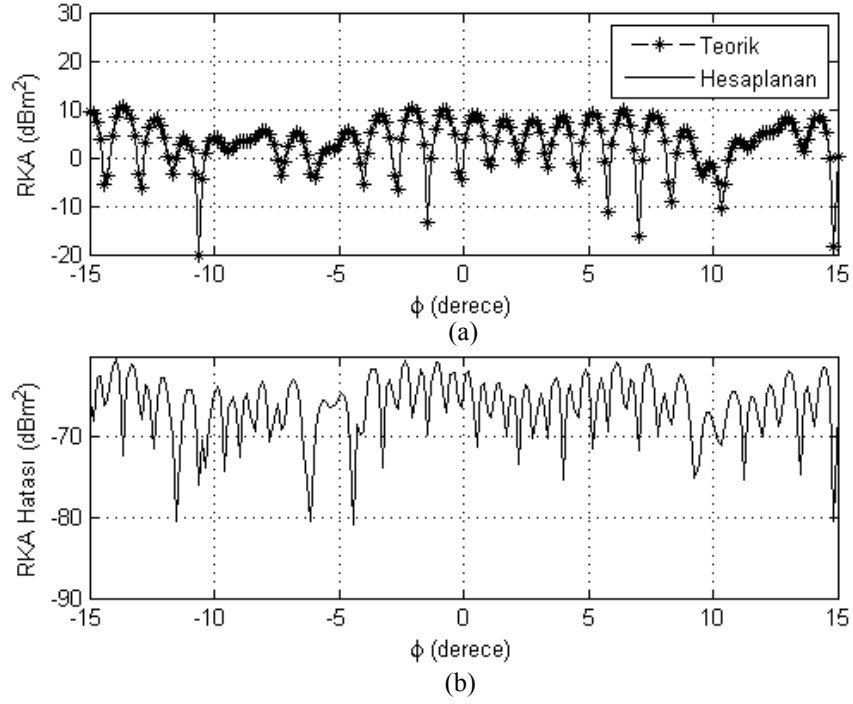


Şekil 6.5. Lineer denklem sistemi çözümü ile 10.5 GHz frekansında hesaplanan RKA değerleri.

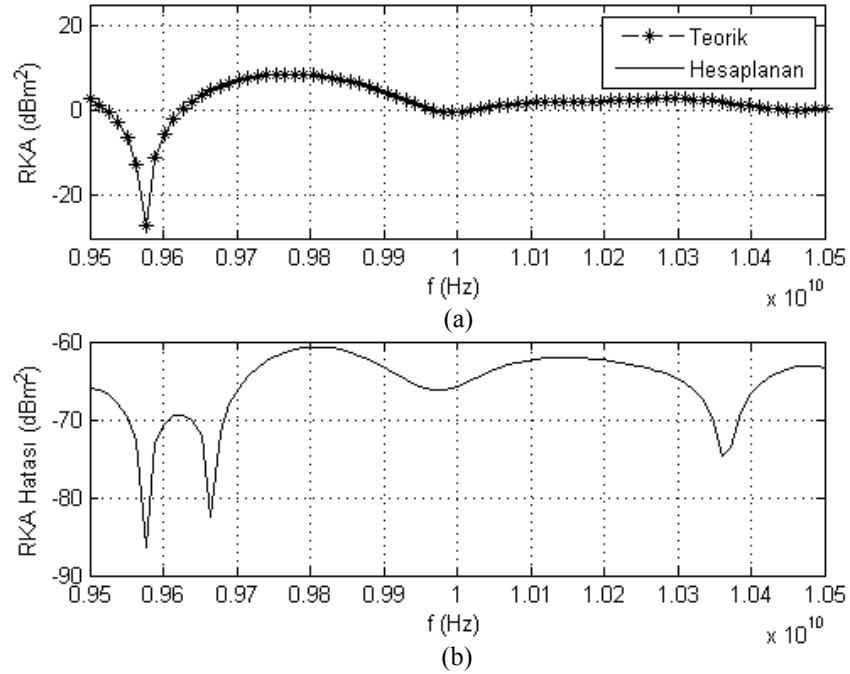


Şekil 6.6. Lineer denklem sistemi çözümü ile 0° açısında hesaplanan RKA değerleri.

6.2.2.2. Yakın Alan



Şekil 6.7. Lineer olmayan denklem sistemi çözümü ile 10.5 GHz frekansında hesaplanan RKA değerleri.



Şekil 6.8. Lineer olmayan denklem sistemi çözümü ile 0^0 açısında hesaplanan RKA değerleri.

Denklem sistemi çözümü ile saçıcı merkez tespiti; GKGİ, KGİ veya YKGİ'den farklı olarak görüntü penceresini ayırıklaştırma ve interpolasyon işlemlerine ihtiyaç duymamaktadır. Bu sebeple, denklem sistemi çözümünün GKGİ'den daha az hataya sahip olması beklenmektedir. Uzak veya yakın alan ölçümlerinden hesaplanan, farklı frekans veya açılardaki RKA değerleri incelendiğinde, bu beklentinin gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 6.5 (a)'da uzak alan YAR ölçümlerinden lineer denklem sistemi çözümü ile 10.5 GHz frekansında hesaplanan RKA değerlerinin teoriğe yakın sonuç verdiği görülmektedir. Şekil 6.5 (b)'ye göre lineer denklem sistemi çözümünün en yüksek hatası -50 dBm^2 civarındayken, Şekil 6.1 (b)'ye göre GKGİ'nin en yüksek hatası -3 dBm^2 kadardır. Şekil 6.2 ve Şekil 6.6'da farklı frekanslarda verilen RKA değerlerine göre de, lineer denklem sistemi çözümünün GKGİ'ye yaklaşık 55 dBm^2 iyileşme sağladığı görülmektedir.

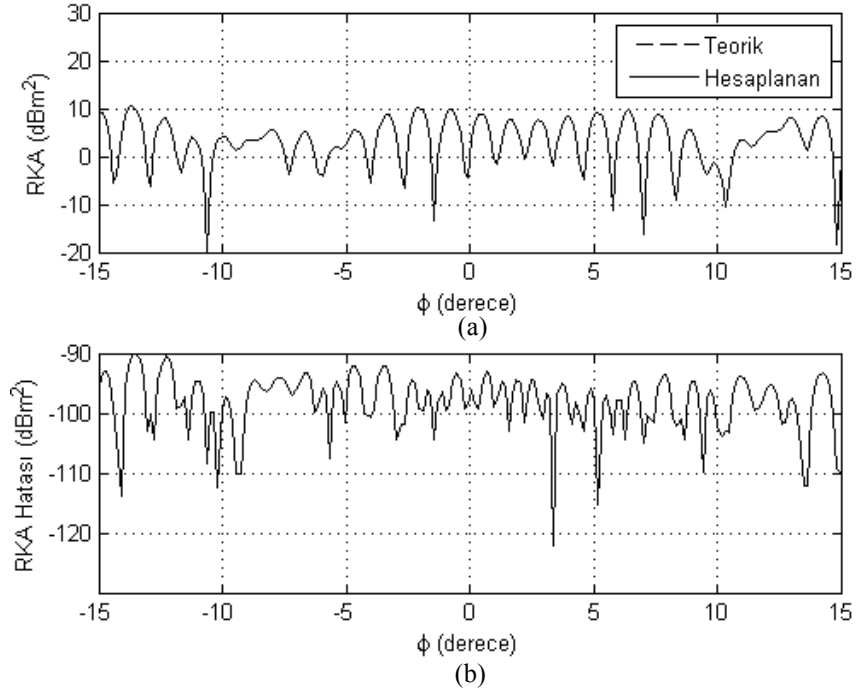
Yakın alan YAR ölçümlerinden lineer olmayan denklem sistemi çözümü ile hesaplanan RKA değerlerinde de uzak alandakine benzer olarak, GKGİ'ye göre önemli miktarda iyileşme söz konusudur. Şekil 6.3 (b) ve Şekil 6.7 (b)'de 10.5 GHz frekansında hesaplanan RKA değerleri karşılaştırıldığında, lineer olmayan denklem sistemi çözümü GKGİ'e göre yaklaşık -60 dBm^2 daha az hata vermektedir. Şekil 6.4 ve Şekil 6.8 incelendiğinde de benzer iyileşme görülmektedir.

Denklem sistemi çözümü ile KGİ veya YKGİ karşılaştırıldığında, KGİ ve YKGİ 100 ile 120 dBm^2 arasında daha fazla hata vermektedir. Örneğin, Şekil 6.8 (b)'e göre lineer olmayan denklem sistemi çözümü en yüksek -60 dBm^2 hataya sahipken Şekil 6.4 (b)'ye göre KGİ için bu değer yaklaşık 50 dBm^2 kadardır. GKGİ algoritması YKGİ'ye yaklaşık 53 dBm^2 iyileşme sağlarken, denklem sistemi çözümü de GKGİ'ye yaklaşık 55 ile 60 dBm^2 arasında iyileşme sağlamaktadır.

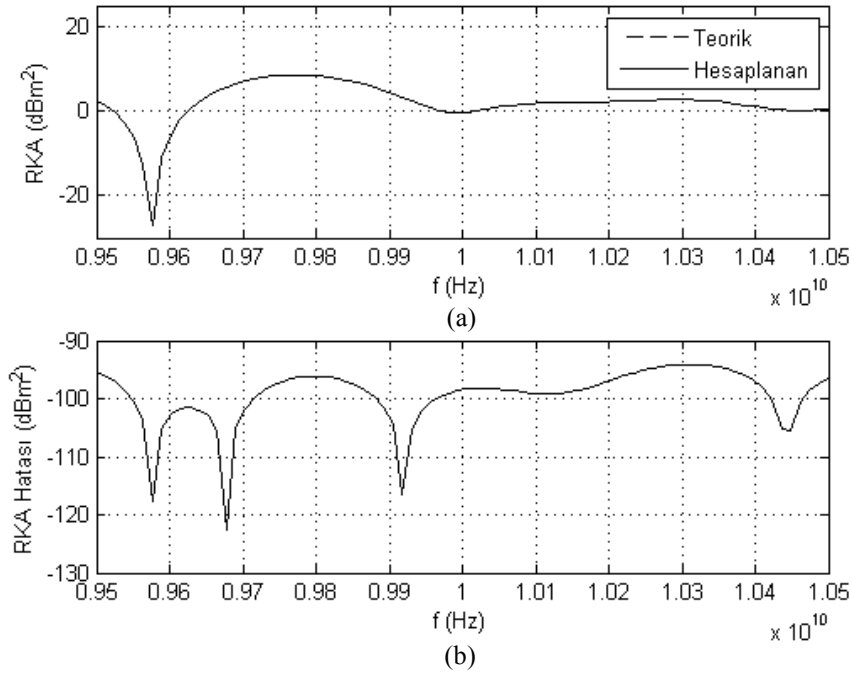
GKGİ, KGİ ve YKGİ algoritmalarının ihtiyaç duyduğu Gİ ile görüntü oluşturma işlemlerinin kalitesi, YAR görüntüsünün pencere çözünürlüğü ile yakın ilişkiye sahiptir. Her ne kadar MKM veya BGMKM sonsuz çözünürlük ile menzil yönündeki saçıcı merkezleri verse de, görüntüleme sonucunda elde edilecek iki boyutlu saçıcı merkezlerin çözünürlüğü YAR penceresinin ızgara genişliği ile sınırlıdır. Görüntü penceresinin ızgaralama çözünürlüğünü arttırmak, Gİ kalitesini yükseltirken hesaplama yükünü arttırmaktadır. Denklem sistemi çözümü ile saçıcı

merkez tespiti herhangi bir pencere veya ızgaralama gerektirmemektedir. Bu sebeple, problem uzayında denklem sistemi çözümü ile hesaplanan saçıcıların çözünürlüğü sonsuzdur. Dolayısıyla denklem sistemi çözümünün hatası GKGİ, KGİ ve YKGİ'ye göre oldukça azdır. Fakat denklem sistemi çözümünün kullanımını kısıtlayan bazı sebepler mevcuttur.

Denklem sistemi çözümü ile saçıcı merkezlerin tespiti, ölçüm alınan açı sayısı kadar çözüme sahip lineer veya lineer olmayan denklemlerden kök bulma işlemi ile yapılmaktadır. Açı sayısının problem uzayının boyut sayısından fazla olduğu durumda artık belirtilmiş denklem sistemi söz konusudur. Bu sebeple, denklem sisteminin kökü iteratif yöntemlerle bulunmuştur. Çözüm sayısının (açı sayısının) artması, iteratif yöntemlerin doğruluğunu düşürmektedir. Öyle ki, açı sayısının yeterince yüksek olduğu durumda iteratif yöntemlerin kondüsyon sayısı artmakta, kararlılığı düşmektedir. Bu sebeple, YAR ölçümlerinde kullanılan açı sayısının artması, denklem sistemi çözümü ile hesaplanan RKA değerlerinin hatasını arttırmaktadır. Örneğin, ölçüm alınan açı sayısının 60 olduğu Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'daki durumlar 2 açı için tekrarlanırsa Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'daki RKA değerleri elde edilmektedir.



Şekil 6.9. İki farklı açıdaki uzak alan YAR ölçümleri ile 10.5 GHz frekansında hesaplanan RKA değerleri.



Şekil 6.10. İki farklı açıdaki uzak alan YAR ölçümleri ile 0^0 açısında hesaplanan RKA değerleri.

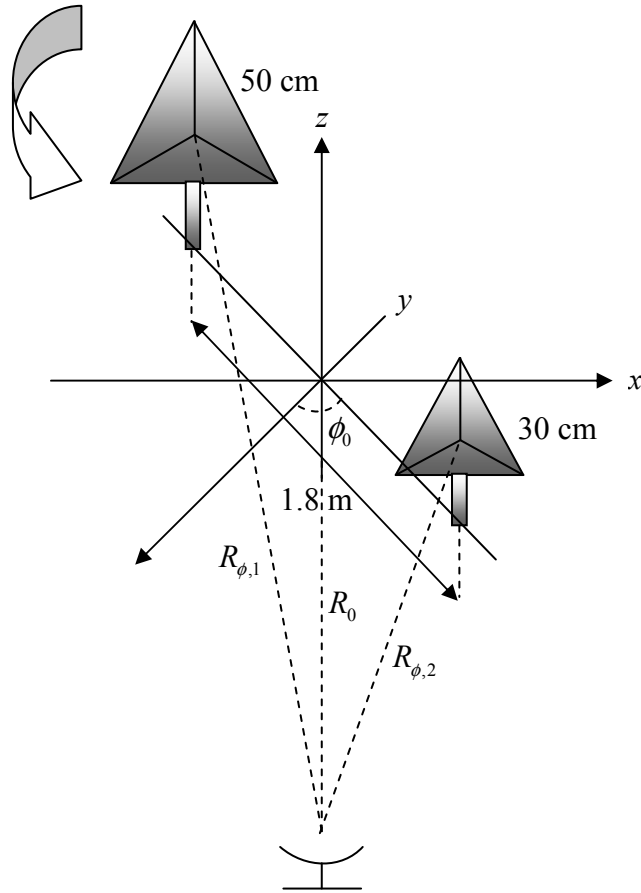
Şekil 6.9 ve Şekil 6.10 ile sırasıyla Şekil 6.5 ve Şekil 6.6 karşılaştırılırsa, ölçüm alınan açı sayısının düşmesi lineer denklem sistemi çözümü ile hesaplanan RKA değerlerinin hatasını azaltmıştır. Benzer durum lineer olmayan denklem sistemi çözümü için de geçerlidir. Bu sebeple, denklem sistemi çözümü ile uzak veya yakın alan YAR ölçümlerinden RKA hesabı yapılırken, ölçümlerde kullanılan açı sayısının yeterince az olması gerekmektedir. Açı sayısının denklem sistemi çözümlerinde kullanılan iteratif yöntemleri kararsız hale getirmesi halinde GKGİ algoritması ile RKA değerlerinin daha az hatalı hesaplanması mümkündür.

7. ALGORİTMALARIN GERÇEKLENMESİ

Bu tezde, yapay ölçüm verileri ile MATLAB programı kullanılarak geliştirilen uzak veya yakın alan YAR görüntüleme ve RKA hesaplama algoritmalarının, Açık Saha Elektromanyetik Laboratuvarı (ASEMLAB)'da toplanan gerçek ölçüm verileri ile desteklenilmesi üzerinde de çalışılmıştır.

7.1. Ölçüm Verilerinin Toplanması

Bu tezde geliştirilen YAR görüntüleme ve RKA hesaplama algoritmaları, nokta saçıcı modelini kullanmaktadır. Bu modele uygun olarak, RKA değeri $(-15^\circ, 15^\circ)$ aralığında yaklaşık sabit olan iki adet trihedral kullanılmıştır.



Şekil 7.1. TYAR ile ölçüm alınan cisim.

Şekil 7.1’de TYAR ölçüm sistemi ile birden çok azimut açısında S parametresi ölçülen cisim görülmektedir. Burada ϕ_0 trihedrallerin radar antenine tam karşıdan baktığı açı olmak üzere, bu değer toplanan verilerde sıfır açısı kabul edilmiştir. Her bir trihedral tek bir saçıcı merkezden meydana gelmek üzere RKA değeri,

$$\sigma(\lambda) = 10 \log_{10} \left(\frac{4}{3\lambda^2} \pi l^4 \right) \quad (7.1)$$

formülü ile hesaplanabilir. Burada l trihedralin kenar uzunluğu olmak üzere, 50 cm’lik trihedralin RKA değeri 24.6373 dBm², 30 cm’lik olanın RKA değeri ise 15.763 dBm²’dir. Ölçüm alınan cismin en yüksek boyutu D olmak üzere, uzak-alan yaklaşımının geçerli olabilmesi için gerekli olan ölçüm mesafesi,

$$R_{ff} > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (7.2)$$

ifadesine sahiptir. Bu çalışmada RKA ölçümleri $f = 10$ GHz merkez frekansında yapılmıştır. Bu durumda, dalga boyu $\lambda = 3$ cm’dir. Eşitlik (7.2)’ye göre, uzak-alan yaklaşımının geçerli olabilmesi için gerekli olan mesafe 216 m değerine sahiptir. Alınan ölçümlerde ise R_0 mesafesi uzak-alan durumu için 308.3 m, yakın-alan durumu için 133.115 m’dir.

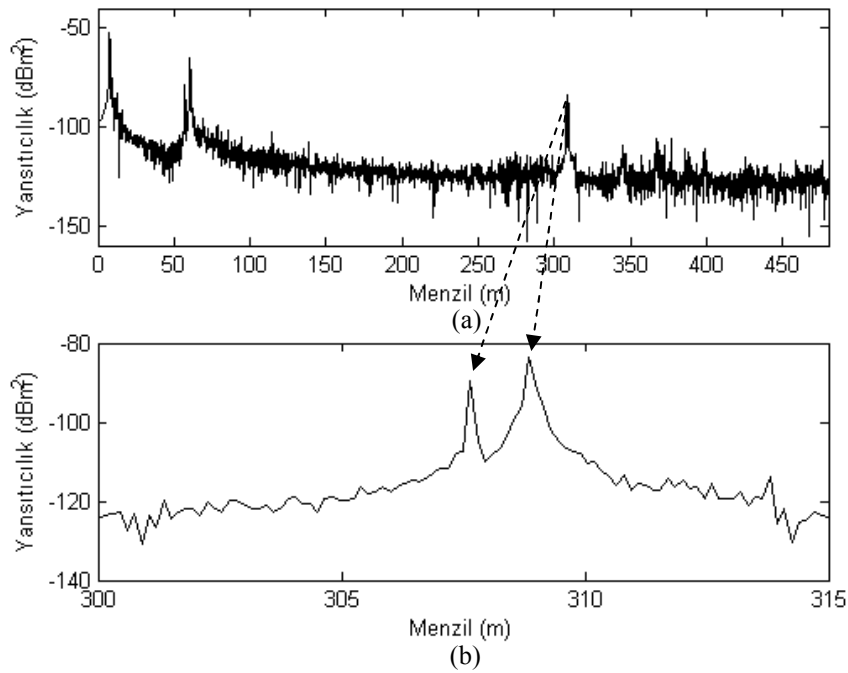
Ölçümlerde kullanılan frekans nokta sayısı 6401’dir. 50 cm kenar uzunluklu trihedral, olası tüm azimut açılarında cisim koordinat sisteminin merkezinden yaklaşık olarak en yüksek 0.9 m uzaklıktadır. Bu durumda, menzilde Nyquist koşulunun sağlanabilmesi için kullanılması gereken en yüksek bant genişliği (3.11) gereğince, uzak-alan durumu için 1.5524 GHz, yakın alan durumu için 3.5814 GHz olmalıdır. Bu çalışmadaki ölçümlerde bant genişliği uzak-alan durumunda 1 GHz, yakın-alan durumunda ise 2 GHz kullanılmıştır. Bu durumda, menzilde ölçülebilen en yüksek uzaklıklar, uzak-alan durumunda 480 m, yakın-alan durumunda ise 240 m olmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan saçıcı merkez modelinin geçerli olabilmesi için yansıtıcılık değerlerinin açıya bağlı olmaması gerekmektedir. Bu sebeple, ölçümlerde

$(-15^0, 15^0)$ açı aralığı kullanılmıştır. Açıya bağlı RKA grafiklerinde uzak-alan ölçüm sonuçlarını gösterebilmek için, ölçümlerde kullanılan azimut açı çözünürlüğü uzak-alan durumunda 0.1^0 , yakın-alan durumunda 0.5^0 'dir. Ayrıca, GKGİ veya denklem sistemi çözümü kullanılarak RKA değerleri 10^{-3} derece azimut çözünürlüğü ile hesaplanmıştır.

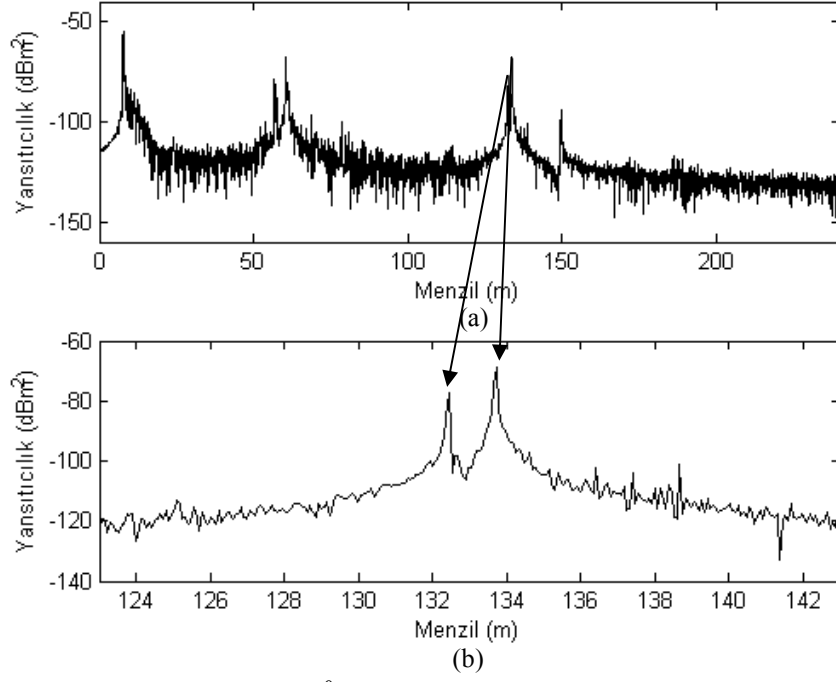
7.2. Ayırık Menzil Profilleri

Ölçümlerde toplanan S parametreleri, Şekil 7.1'deki trihedrallerden yansıyan EM dalgalarından, çevre yankısından ve toplamsal gürültü bileşenlerinden meydana gelmektedir. Verilerde sadece trihedrallerden yansıyan EM dalgalarına odaklanmak için (3.62) ifadesi kullanılmıştır.



Şekil 7.2. THFD ile 0^0 açısındaki uzak-alan menzil profili.

Uzak-alan menzil profilinde görüldüğü üzere, 308 m civarında iki adet saçıcı merkez bulunmaktadır. Bunlar Şekil 7.1'deki trihedrallere aittir. Diğer tepeler çevre yankısına, antenler arası etkileşime ve toplamsal gürültü bileşenlerine aittir. Menzil profilinden çevre yankısı ve gürültü bileşenlerinin kaldırılması uygun pencereleme fonksiyonu kullanılarak menzil kapılama işlemi ile yapılmaktadır.



Şekil 7.3. THFD ile 0^0 açısındaki yakın-alan menzil profili.

TDA işleminin performansı, veriler filtrelenirken kullanılan pencereleme fonksiyonunun şeklinden, ana huzme genişliğinden ve yan huzmelerin kazancından etkilenmektedir. Bu sebeple, pencereleme fonksiyonu seçilirken ana huzme genişliğinin mümkün oldukça dar olması, yan huzmelerin kazancının ise düşük olması istenmiştir. Ana huzme genişliğini daraltmak için filtre derecesinin artırılması, grup gecikmesi sebebiyle, frekans uzayındaki örnekleri geciktirmektedir. Bu durumu düzeltmek için,

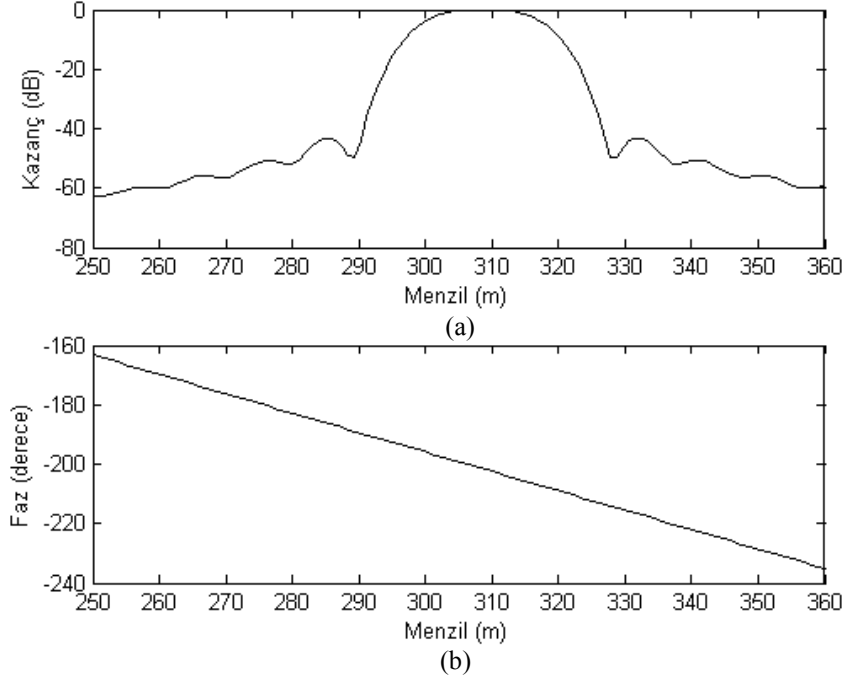
$$[\mathbf{F}_g] = [\mathbf{F}_f]_j; \quad j = 1 + \tau, \dots, N \quad (7.3)$$

ifadesi kullanılabilir. Burada τ grup gecikmesini belirtmektedir. Bu durumda frekans vektörü için,

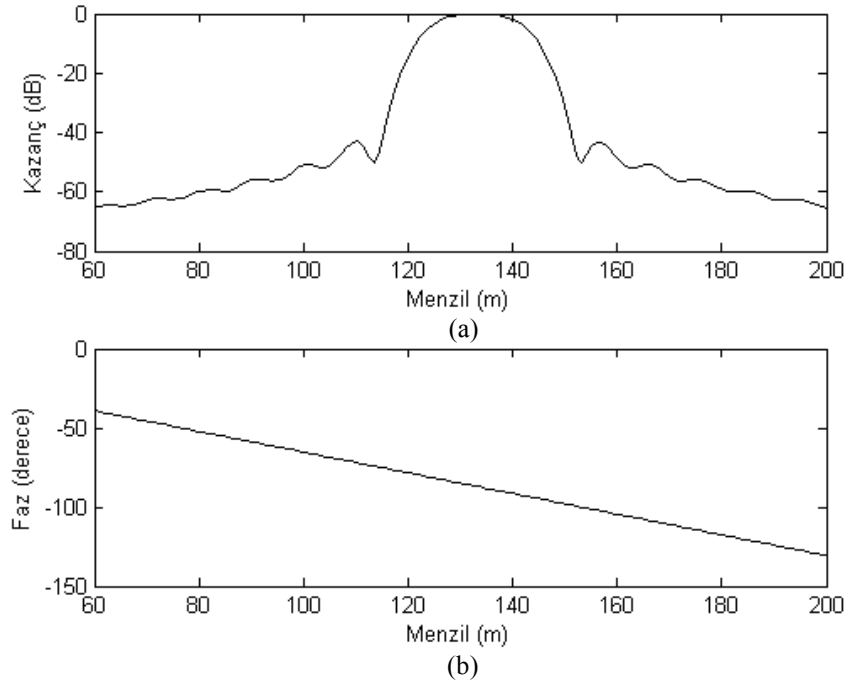
$$f' = f_j; \quad j = 1, \dots, N - \tau \quad (7.4)$$

eşitliği geçerlidir. Dolayısıyla, BGMKM'de kullanılacak olan verilerin nokta sayısı grup gecikmesi kadar azalmaktadır. Bu sebeple, filtre derecesinin yeteri kadar artırılması Nyquist koşulunun bozulmasına sebep olmaktadır.

Bu çalışmada Şekil 7.4’de görülen, derecesi 200 olan Bartlett-Hann penceresi kullanılmıştır. Bu pencere türünün tercih edilmesindeki sebep, en yüksek yan huzme kazancının -40 dB civarında olmasıdır.



Şekil 7.4. Uzak-alan için Bartlett-Hann penceresi kazanç ve faz grafikleri.



Şekil 7.5. Yakın-alan için Bartlett-Hann penceresi kazanç ve faz grafikleri.

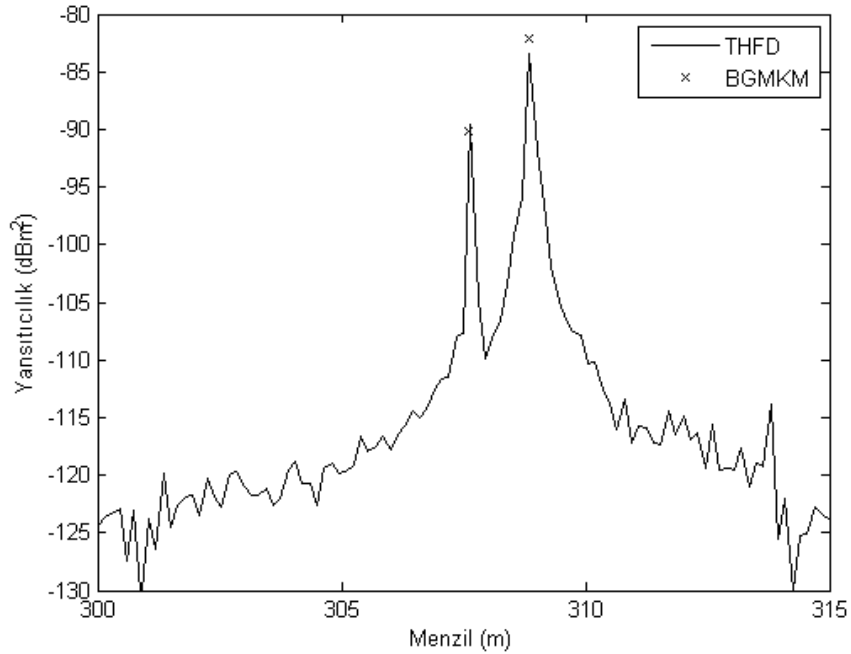
Şekil 7.4 (b) ve Şekil 7.5 (b)'den görüleceği üzere, kullanılan pencereleme fonksiyonu lineer faza sahiptir. Bu sayede, yapılan filtreleme işleminin grup gecikmesi sabittir. Dolayısıyla, her iki trihedrale ait filtrelenmiş veriler frekans uzayında eşit örnek sayısı kadar gecikecektir. Hem uzak-alan hem de yakın-alan durumlarında seçilen pencereleme fonksiyonunun grup gecikmesi $\tau = 100$ 'dür.

Frekans uzayındaki filtrelenmiş verilerde meydana gelen gecikmeye ek olarak, başlangıç frekansına yakın bölgede istenmeyen dalgacıklar meydana gelmektedir. Bu durumun BGMKM'ye olumsuz etkilerini azaltmak için,

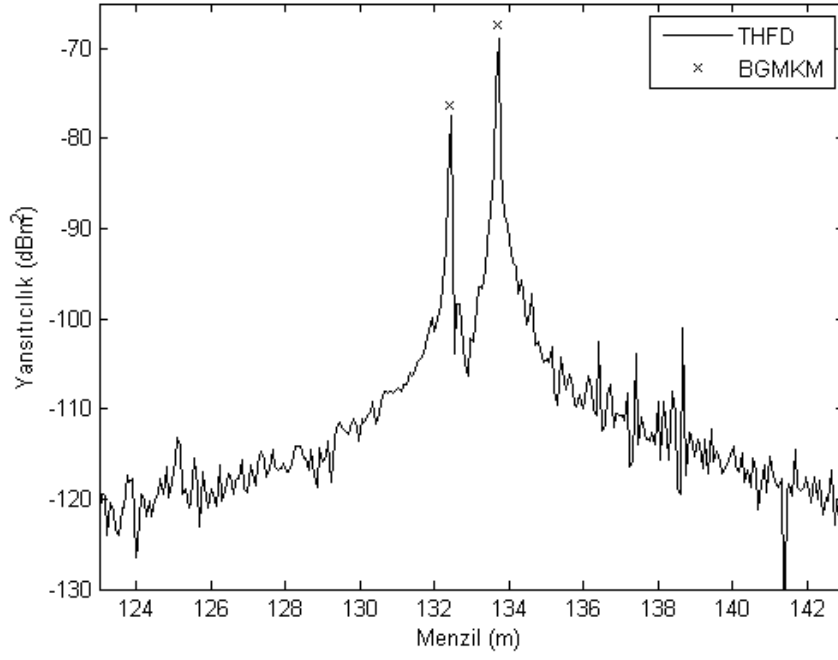
$$[\mathbf{F}_g] = [\mathbf{F}_f]_j; \quad j = 1 + 2\tau, \dots, N \quad (7.5)$$

$$f' = f_j; \quad j = 1 + \tau, \dots, N - \tau \quad (7.6)$$

eşitlikleri kullanılarak filtrelenmiş ölçüm verileri ve frekans vektörü yeniden oluşturulmuştur. Verilerdeki toplamsal gürültü bileşenlerini bastırmak için 64 ortalama kullanılmıştır.



Şekil 7.6. Uzak-alan durumu için 0° azimut açısında BGMKM ile hesaplanan ayırık menzil profili.



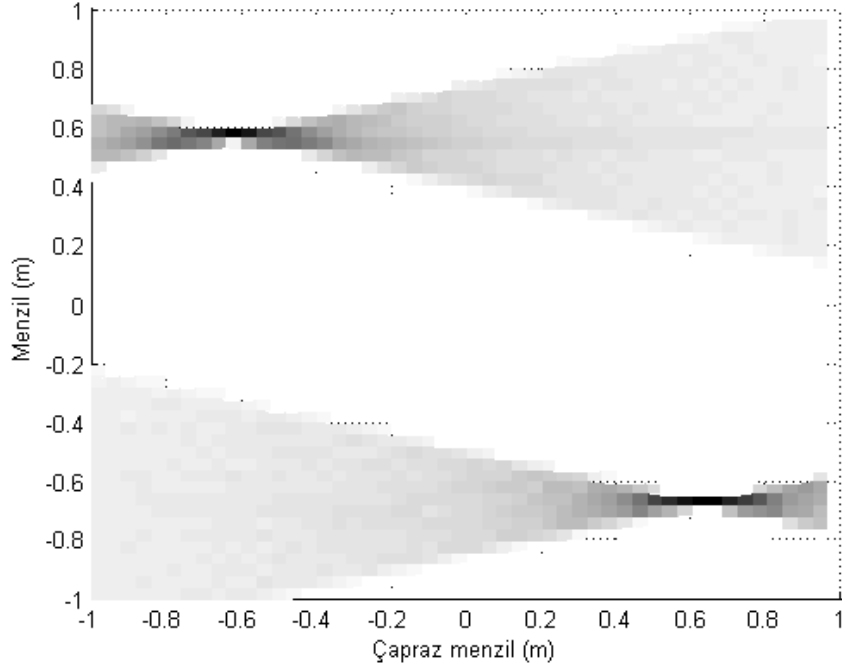
Şekil 7.7. Yakın-alan durumu için 0^0 azimut açısında BGMKM ile hesaplanan ayrık menzil profili.

Menzil çözünürlüğü ile menzil profillerindeki belirsizlik arasında yakın ilişki vardır. Daha yüksek menzil çözünürlüğü, saçıcı merkezlere ait konum değerlerinin daha yüksek doğruluk ile tespit edilmesini sağlamaktadır. THFD ile hesaplanan menzil profillerinin çözünürlüğünü etkileyen temel etken bant genişliğidir. Öyle ki, uzak-alan ölçümlerinde bant genişliği 1 GHz iken menzil çözünürlüğü (3.8) gereğince 15 cm'dir. Yakın alan ölçümlerinde ise, bant genişliğinin 2 GHz olması sebebiyle menzil çözünürlüğü 7.5 cm'dir. BGMKM, Şekil 7.6 ve Şekil 7.7'de görüldüğü üzere ayrık menzil profillerinin sonsuz çözünürlük ile hesaplanmasına imkan sağlamaktadır. Bu sayede, oluşturulacak YAR görüntülerinin kalitesi ve yapılacak RKA hesaplarının doğruluğu önemli ölçüde artmaktadır.

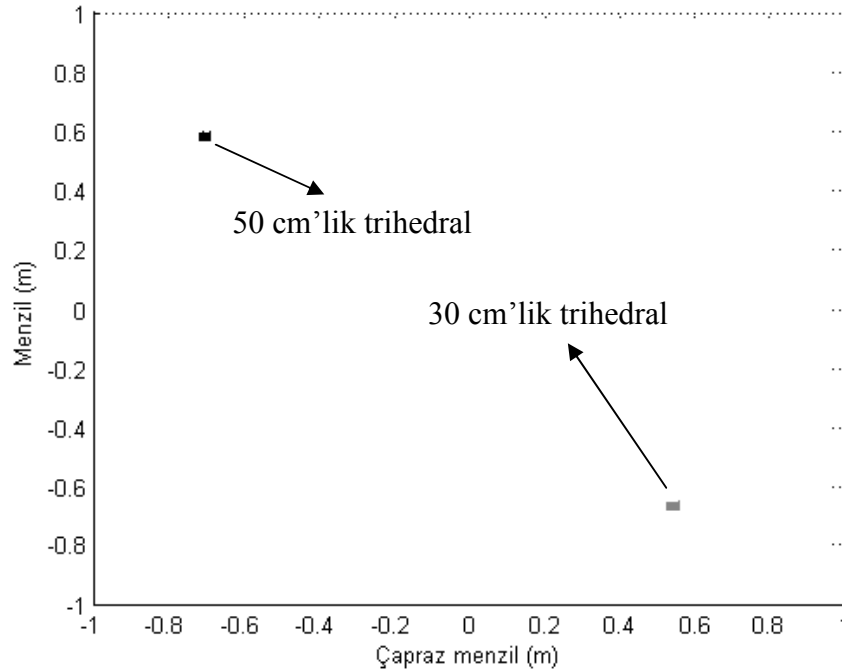
7.3. YAR Görüntüleme

Bu tezde, GKGİ ile görüntü oluşturmak için açı çözünürlüğü 0.5^0 kullanılmıştır. Denklem sistemi çözümlerinin kararsız yapısı (yüksek kondisyon sayısı) sebebiyle açı çözünürlüğü uzak ve yakın-alan durumları için 5^0 alınmıştır. Hem GKGİ hem de denklem sistemi çözümlerinde YAR görüntüleme penceresinin çözünürlüğü 50×50 pikseldir. Görüntü penceresinin piksel sayısı kullanıcı tanımlı olmak üzere, bu değer ölçümlerde kullanılan bant genişliği veya frekans nokta

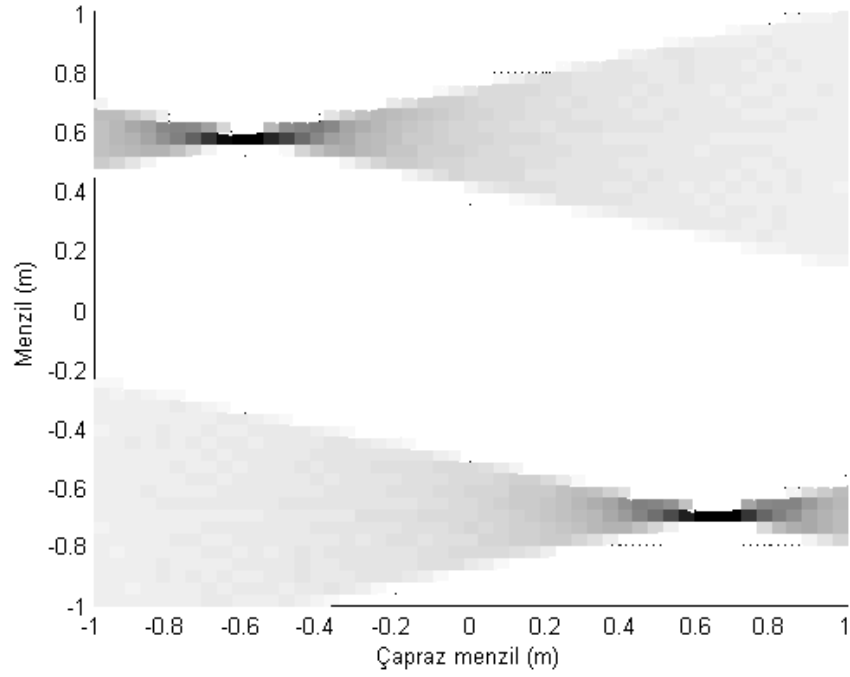
sayısı ile herhangi bir ilişkisi yoktur. GKİ ile görüntü oluştururken, yansıtıcılık değeri göreceli olarak düşük olan 30 cm'lik trihedralin kaybedilmemesi için (5.19), (5.20), (5.21) ve (5.22) ifadeleri kullanılmıştır.



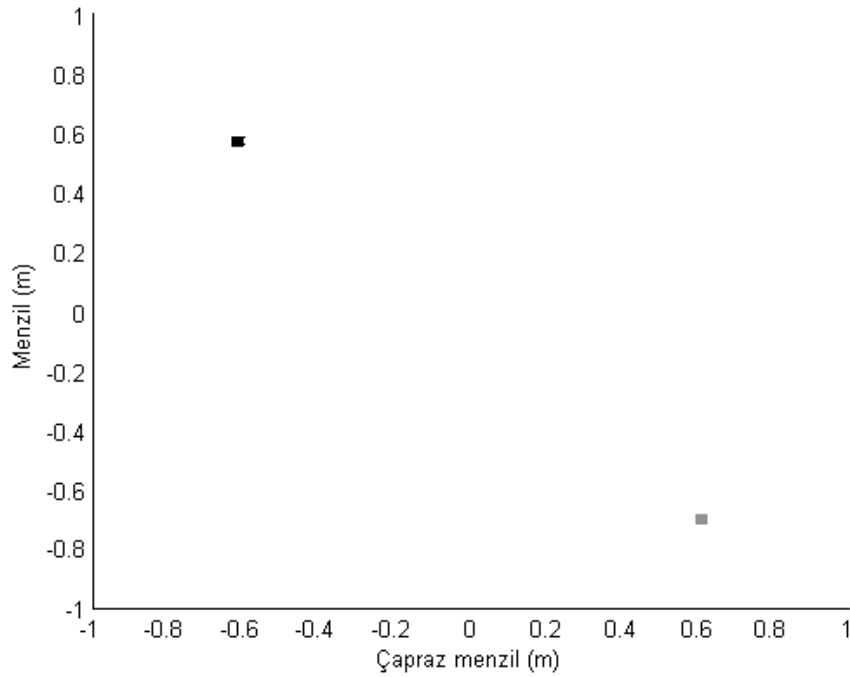
Şekil 7.8. KGİ ile oluşturulan uzak-alan YAR görüntüsü.



Şekil 7.9. GKGİ ile oluşturulan uzak-alan YAR görüntüsü.



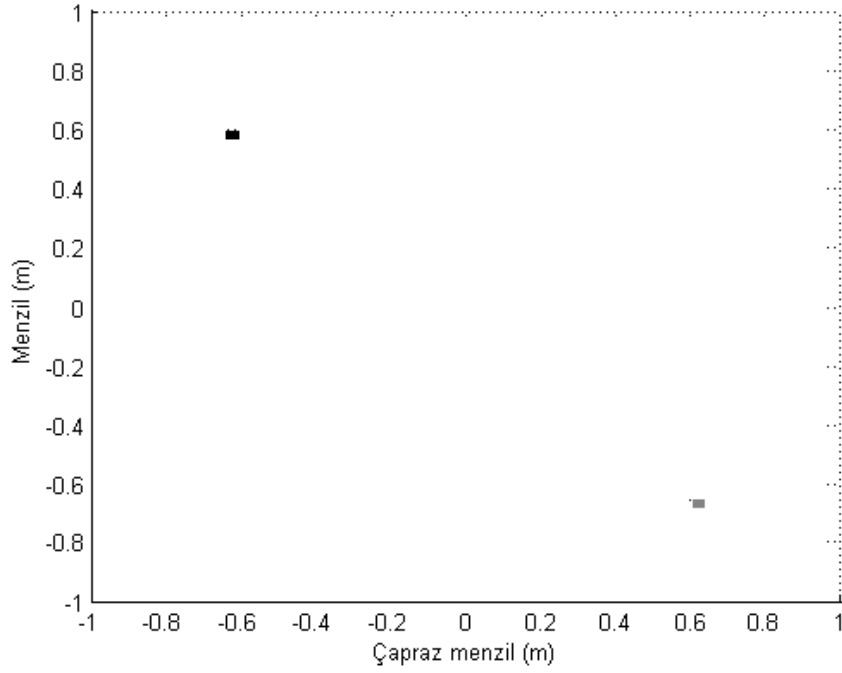
Şekil 7.10. YKGİ ile oluşturulan yakın-alan YAR görüntüsü.



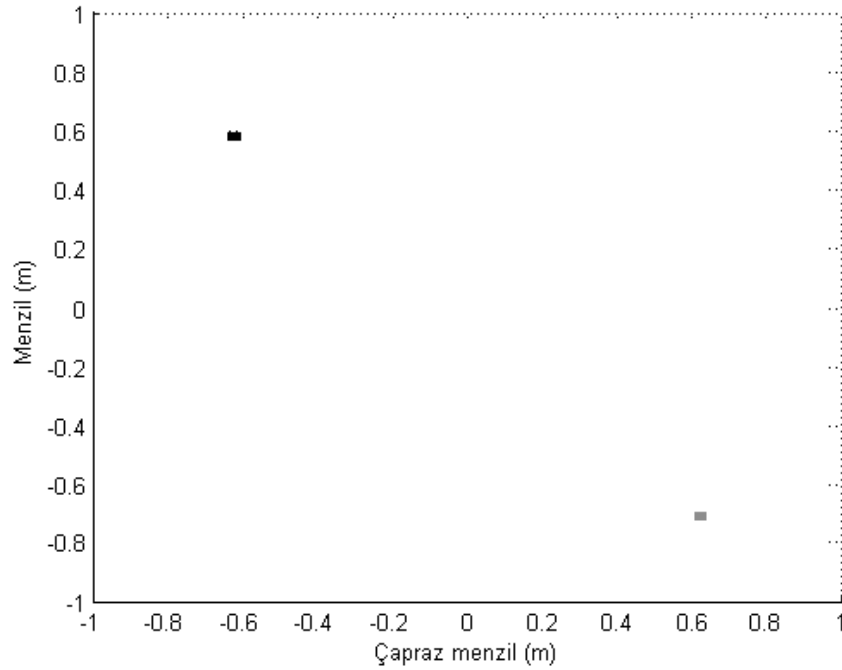
Şekil 7.11. GKGİ ile oluşturulan yakın-alan YAR görüntüsü.

KGİ, YKGİ ve GKGİ algoritmaları ile oluşturulan uzak veya yakın-alan YAR görüntüleri incelendiğinde, GKGİ algoritmasının sahip olduğu GB sayesinde hem menzil hem de çapraz menzilde sonsuz çözünürlükle YAR görüntülemenin yapıldığı görülmektedir. Dolayısıyla, bu tezde literatürde ilk defa geliştirilen GKGİ ile YAR

görüntüleme algoritması hem uzak-alan hem de yakın-alan durumu için gerçek ölçüm verileri ile desteklenmiştir.



Şekil 7.12. Lineer denklem sistemi ile oluşturulan uzak-alan YAR görüntüsü.



Şekil 7.13. Lineer olmayan denklem sistemi ile oluşturulan yakın-alan YAR görüntüsü.

Şekil 7.12 ve Şekil 7.13 incelendiğinde, bu tezde literatürde ilk defa geliştirilen denklem sistemi çözümleri ile YAR görüntüleme algoritmaları hem uzak-alan hem

de yakın-alan durumu için gerçek ölçüm verileri ile desteklenmiştir. Öyle ki, tıpkı GKGİ algoritmasında olduğu gibi hem menzil hem de çapraz menzilde sonsuz çözünürlükle YAR görüntüleri oluşturulmuştur.

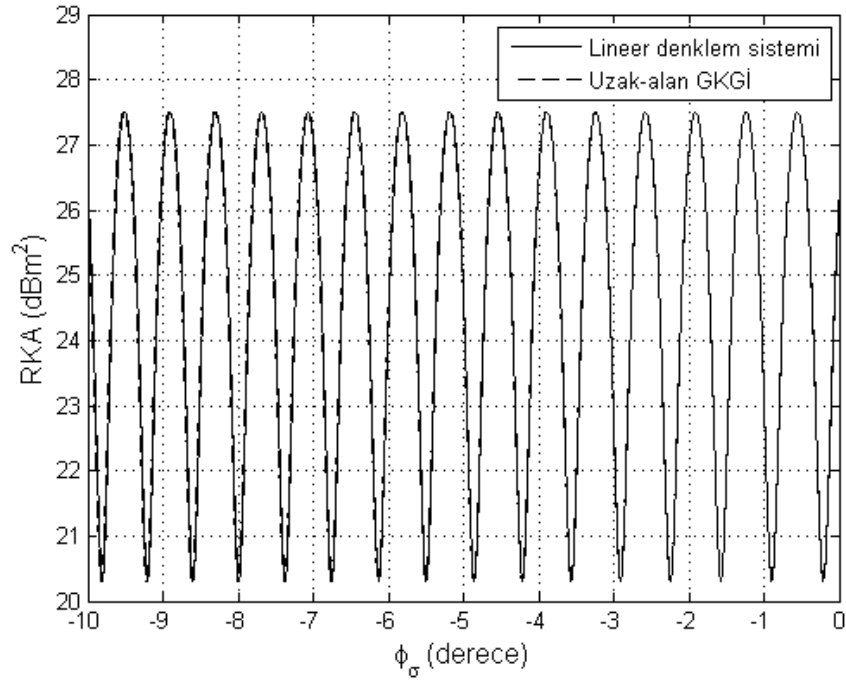
7.4. RKA Hesapları

Bu başlık altında, Şekil 7.1'deki düzeneğin GKGİ ve denklem sistemi çözümleri ile RKA hesabı yapılacaktır. GKGİ ile RKA hesabı yapılırken saçıcı merkezlerin konum ve yansıtıcılık değerleri, Şekil 7.9 ve Şekil 7.11'deki uzak veya yakın-alan YAR görüntülerinden elde edilecektir. Denklem sistemi çözümleri, herhangi bir görüntü oluşturmadan, doğrudan RKA hesabına olanak sağlamaktadır.

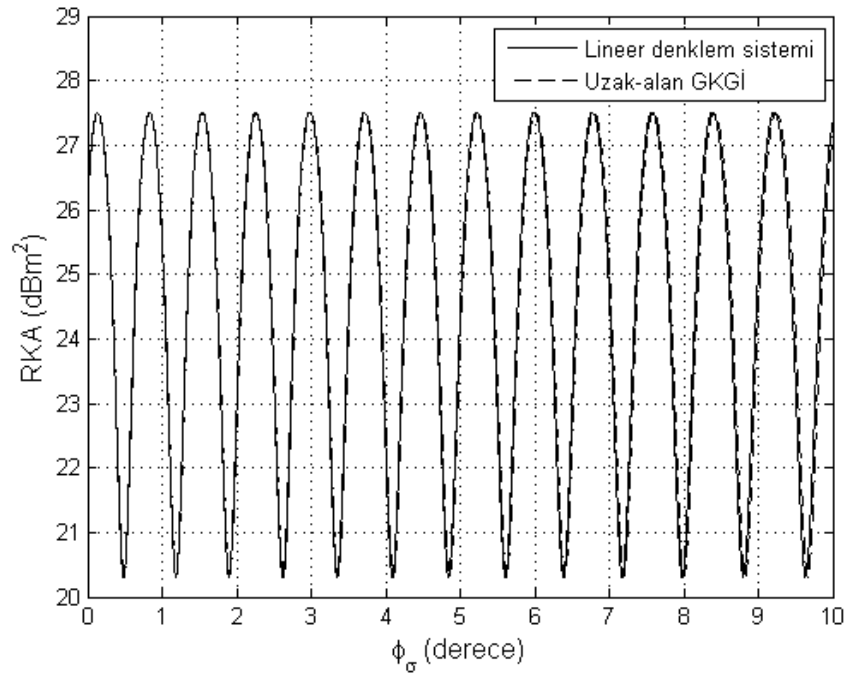
Pratik uygulamalarda ölçüm mesafesi, antenlerin huzme kazancı ve duran dalga oranı, kablo ve network analizörden kaynaklanan kayıplar söz konusudur. Bu kayıplar RKA ölçümlerinde kalibrasyon işlemi ile kontrol altına alınmaktadır. Bu amaca yönelik, Şekil 7.1'deki hedef koordinat sisteminin merkezine, sıfır açısındaki RKA değeri teorik olarak bilinen referans bir cisim konulmaktadır. TYAR ölçüm sisteminden kaynaklanan toplam kayıp,

$$\sigma_{\text{kayıp}} = \sigma_{\text{teorik}} - \sigma_{\text{ölçüm, hesaplanan}} \quad (7.7)$$

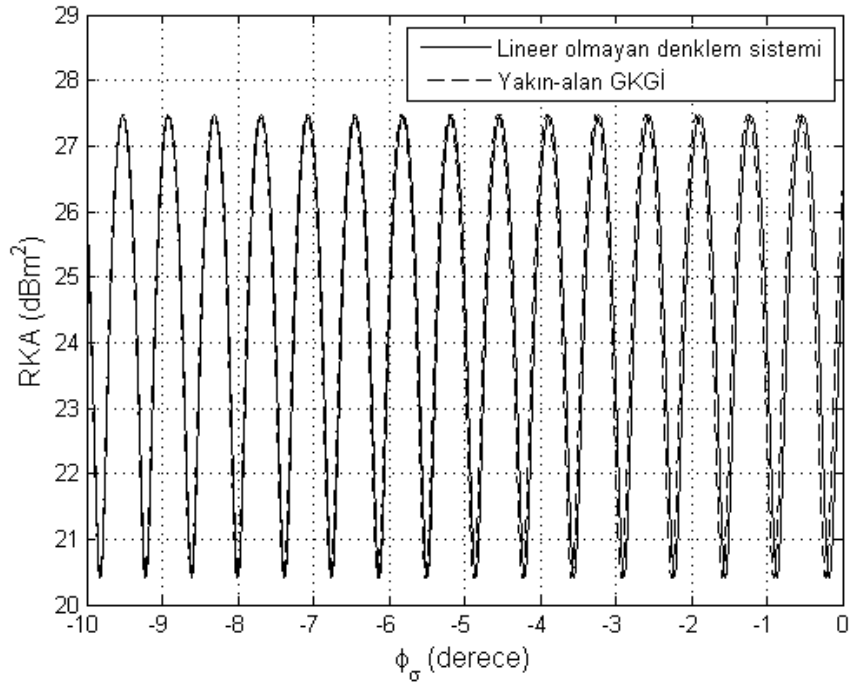
formülü ile dBm^2 biriminde hesaplanmaktadır. Bu kayıp değeri, ölçüm alınan cisimler için hesaplanan RKA değerlerine eklenerek kalibrasyon işlemi yapılmaktadır. Bu tezde referans cisim olarak, RKA değeri 24.6373 dBm^2 olan 50 cm 'lik trihedral kullanılmıştır. Referans cismin yansıtıcılık değeri BGMKM ile dBm^2 biriminde hesaplanmıştır. Elde edilen bu değer ve (7.7) kullanılarak TYAR ölçüm sisteminden kaynaklanan kayıplar hesaplanmıştır. Bu kayıplar, GKGİ veya denklem sistemi çözümleri ile hesaplanan RKA değerlerine eklenerek kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Şekil 7.1'deki her bir trihedrale ait RKA değerinin teorik olarak $(-15^\circ, 15^\circ)$ açı aralığında sabit olmasına karşılık, ölçümlere başlarken yapılan hizalama işleminden dolayı $\pm 15^\circ$ açılara yakın ölçümlerde RKA değerlerinde bir miktar ($< 1.5 \text{ dBm}^2$) değişme meydana gelmektedir. Bu sebeple RKA grafikleri $(-10^\circ, 10^\circ)$ açı aralığında çizilmiştir.



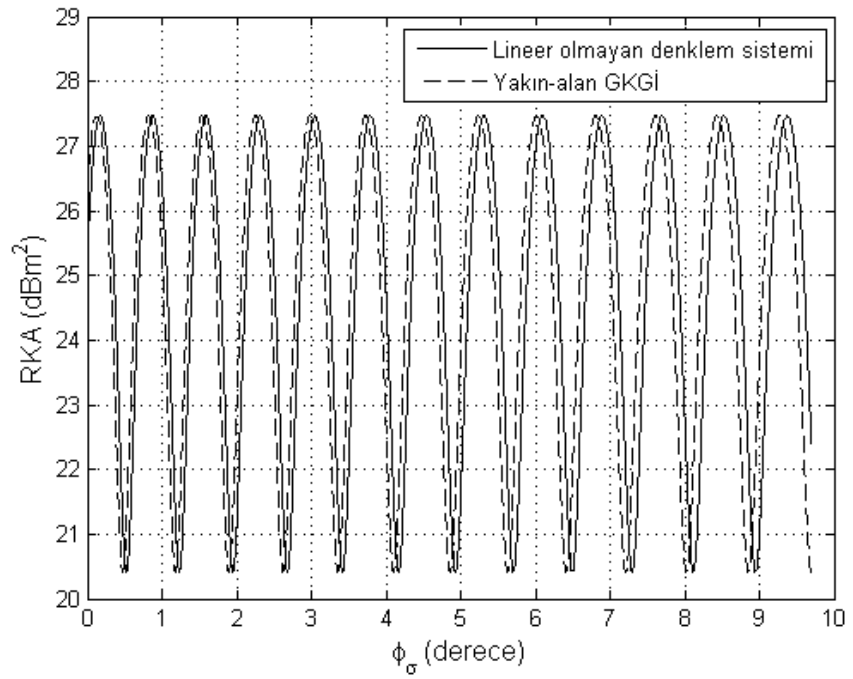
Şekil 7.14. Uzak-alan verileri ile RKA hesabı sonuçları, $\phi \in (-10^0, 0^0)$.



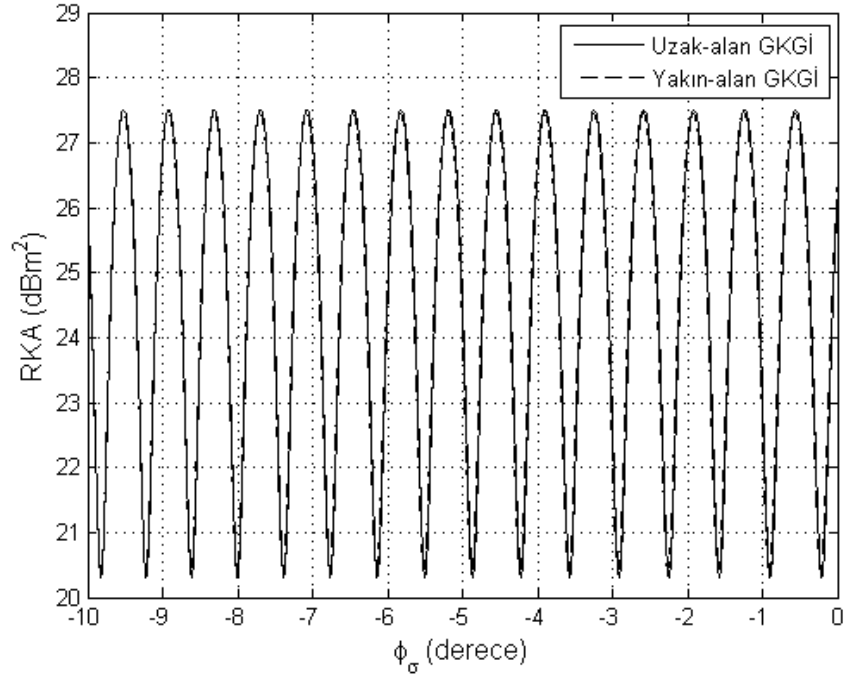
Şekil 7.15. Uzak-alan verileri ile RKA hesabı sonuçları, $\phi \in (0^0, 10^0)$.



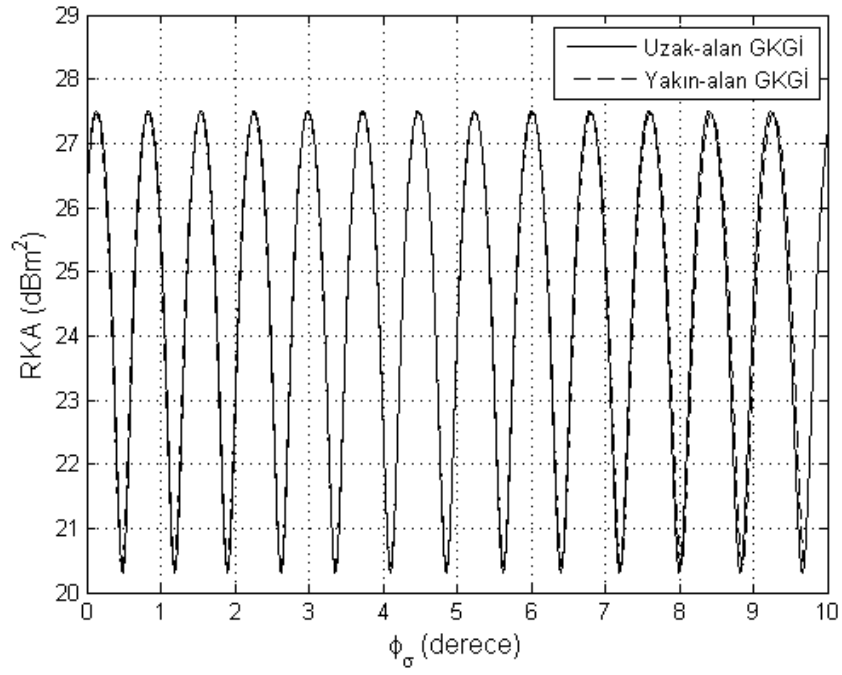
Şekil 7.16. Yakın-alan verileri ile RKA hesabı sonuçları, $\phi \in (-10^0, 0^0)$.



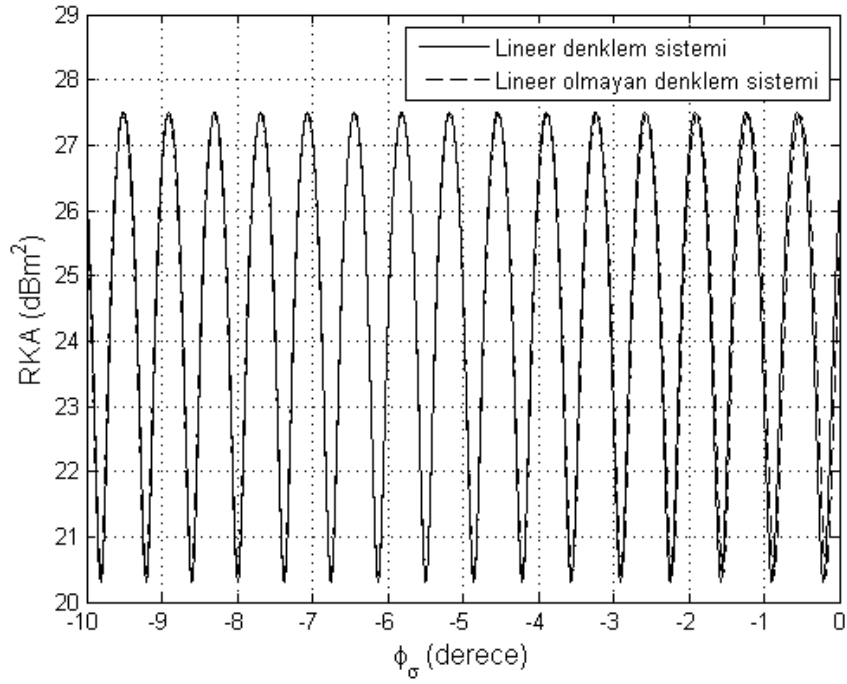
Şekil 7.17. Yakın-alan verileri ile RKA hesabı sonuçları, $\phi \in (0^0, 10^0)$.



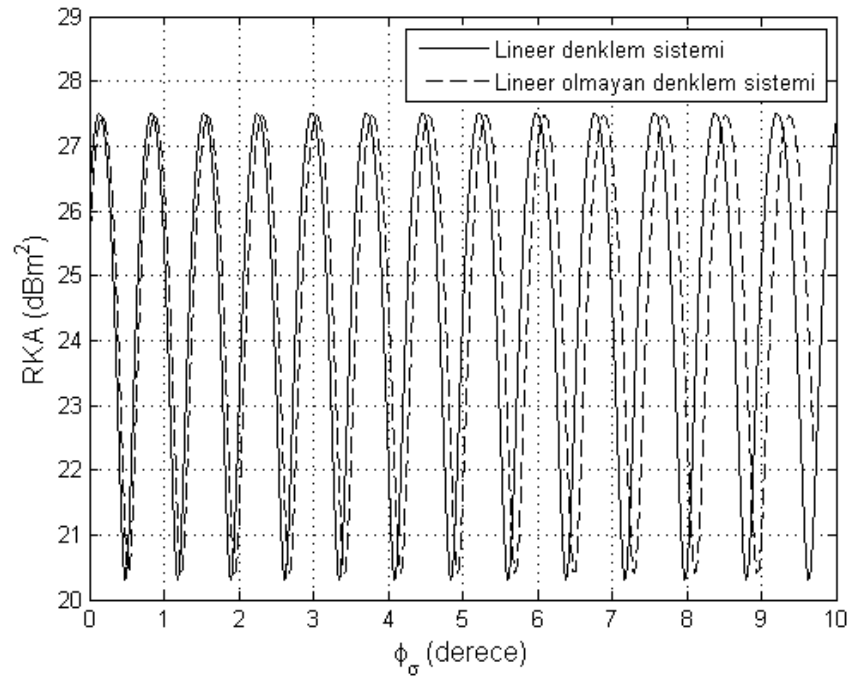
Şekil 7.18. Uzak-alan GKGİ ile yakın-alan GKGİ karşılaştırması, $\phi \in (-10^0, 0^0)$.



Şekil 7.19. Uzak-alan GKGİ ile yakın-alan GKGİ karşılaştırması, $\phi \in (0^0, 10^0)$.



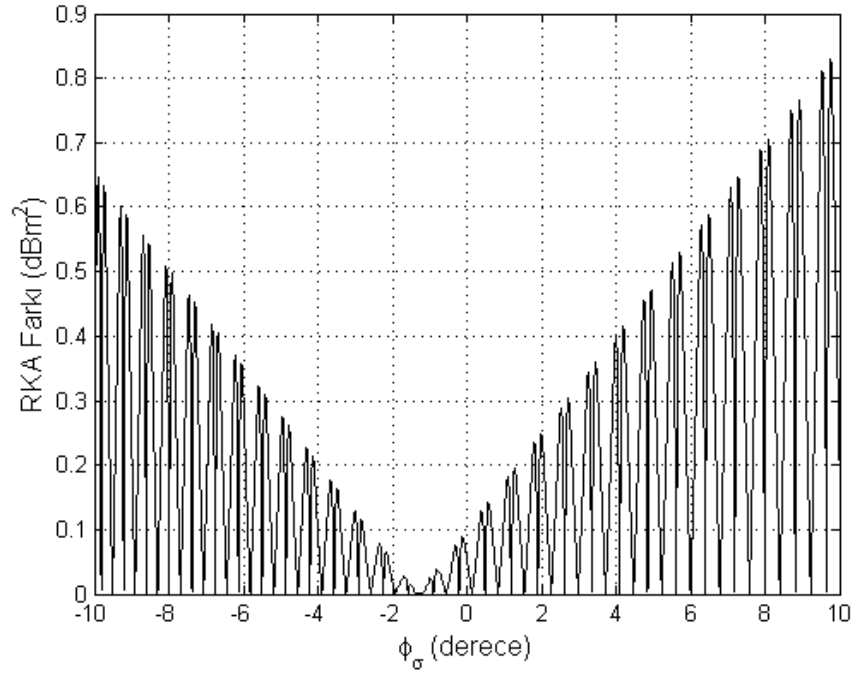
Şekil 7.20. Lineer denklem sistemi ile lineer olmayan denklem sisteminin karşılaştırılması, $\phi \in (-10^0, 0^0)$.



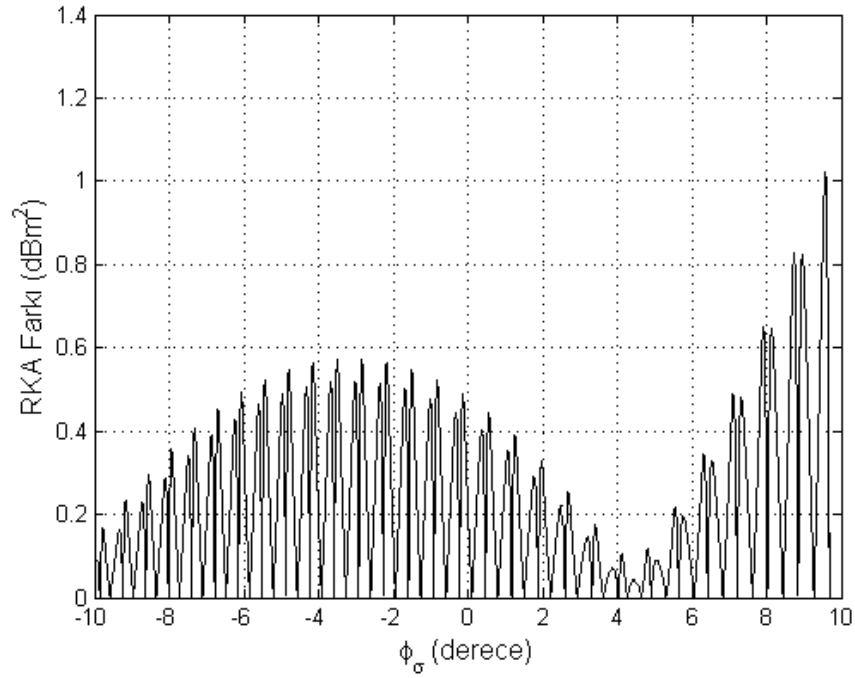
Şekil 7.21: Lineer denklem sistemi ile lineer olmayan denklem sisteminin karşılaştırılması, $\phi \in (0^0, 10^0)$

Uzak-alan ölçüm verileri kullanılarak hesaplanan RKA değerleri ile çizdirilen Şekil 7.14 ve Şekil 7.15 incelendiğinde, lineer denklem sistemi ile uzak-alan GKGİ algoritmalarının oldukça benzer sonuç verdiği görülmektedir. Benzer durum, uzak-

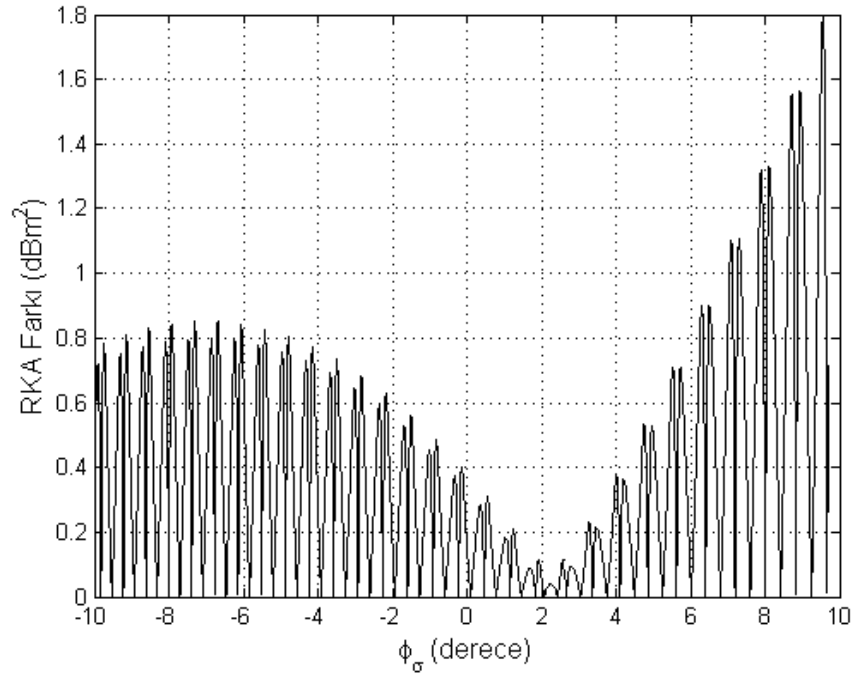
alan GKGİ ile yakın-alan GKİ, lineer denklem sistemi ile yakın-alan GKİ arasında da vardır.



Şekil 7.22. Lineer denklem sistemi ile uzak-alan GKGİ arasındaki RKA farkı.

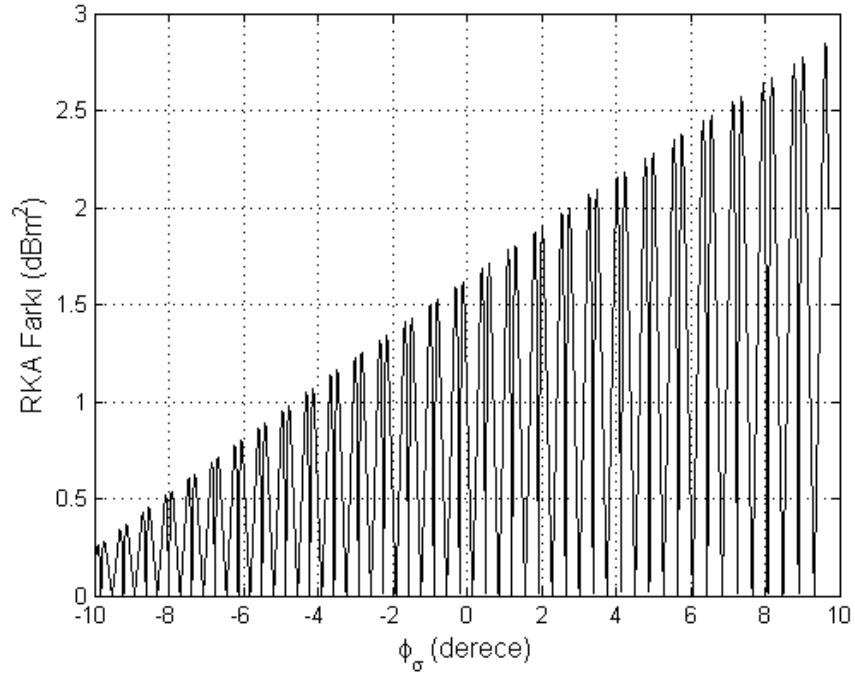


Şekil 7.23. Uzak-alan GKGİ ile yakın-alan GKGİ arasındaki RKA farkı.



Şekil 7.24. Lineer denklem sistemi ile yakın-alan GKGİ arasındaki RKA farkı.

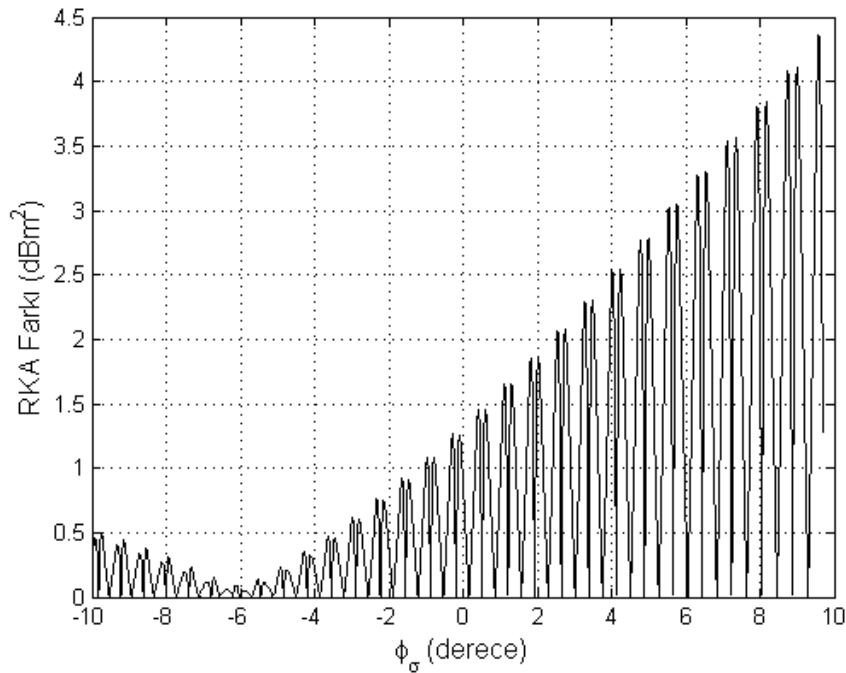
Yakın-alan ölçüm verileri ile RKA hesabı sonuçları incelendiğinde, Şekil 7.16 ve Şekil 7.17 gereğince lineer olmayan denklem sistemi ile yakın-alan GKGİ arasında en yüksek 0.108^0 ve 2.835 dBm^2 fark vardır.



Şekil 7.25. Lineer olmayan denklem sistemi ile yakın-alan GKGİ arasındaki RKA farkı.

Lineer olmayan denklem sistemi çözümü, yüksek kondisyon sayılı matrislerden olumsuz etkilenmektedir. Öyle ki, ayırık menzil profilleri ve R_0 ölçüm mesafesindeki ufak değişimler (hatalar), hesaplanan menzil ve çapraz menzil değerlerini GKGİ ve lineer denklem sistemine göre daha fazla etkilemektedir. Ayrıca, hesaplara katılan açı sayısı (açı aralığı), denklem sistemi çözümlerini uzak veya yakın-alan GKGİ algoritmalarına göre daha fazla etkilemektedir.

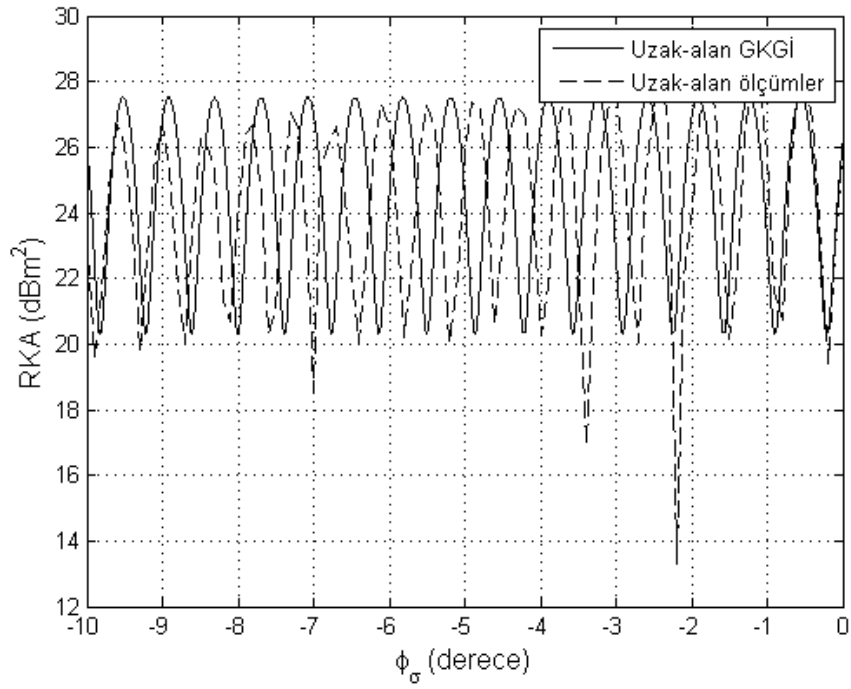
Şekil 7.26 incelendiğinde, iki denklem sistemi çözümü arasında en yüksek 4.357 dBm^2 RKA farkı ve Şekil 7.21 gereğince en yüksek 0.171° açı farkı vardır. Söz konusu açı ve RKA farkları, hesaplarda kullanılan açı sayısı ve R_0 ölçüm mesafesinin değeri ile değişmektedir. Bu durum, denklem sistemi çözümlerinin kararsız yapısının sebep olduğu bir dezavantajdır.



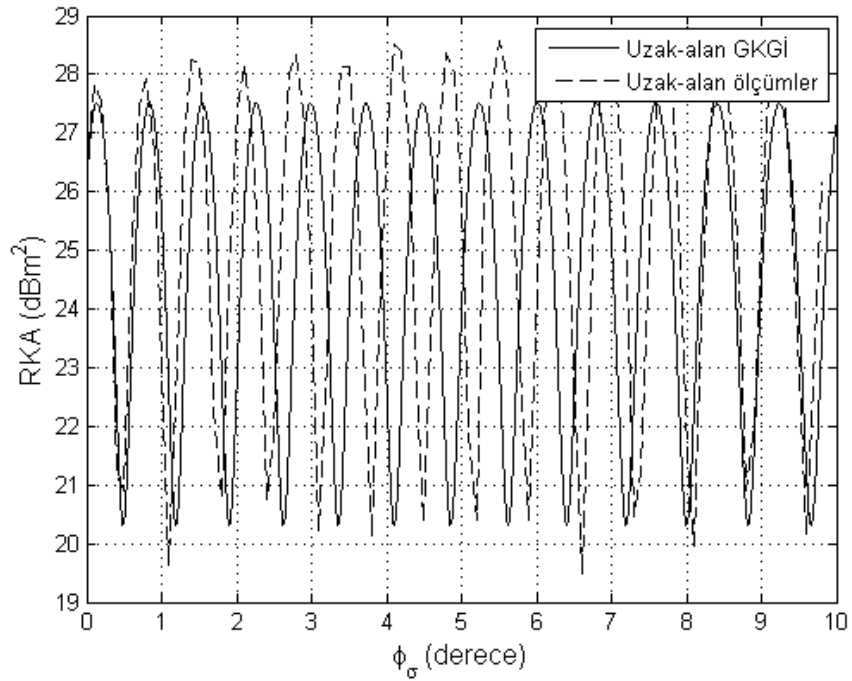
Şekil 7.26. Lineer denklem sistemi ile lineer olmayan denklem sistemi arasındaki RKA farkı.

Network analizör kullanılarak ölçülen S parametreleri ile RKA değerleri arasında yakın ilişki vardır. Eşitlik (2.15) gereğince, ölçülen S parametrelerinden kalibrasyon işlemi ile R_0 ölçüm mesafesinin çıkarılması neticesinde elde edilen S parametreleri RKA değerlerini vermektedir. RKA değerlerinin dBm^2 biriminde olmasından dolayı ölçüm mesafesinin faza etkisi, ölçülen RKA sonuçlarını etkilemeyecektir. Bu yöntem ile uzak-alan RKA ölçümleri yapılmaktadır. Fakat bu

yöntem kullanılarak yakın-alan RKA ölçümleri yapılamamaktadır. Çünkü RKA tanım olarak uzak-alanda geçerlidir.



Şekil 7.27. Uzak-alan GKGİ ve ölçüm sonuçları $\phi \in (-10^\circ, 0^\circ)$.



Şekil 7.28. Uzak-alan GKGİ ve ölçüm sonuçları $\phi \in (0^\circ, 10^\circ)$.

Uzak-alanda ölçülen RKA değerleri, Şekil 7.27 ve Şekil 7.28'e göre, uzak-alan GKGİ sonuçları ile farklara sahiptir. Dikkat edilirse ölçüm sonuçlarında bazı

açılardaki RKA değerleri, diğer açılardakine oranla daha hızlı değişerek tepe veya çukur yapmaktadır. Bu durum özellikle -2.2^0 'de görülmektedir. Ölçümlerin açık sahada yapılması neticesinde, çevresel faktörler ile trihedrallerden birinde meydana gelebilecek açı kayması, söz konusu RKA farklarını meydana getirecektir. Çünkü GKGİ ve denklem sistemi çözümlerinin kullandığı saçıcı merkez modeli, (2.1) gereğince açı ve frekansa bağlı olmayan yansıtıcılık değerlerine sahiptir.

8. SONUÇLAR

Bu tezde, uzak veya yakın-alan ölçüm verileriyle YAR görüntüleme ve RKA hesabına imkân sağlayan GKGİ ve denklem sistemi çözümleri literatürde ilk defa geliştirilmiştir. BGMKM'nin sınırlı bant genişliği ve örnek sayılarına sahip (açı ve frekans boyutlarında) veriler için menzilde sonsuz çözünürlük sağlaması neticesinde ayrık menzil profilleri, geleneksel spektral kestirim algoritmalarında karşılaşılan sayısal gürültülere ve çözünürlük problemine sahip değildir. Dolayısıyla, ayrık menzil profillerinden elde edilen YAR görüntülerinin kalitesi ve RKA hesaplarının doğruluğu bu tezde geliştirilen algoritmalarla artırılmıştır. GKGİ algoritmasının sahip olduğu GB neticesinde, arka plandaki ve saçıcı merkezlerin etrafındaki sayısal gürültüler uzak veya yakın-alan YAR görüntülerinden kaldırılmıştır. Bu sayede nokta yayılma fonksiyonunun sebep olduğu bulanıklık kaldırılmış, hem menzil hem de çapraz menzilde sonsuz çözünürlüğe ulaşılmıştır. Benzer görüntüler denklem sistemi çözümleri ile de elde edilmiştir. Bunlara ek olarak, GKGİ ve denklem sistemi çözümleri, literatürdeki görüntü oluşturma algoritmalarından (uyumlu filtre, 2 boyutlu THFD, HÇK ve benzeri) daha az açı ve frekans sayısı gerektirmekte, bu sayede işlem yükü önemli ölçüde azalmaktadır. Geliştirilen YAR görüntüleme algoritmaları hem yapay ölçüm verileri, hem de ASEMLAB'da toplanan gerçek ölçüm verileri ile desteklenmiştir. Ayrıca, bu çalışmada geliştirilen görüntüleme algoritmaları sadece YAR veya TYAR sistemlere değil, Doppler radarları, uydu, sonar veya medikal görüntüleme sistemlerine de uygulanabilir.

GKGİ ve denklem sistemi çözümleri, yüksek kaliteli YAR görüntülemenin yanı sıra, uzak veya yakın-alan veriler ile RKA hesabına da imkân sağlamaktadır. Bu sayede, pratik uygulamalarda uzak-alan gereksinimlerinin sağlanmasına gerek olmadan RKA hesapları yapılabilmektedir. Bu durum, ölçüm sistemlerinin kurulmasında önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Örneğin, yaklaşık 15 m uzunluğa sahip F16 savaş uçağının 10 GHz merkez frekansındaki uzak-alan gereksinimi yaklaşık 15 km'dir. Dolayısıyla, uzak-alan RKA ölçümlerinin yapılabilmesi için en az 15 km'lik ölçüm sahasına ihtiyaç vardır. Ayrıca menzilde Nyquist şartının sağlanabilmesi için, bant genişliğinin 40 GHz (menzil çözünürlüğü 3.75 mm) olduğu durumda frekans boyutunda 4×10^6 örnek gerekmektedir. Buna karşılık, bu tezde

geliştirilen yakın-alan GKGİ ve lineer olmayan denklem sistemi çözümü uzak-alan gereksinimine ihtiyaç duymadığından, RKA hesapları uzak-alan ölçümlerine göre daha kısa ölçüm sahası, daha az nokta sayısı ve daha az işlem yükü ile yapılabilir. Ayrıca, ayrık menzil profillerinin sonsuz çözünürlüğe sahip olması sebebiyle, uzak-alan ölçümlerine göre daha dar bant genişliği ile RKA hesapları yapılabilir.

Uzak-alan RKA ölçümlerinde açı adım aralığının yeteri kadar küçük olmaması durumunda elde edilecek RKA değerleri hatalı olacaktır. Bu durum, açı boyutunda alınması gereken örnek sayısını arttırmakta ve bu sebeple ölçüm süreleri uzamakta, hesap yükü artmaktadır. Bu tezde geliştirilen GKGİ ve denklem sistemi çözümleri, uzak-alan ölçümlere göre daha az açı sayısı ile RKA hesaplarının yapılmasına imkân sağlamaktadır.

GKGİ ve denklem sistemi çözümlerinin, YAR görüntüleme veya RKA hesaplarına sağladığı kolaylıkların yanı sıra, geliştirilen bu algoritmalar bazı dezavantajlara sahiptir. GKGİ ve denklem sistemi çözümleri, yansıtıcılık değeri frekans veya açı bağımlı olmayan saçıcı merkez modelini kullanmaktadır. Dolayısıyla, bu algoritmalarla YAR görüntüleme veya RKA hesabı yapılırken, açı aralığı ve bant genişliği yeteri kadar dar olmalıdır. Bu durum özellikle dispersif malzemelerde hatalı sonuçlara sebep olabilir. Ayrıca denklem sistemi çözümlerinin kararsız yapısından dolayı bu algoritmanın sonuçları, ayrık menzil profilleri veya R_0 ölçüm mesafesindeki ufak değişimlerden olumsuz etkilenmektedir. İleriki çalışmalarda, açı ve frekansın yansıtıcılık değerlerine etkisi saçıcı merkez modeline dâhil edilerek, GKGİ ve denklem sistemi çözümleri geliştirilmelidir.

9. KAYNAKLAR

- [1] E. F. Knott, J. F. Shaeffer, and M. T. Tuley, *Radar Cross Section*. Scitech Publishing, 2004.
- [2] E. F. Knott, *Radar Cross Section Measurements*. Scitech Publishing, 2006.
- [3] S. Li, B. Zhu and H. Sun, "NUFFT-based near-field imaging technique for far-field radar cross section calculation," *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.*, vol. 9, pp. 550-553, 2010.
- [4] T. Vaupel and T. F. Eibert, "Comparison and application of near-field ISAR imaging techniques for far-field radar cross section determination," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 54, pp. 144-151, Jan. 2006.
- [5] J. W. Odendaal and J. Joubert, "Radar cross section measurements using near-field radar imaging," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 45, pp. 948-954, Dec. 1996.
- [6] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2010.
- [7] D. C. Munson, Jr., J. D. O'Brien and W. K. Jenkins, "A tomographic formulation of spotlight-mode synthetic aperture radar", *Proc. IEEE*, vol. 71, pp. 917-925, 1983.
- [8] M. D. Desai and W. K. Jenkins, "Convolution backprojection image reconstruction for spotlight mode synthetic aperture radar", *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 1, pp. 505-517, 1992.
- [9] X. Shu, D. C. Munson, Jr., S. Basu, and Y. Bresler, "An $N^2 \log N$ Back-Projection Algorithm for SAR Image Formation 2000", pp. 3-7, vol. 1.
- [10] S. Basu and Y. Bresler, "O($N^2 \log N$) filtered backprojection reconstruction algorithm for tomography", *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 9, pp. 1760-1773, 2000.
- [11] S. I. Kelly, G. Rilling, M. Davies, and B. Mulgrew, "Iterative Image Formation using Fast (Re/Back)-projection for Spotlight-mode SAR", *Radar Conference (RADAR), 2011 IEEE*, pp. 835-840.
- [12] Ş. Özsoy and A. A. Ergin, "Pencil back-projection method for SAR imaging," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 18, pp. 573-581, 2009.
- [13] S. G. Qadir, Y. Fan, W. Bao-ping, M. Shabbir, F. Arneeb, "ISAR Imaging of Rotating Targets Using Matrix Pencil Back-Projection Method", *Int. Bhurban Conf. on Applied Sciences & Technology (IBCAST)*, pp. 348-352, 2012.
- [14] Y. Kong, Y. Zhang, J. Zhou, "SAR Images Processing Based on Gibbs-MRF and Connected Clustering", in *Int. Conf. on Computational Sciences and Optimization (CSO)*, pp. 896-898, 2009.
- [15] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*. Harlow: Prentice-Hall, 2007.
- [16] J. A. Jackson, "Automated Image Segmentation for Synthetic Aperture Radar Feature Extraction", *IEEE National Aerospace & Electronics Conference (NAECON)*, Dayton, Ohio, 2010, pp. 45-49.
- [17] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms", *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 9, no. 1, pp. 62-66, Jan. 1979.
- [18] D. Sen and S. K. Pal, "Thresholding for Edge Detection in SAR Images", *International Conference on Signal Processing, Communications and Networking, ICSCN '08*, pp. 311-316, 2008.

- [19] M. L. Boas, *Mathematical Methods in the Physical Sciences*. New York: Wiley, 2005.
- [20] A. Taflove, S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. London: Artech House, 2005.
- [21] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*. New York: Wiley, 1989.
- [22] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*. New York: Wiley, 2011.
- [23] Y. Hua and T. K. Sarkar, "Matrix pencil method for estimating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, vol. 38, pp. 814-824, 1990.
- [24] T. K. Sarkar and O. Pereira, "Using the matrix pencil method to estimate the parameters of a sum of complex exponentials", *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, vol. 37, pp. 48-55, 1995.
- [25] H. Fengduo, T. K. Sarkar, and H. Yingbo, "Utilization of bandpass filtering for the matrix pencil method", *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 41, pp. 442-446, 1993.
- [26] O. Tuglar ve A. A. Ergin, "YAR Görüntüleme ve RKA Ölçümleri için Lineer Denklem Destekli Matris Kalem Metodu", *ELECO, Bursa, 2012*.

ÖZGEÇMİŞ

Okyanus TULGAR, 1986 yılında İstanbul'un Üsküdar ilçesinde doğmuştur. İlköğretim ve lise eğitimini İstanbul'da tamamlayıp 2010 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden lisans mezunu olmuştur. 2011 yılından itibaren Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmakta olup, Açık Saha Elektromanyetik Laboratuvarı (ASEMLAB)'da yazılımcı pozisyonunda görev almaktadır.