GENİŞ-AÇI YAKIN-ALAN TERS SENTETİK AÇIKLIKLI RADAR GÖRÜNTÜLEME TEKNİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE DENEYSEL UYGULAMALARI

ŞEVKET DEMİRCİ

MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MERSİN

HAZİRAN– 2013

GENİŞ-AÇI YAKIN-ALAN TERS SENTETİK AÇIKLIKLI RADAR GÖRÜNTÜLEME TEKNİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE DENEYSEL UYGULAMALARI

ŞEVKET DEMİRCİ

MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Danışman
Prof. Dr. Caner ÖZDEMİR

MERSİN

HAZİRAN– 2013

Şevket DEMİRCİ tarafından Prof. Dr. Caner ÖZDEMİR danışmanlığında hazırlanan "Geniş-Açı Yakın-Alan Ters Sentetik Açıklıklı Radar Görüntüleme Tekniklerinin Geliştirilmesi ve Deneysel Uygulamaları" başlıklı bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza

Prof. Dr. Caner ÖZDEMİR ……...

Prof. Dr. Hanlar REŞİDOĞLU ……...

Prof. Dr. Celal YILDIZ ……...

Doç. Dr. Ali AKDAĞLI ……...

Yrd. Doç. Dr. Evren DEĞİRMENCİ ……...

Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../.....tarih ve ...../……..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Mehmet KÜÇÜKASLAN
Enstitü Müdürü

Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

GENİŞ-AÇI YAKIN-ALAN TERS SENTETİK AÇIKLIKLI RADAR GÖRÜNTÜLEME TEKNİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE DENEYSEL UYGULAMALARI

Şevket DEMİRCİ

ÖZ

Birçok yer tabanlı Sentetik Açıklıklı Radar (SAR)/Ters Sentetik Açıklıklı Radar (TSAR) uygulamasında, yakın alandaki hedeflerin, geniş açısal açıklık verilerinden görüntülemelerinin elde edilmesi istenilir. Yakın-alan çalışma, ya uygulamanın niteliğinin gereğindendir, ya da sağladığı ucuz maliyet ve kolay gerçekleştirilebilme özelliklerinden dolayıdır. Geniş-açı da, yüksek çözünürlüklü görüntüleme ve hedeflerin farklı perspektiflerden gerisaçılım karakteristiklerinin elde edilmesi için gereklidir. Ne var ki, geniş-açı yakın-alan veri toplamı iki gerçekleştirme zorluğunu beraberinde getirmektedir. İlk olarak, bu tarz geometriler için görüntü tekrar-oluşturma algoritmaları, düzlemsel dalga varsayımının geçersiz olmasından dolayı daha karmaşık hale gelir. Bu tezde, bu problem, yakın-alan düzeltme faktörlerini içeren Geriye-İzdüşüm (Gİ) algoritmasının üç-boyutlu (3B) monostatik formülasyonunun çıkarımı ve kullanımı ile ele alınmıştır. Algoritma, yansımasız odada elde edilen iki-boyutlu (2B) ve 3B TSAR görüntülemeleriyle doğrulanmış ve diğer yakın-alan görüntüleme teknikleriyle de karşılaştırılmıştır. İkinci gerçekleştirme zorluğu, yüksek çözünürlüklü görüntüleme için büyük miktarlardaki açısal örnek ölçümlerinin gerekmesi ve bunun da hızlı görüntülemeyi engellemesi olgusundan kaynaklanır. Sıkıştırılmış Algılama (SA)'ya dayalı yeni bir 2B TSAR görüntüleme yaklaşımı önerilmiştir. Toplam veri kümesinin % 1.5 düşük oranına kadar yankı örneklerini kullanan yansımasız oda görüntüleme sonuçları, bu yaklaşımı doğrulamaktadır. Yakın-alan SAR/TSAR görüntülemenin üç farklı uygulaması çalışılmıştır. İlk olarak, uzak-alan Radar Kesit Alanı (RKA) kestirimi problemi, küçük-boyutlu karmaşık hedefler ve milimetre-dalga (MMD) bandı verisi için incelenmiştir. İkinci olarak, gizlenmiş nesne algılaması problemi, çeşitli hedef, gizleyici materyal ve radar parametreleri kombinasyonlarının, 2B MMD TSAR görüntüleme çalışmalarıyla deneyimlenmiştir. Son olarak, otomatik hedef tanıma uygulamasına yönelik, 2B geniş-alan dairesel-SAR'ın üstedüşüm ve diğer özellikleri karakterize edilmiştir. Yer tabanlı 270° açıklıklı bir dairesel-SAR sistem geliştirilmiş, gerçek vasıtaların 2B görüntülemeleri elde edilmiş ve istenmeyen yankı sinyallerinden de temizlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sentetik Açıklıklı Radar (SAR), Ters Sentetik Açıklıklı Radar (TSAR), Geniş-açı, Yakın-alan, Radar Görüntüleme

Danışman: Prof. Dr. Caner ÖZDEMİR, Mersin Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

DEVELOPMENT OF WIDE-ANGLE NEAR-FIELD INVERSE SYNTHETIC APERTURE RADAR IMAGING TECHNIQUES AND THEIR EXPERIMENTAL APPLICATIONS

Şevket DEMİRCİ

ABSTRACT

In most of the ground-based Synthetic Aperture Radar (SAR)/Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) applications, it is desired to obtain the imagery of near-field targets from their wide angular aperture data. Near-field operation is required either due to the inherent characteristic of the application or its cheap cost and easy implementation features. Wide-angle is also needed to obtain high resolution imagery and backscattering characteristics of targets from different perspectives. Unfortunately, wide-angle near-field data collection comes with two implementation difficulties. First, the image reconstruction algorithms for such geometries become more complex due to the invalidity of the plane-wave approximation. In this thesis, this problem is approached by deriving and utilizing a three-dimensional (3D) monostatic formulation of the Back-Projection (BP) algorithm that involves near-field correction factors. The algorithm is validated by means of two-dimensional (2D) and 3D ISAR imagery acquired in an anechoic chamber room and also compared with other near-field imaging techniques. The second implementation difficulty arises from the fact that a vast amount of angular sample measurements is required for high resolution imaging which in turn prohibits fast imaging. A novel Compressed Sensing (CS) based 2D ISAR imaging approach is proposed. The anechoic chamber imaging results that use as low as the 1.5 % echo samples of the whole data set validate this approach. Three different applications of wide-angle near-field SAR/ISAR imaging are studied. At first, the far-field Radar Cross Section (RCS) estimation problem is investigated for small-sized complex targets and for millimeter-wave (MMW) band data. Secondly, the concealed object detection problem is practiced through 2D MMW ISAR imaging studies of various combinations of target, covering material and radar parameters. Finally, oriented to the automatic target recognition application, the layover and other attributes of 2D wide-field circular-SAR imaging are characterized. A ground-based 270° aperture circular-SAR system is developed and the 2D images of real vehicles are obtained and also cleaned out from clutter signals.

Key Words: Synthetic Aperture Radar (SAR), Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR), Wide-angle, Near-field, Radar Imaging

Advisor: Prof. Dr. Caner ÖZDEMİR, Department of Electrical and Electronics Engineering, Mersin University

TEŞEKKÜR

Öncelikle ve en başta, benim bu günleri görmemi sağlayan ve bu çalışmayı yapmama imkân tanıyan Allah'a sonsuz hamd eder ve şükranlarımı sunarım. Daha sonra, beni yetiştiren, hayatı öğreten, sevgisini esirgemeyen babam ve anneme teşekkür ederim. Eşime bu süre içerisinde bana her zaman destek olduğu, sabır gösterdiği için çok teşekkür ederim. Bu tez çalışmasında bana en çok manevi güç veren, hayata olumlu bakmamı sağlayan canım oğluma teşekkür ediyorum.

Bu tezin hazırlanmasında emeği geçen tez danışmanım Prof. Dr. Caner ÖZDEMİR'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Bu tezin farklı aşamalarında katkılar sağlayan, arkadaşlarım Harun ÇETİNKAYA, Mustafa TEKBAŞ, Enes YİĞİT ve Betül YILMAZ'a desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

İÇERİK

ÖZ i

ABSTRACT ii

TEŞEKKÜR iii

ÇİZELGELER DİZİNİ vii

ŞEKİLLER DİZİNİ viii

1. GİRİŞ 1

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 5

2.1. RADAR GÖRÜNTÜLEME TEKNOLOJİSİ 5

2.2. DAİRESEL AÇIKLIKLI GÖRÜNTÜLEME SİSTEMLERİ 6

2.3. YAKIN-ALAN SAR/TSAR GÖRÜNTÜLEME ALGORİTMALARI 7

2.3.1. Odaklama Operatörüne Dayalı (OOD) Algoritma 8

2.3.2. Geriye-İzdüşüm (Gİ) Algoritması 8

2.3.3. Sıkıştırılmış Algılama (SA) Tabanlı Algoritma 9

2.4. YAKIN-ALAN SAR/TSAR GÖRÜNTÜLEME UYGULAMALARI 10

2.4.1. Yakın-Alan TSAR Görüntülerinden Radar Kesit Alanı Kestirimi 10

2.4.2. MMD Görüntüleme ile Gizlenmiş Nesnelerin Algılanması 11

2.4.3. Geniş-alanlı Dairesel-SAR Görüntüleme 13

3. MATERYAL VE METOT 16

3.1. KULLANILAN MATERYALLER 16

3.1.1. TÜBİTAK-MAM'ın Yansımasız Oda Ölçüm İmkânları 16

3.1.2. Mersin Üniversitesi Bünyesindeki Deneysel Altyapı Olanakları 18

3.1.3. Yazılımlar ve Yayınlar 19

3.2. KULLANILAN METOTLAR 20

3.2.1. SAR/TSAR Görüntülemenin Temelleri 20

3.2.2. Yakın-alan Monostatik SAR/TSAR Görüntüleme 38

3.2.3. Yakın-alan TSAR Görüntülemenin RKA Kestirimi Uygulamasında Kullanımı 58

4. BULGULAR VE TARTIŞMA 61

4.1. Gİ ALGORİTMASI İLE GENİŞ-AÇI VE YAKIN-ALAN GÖRÜNTÜLEME ANALİZLERİ 61

4.1.1. Uzak-alan Gİ ileYakın-alan Gİ Algoritmalarının Karşılaştırılması 62

4.1.2. Geniş-açı Veri Toplamının Çözünürlük Analizi 63

4.1.3. Açısal Örnekleme Aralığının Görüntülemeye Etkisi 69

4.1.4. Farklı Bakış Açılarının Görüntülemeye Etkisi 70

4.1.5. Veri İşlem Tekniklerinin Etkileri 72

4.2. Gİ VE OOD ALGORİTMALARININ KARŞILAŞTIRILMASI 73

4.2.1. İPY Fonksiyonları ve Hesaplama Zamanları 74

4.2.2. Çoklu Noktasal Saçıcılar İçin Görüntüleme Performansları 78

4.3. 2B YAKIN-ALAN TSAR GÖRÜNTÜLEMENİN DENEYSEL ANALİZLERİ 79

4.3.1. İki Köşegen Yansıtıcı Hedefi 80

4.3.2. Beş Metal Silindir Hedefi 81

4.3.3. F-16 Uçak Maketi Hedefi 82

4.4. 3B YAKIN-ALAN TSAR GÖRÜNTÜLEME 83

4.4.1. İki Noktasal Hedefin 3B TSAR Görüntüleme Benzetimi 83

4.4.2. İki Metal Çubuğun 3B TSAR ile Görüntülenmesi Deneyi 86

4.5. MİLİMETRE-DALGA GÖRÜNTÜLEME İLE GİZLENMİŞ HEDEF ALGILAMASI DENEYLERİ 88

4.5.1. Motivasyon 88

4.5.2. Yansımasız Oda Veri Örnekleri 89

4.6. YAKIN-ALAN TSAR GÖRÜNTÜLEME İLE RKA KESTİRİMİ 100

4.6.1. Küp Hedefleri için Sonuçlar 100

4.6.2. Tabanca Hedefi için Sonuçlar 102

4.6.3. F-16 Uçak Maketi Hedefi için Sonuçlar 104

4.7. SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA TABANLI TSAR GÖRÜNTÜLEME 106

4.7.1. Sıkıştırılmış Algılama ve Önemi 106

4.7.2. SA ile Yakın-alan TSAR Görüntüleme Sonuçları 107

4.8. GENİŞ-ALANLI DAİRESEL-SAR GÖRÜNTÜLEME 115

4.8.1. Benzetim Sonuçları 116

4.8.2. Ölçüm Sonuçları 119

4.8.3. CFAR Algılama Sonuçları 125

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 128

KAYNAKLAR 131

ÖZGEÇMİŞ VE ESERLER LİSTESİ 141

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. Geniş-açı veri toplamının teorik ve ölçülen çözünürlükleri.....66
Çizelge 4.2. Gİ ve OOD algoritmalarının hesaplama zamanları.....78
Çizelge 4.3. Küp hedeflerini gizlemekte kullanılan tekstiller ve özellikleri.....90
Çizelge 4.4. Küp deneylerinin ölçüm senaryoları. 90
Çizelge 4.5. Tabanca hedefi ölçümlerinin örtüleme konfigürasyonları.....98
Çizelge 4.6. Küp ve tabanca hedeflerinin SA ile görüntüleme parametreleri.....115
Çizelge 4.7. Benzetim ve deneysel dairesel-SAR ölçümlerinin parametreleri. 116

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. TÜBİTAK-MAM'daki yansımasız oda 17
Şekil 3.2. Yansımasız oda ölçümlerinde kullanılan cihazlar 18
Şekil 3.3. Dairesel-SAR deneylerinde kullanılan binaya ait fotoğraflar 19
Şekil 3.4. Dairesel-SAR deney sistemi 20
Şekil 3.5. Doğrusal hareketli SAR görüntüleme geometrisi 22
Şekil 3.6. Uzak-alan ışıma yaklaşımı.....23
Şekil 3.7. SAR ve TSAR'da geniş-açı veri toplama.....24
Şekil 3.8. Kısa darbe dalgaşekli ve örnekleme teknikleri. 28
Şekil 3.9. FMCW sinyali.....29
Şekil 3.10. Adım-frekanslı dalga şekli.....32
Şekil 3.11. 2B SAR veri toplamının uzamsal frekans koordinatlarında gösterimi 35
Şekil 3.12. 2B SAR veri toplamının kutupsal örnekleme şeması.....37
Şekil 3.13. 3B Monostatik SAR/TSAR veri toplama geometrisi. 41
Şekil 3.14. 2B için izdüşüm-kesiti teoreminin izahı. 46
Şekil 3.15. Dairesel tarama için 2B monostatik görüntüleme geometrisi.....50
Şekil 3.16. Monostatik dairesel-SAR görüntüleme için veri toplama geometrisi. 54
Şekil 4.1. Uzak ve yakın-alan görüntüleme algoritmalarının karşılaştırılması 63
Şekil 4.2. Geniş-açı ($\Delta\theta = 90°$) veri toplamanın İPY ve -4 dB kontur grafikleri ...65
Şekil 4.3. Dar-açı ($\Delta\theta = 6°$) veri toplamanın İPY ve -4 dB kontur grafikleri.....67
Şekil 4.4. Farklı geniş-açısal açıklıkların görüntü çözünürlüğüne etkileri 68
Şekil 4.5. Açısal örnekleme adımının monostatik TSAR görüntülemeye etkisi.....70
Şekil 4.6. Farkı bakış açılarından görüntüleme benzetiminin hedefi 71
Şekil 4.7. Farkı bakış açılarından görüntüleme benzetiminin sonuçları.....72
Şekil 4.8. TSAR frekans verisine pencereleme işleminin etkileri.....73
Şekil 4.9. Gİ ve OOD'nin ilk veri toplama durumu için karşılaştırılması.....75
Şekil 4.10. Gİ ve OOD'nin ikinci veri toplama durumu için karşılaştırılması 77
Şekil 4.11. Gİ ve OOD'nin çoklu noktasal hedef durumu için karşılaştırılması.....79
Şekil 4.12. İki köşegen yansıtıcı hedefinin TSAR görüntülenmesi.....81
Şekil 4.13. Beş metal silindir hedefinin TSAR ile görüntülenmesi.....82
Şekil 4.14. F-16 uçak maketi hedefinin TSAR ile görüntülenmesi.....83
Şekil 4.15. Silindirik tarama geeometrili TSAR ölçüm düzeneği. 84
Şekil 4.16. İki noktasal hedefin, 3B TSAR görüntüleme benzetimi 85
Şekil 4.17. İki metal çubuğun, 3B TSAR görüntüleme deneyi.....87
Şekil 4.18. Küp hedeflerinin MMD ile görüntülenmesi deneyinden fotoğraflar.....91
Şekil 4.19. 2 cm^3 metal küpün farklı örtü durumları için MMD radar görüntüleri....94
Şekil 4.20. 1 cm^3 metal küpün farklı örtü durumları için MMD radar görüntüleri....95
Şekil 4.21. 1 cm^3 teflon küpün farklı örtü durumları için MMD radar görüntüleri....96
Şekil 4.22. Tabanca hedefinin MMD ile görüntülenmesi deneyinden fotoğraflar.....97
Şekil 4.23. Tabanca hedefinin farklı gizleme durumları için MMD görüntüleri 99
Şekil 4.24. Küp hedeflerinin RKA kestirimi ile ilgili şekiller 101
Şekil 4.25. Küp hedeflerinin, gerçek RKA (FEKO) ve ölçülen RKA grafikleri 102
Şekil 4.26. Tabanca hedefinin RKA kestirimi 103
Şekil 4.27. F-16 uçak maketi hedefinin RKA kestirimi.....105
Şekil 4.28. Beş noktasal saçıcı hedefinin SA-tabanlı TSAR ile görüntülenmesi.....108
Şekil 4.29. Benzetim hedeflerinin SA-tabanlı TSAR ile görüntülenmesi 110

Şekil 4.30. Deneysel hedef sahnelerinin SA-tabanlı TSAR ile görüntülenmesi.....112
Şekil 4.31. Küp ve tabanca hedeflerinin SA-tabanlı TSAR ile görüntülenmesi.....114
Şekil 4.32. Görüntüleme düzlemi z_f'nin farklı değerleri için İPY görüntüleri.....118
Şekil 4.33. Çoklu noktasal saçıcıların dairesel-SAR ile görüntülenmesi 119
Şekil 4.34. Yer tabanlı dairesel-SAR görüntülemenin deneysel geometrisi.....120
Şekil 4.35. Dairesel-SAR ile araba görüntüleme deneyinin görüntüleri 122
Şekil 4.36. Dairesel-SAR ile iş makinası görüntüleme deneyinin görüntüleri 124
Şekil 4.37. İstenmeyen yankı tanımlaması ve giderilmesi.....126
Şekil 4.38. Dairesel-SAR görüntülerine CFAR algılayıcı uygulama sonuçları.....127

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

Sayfa

λ : Dalgaboyu 23

D : Hedefin derinlikteki uzunuluğu 23

R_0 : Hedef merkezine olan uzaklık 23

W : Hedefin genişlikteki uzunluğu 23

B : Dalgaşeklinin bantgenişliği 24

f_c : Merkez frekans 24

$\Delta\theta$: Azimut açısı kapsamı 24

δx : $x-$yönündeki çözünürlük 25

d : Anten açıklığı 26

c : Işık hızı 26

δy : $y-$yönündeki çözünürlük 26

θ_B : Anten yarı-güç ışıngenişliği 26

L : Sentetik açıklık uzunluğu 27

λ_c : Merkez dalgaboyu 27

f_0 : Taşıyıcı frekansı 29

r : Menzil 29

$s_t(t)$: İletilen sinyal 29

$s_r(t)$: Alınan sinyal 29

a : Cıvıltı oranı 29

t_d : Zaman gecikmesi 30

f_b : Vuru frekansı 30

$s_{IF}(t)$: Vuru (IF) sinyali 30

τ : Darbenin zaman genişliği 31

τ_s : Altdarbe süresi 31

f_n : n'inci altdarbe frekansı 31

N : Frekans örneklerinin veya adım frekanslı sinyalin altdarbe sayısı ..31

f : Frekans 33

θ : Azimut açısı 33

ϕ : Elevasyon açısı 33

A_m : m'inci saçıcının gerisaçılım genliği 33
$E_m(f)$: m'inci saçıcının frekans cevabı 33
$E_m(f,\theta,\phi)$: m'inci saçıcıya ait saçılan alan 33
$E(f,\theta,\phi)$: Toplam saçılan alan 33
T_m : m'inci saçıcıya ait zaman gecikmesi 33
R_m : m'inci saçıcının menzili 33
k_r : Radyal uzamsal frekans 33
M : Noktasal saçıcıların sayısı 33
$E_{\theta,\phi}(k_r)$: $e_{\theta,\phi}(r)$'nin FD'ü 34
$e_{\theta,\phi}(r)$: (θ,ϕ) oryantayon açısındaki menzil profili 34
$g(x,y,z)$: Sahnenin 3B yansıtırlık fonksiyonu 34
$g_p(x,y)$: Sahnenin 2B yansıtırlık fonksiyonu 34
$\Lambda(k_r,\theta)$: $\phi = 0$ için tanımlanan $E(k_r,\theta,\phi)$ 34
k_x : k_x −yönündeki uzamsal frekans 35
k_y : k_y −yönündeki uzamsal frekans 35
$G_p(k_x,k_y)$: 2B yansıtırlık fonksiyonunun FD'ü 36
Δx : x −yönündeki maksimum görüntü boyutu 37
δk_r : Menzil yönündeki uzamsal frekans örnekleme aralığı 37
δk_x : k_x −yönündeki örnekleme aralığı 37
δk_y : k_y −yönündeki örnekleme aralığı 37
Δy : y −yönündeki maksimum görüntü boyutu 37
$f_{\max}$: İletilen maksimum frekans 38
δf : Frekans örnekleme aralığı 38
$\lambda_{\min}$: İletilen minimum dalgaboyu 38
E_S^{tar} : Hedef gerisaçılım verisi 39
E_S^{cal} : Kalibrasyon nesnesinin gerisaçılım verisi 39
$E_S^{cal,exact}$: Kalibrasyon nesnesinin analitik saçılım çözümünün verisi 40
E_S^{bkg} : Hedef ölçümlerinde kullanılan arkaplanın gerisaçılım verisi 40
E_S^{cbkg} : Kalibrasyon nesnesi ölçümünün arkaplanın geri-saçılım verisi 40
$\hat{g}(x,y,z)$: $g(x,y,z)$'nin tahmini 41
$G(k_x,k_y,k_z)$: 3B yansıtırlık fonksiyonunun FD'ü 42

θ_m : Anten platformunun azimut açısı 42
ϕ_m : Anten platformunun elevasyon açısı 42
k_z : k_z −yönündeki uzamsal frekans 43
r_m : Orijin referanslı menzil 43
R_m : Antenden hedef saçıcılarına olan menzil 43
$\overline{\boldsymbol{r}}$: Hedef saçıcıların vektörel konumları 44
$\overline{\boldsymbol{V}}$: Hedefin EM ile aydınlatılan hacimi 44
$\boldsymbol{d\overline{r}}$: Diferansiyel saçılım hacimi 44
$g(\rho, \varphi, z)$: Silindirik koordinattaki 3B yansıtırlık fonksiyonu 45
ξ : Odaklama operatörü 45
$Q_{\theta_m,\emptyset_m}(k_r)$: $q_{\theta_m,\emptyset_m}(r)$'nin FD'ü 47
$q_{\theta_m,\emptyset_m}(r)$: $(\theta_m, \emptyset_m)$ yönündeki filtrelenmiş menzil profili 47
J : Ölçüm vektörünün boyutu 49
S : Sinyalin seyreklik seviyesi 49
α : g'nin katsayı dizisi 49
$\tilde{\alpha}$: α'nın tahmini 49
$\boldsymbol{\Phi}$: Ölçüm matrisi 49
$\boldsymbol{\Psi}$: Taban vektörlerinin matrisi 49
$\boldsymbol{\Theta}$: Son ölçüm matrisi 49
R_p : Anten konumundan p'inci saçıcıya olan menzil 50
x_p : p'nci saçıcının x −koordinatı 50
y_p : p'nci saçıcının y −koordinatı 50
R : 2B görüntüleme için antenden hedef saçıcılarına olan menzil 51
n : Toplanır gürültü 52
R_g : Dairesel taramanın yarıçapı 54
z_m : Anten platformunun yüksekliği 54
R_{max} : Belirsiz olmayan maksimum menzil mesafesi 55
$\delta\theta_m$: Azimut açısı örnekleme aralığı 56
Δk_{θ_m} : Azimuttaki spektral kapsam 56
$f_{\min}$: İletilen minimum frekans 56
k_{θ_m} : Anlık açısal uzamsal frekans 56

δz_m : z −yönündeki örnekleme aralığı 57
$\emptyset_z$: Antenin elevasyondaki −3 dB ışıngenişliği 57
Δk_{z_m} : Elevasyondaki uzamsal frekans kapsamı 57
$\rho_{\max}$: Hedef dairesinin yarıçapı 57
σ_{kal} : Kalibrasyon nesnesinin RKA'sı 59
$\psi(x,y)$: Hedef ve kalibrasyon yansıtırlıklarının oran fonksiyonu 59
C : Kalibrasyon nesnesinin yansıtırlığı 59
E^{FF} : Uzak-alan saçılım verisi 60
SAR : Sentetik Açıklıklı Radar 1
TSAR : Ters Sentetik Açıklıklı Radar 1
RKA : Radar Kesit Alanı 1
YNR : Yere Nüfuz Eden Radar 2
DAR : Duvar Arkası Radarı 2
3B : Üç Boyutlu 2
Gİ : Geriye-İzdüşüm 2
OOD : Odaklama Operatörüne Dayalı 2
SA : Sıkıştırılmış Algılama 3
MMD : Milimetre Dalga 3
2B : İki Boyutlu 3
OHT : Otomatik Hedef Tanıma 4
CFAR : Sabit yanlış alarm oranı 4
EM : Elektromanyetik 7
FD : Fourier Dönüşümü 8
VNA : Vektör Network Analizörü 11
SFCW : Adım Frekanslı Sürekli Dalga 16
1B : Bir Boyutlu 17
CW : Sürekli Dalga 20
TX : İletim 24
RX : Alım 24
A/D : Analogdan Dijitale 27
FMCW : Frekans Modüleli Sürekli Dalga 28
PRF : Darbe tekrarlama frekansı 29

PRI : Darbe tekrarlama periyodu 29
SNR : Sinyal-Gürültü Oranı 30
TFD : Ters Fourier Dönüşümü 30
SF : Adım Frekanslı 30
IF : Vuru Frekansı 30
FFT : Hızlı Fourier Dönüşümü 45
LOS : Nişan Çizgisi 54
İPY : İmpals Yanıtı.....58
ÇHH : Çözünürlük Hücre Hacimi 58
ÇHA : Çözünürlük Hücre Alanı 58

1. GİRİŞ

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR), sinyal işleme teknikleri kullanarak yüksek kaliteli görüntüler üretebilen, aktif mikrodalga frekansı görüntüleme tekniğidir. Temel prensip olarak SAR sistemlerinde, bir radar birimi, görüntülenmesi istenen sahneyi veya hedefi, belirli bir bakış açısından ve farklı frekanslardaki elektromanyetik dalgalar ile aydınlatır. Geri yansıyan sinyaller toplanır ve hedef alanının yansıtırlığı hakkında bilgi çıkarılır. Daha sonra, hedefin değişik bakış açılarındaki sıralı gözlemleri toplanarak ve işlenerek, hedef alanının yansıtırlık tahmininin bilgisini veren radar görüntülerine dönüştürülür.

Klasik SAR görüntülemede, hedeflerin genellikle antenin uzak alanında olduğu durumundaki ve dar açısal bakıştaki verileri elde edilir. Bu işlem, SAR'da dar iletim ışınları göndererek, Ters Sentetik Açıklıklı Radar (TSAR)'da da hedefin antene ekseriyetle birkaç derecelik bakış açısı genişliği sağlayabilen hareketi ile sağlanır. Dar açı kullanımı, veri toplama ve işlemede büyük kolaylıklar sağladığı için tercih edilmektedir. Bununla birlikte, SAR/TSAR görüntü çözünürlüklerinin taranan frekans ve uzamsal bantgenişliğine bağımlılığından dolayı, bu tip dar-açı sistemleri ile büyük boyuttaki hedeflerin yüksek çözünürlüklü görüntülerini elde etmek mümkün olamamaktadır. Diğer yandan, son yıllardaki birçok popüler radar uygulamasında, hedeflerin antenin yakın alanında olduğu ve geniş açısal açıklık kullanılarak veri toplandığı durumdaki görüntüleri istenmektedir. Kısa mesafe ölçüm gereksinimi, ya uygulamanın niteliğinin gereğindendir, ya da sağladığı ucuz maliyet ve kolay gerçekleştirilebilme özelliklerinden dolayıdır. Geniş-açı kullanımı ise, yüksek çapraz-menzil çözünürlüklü görüntüleme, hedeflerin daha geniş perspektiflerde görüntülerini sağlama, gölgelenme etkilerinin azaltılması, hedeflerin anizotropik gerisaçılım karakteristiklerinin bilgisini sunma vs. gibi önemli avantajlara sahip olmasından dolayı tercih edilmektedir. Genellikle yer tabanlı olan bu geniş-açı yakın-alan SAR/TSAR görüntüleme uygulamalarının bazıları şunlardır; Radar Kesit Alanı (RKA) kestirimi, gizlenmiş nesne algılanması, betonarme yapıların bozulmalarının ve malzeme kusurlarının tahribatsız muayene ile testi, biyomedikal alanında kanserli hücrelerin mikrodalga ile görüntülenmesi, yere nüfuz-

eden radar (YNR) ile toprak altının görüntülenmesi, duvar-arkası radar (DAR) ile opak nesneler arkasının görüntülenmesi, vs.

Sözkonusu kısa mesafe radar görüntüleme uygulamalarında, temel olarak yakın-alan ve geniş-açı veri toplamından kaynaklanan bir takım veri toplama ve görüntüleme zorlukları ile karşılaşılır. Bu zorluklara örnek olarak; odaklı görüntü oluşturma, özellikle üç-boyutlu (3B) görüntülemelerde karşılaşılan çok fazla açısal örnek gereksiniminin hızlı görüntülemeyi engellemesi, geniş-açı ve özellikle tam-açıklık (diğer bir ifade ile 360°) görüntüleme sistemleri için görüntü çözünürlüklerinin ve Nyquist örnekleme gereksinimlerinin analitik çıkarımlarının karmaşıklığı vs. gösterilebilir. Bunlara ek olarak, her bir uygulamada, başarılı hedef karakterizasyonu ve tanıma amaçları için, uygulamaya özgü olarak, görüntüleme sonrası işlem tekniklerine ve bu tekniklerin hem benzetim hem de deneysel veriler üzerinde doğrulanmalarına gereksinim duyulur. Tez çalışmasında, bu problemlerin bazılarının çözümüne yönelik yapılan katkılar aşağıdaki paragraflarda anlatılmıştır.

Kısa mesafe SAR/TSAR'daki en önemli problemlerden biri, odaklı görüntü oluşturmadır. Klasik SAR/TSAR sistemlerinde yapılan düzlemsel dalga yaklaşımı, yakın-alan ve/veya geni-açı durumunda geçersiz olur ve odaksız görüntülemeye yol açar. Literatürde, bu yaklaşımı içermeyen ve dalgaönü eğikliğini tamamen kompanze eden farklı yakın-alan algoritmaları bulunmaktadır. Bu algoritmalardan, Geriye-İzdüşüm (Gİ) algoritmasının formülasyonu üzerinde çalışılmış, algoritmanın, gerisaçılım verilerinin kalibrasyonu, yakın-alan genlik terimleri gibi faktörleri de içeren genel bir formülasyonu geliştirilmiştir. Radar görüntülemede önemli olan bir konu, farklı görüntüleme tekniklerinin performanslarının hız, doğru odaklama gibi ölçütler ile karşılaştırılmalarının yapılmasıdır. Genellikle yakın-alan küresel tarama TSAR geometrileri için uygulanan ve Odaklama Operatörüne Dayalı (OOD) olarak adlandırılabilecek yaklaşım içermeyen bir algoritma referans amaçlı olarak çalışılmıştır. İyileştirilmiş Gİ algortiması ile OOD algoritmasının kapsamlı karşılaştırmaları ve doğruluk testleri, TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi (MAM)'nin yansımasız odasının TSAR verileri kullanılarak yapılmıştır.

Yukarıda bahsedilen, yer tabanlı SAR/TSAR sistemlerinin birçoğunda 360°'ye kadar varan geniş açısal tarama ve/veya 3B görüntüleme talep edilir. Bu durumda, karşılaşılan veri boyutu çok yüksek olur ve bu da çoğu zaman kritik önemli

koşul olan, hızlı görüntülemenin engellenmesine yol açar. Son yıllarda geliştirilen Sıkıştırılmış Algılama (SA) yaklaşımı ise, kanonik kuralları yıkarak, örnekleme oranının, asıl bilgiyi kaybedilmeden düşürülebileceğini söylemektedir. SA tekniğinin SAR, YNR ve DAR görüntülemedeki değerinin belirlenmesine yönelik artan bir eğilim vardır. SA tekniğinin yer tabanlı TSAR görüntülemedeki kullanımı, bilgimiz dahilinde, ilk defa bu çalışma ile ele alınmıştır. Bu doğrultuda, SA-tabanlı TSAR görüntüleme tekniğinin formülasyonu geliştirilmiş, daha sonra tekniğin performansı, hem benzetim hem de deneysel veriler üzerinde doğrulanmıştır.

Hedeflerin yakın-alan ölçümlerinden RKA kestirimi probleminde, yansımasız oda boyutlarındaki ve donanım maliyetindeki kısıtlamalardan dolayı, ölçeklendirilmiş hedef modellerinin kullanılması yaygın bir yaklaşımdır. Gerçek uygulamalardaki X-bant operasyonu dikkate alındığında, ölçeklendirilmiş hedefler için, yüksek frekanslara çıkma gereksinimi aşikârdır. Bunun yanında, frekans yükseldikçe sistem karmaşıklığı ve maliyeti, ölçüm zorlukları, sinyal işlemedeki zorluklar vs. artar. Tez çalışmasında, bu yakın-alan milimetre-dalga (MMD) ölçümleri ile RKA kestirimi problemi, basit ve karmaşık küçük boyutlu nesnelerin kalibreli gerisaçılım verileri elde edilerek çalışılmıştır. Yakın-alan TSAR verilerinden, hedeflerin uzak-alan RKA'larını kestirmek için kullanılan tekniklere benzer karma bir yöntem geliştirilmiş, farklı hedeflerin, MMD bandı için teorik ve deneysel RKA analizleri yapılmıştır.

Yakın-alan SAR/TSAR görüntülemenin son yıllardaki oldukça popüler uygulamalarından biri, insan üzerinde gizlenen tehdit nesnelerinin, MMD görüntüleme ile algılanmasıdır. Pratikte bu uygulama, insanların havaalanı gibi güvenlik noktalarında bir kabin içerisine girerek, tüm vücutlarının 3B radar görüntülenmesi ile çalışır. Karşılaşılan temel problemlerden biri, tehdit objelerinin ve gizleyici tekstil malzemelerinin farklı yapı ve biçimde olmalarının, başarılı görüntülemeyi engelleyen etkenlere sahip olmasıdır. Bu problem, dairesel açıklıklı sistemler için farklı hedef, gizleyici giysi materyali, radar parametreleri ve görüntü oluşturma teknikleri açısından ele alınmıştır. Hedef algılamasını olumsuz yönde etkileyen faktörler, kapsamlı deneysel iki-boyutlu (2B) TSAR görüntüleme çalışmaları ile analiz edilmiştir.

Dairesel-SAR görüntüleme tekniğinin Otomatik Hedef Tanıma (OHT) alanındaki pratik uygulamasında, hava aracına monte edilen radar platformu, belirli bir yükseklikteki dairesel uçuş ile sahne yankısını toplar. Böyle bir sistemin pahalı ve karmaşık olmasından dolayı, dairesel-SAR verileri, genellikle askeri kuruluşlar tarafından ve kısıtlı olarak sağlanmaktadır. Dairesel-SAR tekniği alternatif olarak, tam ölçekli hedeflerin büyük çaplı bir döner-tabla üzerinde döndürüldüğü ve elevasyon (yani dik) yönünde doğrusal hareket edebilen bir anten ile gerisaçılımlarının toplandığı, yer tabanlı TSAR sistemler ile de gerçekleştirilebilmektedir. Lakin bu düzeneklerinin kurulumu da, pahalı donanımlar gerektirmektedir. Tez çalışmasında, alternatif bir sistem geliştirilerek, 270° yay yapısına sahip bir bina yardımıyla, araba ve iş makinası gibi çeşitli araçların geniş-alan (hedef boyutları ile tarama yarıçapının kıyaslanabilir olduğu alan) dairesel-SAR görüntülemele çalışmaları yapılmıştır. 2B dairesel-SAR görüntülemenin üstedüşüm (layover) gibi çeşitli karakteristikleri benzetim ve elde edilen deneysel ölçüm görüntüleri üzerinden analiz edilmiştir. Hedef sinyallerinin istenmeyen yankılardan (clutter) ayrıştırmak için deneysel görüntülere uygulanan, adaptif bir sabit-yanlış-alarm-oranı (CFAR) algılayıcısının performansı da bu kapsamda değerlendirilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. RADAR GÖRÜNTÜLEME TEKNOLOJİSİ

Radar, ilk olarak yankı analizi ile nesneleri algılamak, konumlarını ve hızlarını belirlemek amacıyla geliştirilmiş olan bir teknolojidir. Ancak, radar sistemleri 70 yılı aşan bir süre içinde hızla gelişerek, birçok karmaşık işlevleri de gerçekleştiren sistemler haline gelmişlerdir. Radar teknolojisinin günümüz dünyası için ne kadar önemli olduğu hakkında fikir sahibi olmak için, aşağıda verilen tipik radar uygulamaları göz önüne alınabilir:

- Gözetim: askeri ve sivil hava trafiği kontrolü
- Arama ve izleme: askeri hedefleri arama ve izleme
- Navigasyon: uydu, hava, denizcilik
- Otomotiv: çarpışma uyarma, adaptif hız kontrolü, çarpışma önleme
- Seviye ölçümleri: sıvıları, mesafeleri vs. görüntüleme
- Yükseklikölçer: askeri ve sivil amaçlar için uçak ve uzay araçları altimetreleri
- Hava: iklim haritalandırma, fırtınadan kaçınma
- Uzay: yeryüzü haritalandırma, yeryüzünün askeri amaçlar için gözetlenmesi, uzay ortamının keşfi
- Güvenlik: gizlenmiş silah algılanması, yeryüzünün askeri amaçlar için gözetlenmesi

Bu işlevlerin birçoğunda, görüntüleme radarları kullanılmaktadır. Görüntüleme için elektromanyetik spektrumun büyük kısmı (günümüzde genellikle 300 MHz ve 300 GHz arası mikrodalga bandı), test nesnesi hakkında farklı frekanslar için farklı bilgiler sağlayacak şekilde kullanılabilir. Radar teknolojisi ile ilgili genel bilgiler için [1, 2, 3] kaynaklarına, özel olarak görüntüleme radarı ile ilgili bilgiler edinmek için [4, 5] kaynaklarına başvurulabilinir.

Radar ile görüntüleme yapmanın diğer elektro-optik, termal vs. görüntüleme sistemlerine üstünlükleri arasında; gece-gündüz çalışabilme, bulut örtüsü, sis, duman gibi atmosferik engeller ile bitki ve yer altı gibi birçok opak engeller arkası hedeflerini görüntüleyebilme, cisimlerin yükseklik bilgilerini verebilme sayılabilir. Diğer yandan, radar tabanlı görüntüleme teknolojisinde karşılaşılan genel zorluklar

ise şunlardır: (i) mikrodalga enerjisinin yüksek güçlerde gönderilmesi, (ii) mikrodalga enerjisinin belirli bir duyarlılık seviyesinin üzerinde algılanmasının gerekliliği ve (iii) alınan sinyallerden gerekli bilginin sinyal işleme teknikleri kullanılarak çıkarılması ve yorumlanması. İlk iki problem, uygun donanımların geliştirilmesi ile ilgili olup, mevcut teknolojik imkânlar ile büyük oranda çözülebilecek durumdadır. Yine de daha hafif ve daha küçük donanımlar geliştirmek için çalışmalar devam etmektedir. Üçüncü problem ise temel olarak bir takım matematiksel zorlukları içeren ve şu anki birçok araştırmanın temel konusunu teşkil eden odaklı ve yüksek çözünürlüklü görüntü oluşturma problemidir.

İlk görüntüleme radarları, platform hareketine dik yön olan, menzil yönündeki çözünürlük için zaman düzlemini, çapraz-menzil (azimut, yanca) yönündeki çözünürlük için de ışıngenişliğini kullanan yanal-bakışlı, dar-ışınlı sistemlerdir. Bu sistemlerde, ışının antenden uzaklaşmasıyla, çapraz-menzil çözünürlüğünün, artan mesafe ile kötüleşeceği aşikârdır. Bunlar gerçek açıklı radarlar olarak bilinirler. Diğer yandan, 1950'li yıllardan itibaren geliştirilen, SAR [6, 7] sinyal işleme tekniği ile, yüksek çözünürlüklü görüntülerin oluşturulması mümkün kılınmıştır. SAR sinyal işleme teknikleri kullanarak yüksek kaliteli görüntüler üretebilen, aktif mikrodalga frekansı görüntüleme tekniğidir [8, 9, 10, 11, 12]. SAR aslında, içerisinde TSAR [13, 14], dairesel-SAR [5], interferometrik SAR [15], spot-ışığı SAR [16, 17], şerit-harita SAR [5], vs. gibi birçok özel uygulamala modlarını barındıran şemsiye terimdir. Örnek olarak TSAR terimi, veri toplama geometrisinde hedefin hareketli, anten platformunun ise sabit tutulduğu SAR sistemlerini ifade etmek için kullanılır.

2.2. DAİRESEL AÇIKLIKLI GÖRÜNTÜLEME SİSTEMLERİ

Bu tezde, hedeflerin azimut açısı yönünde 360° bantgenişliğine kadar hedef yankılarının toplanabildiği ve genel olarak dairesel-SAR veya döner tabla tabanlı TSAR olarak adlandırılan sistemler üzerinde çalışılmıştır. Bu tip dairesel açıklıklı veri toplama, TSAR'da hedeflerin bir döner tabla yardımıyla döndürülmesi ile, SAR'da ise antenin hedef etrafındaki dairel bir güzergah boyunca hareket ettirilmesi ile gerçekleştirilir. Bu sistemler, eğer dik yöndeki elevasyon açısı, anten veya hedefin

doğrusal hareketi ile değiştiriliyorsa silindirik, dairesel hareketi ile değiştiriliyor ise küresel taramalı SAR/TSAR sistemleri olarak adlandırılırlar. Görüntüleme tekniği açısından SAR ve TSAR sistemleri eşdeğer olup, önemli olan radar ve hedef arasındaki açısal ilişkinin nasıl değiştiğidir. Literatürde, bu tip dairesel açıklıklı SAR/TSAR geometrileri için geliştirilen yakın-alan radar görüntü oluşturma algoritmaları ve bu tekniklerin performans analizleri üzerine yapılan çalışmalar aşağıdaki bölümde anlatılmıştır. Bu tarama tekniklerinin kullanıldığı ve tez çalışmasının deneysel uygulamaları çerçevesinde ele alınan, önemli kısa mesafe mikrodalga görüntüleme uygulamalarında, şimdiye kadar yapılan çalışmalar ve elde edilen bulgular da takip eden başlıklarda sunulmuştur.

2.3. YAKIN-ALAN SAR/TSAR GÖRÜNTÜLEME ALGORİTMALARI

Genel olarak SAR/TSAR görüntüleme algoritmaları, oldukça karmaşık bir yapıda olan fiziksel radar gerisaçılım olgusu ve veri toplama senaryosu üzerinde bazı basitleştirici yaklaşımlar yaparak görüntüleme işlemini gerçekleştirirler. Bu yaklaşımlara örnek olarak, bütün algoritmaların görüntüleme problemini doğrusallaştırmak için varsaydığı Born yaklaşımıdır [18]. Fakat bu yaklaşım bile, çoklu-saçılım, gölgelenme ve saçılan dalgaların polarizasyon değişimleri gibi birçok fiziksel etkileri içermez. Bu temel yaklaşıma ek olarak, klasik SAR'da olduğu gibi uzak-alan ve dar-açı varsayımlarını yapmak görüntüleme algoritmasında büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu yaklaşımın geçersiz olduğu durumlarda, algoritmaların, görüntü kalitesinin ve çözünürlüğünün azalmasını önlemek için, elektromanyetik (EM) dalgaönünün eğikliğinden kaynaklanan ve radar camiasında menzil göçü olarak bilinen etkileri göz önüne alması gerekmektedir. Bu da, görüntüleme algoritmasının radar ve hedef saçıcıları arasında sentetik açıklık boyunca değişen geometrik bağıntıyı ne kadar iyi modellediği ile ilişkilidir. Bu sebeple, menzil göçü etkilerini belirleyerek ve gidererek, bu etkilerden bağımsız odaklı görüntüler oluşturma görevi, yakın-alan görüntülemeyi karmaşık ve zor bir işleme dönüştürmektedir. Dolayısıyla, literatürdeki bazı çalışmalar, temel olarak başarılı yakın-alan SAR/TSAR görüntüleme tekniklerinin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

2.3.1. Odaklama Operatörüne Dayalı (OOD) Algoritma

Klasik Fourier tabanlı TSAR görüntüleme algoritmalarındaki (mesela, Kutupsal (polar) Formatı veya Menzil-Doppler) Fourier Dönüşümü (FD)'nü, dairesel konvolüsyon integrali olarak yorumlamaya dayalı ve interpolasyon gerektirmeyen ilk TSAR görüntüleme algoritması [19]'da önerilmiştir. [20]'de bu prensip, 2B yakın-alan TSAR geometrisi için kullanılarak, Odaklama Operatörüne Dayalı (OOD) algoritma olarak adlandırılabilecek, bir küresel TSAR görüntüleme tekniği çıkarılmıştır. Algoritma kısaca, alınan dalga genliğindeki ve fazındaki değişimleri restore eden bir odaklama operatörünün uygulanmasına ve her bir frekans ve azimut açı taraması için bu işlem sonucunu, görüntü düzleminde eşzamanlı toplayarak görüntü oluşturulması prensibine dayanmaktadır. Bu tekniğin en önemli dezavantajı, klasik FD tabanlı düzlemsel dalga TSAR'a göre çok daha fazla hesaplama yükü getirmesidir.[21, 22]'de bu tekniğin 3B küresel TSAR geometrisi için formülasyonu geliştirilmiş, benzetim ve yansımasız oda verilerinin görüntüleme sonuçları sunulmuştur. [23]'de aynı görüntüleme yaklaşımı, algoritmaya küçük modifikasyonlar yapılarak doğrusal SAR ölçümleri için uyarlanmıştır. [24, 25]'de teknikten, hedeflerin yakın-alan 2B ve 3B TSAR görüntülemeleri ile uzak-alan RKA kestirimlerinin yapılabilmesi amacı doğrultusunda faydalanılmıştır.

OOD algoritması, pratik uygulamalarda kullanılacak asıl görüntüleme algoritmalarının doğruluk testlerinde referans amaçlı olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, algoritma çok fazla hesaplama yükü getirdiği için, gerçekleştiriminde bazı hızlandırıcı işlemlere ihtiyaç vardır. Bu sebeple, tez çalışmasında, OOD tekniğinin etkin ve göreceli olarak hızlı gerçekleştirimi üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

2.3.2. Geriye-İzdüşüm (Gİ) Algoritması

Geriye-izdüşüm (Gİ) algoritması, SAR görüntüleme metotları arasında, dairesel açıklık verilerine uygulanabilen, belki de bu iş için en çok tercih edilen algoritmadır. Tekniğin orijinal formülasyonu [26] düzlemsel dalga yaklaşımı altında geliştirilmiş olsa da, sonraki formulasyonlar [27, 28, 29] dalgaönü eğikliğini tamamen kompanze edecek şekilde tasarlanmıştır. Gİ algoritmasının önemli

avantajları arasında, rasgele ve düzgün örneklenmemiş, her türlü tarama geoemetrilere uygulanabilir olması, paralel işlem ve buna bağlı hızlı görüntüleme yapabilme yeteneğine sahip olması vs. sayılabilir. Gİ tekniği ayrıca, görüntü oluşturma probleminin fiziksel olgusu hakkında bilgi sağlayabilmektedir. Bu önemli özelliklerinin yanında, başarılı bir görüntüleme için tekniğe çeşitli iyileştirmelerin yapılması gerekmektedir. Örnek olarak, gerisaçılım verilerinin kalibrasyonu, yakın-alan genlik terimleri, anten ışıngenişliği gibi faktörleri de içeren genel bir formülasyona ihtiyaç vardır. Tez çalışmasında, Gİ algoritması temel görüntüleme algoritması olarak seçilmiş, etkin formülasyonu ve gerçekleştirimi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

2.3.3. Sıkıştırılmış Algılama (SA) Tabanlı Algoritma

Birçok yer tabanlı SAR/TSAR görüntüleme uygulamasında, yüksek çözünürlüklü ve yaklaşık gerçek-zamanlı görüntüleme yapılması talep edilir. Bunun yanında, yüksek çözünürlük için veri toplamada yüksek bantgenişliğinin sağlanması ve dolayısıyla çok fazla örnek alınması gerekmektedir. Çoğunlukla talep edilen 3B görüntüleme isteği de dikkate alınırsa, bu durumlarda karşılaşılan veri boyutu çok büyük olmaktadır. Bu da, uygulamaların, özellikle hızlı görüntüleme konusunda, ciddi problemlere maruz kalmasına yol açmaktadır. Öte yandan, çok yakın zamanda ortaya çıkarılan ve halen gelişme sürecinde olan Sıkıştırılmış Algılama (SA) yaklaşımı sayesinde, seyrek (sparse) veya sıkıştırılabilir sinyallerin, çok küçük bir kümeli doğrusal ölçüm verilerinden tekrar oluşturulabilmesi mümkün olabilmektedir. SA yaklaşımı ile, Nyquist örnekleme kriterinin çok çok aşağısındaki örnekleme oranları ile hedef ölçümleri yapılabilir; etkin sıkıştırmayı-açma teknikleri ile hedeflerin radar görüntüleri oluşturulabilir.

Bu gelişmeler ışığında, SA tekniğinin SAR görüntülemedeki olası kullanımı, literatürde artan bir ilgi görmektedir. Tekniğin, klasik hava/uzay tabanlı SAR görüntüleri için performansı, [30, 31, 32, 33]'de simulasyon verileri, [34, 35, 36]'de de gerçek deneysel veriler kullanılarak test edilmiştir. SA uygulanabilirliğinin göreceli olarak fazlaca çalışıldığı bir diğer SAR modu da, büyük miktardaki veri çıktısından dolayı dairesel-SAR görüntülemedir. SA-tabanlı dairesel-SAR

görüntülemenin etkinliği, [37, 38, 39]'de nümerik, [40, 41]'de gerçek deneysel veriler üzerinde araştırılmıştır. DAR görüntüleme alanında da, SA yaklaşımının denendiği birkaç çalışma göze çarpmaktadır [42, 43, 44, 45, 46]. Bunun yanında, SA'nın yer tabanlı SAR verilerine uygulanmasına yönelik çok az sayıda çalışma yapılmıştır [47, 48]. Yapılan bu çalışmalardan, SA'nin özellikle gerçek SAR görüntülerine uygulanmasının, zor bir problem olduğu görülmüştür. SA yaklaşımı kullanılarak hedef yansıtırlığının doğru bir şekilde tekrar oluşturulabilmesi için, görüntüleme sisteminin doğru modellenmesi, etkin sıkıştırmayı-açma algoritmalarının uygulanması gibi birçok faktörün göz önüne alınması gerekmektedir. Özellikle gerçek SAR/TSAR verilerindeki performansı üzerine çok az sonuçları bulunan ve önü açık problemleri bulunan bu popüler görüntüleme yaklaşımının, yer tabanlı yakın-alan TSAR görüntülemedeki kullanımı, bilgimiz dahilinde ilk defa bu çalışma ile ele alınmıştır. Tekniğin etkili görüntüleme için kuramsal altyapısı ve hem benzetim hem de deneysel veriler üzerindeki performansı, bu kapsamda incelenmiştir.

2.4. YAKIN-ALAN SAR/TSAR GÖRÜNTÜLEME UYGULAMALARI

Özel olarak, hedeflerin genellikle dairesel-SAR veya döner tabla TSAR tekniği ile verilerinin toplanılmasının uygun olduğu veya istendiği ve bu tezde deneysel çalışma alanları olarak seçilen kısa mesafe görüntüleme uygulamaları ve bunlar ile ilgili literatür çalışmaları aşağıda verilmiştir.

2.4.1. Yakın-Alan TSAR Görüntülerinden Radar Kesit Alanı Kestirimi

RKA, hedefin radar algılanabilirliğini tanımlayan bir karakteristiğidir ve tanım olarak, hedeften saçılan alanın, sonsuz uzaklıktaki değerinin bir ölçüsüdür. Karmaşık bir hedef için RKA, hedefi düzgün düzlemsel dalga ile aydınlatarak ve gerisaçılan alanları ölçerek belirlenir [49]. Fakat yüksek frekanslarda ve büyük hedefler için, düzlemsel dalga aydınlatmasını yeterli doğrulukla ve ucuz maliyetle üretebilmek zordur. Bu yüzden bu durum, tam ölçekli hedeflerin RKA değerlerinin belirlenmesinde ciddi bir problem oluşturur. Alternatif olarak, RKA karakteristikleri,

hedeflerin yakın-alan ölçümleri ve TSAR görüntülemeleri ile de elde edilebilir. Bu görüntü tabanlı RKA belirleme tekniği litarürde birçok çalışmada incelenmiştir.

[50]'de RKA değerleri, yakın-alan ölçüm verilerine küresel Gİ görüntüleme tekniği kullanılarak elde edilmiştir. [51]'de [50]'e benzer olarak hedeflerin RKA değerleri, yine küresel geriye-izdüşüm odaklama algoritması ve interpolasyon şeması kullanarak elde edilmiştir. [24]'de RKA değerleri, OOD görüntüleme tekniği ile oluşturulan yansıtırlık görüntüsünden 2B FD ve interpolasyon kullanılarak elde edilmiştir. [52]'de [24]'deki RKA kestirim tekniğinin, vektör network analizör (VNA) kalibrasyonunu da içeren daha gelişmiş versiyonu çıkarılmıştır.

Tez çalışmasında, yakın-alan gerisaçılım verilerinden RKA kestirimi problemi, MMD frekans kullanımı, yakın-alan kalibreli yansımasız oda ölçümleri ve farklı yansıtırlıklı kompleks küçük boyutlu nesneler için ele alınmıştır.

2.4.2. MMD Görüntüleme ile Gizlenmiş Nesnelerin Algılanması

Son yıllarda, radar ile hedef algılama uygulamalarında, MMD kullanımı yönünde artan bir eğilim vardır. Bu temel olarak iki faktöre bağlıdır; birinci olarak, MMD bandı (30~300 GHz) ışıması ionize olmayan ve sağlık açısından güvenli olarak kullanılabilir bir ışımadır; ikinci olarak MMD birçok dielektrik materyallerden ve sis, yangın gibi çeşitli kötü hava koşullarından penetre edebilmektedir [53]. Ayrıca, MMD bandında çalışan bir radarın, kısa dalgaboyu özelliğinden kaynaklı birtakım avantajları vardır. İstenilen bir anten açıklığı için, düşük frekanslara kıyasla, daha dar ışıngenişlikleri ve daha düşük yanbant sevileyeleri elde edilebilir veya istenilen bir ışın özellikleri grubu için daha düşük açıklık kullanılabilir. Bu özelliklerinden dolayı, MMD görüntüleme, birçok güncel radar uygulanması için tercih edilmektedir. Bu uygulamalara örnek olarak; askeri görevler için hedef gözetleme ve hassas hedef görüntüleme [54], güvenli uçak inişi, sisli ortamda yol trafik kontrolü, sivil uygulamalar için uzaktan algılama [55] ve güvenlik amaçlı olarak gizlenmiş tehdit nesnelerinin algılanması [56] sayılabilir.

Son yıllarda, terörizm ile başa çıkabilme yönündeki artan gereklilikten dolayı, gizlenmiş nesne algılanması, literatürde fazlaca çalışılan konulardan biridir. Temel olarak istenilen, insan üzerinde, giysi altına gizlenmiş silahların veya genel

olarak tehdit unsurlarının, havaalanı gibi halka açık ve kritik güvenlik noktalarında güvenilir şekilde algılamalarını yapabilmektir. Klasik metal detektörlerininn çok çeşitli ve fazlaca dielektrik yapıya sahip tehdit silahlarını algılamadaki yetersizliğinden dolayı, bu görev için yakın zamanda görüntüleme tabanlı sistemler üzerinde durulmaktadır. İki tip teknik öne çıkmaktadır; gerisaçılım X-ışını görüntüleme ve MMD görüntüleme. Bu tekniklere dayalı bazı sistemler de hâlihazırda kullanılmaya başlanmıştır (mesela AS&E, Rapiscan, Agilent and L3-Communications Systems). Bununla birlikte, tehdit nesnelerinin çok çeşitli yapıda olması, engelleyici kıyafet materyallerinin farklı özellikleri ve kalınlıkları, etkin yakın-alan görüntüleme yapılabilmesindeki zorluklar gibi birçok faktörden dolayı, bu konu üzerinde çalışmalar yoğun biçimde devam etmektedir. Çalışmalar daha çok, gerisaçılım X-ışını görüntülemenin sağlık açısından olumsuz etkilerinden dolayı, pasif ve aktif MMD görüntüleme üzerine odaklanmıştır. Pasif görüntüleme sistemleri, hedeflerden ve etraftan yansıyan doğal ışımaya bağlı olduğundan dolayı, daha çok kapalı olmayan ortamlar için uygundurlar [57, 58]. Bunun yanında, aktif sistemler, çeşitli tiplerdeki radarlar ile kendi ışımalarını yaparlar ve kapalı ortamlarda çalışabilme ve hedef menzil bilgisini sunabilme gibi birtakım avantajlara sahiptirler. Ancak, aktif görüntüleme sistemlerinde de, insan vücudunun bütün perspektiflerden taranması gereksinimden dolayı, donanımsal karmaşıklık ve doğru ve hızlı görüntüleme yapabilme zorlukları vardır. Bu sebeple, literatürde birçok çalışma, farklı deneysel tarama düzenekleri ve buna uygun yakın-alan görüntüleme algoritmaları ile probleme yaklaşmışlardır. [59]'de, insan vücudunun görüntülenmesi düzlemsel tarama açıklığı ve 3B menzil-göçü algoritması kullanılarak denenmiştir. Yakın zamanda gerçekleştirilen [60]'deki doktora tezinde, aynı teknik ve görüntüleme algoritması, farklı giysi çeşitleri, hedef duruş pozisyonu, açıklık boyutu ve örnekleme sayıları gibi çeşitli sistem parametreleri üzerinde test edilmiştir. [61] ve [62]'de algılama problemi, insan vücudunun komple taranması için daha uygun olan 2B silindirik tarama geometrisi ve yine menzil-göçü algoritması kullanılarak çalışılmıştır. Bistatik veri toplama geometrilerinin, algılama performansını arttırmadaki özelliğinden ve menzil-göçü algoritmasının bu tip geometrilere adapte edilmesindeki zorluklardan dolayı [63], Gİ algoritması da alternatif olarak yine silindirik taramalar kullanan kısıtlı sayıdaki çalışmada denenmiştir [64, 65, 66]. Hem

MMD kullanımından, hem de 3B yüksek çözünürlüklü yakın-alan görüntülemeden kaynaklı ciddi zorluklara sahip MMD ile gizlenmiş silah algılanması probleminin çözümü için çalışmalar devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında problem, kapsamlı deneysel çalışmalar ile ele alınmıştır. Etkin görüntü oluşrma tekniklerinin geliştirilmesi, farklı hedef, gizleyici giysi materyali ve radar parametreleri için yakın-alan TSAR ölçümleri ve görüntü analiz çalışmaları ile ilgili sonuçlar sunulacaktır.

2.4.3. Geniş-alanlı Dairesel-SAR Görüntüleme

Hâlihazırda mevcut SAR sistemlerinin çoğu, ister hava tabanlı isterse yer tabanlı olsun, iki moddan biri ile çalışır; şerit-harita ve spot-ışığı. Radar platformunun yere paralel bir doğru boyunca hareket ettiği bu sistemlere doğrusal-SAR sistemleri denilmektedir. Şerit-harita SAR'da, iletilen ışın, sentetik açıklık boyunca sahnenin farklı bölgelerini aydınlattığından, büyük yer şeritlerinin göreceli olarak düşük çözünürlüklü görüntülemeleri yapılabilmektedir. Buna zıt olarak, spot-ışığı SAR'da, doğrusal açıklık boyunca, aynı yeryüzü bölgesinin aydınlatılması (antenin mekaniksel döndürülmesi veya ışın yönlendirme ile) yapıldığından, hedeflerin daha geniş perspektif açılarından verileri ve bunun sonucu olarak daha yüksek çözünürlüklü görüntüleri elde edilebilmektedir. Dairesel-SAR sistemlerinde ise, ışın yeryüzünün yine aynı bölgesini aydınlatır; fakat bu defa işlem, belirli bir yükseklikteki antenin dairesel güzergâh boyunca hareket ettirilmesi ile gerçekleştirilir. Bu tip doğrusal olmayan (yani eğik) veri toplama geometrisi, hedeflerin azimutta 360°'ye kadar gözlemlenmesine olanak tanımasından dolayı, doğrusal sistemlere göre çok daha yüksek çözünürlüklü (yani kullanılan dalgaboyundan düşük) görüntüler sağlamaktadırlar. Ek olarak, görüntülenmek istenen sahnedeki, saçılım merkezlerinin anizotropik yansıtırlıkları, bu tip geniş-açı veri toplama ile karakterize edilebilmektedir. Dairesel-SAR görüntülemenin bir diğer avantajı da, hedefler hakkında 3B çözünürlük bilgisi sağlayabilmesidir. Daha açık ifade ile, hedef saçıcılarının yükseklik bilgileri, sadece tek bir yükseklik noktası için yapılan tam-açıklık azimut ölçümü (yani tek-geçiş) verisinden bile çıkarılabilmektedir. Bu üstün özelliklerinden ötürü, dairesel-SAR tekniği, şehirsel

arazilerin yüksek çözünürlükü görüntülenmesi [67], jeosenkron dairesel-SAR ile yeryüzünün çok büyük ölçekteki alanlarının görüntülenmesi [68], askeri ve sivil araçların OHT ile sınıflandırılması [69, 70, 71, 72, 73, 74, 75] gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır.

Spesifik olarak, tek-geçiş ve 2B görüntüleme uygulamalarında, görüntülenecek sahne boyutunun (herhangi bir eksende), tarama yarıçapına göre karşılaştırılabilir derecede büyük olduğu durumlarda (yani geniş-alan senaryosu) temel bir problem ile karşılaşılır. Geniş-açı tarama ile beraber, bu tip veri toplama geometrisi, sahneye gelen ışınların alçalış (ya da elevason) açılarının, sahne sınırları boyunca önemli derecede değişim göstermesine sebep olur. Bu durumda, farklı saçıcılardan gelen gerisaçılım sinyalleri, görüntülemede aynı görüntüleme hücresinde üst üste biner; bu da hedefin radar karakteristiğinin konuma bağlı olarak değişmesine yol açar. Karakteristiğin alçalış açısı ile bu uzamsal değişimi, aslında 3B hedefin 2B gösterimi sonucu oluşan üstedüşüm (layover) olgusundan kaynaklanmaktadır [16, 74]. Üstedüşüm etkileri, SAR görüntüleme kalitesini önemli ölçüde düşürebilecek görüntü bozulumlarına sebep olmaktadırlar. Bu da özellikle OHT gibi kritik görevlerde, hedeflerin doğru sınıflandırılmasına engel teşkil etmektedir. Bu sebeple, üstedüşüme bağlı dairesel-SAR görüntü bozulumu problemi, yakın zamanda gerçekleştirilen bazı çalışmalarda ele alınmıştır [71, 72, 73, 74, 75]. [72, 73]'de sahne merkezinden, tarama yarıçapının 0.4'ü kadar bir kayma mesafesi uzaklıktaki ve farklı açısal pozlardaki hedefler için, 2B dairesel-SAR görüntüleri simüle edilerek, üstedüşüm etkileri analiz edilmiştir. [71, 74]'de halka açık GOTCHA dairesel-SAR veri setinden [70] faydalanılarak, 3B hedef görüntüleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu işlem için, hedef saçılım merkezlerinin uzamsal konumları hakkındaki önbilgi kullanılmış, üstedüşüm noktaları, bu sayede ters işlem ile doğru konumlara atanarak, yükseklik bilgisini içeren görüntülemeler yapılabilmiştir.

OHT uygulamasında tipik olarak, yer üstündeki askeri veya sivil araçların, yüksek çözünürlüklü dairesel-SAR görüntüleri ile tanımlanması gerçekleştirilir. Bu sistemlerin algoritmaları, kontrollü ve yer tabanlı döner tabla TSAR sistemlerinin verileri ile eğitilebilirler. [69, 76]'de bu tipteki sistemler ile askeri yer araçlarının, 3B yakın-alan TSAR görüntüleme sonuçları sunulmuştur. Tez çalışmasında, bu tip kule montajlı veya büyük boyuttaki döner-tablalı TSAR görüntüleme sistemlerine

alternatif olarak, belirli yüksekliğe ve dairesel geometriye sahip bina yapılarından faydalanılarak, çeşitli araçların dairesel-SAR görüntülemeleri elde ve analiz edilmiştir. Belirtilen muadil sistemlere göre, çok düşük maliyet getiren ve literatürde bilgimiz dahilinde benzer sonuçları bulunmayan böyle bir sistem ile gerçek dairesel-SAR verilerine erişilmiş, 2B dairesel-SAR görüntülemedeki problemler incelenebilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

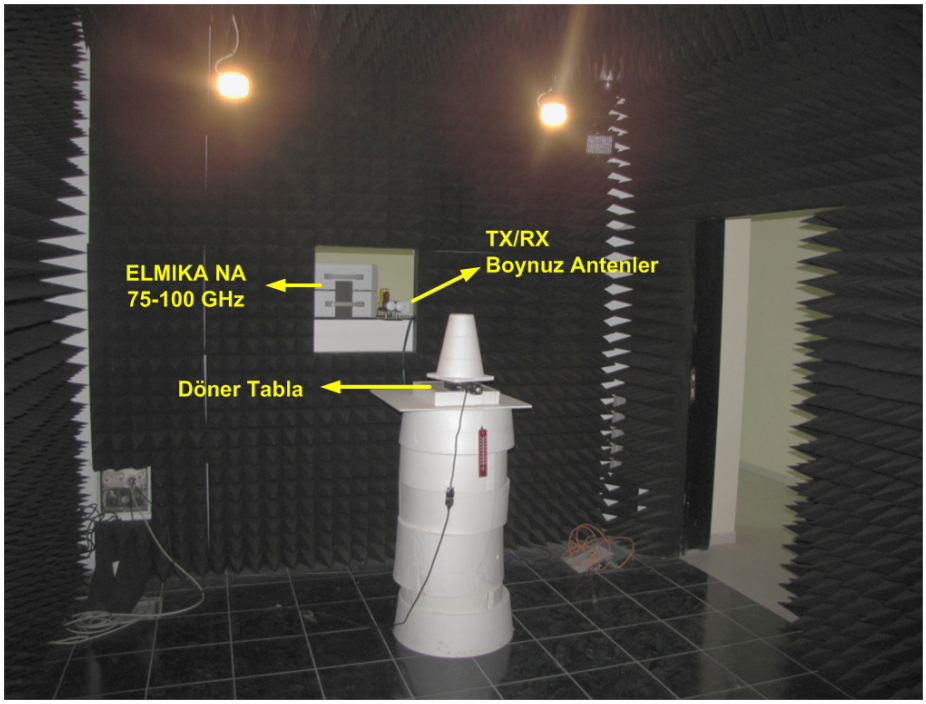
Tez çalışmasının temel olarak odaklandığı konu, dairesel açıklıklı tarama geometrisine sahip, yer tabanlı SAR/TSAR sistemleridir. Bu yakın-alan görüntüleme sistemleri için, etkin görüntü oluşturma algoritmaların geliştirilerek, hem benzetim, hem de gerçek veriler üzerindeki performanslarının doğrulanması üzerine çabalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ayrıca, mevcut imkânlar doğrultusunda, bazı güncel, yer tabanlı SAR/TSAR görüntüleme uygulamalarına yönelik deneysel çalışmalar yapılmış, incelenen uygulamaların özel problemlerine çözümler aranmıştır. Bu çalışmalar kapsamında yararlanılan donanımsal radar ekipmanları, ölçüm ve kalibrasyon cihazları ve yöntemleri, sinyal ve görüntü işlem teknikleri aşağıdaki başlıklarda anlatılmıştır.

3.1. KULLANILAN MATERYALLER

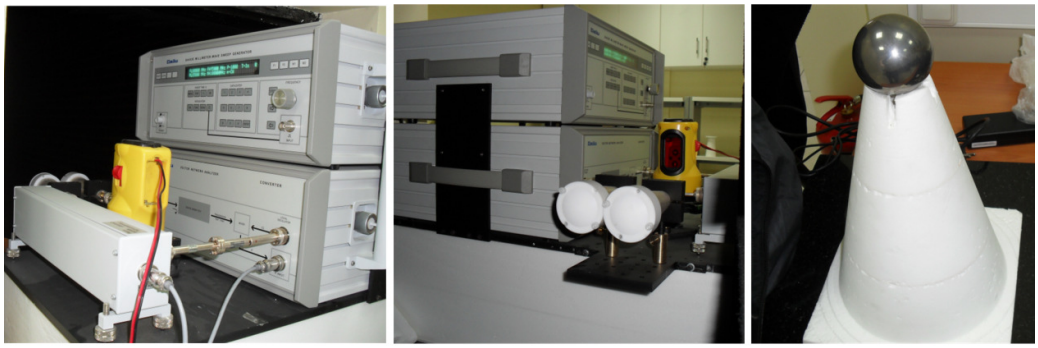
3.1.1. TÜBİTAK-MAM'ın Yansımasız Oda Ölçüm İmkânları

Yakın-alan TSAR görüntülemenin deneysel uygulamalarında, *TÜBİTAK-MAM*'ın "*Yüksek Teknolojiler için Uluslararası Laboratuvarı (ULYT)*" biriminde bulunan kapalı yansımasız odası ve radar ölçümleri için gerekli donanımsal imkânları kullanılmıştır. 6 m uzunluğa sahip yansımasız odanın EM soğurucu kaplaması 110 GHz'e kadar olan ölçümlere olanak tanımaktadır. Laboratuvarda çok çeşitli frekanslarda çalışabilecek radar ve anten cihazları olmasının yanında, bu tez çalışması kapsamında sadece W-bant (75~110 GHz) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1'deki fotoğrafta, yansımasız oda ve bu banttaki çalışma içi kullanılan ölçüm düzeneği görülmektedir. Radar ve anten cihazları, yansımasız odanın hemen arkasında olan ve bir pencere ile yansımasız odaya açılan küçük bir bölmeye yerleştirilmişlerdir. Hedeflerin azimut yönünde döndürülmesi için, 0.1° açısal dönüş hassasiyetine sahip küçük çaplı bir döner-tabla ve EM dalgayı emici özelliğine sahip konumlandırma malzemesi kullanılmıştır. Radar sistemi olarak, Şekil 3.2(a)'da görülen, Adım-Frekanslı Sürekli-Dalga (Stepped-Frequency Continuous-Wave, SFCW) prensibi ile çalışan, 75~110 GHz frekans bantgenişliğine sahip ELMIKA

S4403 model numaralı VNA kulanılmıştır. Alıcı ve verici antenler olarak, Şekil 3.2(b)'de görülen ve VNA'ya dalgakılavuzları yardımı ile bağlanan iki adet dairesel boynuz tipteki antenler kullanılmıştır. Antenler, yarı-monostatik konfigürasyonda çalışmak üzere mesafelendirilmiştir. Antenlerin orta noktasına konumlandırılan bir lazer işaretleyici ile döner-tabla üzerine yerleştirilen hedefin merkezine doğru olan bakış açısı, hassas şekilde ayarlanabilmektedir. Gönderilen ışınları, sadece hedefe odaklamak için anten açıklıkları ilave olarak lens ile kaplanmıştır. VNA ve döner-tabla cihazların tüm parametreleri ve veri aktarım işlemleri otomatik olarak bir bilgisayar programı ile kontrol edilmektedir. Sistem, hedef ölçümlerinden önce genellikle Şekil 3.2(c)'de görülen bir metal küre yardımıyla kalibre edilmiş, daha sonra hedeflerin tek-boyutlu (1B) MMD frekans cevapları toplanmıştır. Tez çalışmasında, kısıtlı sayıda gerçekleştirilen 3B TSAR görüntüleme çalışmalarında ise hedeflerin z −eksenindeki konumları manuel olarak değiştirilerek, 2B silindirik tarama geometrisi ölçümleri yapılabilmiştir.



Şekil 3.1. TÜBİTAK-MAM'daki yansımasız oda. Odanın duvarları ve tavanı soğurucu madde ile kaplanmıştır; tabana da kısmen ek soğurucu konulabilmektedir. Yarı-monostatik antenler ile VNA odaya bitişik küçük bir hazneye yerleştirilmişlerdir.



(a) (b) (c)

Şekil 3.2. Yansımasız oda ölçümlerinde kullanılan cihazlar. (a) W-bant frekanslarında çalışmaya uygun VNA, (b) dairesel tipli verici ve alıcı boynuz antenler, (c) kalibrasyon nesnesi.

3.1.2. Mersin Üniversitesi Bünyesindeki Deneysel Altyapı Olanakları

Dairesel-SAR tekniği ile gerçek görüntüleme çalışmalarını yapabilmek için, *Mersin Üniversitesi Mimarlık Fakultesi Binası*'nın yay biçimli teras yapısı kullanılmıştır. Binanın üstten ve yandan görüntüleri Şekil 3.3'deki fotoğraflarda görülmektedir. 21.9 m yarıçaplı bu yapının, üzerine antenlerin yerleştirilebileceği ve dairesel olarak hareket ettirilebileceği taban yükseklik noktası, yerden 9.54 m yüksekliktedir. Yer düzlemindeki daire merkezine yerleştirilen hedeflerin, toplam 270°'ye kadar bakış açılarında gerisaçılım verilerinin toplanabilmesi için Şekil 3.4'de görülen bir sistem oluşturulmuştur. Sistem, 0~6 GHz arası ve SFCW prensibi ile çalışan *Anritsu MS2026C* model numaralı bir el tipi VNA, tekerlekli bir platform üzerine monte edilmiş yarı-monostatik konfigürasyonlu 2 adet dikdörtgensel boynuz tipi anten, VNA ile GPIB portu üzerinden haberleşerek verilerin alınmasını sağlayan 1 adet bilgisayar ve 1 adet lazer işaretleyici ve mesafe ölçer cihazlarını içermektedir.

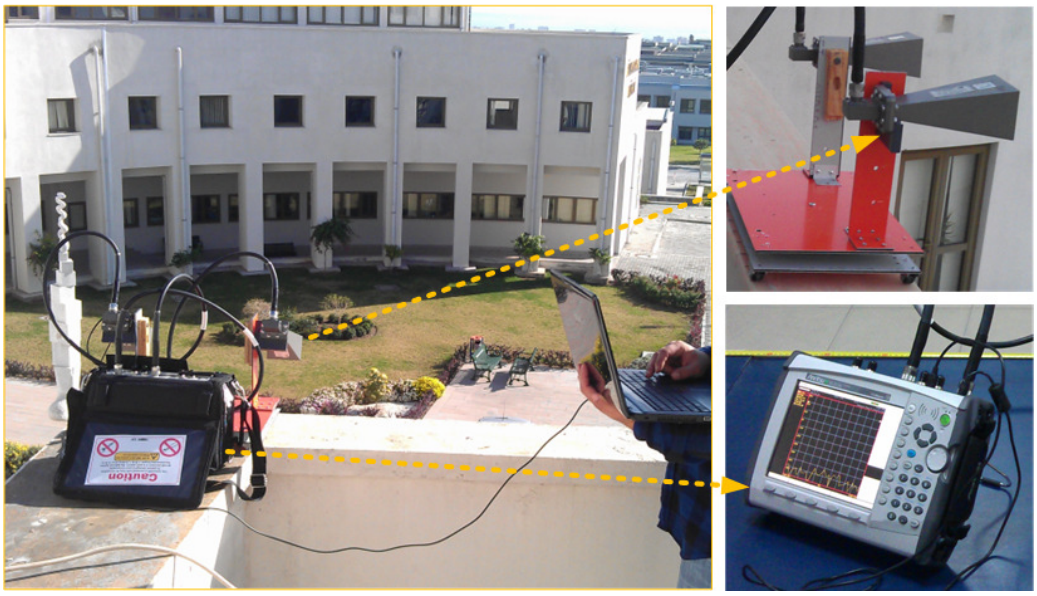
Tez çalışması süresince, hem görüntü oluşturma algoritmalarının testleri için, hem de yakın-alan radar görüntülerinden yararlı bilginin çıkarılmasına yönelik yürütülen birçok deneysel çalışmada, tabanca, maket uçak modelleri, iş makinası gibi çeşitli radar hedefleri kullanılmıştır. Bu hedefler ile ilgili bilgiler Kısım 4'de verilmiştir.

3.1.3. Yazılımlar ve Yayınlar

Yansımasız oda TSAR verilerinin toplanmasında, ULYT personeli tarafından geliştirilen özel otomasyon programları kullanılmıştır. Mersin Üniversitesi'ndeki dairesel-SAR deneylerinde ise verilerin otomatik ve hızlı şekilde toplanabilmesi için, MATLAB'ın [77] enstrümentasyon araç kutusundan faydalanan ve VNA'yı kontrol eden bir yazılım geliştirilmiştir. Bunun yanında tez çalışmasının genelindeki, tüm hesaplamalar, algoritmalar, veri analizleri ve grafikler için, yine MATLAB yazılım paketi kullanılmıştır. Mersin Üniversitesi'nin mühendislik alanındaki birçok veritabanına aboneliğinden dolayı, tez çalışması ile ilgili kitap, doktora tezi, makale vs. yayınlarına ulaşmak ve yararlanmak mümkün olmuştur.



Şekil 3.3. Dairesel-SAR deneylerinde kullanılan binaya ait fotoğraflar. (a) üstten görünüm, (b) yandan görünüm.



Şekil 3.4. Dairesel-SAR deney sistemi. Dikdörtgensel boynuz tipteki antenler ve el tipi VNA sağ tarafta görülmektedir.

3.2. KULLANILAN METOTLAR

3.2.1. SAR/TSAR Görüntülemenin Temelleri

3.2.1.1. Kısa Tarihçe

Radarlar, yer tabanlı antenler ile hava nesnelerini algılamak ve hava platformları ile yeryüzününün görüntülemek için yıllardır kullanılmaktadırlar. 1930'lu yıllarda geliştirilen ilk radar sisteminde, sürekli-dalga (continuous-wave, CW) radyo dalga-alanları kullanılmıştır. Sistem basit olarak, radyo dalgaları bir nesne tarafından yansıtıldığında, dönüş sinyalinin genliğinde oluşan modülasyon karakteristiğinin bir algılama belirteci olarak kullanılmasına dayanmaktaydı. Bu radar sisteminin çözünürlüğü, o zamanın mevcut imkânları ile ancak sağlanabilen uzun dalga-boylarından (yaklaşık 1 km) dolayı çok zayıf olmasına karşın, düşman uçaklarını izleme ve yönleri ve sayıları hakkında bilgi edinme için işlevsel olarak kullanılmıştır. 1940'larda "*oyuklu magnetron*" cihazının geliştirilmesi ile bugün mikrodalga olarak bilinen çok kısa dalgaboylu radyo dalgalarını (λ yaklaşık olarak 1 m) üretmek mümkün olmuştur. Daha sonra, mikrodalga darbeleri kullanılarak ve

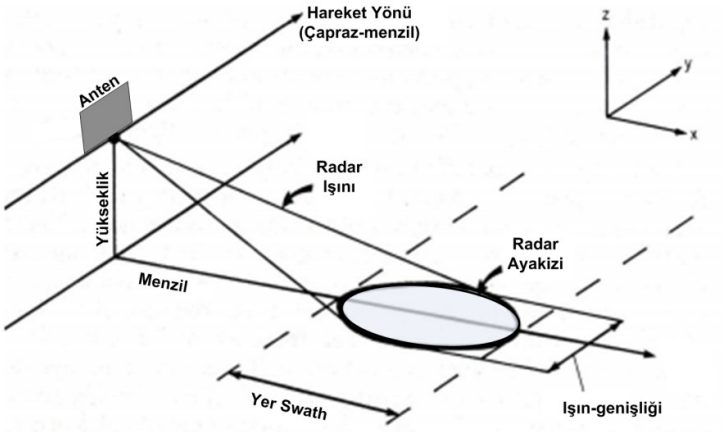
antenlerin döndürülme hareketleri ile yeryüzünün görüntülemeleri yapılabilmiştir. O zamanın teknolojisinde, menzil çözünürlüğü darbenin genişliğiyle, çapraz-menzil (yanca, azimut) çözünürlüğü de istenilen menzildeki ışın genişliğiyle belirlenmekteydi. Bu prensip, o yıllardaki birçok radar sisteminin temelini teşkil etmiştir. 1951'de Carl Wiley, açısal mesafeye sahip iki hedefin, hareketli bir radar platformunu ve hedeflerin Doppler kaymalarındaki farklılıklar sayesinde ayırt edilebildiğini keşfetti [6, 8]. "*Doppler ışın keskinleştirme*" olarak adlandırdığı bu teknik, bugün SAR'ın özel bir biçimi olarak bilinmektedir. Bu gelişmeye paralel olarak, Illinois Üniversitesi'ndeki bir grup bilimadamı, bir dizi arazisel yankı örneklerinin frekans spektrumlarında aynı Doppler etkisinin olduğunu farkettiler. Daha sonra bu grup, 1953'de özel bir X-bant radarı geliştirerek, 2B radar görüntüleri oluşturmuşlardır [12, 78].

1950'li yıllardan itibaren, SAR işlem teknikleri çok fazla gelişmiştir. Önemli bir dönüm noktası ise 1960'lardaki menzil çözünürlüğünün iyileştirilmesine yönelik geliştirilen tekniktir. Bu teknik, gönderilen darbenin doğrusal frekans modüle edilmesi ve dönüş yankısının, bu iletilen darbenin karmaşık eşleniği ile konvolüsyon edilmesi (yani uyumlandırılmış-filtre) prensibine dayanır. SAR tekniği bugün, birçok askeri ve sivil birçok uzaktan algılama uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun temel temel sebeplerinden biri, SAR'ın hem menzil hem de çapraz-menzil yönünde yüksek çözünürlüklü görüntülemeler yapabilmesidir [3, 4, 5, 14, 79].

3.2.1.2. Çalışma Prensibi

SAR, saçıcının radar ışınından geçerken oluşturduğu cevabı kullanarak, çapraz-menzil çözünürlüğü sentezleyen bir darbe-yankı sistemidir. Bu işlem, uzun mesafelerde bile göreceli olarak yüksek çözünürlükü görüntüler üretilmesine imkân tanır. Doğrusal bir hat boyunca hareket eden radar platformu için sistem geometrisi Şekil 3.5'de görülmektedir. Burada ve tezin diğer tüm kısımlarında menzil koordinatı x ile, menzil yönüne yanalda dik olan çapraz-menzil (azimut) koordinatı da y ile gösterilecektir. Anten, mikrodalga ışımasında darbe yayar, dönüş sinyali veya yankı hareket yolu boyunca sabit zaman aralıklarında kaydedilir. Sentetik açıklık

tekniğinin en önemli özelliği çapraz-menzil yönünde, antenin hareketi sayesinde oluşan yankı sinyallerindeki modülasyon bilgisini kullanmasıdır. SAR terminolojisinde bu modülasyon, genellikle *hedefin faz geçmişi* olarak adlandırılır. Bir çok çalışmada ise bu olgu yanlış anlaşılmaya yol açacak şekilde *Doppler modülasyonu* olarak tanımlanmış, daha sonra da ilişkili matematiksel analiz için de *başla-dur varsayımı* diye bilinen yaklaşım kabul edilmiştir. Başla-dur varsayımında, bir darbe iletildikten ve tüm yankılar alındıktan sonra, platform anlık olarak bir sonraki yanca-yönü örnekleme noktasına hareket eder ve işlem tekrarlanır. Başla-dur varsayımı, sistemden hareketi efektif olarak ortadan kaldırır ve bu yüzden zamansal (temporal) Doppler etkisi meydana gelmez. Çapraz-menzil yönünde, faz modülasyonu ile oluşan spektral içerik için doğru terim *uzamsal Doppler*'dır. Yani yankı sinyalinin uzamsal modülasyonuna asıl sebep olan, platform-hedef arasındaki göreceli mesafesinin değişim oranıdır. Geometriksel değişim ile indüklenen modülasyona bağlı oluşan bu uzamsal bantgenişliğin işlenmesi sentetik açıklık tekniğinin esasını oluşturur. Gerçek zamansal Doppler etkileri ise iletilen herbir darbenin çok düşük modülasyonuna sebep olduğundan, radar görüntülemede genellikle ihmal edilebilir.

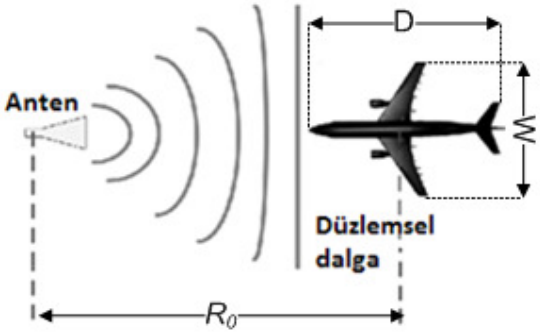


Şekil 3.5. Doğrusal hareketli SAR görüntüleme geometrisi.

3.2.1.3. Veri Toplama Stratejileri

Geleneksel SAR/TSAR sistemleri, getirdiği bir takım görüntüleme kolaylıklarından dolayı uzak-alan aydınlatması ve dar açısal açıklıklar kullanırlar.

Şekil 3.6'da izah edildiği üzere, uzak-alan aydınlatmada, hedefe çarpan dalgaların düzgün düzlemsel dalgalar olduğu yaklaşımı yapılır. Bu yaklaşımın geçerli olması için dalga yayılımın iki karakteristiğinin, rasgele seçilen fakat genel olarak kabul gören tolerans değerlerinin altında tutulması gerekir.



Şekil 3.6. Uzak-alan ışıma yaklaşımı.

İlk olarak, hedefin ön ve arka kenarlarına çarpan dalganın genlik değişimi 1 dB'den az olacak şekilde tutulmak istenirse, bu durumda uzak-alan gereksinimin ilk şartı şu şekilde bulunur [29];

$$R_0 \geq 8.7D \tag{3.1}$$

burada, R_0 radarın hedef merkezine olan uzaklığı ve D de hedefin menzil yönündeki uzunluğudur. İkinci olarak, hedefin çapraz-menzil yönünde, üst ve alt uç noktalarına gelen dalgalar arasındaki maksimum faz değişimi, $\pi/8$ olacak şekilde ayarlanırsa, yaygın olarak bilinen uzak-alan gereksinimi aşağıdaki şekilde elde edilir [29];

$$R_0 \geq 2\,W^2/\lambda \tag{3.2}$$

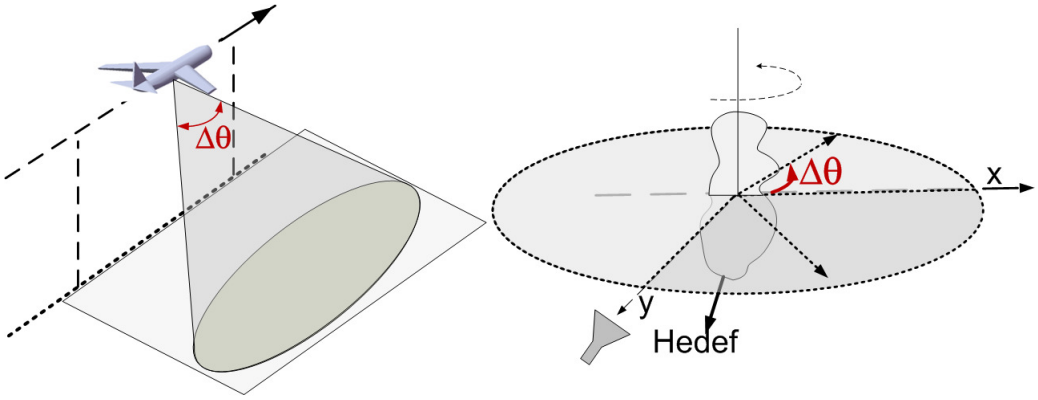
burada, W hedefin çapraz-menzil yönündeki maksimum genişliği ve λ iletilen dalgaboyudur. Denklem (3.1) ve (3.2)'deki kriterlerin sağlanmadığı durumlarda, hedefin antenin yakın-alan ışımasında olduğu kabul edilir.

Yakın ve uzak-alan ölçümlerinden başka, SAR/TSAR'da kullanılan bir diğer veri toplama stratejisi de çapraz-menzil yönünde dar veya geniş-açı

kullanımıdır. Dar-açı kullanımı her ne kadar görüntüleme işlemini basitleştirse de, büyük hedeflerin yüksek yanca çözünürlüklü görüntülerinin elde edilmesi için geniş açısal açıklık kullanmak gerekir. Şekil (3.7)'de görüldüğü gibi, geniş-açı veri toplama, SAR'da gönderilen dalganın geniş yarı-güç (ya da -3 dB) ışıngenişliğine sahip olmasıyla, TSAR'da ise hedeflerin geniş açısal taramalarının yapılmasıyla sağlanır. Geniş-açı kriteri ise şu formül ile belirlenir [80];

$$\Delta\theta > 2\,sin^{-1}(B/2f_c) \tag{3.3}$$

burada $\Delta\theta$ taranan azimut açı kapsamı, B ve f_c sırasıyla gönderilen dalganın frekans bantgenişliği ve merkez frekansıdır.



Şekil 3.7. SAR ve TSAR'da geniş-açı veri toplama. a) SAR geometrisi b) TSAR geometrisi.

SAR/TSAR'da uygulanan bir diğer strateji de monostatik veya multistatik radar konfigürasyonları ile veri toplamaktır. Monostatik modda, dalga iletimi (TX) ve alımı (RX) tek bir anten ile sağlanır. Multistatik modda ise bu işlemler için uzamsal olarak farklı konumlarda olan ayrı antenler kullanılır. Multistatik modun sıklıkla kullanılan bir çeşidi ise, tek TX ve tek RX antenin kullanıldığı bistatik modudur.

3.2.1.4. Görüntü Çözünürlüğü

SAR/TSAR sistemleri, görüntülenmek istenen alana bir dizi radar darbeleri yayar. Her bir darbenin yankısı işlemden geçirilerek, hedef sahnesinin ışıma dalgasına cevabı olan 1B menzil profillerine dönüştürülür. Radar ile hedef arasındaki açısal ilişkinin değişmesi ile menzil profilleri de değişir. Uygun işlem metotları kullanılarak, çok-boyutlu ve yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilir. 2B görüntüleme sistemleri göz önüne alınırsa, görüntü çözünürlüğü, geleneksel olarak menzil ve çapraz-menzil olarak iki ayrı bileşen ile değerlendirilir. Bu terminolojinin kabul edilmesinin sebebi, klasik dar-açı SAR/TSAR sistemlerinde, menzil ve çapraz-menzil çözünürlüklerinin birbirinden bağımsız olmasıdır. Bu sistemlerde, klasik darbe sıkıştırıma teknikleri menzil çözünürlüğü sağlarken, SAR işlemi de çapraz-menzil çözünürlüğünü geliştirmek için uygulanır. Bakış açısı aralığının yüksek olduğu geniş-açı sistemlerinde ise bu etkiler birbirinden bağımsız olmayıp, bağlaşıktır. Bu bölümde, klasik dar-açı SAR/TSAR görüntüleme çözünürlüğünün elde edilmesi ile ilgili bilgiler özet olarak verilecektir.

Menzil Çözünürlüğü

SAR sistemleri tepe gücü sınırlamalı sistemlerdir. Bir başka ifade ile mevcut olan maksimum güç ile çalışırlar. Yeterli enerji seviyelerinde mikrodalga alanı göndermek ve ölçülebilir bir dönüş sinyali elde etmek için, radar darbesinin süresi, göreceli olarak uzun olmalıdır. Eğer basit aç/kapa darbesi gönderilirse, karakteristik spektrum, dar–bantlı *sinc* fonksiyonudur. Bu tarz bir darbenin frekans içeriği, genellikle, istenen menzil çözünürlüğü için yeterli olmaz. Bunun yanında, yüksek menzil çözünürlüğü, menzil yönündeki yakın mesafeli hedefleri ayırt etme özelliğine ek olarak, menzil doğruluğunun arttırılması, çözünürlük hücresindeki istenmeyen yankı (clutter) miktarının azaltılması, çoklu-yol (mulitpath) etkilerini azaltma, hedef tanıma işlemini kolaylaştırma vs. gibi birçok önemli avantajlar getirmektedir. Bu sebeple, yüksek menzil çözünürlüğü oluşturmak için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bu teknikler; kısa darbe (impals), klasik darbe sıkıştırma ve adım-frekanslı dalgaşekli olarak üç ana grup altında toplanabilir. Bu üç kategori için de, menzil

çözünürlüğü δx aynıdır ve birçok SAR kitabında [3, 4, 16]'da verildiği üzere aşağıdaki şekildedir;

$$\delta x = \frac{c}{2B} \tag{3.4}$$

burada B dalgaşeklinin bantgenişliği ve c ışık hızıdır. Bantgenişliğinin her bir kategori için farklı şekilde oluşturulduğu, bu menzil yönündeki darbe sıkıştırma teknikleri ilerleyen kısımlarda anlatıcalaktır.

Çapraz-Menzil Çözünürlüğü

Sentetik odaklama işleminin olmadığı durumlarda (yani gerçek açıklıklı radarlarda), d uzunluğuna sahip bir anten ile elde edilebilecek çapraz-menzil çözünürlüğü, menzil ve ışıngenişliği θ_B'nin $(-3$ dB$)$ çarpımı ile belirlenir. λ dalgaboyu olmak üzere, θ_B yaklaşık olarak şu formül ile hesaplanır;

$$\theta_B = \frac{\lambda}{d} \tag{3.5}$$

Bu durumda, R_0 mesafesi için, çapraz-menzil yer çözünürlüğü;

$$\delta y = R_0 \theta_B \approx \frac{R_0 \lambda}{d} \tag{3.6}$$

şeklinde elde edilir. Birçok pratik uygulamada anten boyutları kısıtlandığı için, çapraz-menzil çözünürlüğü, aşağı-menzil çözünürlüğüne göre oldukça düşük olur. Fakat SAR sinyal işlemede, hedeften geriyansıyan sinyal enerjileri eşzamanlı olarak toplanarak büyük bir sentetik anten simüle edilir ve çapraz-menzil yönünde toplanan bu veriye yine uyumlanmış-filtre tabanlı sıkıştırma işlemi uygulanarak çözünürlük arttırılır. Bu tekniklerin hepsi, neticede bakış veya gözlem açısındaki değişim miktarına bağımlıdırlar. Dolayısıyla, çapraz-menzil yönünde çözünürlük δy ile bakış açısındaki değişim $\Delta\theta$ arasındaki bağıntı aşağıda gösterildiği gibidir [3, 4, 16];

$$\delta y = \frac{\lambda_c}{4\sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)} \tag{3.7}$$

burada λ_c merkez dalgaboyudur. Uzak-alan sistemleri için, Denklem (3.7) menzilden bağımsız olacak şekilde;

$$\delta y = \frac{\lambda_c}{2\Delta\theta} \tag{3.8}$$

formülüne indirgenir. Doğrusal, şerit-harita geometrili sistemlerde, hedefin çapraz-menzil yönündeki boyutundan daha kısa bir L uzunluklu sentetik açıklığın (yani yarı-optimal açıklık) kullanıldığı ve/veya yakın-alan çalışma olduğu durumlarda, çapraz-menzil çözünürlüğü δy, menzil mesafesi R_0 ile değişir, yani;

$$\delta y = \frac{\lambda_c R_0}{2L} \tag{3.9}$$

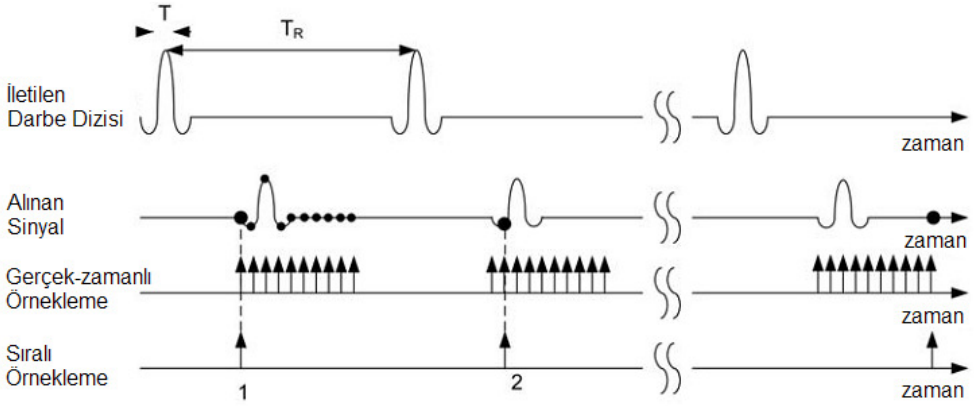
Işının, hedef sahnesini daha uzun gözlemesi için yönlendirildiği spot-ışığı sentetik açıklık moduunda, $\Delta\theta$ anten ışın genişliğinden daha büyük olur ve Denklem (3.8)'den görüleceği üzere, daha yüksek çözünürlük değerleri elde edilebilir.

3.2.1.5. Menzil Sıkıştırma Teknikleri

Kısa Darbe (İmpals)

Yüksek menzil çözünürlüğü oluşturmanın en basit yolu, kısa darbe veya impals dalgaşeklini kullanmaktır. Fakat bu durumda, çok kısa darbe süresinden dolayı, darbe enerjisi düşük olur. Bunun sonucunda tepe gücü, eğer makul bir sistem performansı isteniliyorsa, çok yüksek olmalıdır. Bu tekniğin diğer bir önemli dezavantajı da, yüksek anlık bantgenişliğine sahip olmasından dolayı, yankı sinyallerinin toplanmasında yüksek örnekleme oranlı analog-sayısal (A/D) dönüştürücülere gereksinim duymasıdır. Çok yüksek örnekleme hızına (mesela $8\sim10$ Giga-örnek/s) sahip sayısal osiloskoplar bulunmasına karşın, bu cihazlar pahalıdırlar ve çok güç harcamaktadırlar. Buna alternatif olarak, Şekil 3.8'de

anlatılan örnekleme işlemine göre çalışan, sıralı örnekleme (sequential or stroboscopic sampling) sistemleri de pratikte yaygın biçimde kullanılmaktadır.



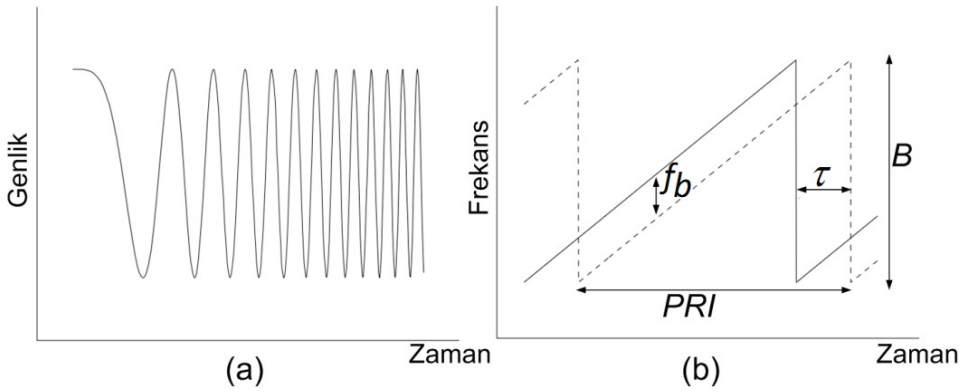
Şekil 3.8. Kısa darbe dalgaşekli ve örnekleme teknikleri.

ii) Klasik Darbe Sıkıştırma (Doğrusal FM, FMCW)

Klasik darbe sıkıştırma dalgaşekillerinde, yüksek bantgenişliği, iletim darbesinin, zaman süresinin kısaltılması yerine, modüle edilmesi ile oluşturulur. İletilen radar sinyalinin fazı kodlanır (tipik olarak doğrusal frekans modülasyonu, doğrusal FM), daha sonra geriyansıyan sinyal, gönderilen sinyalinin kopyası ile ilintilenir. Uyumlanış-filtre ile zaman-sıkıştırması olarak da bilinen bu işlem sonucundaki darbeler, gönderilen darbelerden çok daha kısa sürelere sahip olurlar. Bu tekniğinin en belirgin avantajı, darbe genişliğini ve dolayısıyla darbe enerjisini azaltmadan, yüksek çözünürlüğü sağlayabilmesidir. Bu işlem ile ayrıca, sıkıştırılmış darbenin Sinyal-Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio, SNR), sıkıştırılmamış darbenin uzunluğunun, sıkıştırılmış darbeninkine oranı ile artar. Bu sayede, hedef algılanabilirliğinden kayıp verilmez. Doğrusal FM dalgaşekilleri, genellikle anten-hedef mesafesinin uzun olduğu hava tabanlı SAR'ın darbe-doppler radarlarında kullanılırlar. Bu tip radarlarda, yine yüksek örnekleme oranlı A/D dönüştürücüye sahip alıcı tasarımı gerekmektedir.

Eğer doğrusal FM dalgaşekli, hedef yansımasındaki çift-yol yayılım gecikmesinden çok daha uzun süreli olacak şekilde tasarlanırsa, genellikle frekans-modüleli sürekli–dalga (Frequency-Modulated Continuous-Wave, FMCW) olarak

adlandırılır. Bu durumda, alıcıda gerisaçılım sinyalleri, verici iletim yaparken alınmaya başlar. Şekil 3.9(a)'da grafiği görülen FMCW dalgaşekillerinde, tipik tarama (sweep) zamanları 1 ile 100 ms arasında değiştiği için, düşük iletilen güç ile yüksek enerjili darbeler göndermek mümkündür.



Şekil 3.9. FMCW sinyali: (a) zaman düzleminde gösterim (b) zaman-frekans düzleminde iletilen ve alınan (kesikli çizgi) sinyaller.

İletilen FMCW sinyali $s_t(t)$'nin matematiksel ifadesi şu şekildedir:

$$s_t(t) = \text{rect}(\frac{t}{PRI}) \cdot \cos\left(2\pi\left(f_o t + \frac{1}{2}at^2\right)\right) \tag{3.10}$$

burada "rect(·)" dikdörtgensel fonksiyonu, $PRI = 1/PRF$ darbe tekrarlama periyodunu, PRF darbe tekrarlama frekansını, f_o, taşıyıcı frekansını ve a cıvıltı oranını (ya da frekans tarama hızını) vermektedir. Cıvıltı oranı a, sinyalin toplam bantgenişliği B ile şu şekilde doğru orantılıdır;

$$a = \frac{B}{PRI} \tag{3.11}$$

İletilen sinyalin gecikmiş bir versiyonu olan yankı sinyali $s_r(t)$'nin (Şekil 3.9(b)'deki kesikli çizgi ile gösterilen sinyal) ifadesi ise aşağıdaki gibidir;

$$s_r(t) = \text{rect}(\frac{t}{PRI}) \cdot \cos\left(2\pi\left(f_o(t-t_d) + \frac{1}{2}a(t-t_d)^2\right)\right) \tag{3.12}$$

burada t_d sinyalin hedefe ulaşıp radara geri dönmesindeki zaman gecikmesidir (r menzilindeki bir hedef için, c ışık hızı olmakla birlikte; $t_d = 2r/c$). Homodin (eşzamanlı) FMCW alıcılarda, alınan sinyal, iletilen sinyalin kopyası ile karıştırılır (mixing) ve daha sonra alçak geçiren filtreden geçirilir. Bu işlem genellikle sıkıştırma (streching, deramping) olarak bilinir. Çıkıştaki oluşan sinyal ise vuru (beat, ara-frekans (IF)) sinyali olarak adlandırılır ve şu şekilde ifade edilir;

$$s_{IF}(t) = \text{rect}(\frac{t}{PRI}) \cdot \cos\left(2\pi\left(f_o t_d + a t t_d - \frac{1}{2} a {t_d}^2\right)\right) \tag{3.13}$$

Denklem (3.13)'den görüleceği üzere, vuru sinyalinin frekansı, hedef zaman gecikmesi veya mesafesi ile direkt orantılıdır ve şu formdadır;

$$f_b = a t_d = \frac{2a}{c} r \tag{3.14}$$

Mikserin çıkışındaki vuru sinyali, istenilen menzil aralığına göre belirlenecek bir bantgeçiren filtreden geçirilerek ve belirlenen örnekleme frekansı ile örneklenerek sayısal hale getirilir. Elde edilen vuru sinyalinin Ters Fourier Dönüşümü (TFD) ile frekans düzlemi verisine eşdeğer olan, zaman düzlemi verisi (veya menzil profili) elde edilir. TFD işlemi, alınan sinyallerin uyumlanmış-filtreden geçirilmesi işlemine karşılık gelir. Daha çok yer tabanlı ve kısa mesafe SAR uygulamaları için tercih edilebecek FMCW radarlarının avatanjları arasında uygun maliyetli olmaları, donanımsal basitliği ve düşük örnekleme oranlı (mesela kHz frekanslarında) A/D dönüştürücü gereksinimleridir. Bununla birlikte, farklı sinyal seviyelerindeki (onlarca dB) iletim ve alım sinyallerinin aynı anda gönderimi ve alımı tekniği ile çalışmasından dolayı, ileticiden alıcıya giden parazit akı (leakage) sinyali ve bunun sonucu oluşan maksimum radar menzili kısıtlaması, FMCW radarlarının en önemli dezavantajı olarak göze çarpmaktadır.

iii) Adım-Frekanslı Dalgaşekli

Yüksek menzil çözünürlüğü elde etmede üçüncü kategori, adım-frekanslı (stepped-frequency, SF) dalgaşekli kullanmaktır (Wehner, 85). SF dalgaşeklini içeren radarlar, ardışık darbelerin frekanslarını doğrusal ve kesikli adımlarla arttırılırlar. SF dalgaşekli, modülasyonu her bir darbe içine değil de, darbeler boyunca yapan darbe sıkıştırma tekniği olarak görülebilir. SF radarları, önceleri, temel olarak yansımasız odalardaki teşhişsel RKA ölçümlerinde ve açık arazilerde hedefin rotasyonel hareketini kullanarak 2B görüntüleme yapan sistemlerde kullanılmıştır. Şu anda da, SF radarlarının yüksek çözünülüklü menzil profilleri ve 2B görüntülemeleri, hedef tanıma ve sınıflandırma amaçlarına yönelik olarak yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Yakın zamanlarda ise, SF radarının bu yüksek menzil çözünürlüğü kapasitesi, yüksek hızlı, düşük RKA'lı hedeflerin, yoğun istenmeyen-yankı koşullarında algılanması gibi zor problemlerin çözümü için faydalanılmaktadır.

Şekil 3.10'da görülen ve bantgenişliği B, sıkıştırılmamış uzunluğu τ olan bir SF dalgaşekli, dalganın tek frekanslı ve düzgün genlikli sinüzoidleri içeren, N sayıdaki eşit uzunluklu alt-darbelere bölünmesi ile oluşturulabilir. Bu durumda, dalgaşeklinin bantgenişliği boyunca eşit mesafelerle konumlandırılmış N frekansı olur. SF dalgaşekli analitik olarak şu şekilde gösterilebilir;

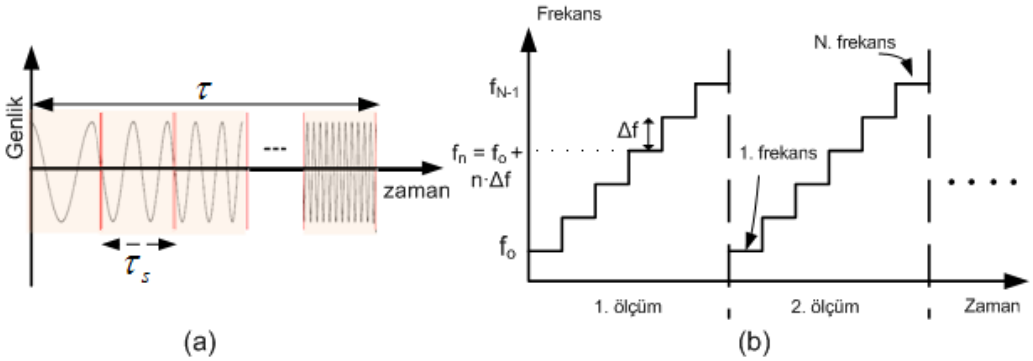
$$s_t(t) = \frac{1}{\sqrt{\tau}} \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t-n\tau_s}{\tau_s}\right) \exp(j2\pi f_n t) \tag{3.15}$$

burada $f_n \in \{f_0, f_1, \ldots f_{N-1}\}$ n'inci alt-darbenin frekansı ve τ_s ise alt-darbenin süresidir. Her bir SF alt-darbesinin, gönderildiği ortamı, kendisine tahsis edilen B/N genişlikli tüm frekans bandı boyunca örneklemesi için, dalgaşekli bantgenişliği B ile uzunluğu τ şu şekilde arasındaki ilişki şu şekilde ayarlanır [1];

$$B\tau = N^2 \tag{3.16}$$

SF radarında sinyal kaynağı, her bir frekansta alınan yankıların alıcıya ulaşmasını sağlayacak kadar, yani durağan bir durum oluşturacak kadar uzun bekler. Her bir frekansta alınan sinyaller çarpıcı ile dar-bantlı eşfaz (Inphase, I) ve dikfaz

(Quadrature, Q) temel bant sinyallerine dönüştürülür. Şunu da belirtmek gerekir ki, radar frekansı değişmediği sürece ve alınan yankılarda Doppler kayması olmadığı sürece, bu I ve Q sinyalleri durağan genliğe sahiptirler. Bir başka ifade ile SF temel bant sinyali, hedef yankısının bir dizi ayrık frekanslar için ölçülen frekans cevabını temsil eden karmaşık bir sinyal olarak görülebilir. Temel bant sinyali daha sonra, düşük-frekanslı, yüksek hassasiyetli A/D dönüştürücüler ile örneklenerek, karmaşık sayısal veriye dönüştürülür. Eşdeğer zaman düzlemi cevabı ise, FMCW radarında olduğu gibi, temel bant sinyaline TFD uygulanarak elde edilebilir.



Şekil 3.10. Adım-frekanslı dalga şekli: (a) zaman-genlik, (b) zaman-frekans gösterimi.

3.2.1.6. Hedef Saçılımının Karekterizasyonu

Bir hedef nesnesi EM dalga ile aydınlatıldığı zaman, yapı üzerinde akımlar indüklenir ve bunlar tekrar ışıma yaparak saçılan alanları oluştururlar. İndüklenen akımlar düzgün değildirler ve eğer hedef nesnesi elektriksel olarak büyük ise, saçılım karakteristiği, *saçılım merkezleri* olarak adlandırılan farklı noktalarda yoğunlaşma eğiliminde olurlar. Aslında, elektriksel olarak büyük bir hedeften kaynaklanan toplam saçılım alanı birçok durumda, bu saçılım merkezlerinin cevaplarının doğrusal süperpozisyonu olarak yaklaşım edilebilir.

Her bir saçılım merkezi cevabının gerisaçılım karakteristiği, gelen dalganın frekansına ve radarın hedefe göre olan pozisyonuna bağlıdır. Toplam M tane bu tip mekanizmadan oluşan bir hedeften kaynaklanan toplam saçılım, verilen bir aydınlatma frekansı ve bakış açısı için, aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

$$E(f,\theta,\phi) = \sum_{m=1}^{M} E_m(f,\theta,\phi) \tag{3.17}$$

burada, $E(f,\theta,\phi)$ toplam saçılan alanı, $E_m(f,\theta,\phi)$ m'inci saçılım merkezinin yayılıma bağlı faz bilgisini içeren karmaşık saçılan alanı, f frekansı, θ azimut açısını ve ϕ elevasyon açısını temsil etmektedir. Tabi ki E ve E_m, hedefin aydınlatılma yönü olan (θ,ϕ)'ye bağlıdır.

SAR camiasında hedef ile ilgili yapılan diğer bir genel varsayım da, her bir saçılım merkezinin noktasal saçıcılar olarak kabul edilebileceğidir [5, 12, 16]. Noktasal saçıcılar tanımında, ilk olarak bunların nişan-çizgisi (line-of-sight) saçıcılar olduğu kabul edilir. Nişan-çizgisi terimi, radardan noktasal saçıya ve geriye olan sinyal yolunun direkt yol olduğu anlamına gelir. Bu varsayım çoklu-yol etkileri, kenar dalgaları etkileri gibi etkileşimler gösteren gerçek hedeflerin doğru modellenemeyeceği anlamına gelir. Bununla beraber, varsayımının bu kısıtlamaları, SAR/TSAR görüntü oluşturma açısından problem teşkil etmez. Bu varsayım aynı zamanda, noktasal saçıcının fazının, saçıcıdan faz merkezine olan uzaklığının doğrusal fonksiyonu olduğu anlamına gelir. Dolayısıyla, bu tip bir saçıcının radar tarafından görülen frekans cevabı $E_m(f)$ aşağıdaki gibi gösterilebilir;

$$E_m(f) = A_m \exp(-j2\pi f T_m) \tag{3.18}$$

burada A_m hedef gerisaçılım sinyalinin genliğini belirten karmaşık sabit, T_m radar sinyalinin radardan hedefteki m'inci saçılım merkezine gidip-gelmesinde geçen zamanı belirtmektedir. Radardan noktasal saçıcıya olan mesafe R_m ise, zaman gecikmesi ile menzil arasındaki bağıntı, sabit dalga yayılım hızı için

$$T_m = \frac{2R_m}{c} \tag{3.19}$$

ile hesaplanır. λ dalgaboyu ile tanımlanan radyal uzamsal frekansın (ya da dalgasayısının) çift-yol dalga yayılımı için ifadesi şu şekilde tanımlanırsa;

$$k_r = \frac{4\pi}{\lambda} \tag{3.20}$$

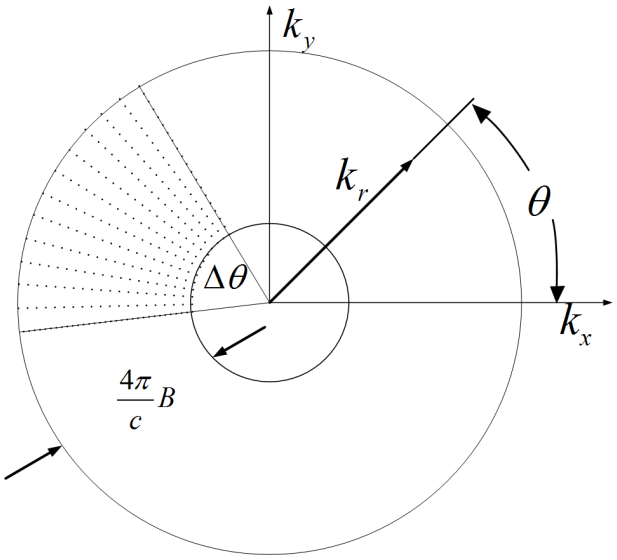
bu durumda, Denklem (3.17)'de verilen toplam hedef saçılımının ifadesi şu şekilde gösterilebilir;

$$E_{\theta,\phi}(k_r) = \sum_{m=1}^{M} A_m \exp(-jk_r R_m) \tag{3.21}$$

Özet olarak, belirli bir (θ, ϕ) bakış açısında, önceki bölümde anlatılan darbe sıkıştırma teknikleri ile hedeflerin $e_{\theta,\phi}(r)$ ile gösterilebilecek yüksek çözünürlüklü 1B *menzil profilleri* elde edilebilir ve bu profillere FD uygulanarak Denklem (3.21)'de verilen frekans cevabı $E_{\theta,\phi}(k_r)$'in uzamsal frekans örnekleri toplanabilir.

3.2.1.7. Veri Toplamının Uzamsal Frekans Gösterimi

Elevasyon açısının $\phi_0 = 0$ gibi bir değerde sabit tutularak, hedef ile radar arasında sadece azimutta açısal değişimin sağlandığı 2B veri toplamını göz önüne alalım. k_r ve θ ile tanımlanan 2B uzayı görselleştirmek için, Şekil (3.11)'de görülen kutupsal koordinat sistemi ele alınabilir. k_r koordinatı radyal bileşene, θ da açısal olana karşılık gelmektedir. Azimut açısı θ'ın sabit aralıklarla değiştiğini ve toplamda $\Delta\theta$ kadarlık açının tarandığını kabul edelim. Simgelemesel uygunluk için, $\phi_0 = 0$ için $\Lambda(k_r, \theta) = E(k_r, \theta, \phi_0)$ olacak şekilde 2B karmaşık bir fonksiyon tanımlayalım. Bu durumda, belirli bir k_r ve θ noktasında, gerisaçılan alanın genlik ve faz ölçümü $\Lambda(k_r, \theta)$'ın bir ayrık örneğine tekabül eder. $\Lambda(k_r, \theta)$'den görüntüleme sahnesinin 2B karmaşık yansıtırlık fonksiyonu $g_p(x, y)$ elde edilebilir. Bir hedefin yansıtırlık fonksiyonu, hedef yansıtırlığının uzamsal dağılımıdır [81] ve genel olarak 3B karmaşık bir fonksiyon $g(x, y, z)$ ile gösterilir. 2B görüntülemede tahmin edilmek istenen uzamsal yansıtırlık fonksiyonu $g_p(x, y)$ ise, 3B yansıtırlık fonksiyonu $g(x, y, z)$'in, radarın aşağı-menzil ve çapraz-menzil eksenleri ile tanımlanan bir düzlem üzerine izdüşümünü temsil etmektedir.



Şekil 3.11. 2B SAR veri toplamının uzamsal frekans koordinatlarında gösterimi. Her bir nokta tek bir sayısal örneği temsil eder. Dalgaşeklinin bantgenişliği B, halka genişliğini, bakış açıları $\Delta\theta$ da açısal genişliğini belirlemektedir.

Şekil (3.11)'in kutupsal örnekleme şemasındaki her bir radyal kesit, belirli bir bakış açısındaki frekans taramasına denk gelir. İletilen dalgaşeklinin bantgenişliği B dairesel halkanın genişliğini, gözlem açıları da $\Delta\theta$ açısal kapsamını belirler. Veri toplama düzlemi (k_r, θ) ile uzamsal (görüntü) düzlemi (x, y) arasındaki ilişkiyi kurmak için Fourier dönüşümünün rotasyonel özelliğinden faydalanılır. Bu özellik, uzamsal düzlem (x, y)'deki yön (oryantasyon) açısı θ'nın, dönüşüm düzlemi (k_x, k_y)'deki yön açısı ile aynı olduğunu belirtir. Bu nitelik ile her bir gözlem noktasının radyal kesitteki uzamsal frekans örnekleri, 2B uzamsak frekans düzlemine aşağıdaki gibi basit bir kutupsaldan-dikdörtgensele dönüşümü ile atanabilir;

$$k_x = k_r \cos\theta \tag{3.22}$$

ve

$$k_y = k_r \sin\theta \tag{3.23}$$

burada k_x k_x-yönündeki uzamsal frekans koordinatını, k_y de k_y-yönündeki uzamsal frekans koordinatını göstermektedir. Bununla birlikte, sahnenin 2B karmaşık yansıtırlık fonksionu $g_p(x,y)$, eşdeğer olarak, sahneye 2B FD uygulanması sonucu elde edilen uzamsal frekans düzlemi verisi $G_p(k_x,k_y)$ ile de temsil edilebilir, yani

$$G_p(k_x,k_y) = \mathcal{F}[g_p(x,y)] \tag{3.24}$$

burada $\mathcal{F}$, FD'nü temsil etmektedir. Bu durumda, Denklem (3.22) ve (3.23)'deki dönüşümler, görüntüleme sahnesinin 2B karmaşık yansıtırlık fonksionu $g_p(x,y)$'in, 2B uzamsal frekans düzlemi $G_p(k_x,k_y)$'de incelenebilmesine imkân tanır. SAR veri toplamı ve işleminin bu şekilde yorumlanması, birçok modern SAR görüntü oluşturma algoritmalarının temelini oluşturmaktadır.

3.2.1.7. Örnekleme Gereksinimleri

Pratikte, bir hedefin yansıtırlık fonksiyonu uzamsal olarak sınırlıdır. Bu şu anlama gelir; $g_p(x,y)$'nin tam anlamıyla tekrar oluşturulması için, $\Lambda(k_r,\theta)$'in tüm k_r ve θ'lar boyunca örneklenmesi gerekir. SAR veri toplamında ölçüm verisi Λ, k_r ve θ'da kısıtlı bantgenişliği ve açısal kapsam boyunca ayrık olarak örneklendiği için, sahnenin uzamsal frekans verisi $G_p(k_x,k_y)$'in ancak kısıtlı bir alt kümesi elde edilebilir. Bu sebeble oluşturulan sahne görüntüsü kısıtlı çözünürlük, örtüşme gibi etkilere maruz kalır.

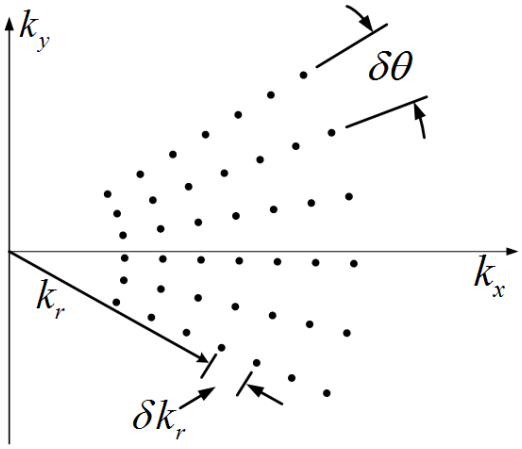
Temel Fourier analizinden, bir düzlemdeki çözünürlüğün, diğer düzlemdeki kapsam ile belirlendiği bilinmektedir. Bu prensip kullanılarak, SAR veri toplamının frekans düzlemindeki veri kapsamları belirlenebilir ve Denklem (3.4) ve Denklem (3.8)'de verilen görüntü çözünürlük formülleri kolayca elde edilebilir. Burada, bu analiz, düzlemleri tersleyerek, verilen bir hedef geometrisi için örtüşme (bozulma) içermeyen görüntüleme yapmak için gerekli frekans ve açısal örnekleme kriterlerini elde etmek için yapılacaktır. Uzamsal frekans verileri için Nyquist kriterleri şu şekildedir;

$$\delta k_x \leq \frac{2\pi}{\Delta x} \tag{3.25}$$

ve

$$\delta k_y \leq \frac{2\pi}{\Delta y} \tag{3.26}$$

Burada δk_x ve δk_y uzamsal frekans düzleminde, müsade edilen maksimum örnek mesafelerini, Δx ve Δy ise menzil ve çapraz-menzil yönlerinde müsade edilen maksimum görüntü boyutlarını göstermektedirler. Bu kriterleri, frekans ve açısal yönlerindeki örnekleme adımlarını cinsinden ifade etmek için Şekil (3.12)'de görülen kutupsal örnekleme şemasından yararlanılabilir.



Şekil 3.12. 2B SAR veri toplamının kutupsal örnekleme şeması.

Öncelikle, tek bir açısal noktada yapılan frekans ölçümlerinin, k_x eksenine izdüşümü göz önüne alınarak δk_x ile δk_r arasındaki ilişki belirlenebilir. Her bir örneğin izdüşümü $k_x = k_r \cos\theta$ ile ifade edilir ve küçük θ için $k_x = k_r$ şeklinde olur. Bu şu anlama gelir; eğer $\Delta\theta$ yeteri kadar küçük ise, görüntünün k_x yönündeki davranışı, k_r'deki örnekleme parametreleri ile belirlenebilir. Böylece, $\delta k_x = \delta k_r$ olur ve frekans verisinin toplam N noktada ve B bantgenişliğinde toplandığı kabul edilerek, k_x-eksenindeki verilerin örnek aralığı şu şekilde yazılabilir;

$$\delta k_x = \frac{4\pi B}{cN} \tag{3.27}$$

Bu durumda, Nyquist kriterini sağlayan frekans örnekleme adımı, yani $\delta f = B/N$, Denklem (3.25)'den aşağıdaki şekilde elde edilir;

$$\delta f \leq \frac{c}{2\Delta x} \tag{3.28}$$

Daha sonra, görüntünün çapraz-menzil koordinatı y'deki davranışını belirlemek için, Şekil (3.12)'de sabit bir radyal uzamsal frekans k_r ile tanımlanan yay boyunca olan kesit göz önüne alınabilir. Böyle bir yayın k_y-eksenine izdüşümü $k_y = k_r \sin\theta$'dır ve küçük θ için $k_y = k_r\theta$ olur. Dolayısıyla görüntünün bu eksendeki karakteristiği, hem k_r hem de θ'daki örneklemeye bağlıdır. Bu durumda, k_y'deki örnekleme adımı boyutu $k_r\delta\theta$ olur. Buradan, Denklem (3.26)'daki Nyquist kriteri şu formda yazılabilir;

$$\delta k_y = k_r\delta\theta \leq \frac{2\pi}{\Delta y} \tag{3.29}$$

Bu kriterin tüm bantgenişliğinde sağlanması için, f'in maksimum değeri olan f_{max} değeri seçilmelidir. Bu durumda, açısal örnekleme gereksinimi şu halde edlde edilir;

$$\delta\theta \leq \frac{\lambda_{min}}{2\Delta y} \tag{3.30}$$

burada $\lambda_{min} = c/f_{max}$'dır.

3.2.2. Yakın-alan Monostatik SAR/TSAR Görüntüleme

Bu tez çalışmasında temel olarak, tek bir TX/RX antene sahip ve SFCW radarı kullanan monostatik görüntüleme sistemleri üzerinde durulmuştur. Ancak, monostatik ölçümün zayıf izolasyona sahip olmasından dolayı, pratik uygulamalarda genellikle yarı-monostatik diye adlandırılan birbirine yakın konumlandırılan ayrı TX ve RX antenleri kullanılmıştır. Çok küçük bistatik açının oluştuğu bu tip veri toplama

geometrileri için, monostatik görüntüleme formülasyonlarının kullanımının, görüntü kalitesini düşürücü önemli etkilerinin olmadığı bilinmektedir. Bu sebeble, ilerleyen kısımlardaki formülasyonlar, monostatik geometri kabul edilerek yapılacaktır.

Yine tez çalışmasının deneysel kısmında, ölçüm verileri çoğunlukla yansımasız odada, yakın alan TSAR tekniği ile toplanmıştır. Etkin bir görüntülemeyi başarabilmek için, öncelikle, bu tip laboratuvar ortamında VNA ile ölçülen saçılım verisinin (örneğin S_{11}), hedeften saçılan elektrik alan ile olan ilişkisi belirlenmelidir. Bu sebeble, izlenecek kalibrasyon prosedürüne göre, ölçüm verilerinden, sadece hedefe ait geri-saçılım verileri elde edilmeli ve bu veriler algoritmaya giriş olarak uygulanmalıdır. Dolayısıyla, izleyen bölümde, monostatik geometriler için frekans düzlemi gerisaçılım verisinin kalibrasyonu ile ilgili iki farklı prosedür anlatılacaktır.

3.2.2.1. Kalibrasyon Teknikleri

Kalibrasyon, ölçüm düzeneğinin zaman gecikmesini ve istenmeyen yankı sinyalini hesaba katmak ve ayrıca radar, iletim kabloları/dalgakılavuzları ve antenlerdeki kayıpları kompanze etmek için yapılır.

Arkaplan Çıkarımı Yapılmadan Kalibrasyon

Bu kalibrasyon prosederünde, arkaplan yansımasının hedef yansımasına etkisinin çok az ve ihmal edilebilir olduğu varsayılarak, hedefin olmadığı arkaplanın gerisaçılım ölçümü yapılmaz. Görüntülenmek istenen hedef hacminin merkez noktasına, bir kalibrasyon nesnesi (genellikle metal bir küre) yerleştirilir ve nesnenin uzak-alan geri-saçılım verisi $E_S^{cal}(f)$, rasgele bir bakış açısı için ölçülür. Bu referans sinyal, kürenin rotasyonel simetriğe sahip gerisaçılım karakteristiğinden dolayı, diğer tüm ölçüm açıları için sabit alınır. Ölçülen bu kompleks veri, daha sonra yapılacak olan hedef ölçümleri $E_S^{tar}(f)$ için referans olarak kabul edilir. Yani VNA ile ölçülen saçılım parametresi $E_S(f)$'in ifadesi şu şekildedir;

$$E_S(f) \equiv \frac{E_S^{tar}(f)}{E_S^{cal}(f)} \tag{3.31}$$

burada $E_S^{tar}(f)$ ve $E_S^{cal}(f)$ sırasıyla hedef ve kalibrasyon nesnesinden saçılan elektrik alanlardır. Bu saçılım verisi, görüntüleme amaçları için, direkt olarak hedeften saçılan veri olarak alınabilir. Fakat, RKA kestirimi gibi uygulamalarda hedeften saçılan alanın şiddetini tam olarak belirlemek için, bu verinin genliği ile kalibrasyon nesnesine ait analitik saçılım çözümünün genliği çarpılmalıdır.

Arkaplan Çıkarımı ile Kalibrasyon

Bu kalibrasyon prosedüründe ise, sadece hedefe ait olan geri-saçılım verisi şu şekilde elde edilir;

$$E_S(f) = \frac{E_S^{tar}(f) - E_S^{bkg}(f)}{E_S^{cal}(f) - E_S^{cbkg}(f)} E_S^{cal,exact}(f) \tag{3.32}$$

burada;

$E_S^{tar}(f)$: hedefin olduğu durumdaki geri-saçılım verisi

$E_S^{bkg}(f)$: hedef ölçümlerinde kullanılan arkaplanın geri-saçılım verisi

$E_S^{cal}(f)$: kalibrasyon nesnesinin geri-saçılım verisi

$E_S^{cbkg}(f)$: kalibrasyon nesnesi ölçümünün arkaplanın geri-saçılım verisi

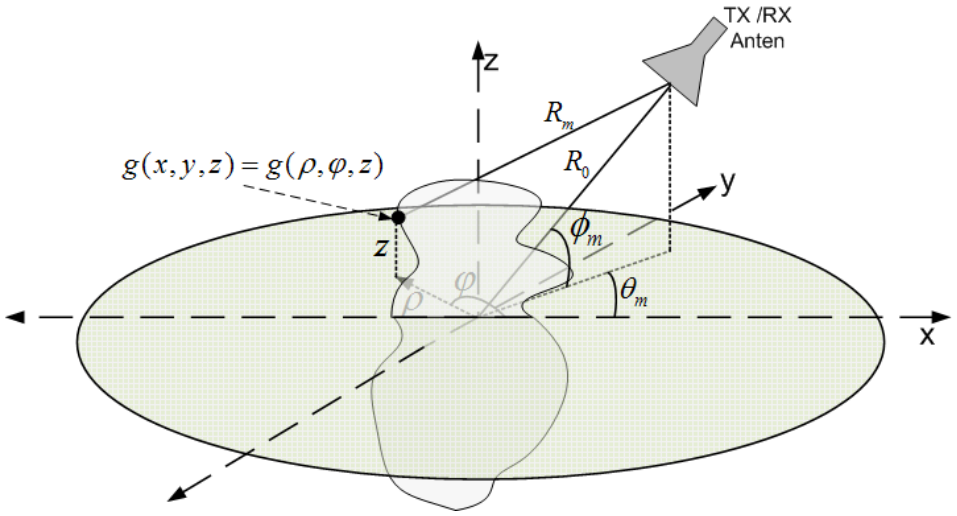
$E_S^{cal,exact}(f)$: kalibrasyon nesnesinin analitik saçılım çözümünün verisi

Yani, hedef ölçümleri ile birlikte toplam 4 farklı ölçüm verisi elde edilmelidir. Daha sonra, kullanılan kalibrasyon nesnesinin geri-saçılım alan çözümü hesaplanır ve Denklem (3.32)'deki formül uygulanarak görüntülenmek istenen hedefe ait gerisaçılım verisi elde edilebilir.

3.2.2.2. Görüntüleme Geometrisi

Başla-dur yaklaşımını kabul ederek, tek bir bakış açısı noktasındaki monostatik SAR/TSAR veri toplama geometrisi Şekil (3.13)'deki gibi gösterilebilir. Sahne orijini, sağ-el kartezyen/silindirik koordinat sisteminde $(0,0,0)$ olarak

tanımlanmıştır. Hedef merkezinden R_0 uzaklıkta konumlandırılan bir radar anteni, belirli bir $(\theta_m, \emptyset_m)$ gözlem açısı ile yakın-alanda bulunan hedefi aydınlatmaktadır. θ_m ve $\emptyset_m$ anten konumunun sırasıyla *x*-eksenine göre ölçülen *azimut* açısını ve *xy*-düzlemine göre ölçülen *elevasyon* açısını ifade etmektedir. Anten bu gözlem noktasında, hedefe, yüksek çözünürlüklü (yani geniş-bant) radar dalgaşekli gönderir ve geriyansıyan sinyaller zaman veya frekans düzleminde ölçülür. Daha sonra hedef ve anten arasındaki bağıl hareket ile farklı bakış açıları sağlanarak işlem tekrarlanır. İyi bilindiği üzere, 2B yansıtırlık görüntüleri, 1B sentetik açıkıklık ve geniş-bant radar ile oluşturulabilmektedir. Benzer şekilde, 3B yansıtırlık görüntüleri oluşturmak için, 2B bir açıklığın sentezlenmesi gerekir. Yaygın olarak kullanılan 2B tarama geometrileri, silindirik, küresel ve düzlemseldir. SAR'da bu tarama geometrileri anten harkeeti ile, TSAR'da da hedefin antene göre istenilen açı durumlarını sağlayacak hedef döndürme veya yer değiştirme işlemleri ile sağlanmaktadır. Hedefin, farklı bakış perspektiflerindeki bu gerisaçılım verileri, hedef hakkında farklı bilgiler sağlar. Radar görüntülemenin asıl amacı, bu dönen sinyalleri kullanarak, her bir hedef saçıcısının radar yansıtırlığı $g(x,y,z)$'yi uzamsal koordinatların bir fonksiyonu olarak tahmin etmektir. Tahmin edilen bu görüntü fonskiyonu $\hat{g}(x,y,z)$, radar verisindeki kısıtlılıktan dolayı $g(x,y,z)$'in tam seçik olmayan (bulanık) bir gösterimi olacaktır. Sadelik için, ilerleyen bölümlerde tahmin edilen görüntü fonksiyonları için de $g(x,y,z)$ notasyonu kullanılacaktır.



Şekil 3.13. 3B Monostatik SAR/TSAR veri toplama geometrisi.

3.2.2.2. Uzamsal Frekans Düzlemi

Her bir gözlem noktası için, uyumlanmış-filtre tabanlı bir radar sistemi, radar yankı şiddetlerinin, menzile göre fonksiyonunu belirten karmaşık değerli *menzil profili* $e(r)$'yi çıktı olarak üretir. Adım-frekanslı radar sistemleri ise, direkt olarak frekans düzlemi verisi $E(k_r)$'yi ölçerler. Bu iki veri çıktısı birbirlerine 1B FD ile bağlıdırlar, yani;

$$E(k_r) = \mathcal{F}[e(r)] = \int_{-\infty}^{\infty} e(r)\exp(-jk_r r)dr \tag{3.33}$$

Burada r metre cinsinden menzili, $k_r = 4\pi/\lambda$ radyan/metre cinsinden uzamsal frekans değerini, λ da metre cinsinden iletilen/alınan dalgaboyunu göstermektedir. Radarın belirli bir açısal koordinatında ölçülen bu frekans düzlemi verisi $E(k_r)$, hedefin 3B frekans uzayı $G(k_x, k_y, k_z)$'de aynı açısal koordinata göre yönelmiş kutupsal çizgilerine denk gelir (bkz. Kısım 3.2.2.4'deki Gİ algoritması formülasyonu). Bu durumda, (k_r, θ_m, ϕ_m) noktalarında toplanan uzamsal frekans verileri, karşılık gelen frekans düzlemi noktaları (k_x, k_y, k_z)'ye aşağıdaki dönüşüm formülleri ile atanabilir;

$$k_x = k_r \cos(\theta_m)\cos(\phi_m) \tag{3.34}$$

$$k_y = k_r \sin(\theta_m)\cos(\phi_m) \tag{3.35}$$

$$k_z = k_r \sin(\phi_m) \tag{3.36}$$

Dolayısıyla, (k_r, θ_m, ϕ_m) koordinat sistemindeki ölçümler ile hedefin 3B uzamsal frekans spektrumu $G(k_x, k_y, k_z)$'in bir bölümünün örneklenmesi sağlanır. Bunun sonucu olarak ve $g(x, y, z)$ ile $G(k_x, k_y, k_z)$ arasında FD bağıntısının olmasından dolayı, birçok etkin görüntüleme algoritmaları, çok-boyutlu FD tekniklerine dayanılarak geliştirilebilmektedir.

3.2.2.3. Sinyal Modeli

Şekil 3.13'deki geometriyi tekrar göz önüne alarak, antenin tüm hedefi, Denklem (3.31)'e göre kalibre edilmiş bir VNA'dan gelen ve SFCW sinyali ile düzgün olarak aydınlattığını varsayalım. Bu durumda, (x_0, y_0, z_0) konumundaki bir noktasal saçıcı için ölçülen saçılım parametresi şu şekilde ifade edilebilir;

$$E_{\theta_m,\emptyset_m}(k_r) = g(x_0, y_0, z_0)\,\frac{{R_0}^2}{{R_m}^2}\exp\big(-jk_r(R_m - R_0)\big) \tag{3.37}$$

burada R_m anten konumundan noktasal saçıcıya olan menzili, R_0 antenden koordinat sisteminin merkezine olan menzili ve sıfır-faz referans noktasını ve k_r=$4\pi f/c$ çift-yol dalga yayılımı için tanımlanan dalgasayısını ifade etmektedir. Orijin referanslı menzil $r_m = R_m - R_0$ şeklinde tanımlanırsa ve tüm saçıcıların cevapları toplanırsa, toplam saçılan alanın ifadesi;

$$E_{\theta_m,\emptyset_m}(k_r) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} g(x,y,z)\frac{{R_0}^2}{{R_m}^2}\exp(-jk_r r_m)\,dx\,dy\,dz \tag{3.38}$$

olarak yazılabilir. Hedefin düzgün olmayan ışıma ile aydınlatılması durumunda, anten kazanç dizisinin de, Denklem (3.38)'e genlik ağırlığı şeklinde eklenmesi gerekir. Denklem (3.38)'in ölçülen bu frekans verisine 1B TFD uygulanarak, hedefin menzil profili şu şekilde elde edilebilir;

$$\begin{aligned} &e_{\theta_m,\emptyset_m}(r) \overset{\text{def}}{=} \text{IFT}\big\{E_{\theta_m,\emptyset_m}(k_r)\big\} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} g(x,y,z)\frac{{R_0}^2}{{R_m}^2}\delta(r_m - r)\,dx\,dy\,dz \end{aligned} \tag{3.39}$$

Denklem (3.39) yaygın olarak görüntüleme sahnesinin *Radon Dönüşümü* olarak da bilinir. Daha sonra, farklı $(\theta_m, \emptyset_m)$ gözlem açısı kombinasyonları için ölçümler tekrarlanarak, 3B frekans düzlemi verisi $E(k_r, \theta_m, \emptyset_m)$ veya 3B zaman düzlemi verisi $e(r, \theta_m, \emptyset_m)$, SAR/TSAR görüntü oluşturma amaçları için elde edilebilir.

3.2.2.4. Görüntüleme Algoritmaları

Odaklama Operatörüne Dayalı Algoritma

Denklem (3.38)'de verilen ve 3B uzay için $E(k_r, \theta_m, \emptyset_m)$ ile temsil edilebilecek hedef gerisaçılım sinyali, daha genel ifade ile şu formda yazılabilir;

$$E(k_r, \theta_m, \emptyset_m) = \int\int\int_{\overline{\mathbf{V}}} g(\overline{\mathbf{r}}) \frac{{R_0}^2}{{R_m}^2} \exp(-jk_r r_m)\, d\overline{\mathbf{r}} \quad [1] \tag{3.40}$$

burada $\overline{\mathbf{V}}$ hedefin aydınlatılan hacmini, $\overline{\mathbf{r}}$ hedef saçıcılarının vektörel pozisyonlarını $d\overline{\mathbf{r}} = dxdydz = \rho d\rho d\varphi dz = r^2 \cos(\theta) dr d\theta d\phi$ diferansiyel saçılım hacmini göstermektedir. Denklem (3.40)'ın Fourier integraline benzerliğinden dolayı, yansıtırlık fonksiyonu tahmini, bu denklemin ters dönüşümüne benzeyen integrali ile elde edilebilir, yani;

$$g(\overline{\mathbf{r}}) = \int\int\int_{\overline{\mathbf{K}}} E(k_r, \theta_m, \emptyset_m) \frac{{R_m}^2}{{R_0}^2} \exp(jk_r r_m)\, d\overline{\mathbf{K}} \tag{3.41}$$

burada $d\overline{\mathbf{K}} = {k_r}^2 \cos(\emptyset_m) dk_r d\theta_m d\emptyset_m$. 3B hedef yansıtırlık fonksiyonunun silindirik koordinatlarda $g(\rho, \varphi, z)$ hesaplanması için aşağıda verilen integralin nümerik olarak hesaplanması gerekir;

$$g(\rho, \varphi, z) = \int_{k_r} {k_r}^2 dk_r \int_{\emptyset_m} \cos(\emptyset_m) d\emptyset_m \int_{\theta_m} E(k_r, \theta_m, \emptyset_m) \frac{{R_m}^2}{{R_0}^2} \exp(jk_r r_m) d\theta_m \tag{3.42}$$

burada yakın-alan odaklama operatörü $\xi(\rho, \varphi, z;\, k_r, \emptyset_m) = \frac{{R_m}^2}{{R_0}^2} \exp(jk_r r_m)$ ve $r_m = R_m - R_0$'dır. (ρ, φ, z) koordinatındaki bir noktaya olan menzil R_m ise Şekil (3.13)'deki geometriden açık olarak şu şekilde yazılabilir;

[1] Vektörler koyu ve üstü çizgili olarak gösterilmiştir.

$$R_m = \sqrt{(R_0 \cos \emptyset_m)^2 + \rho^2 - 2R_0 \rho \cos \emptyset_m \cos(\varphi - \theta_m) + (z - R_0 \sin \emptyset_m)^2}$$

$$= \sqrt{{R_0}^2 + \rho^2 + z^2 - 2R_0[\rho \cos \emptyset_m \cos(\varphi - \theta_m) + z \sin \emptyset_m]} \qquad (3.43)$$

Odaklama operatörü, ölçülen sinyalin hedefe gidip geri gelmesi süresince oluşan dalga yayılım etkilerini dekonvolüsyon eder. Ölçülen sinyalin, tüm frekans ve açı değerleri için, bu odaklama operatörü ile çarpılarak toplanması sonucu, yakın-alan hedef görüntüsü oluşturulur. Kutupsal koordinatlarda elde edilen bu görüntü, daha sonra interpolasyon şemaları kullanılarak kartezyen koordinatlara aktarılır. Denklem (3.42)'deki üstel fonksiyonda, yakın-alan faz geçmişi yaklaşım yapılmadan tam olarak alınmıştır ve genlikteki ikinci derece terimler de boş-uzay dalga yayılım kayıplarını modellemek içindir. Bu sebeble, algoritma yakın-alan ve rasgele SAR/TSAR tarama geometrilerinde etkili olarak kullanılabilir. Ancak, algoritmanın bilgisayar işlem ve hafıza gereksinimi, özellikle elektriksel olarak büyük hedeflerin olduğu durumlarda, 3B ve uzun integral hesaplamalar içermesinden dolayı yüksektir. Bununla birlikte, Denklem (3.42)'deki azimuttaki dairesel konvolüsyan işlemi, Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kodlari ile hasaplanarak algoritmanın işlem ve hafıza yükü azaltılabilir.

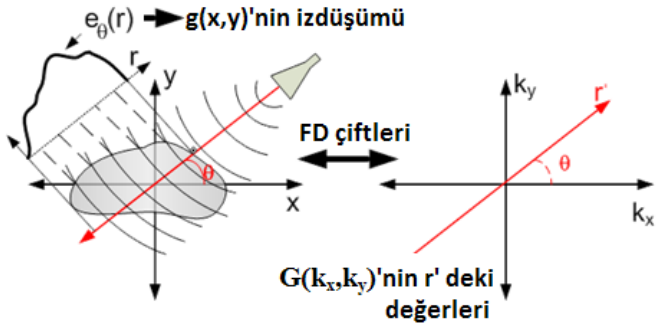
Geriye-İzdüşüm (Gİ) Algoritması

SAR/TSAR görüntüleme metotları arasında, dairesel açıklık verilerine uygulanabilen ve belki de bu iş için en çok tercik edileni, Gİ algoritmasıdır. İlk olarak medikal görüntüleme için ve tomografik prensipler ile formüle edilmesine karşın, sonraki yıllarda SAR görüntülemeye uyarlanmıştır [26]. Algoritma, menzil göçettirme etkilerini veya diğer bir ifade ile ışınımsal yakın-alan etkilerine bağlı oluşan odak bozulumlarını tam olarak kompanze edebilen yapıya sahiptir. Her ne kadar Gİ'nin orijinal formülasyonu düzlemsel dalgaönü için çıkarılmış olsa da, algoritma daha sonra elektromanyetik dalga eğikliğini de tolere eden daha genel bir formülasyona genişletilmiştir [27, 28]. Bu bölümde, Gİ algoritmasının monostatik geometriler için 3B formülasyonu, yakın-alan etkilerini ve kalibrasyon işlemini de içerecek şekilde formüle edilecektir.

Formülasyona geçmeden önce, algoritmanın çıkarımında kritik rol oynayan *izdüşüm-kesiti (projection-slice)* teoremine kısaca değinmek gerekir. Bu sebeble, öncelikle Denklem (3.39)'da verilen ve her bir gözlem noktası için ölçülen menzil profili $e_{\theta_m,\emptyset_m}(r)$'yi göz önüne alalım. İzdüşüm-kesiti teoremine göre, $(\theta_m, \emptyset_m)$ açısında ölçülen menzil profilinin 1B FD, hedef yansıtırlığının 3B FD'nün aynı yönelime sahip doğrusu boyunca hesaplanan değerlerine karşılık gelir [82]. Yani, teorem şu eşitliği ispatlamaktadır;

$$E_{\theta,\phi}(k_r) = G(k_r, \theta, \phi) \tag{3.44}$$

Bir başka ifade ile $G(k_x, k_y, k_z)$'nin örneklenmiş gösterimi, farklı bakış açılarında ölçülen izdüşümlerin (yani menzil profillerinin) FD verisi $E_{\theta,\phi}(k_r)$ ile elde edilebilmektedir. Teoremin 2B görüntüleme için açıklaması Şekil (3.14)'deki grafikte görülmektedir.



Şekil 3.14. 2B için izdüşüm-kesiti teoreminin izahı.

Gİ algoritmasının çıkarımına, hedef yansıtırlık fonksiyonunun Kartezyen koordinatlarındaki TFD ifadesi yazılarak başlanabilir;

$$g(x,y,z) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} G(k_x, k_y, k_z)\exp\left[j\left(k_x x + k_y y + k_z z\right)\right]dk_x dk_y dk_z \tag{3.45}$$

Denklem (3.45), uzamsal frekans verisinin toplandığı $(k_r, \theta_m, \emptyset_m)$ koordinat sistemi için şu hale dönüştürülebilir;

$$g(x,y,z) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2}\int_{-\pi}^{\pi}\int_{0}^{\infty} G(k_r,\ \theta_m, \emptyset_m)\exp(jk_r r_m){k_r}^2\cos(\emptyset_m)dk_r\ d\theta_m d\emptyset_m \quad (3.46)$$

Denklem (3.44) kullanılarak, Denklem (3.46)'daki ters Fourier bağıntısı şu hale gelir;

$$g(x,y,z) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2}\int_{-\pi}^{\pi}\int_{0}^{\infty} E_{\theta_m,\emptyset_m}(k_r)\exp(jk_r r_m){k_r}^2\cos(\emptyset_m)dk_r\ d\theta_m d\emptyset_m \quad (3.47)$$

Uzamsal frekans k_r negatif veriler içermediğinden, Denklem (3.47)'nin içteki integrali, $Q_{\theta_m,\emptyset_m}(k_r) = E_{\theta_m,\emptyset_m}(k_r){k_r}^2\cos(\emptyset_m)$ şeklinde tanımlanabilecek fonksiyonunun, 1B TFD'nün r_m'de hesaplanması olarak görülebilir. $q_{\theta_m,\emptyset_m}(r)$, bu fonksiyonun TFD olarak tanımlanırsa, Gİ algoritmasının son ifadesi aşağıdaki şekilde elde edilir;

$$g(x,y,z) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2}\int_{-\pi}^{\pi} q_{\theta_m,\emptyset_m}(r_m)\, d\theta_m d\emptyset_m \quad (3.48)$$

Algoritmanın SFCW radar sistemi için gerçekleştirim aşamaları şunlardır:

i) Hedef yansıtırlık değerlerini tutmak için sıfırlardan oluşan bir $g(x,y,z)$ görüntü matrisi tanımla.
ii) Toplanan uzamsal frekans verisi $E_{\theta_m,\emptyset_m}(k_r)$'yi k_r ile çarp.
iii) Sonucun 1B TFD'nü alarak menzil profili $e_{\theta_m,\emptyset_m}(r)$'nin filtrelenmiş versiyonu olan $q_{\theta_m,\emptyset_m}(r)$'yi elde et.
iv) Görüntü hacim bölgesindeki her bir piksel konumu için r_m ve R_m menzil değerlerini hesapla ve pikselin $\frac{{R_m}^2}{{R_0}^2} q_{\theta_m,\emptyset_m}(r_m)$ değerini interpolasyon yaparak elde et.
v) İnterpole edilmiş değerleri $g(x,y,z)$'ye ekle.
vi) (i)-(v) adımlarını diğer gözlem açı kombinasyonları $(\theta_m, \emptyset_m)$ için tekrarla.

Gİ algoritması, birçok SAR/TSAR görüntüleme uygulamaları için faydaları kanıtlanmış bazı önemli özelliklere sahip olduğundan, radar camiasında yoğun ilgi görmektedir. Örneğin, algoritma, seri işlem doğasından ötürü, düzgün-örneklenmiş ve düz doğrusal sentetik tarama açıklığı kısıtlamasını getirmez. Daha açık idafe ile,

Gİ algoritmasında, her bir 1B menzil profili seri olarak işleme tabi tutulur ve tüm görüntü düzlemine diğer profillerden bağımsız olarak geriye izdüşüm edilir. Dolayısıyla, algoritma rasgele güzergâhlı veri toplama geometrilerine uygulanabilmektedir. Bu sıralı işlem özelliği, görüntüleme işleminin, tüm sentetik açıklık noktalarındaki ölçümler toplanmadan bile başlayabileceği ve dolayısıyla algoritmanın gerçek-zamanlı çalışabileceği anlamına da gelmektedir. Ek olarak, Gİ algoritmasında, hedef sahnesinin istenilen alt bölgeleri daha detaylı görüntüleme yapmak üzere kolaylıkla seçilebilmektedir. Gİ algoritmasının çeşitli SAR uygulamalarındaki kullanımı için [83, 84, 85]'deki kaynaklara başvurulabilinir.

Sıkıştırılmış Algılama Tabanlı Görüntüleme

Bu kısımda, sinyal sıkıştırma/sıkıştırmayı-açma konusuna çok yeni bir yaklaşım getiren ve son yıllarda çeşitli mühendislik alanlarının problemleri için artan bir ivme ile uygulanmaya çalışılan, sıkıştırılmış algılama (SA) teorisinin SAR/TSAR görüntülemede kullanımı için gerekli teorik altyapı bilgileri oluşturulacaktır. SA tekniğinin SAR/TSAR görüntülemeye uygulanması, henüz gelişim ve test aşamasında olduğundan dolayı, buradaki SA-tabanlı SAR/TSAR görüntüleme formülasyonu, 2B ve monostatik sistemler kabul edilerek yapılmıştır.

Sıkıştırılmış Algılamanın Temelleri

SA teorisi kısaca şunu ifade etmektedir; $g \in \mathbb{C}^Q$ vektörü şeklinde ifade edilen kesikli bir sinyal, herhangi bir ortonormal tabanda sıkıştırılabilir (yani seyrek, spars) olduğu sürece, Nyquist oranından çok daha az sayıdaki örnekleri ile tam olarak tekrar oluşturulabilir. Bu durumda, g şu şekilde gösterilebilir;

$$g = \boldsymbol{\Psi}\alpha \quad [2] \qquad (3.48)$$

burada $\boldsymbol{\Psi} \in \mathbb{C}^{Q\times Q}$ taban vektörlerini sütunlar halinde tutan matrisi ve $\alpha \in \mathbb{C}^Q$ ise sadece $S \ll Q$ sayıda sıfırdan farklı değerleri olan g'nin katsayı dizisini belirtmektedir. SA terminolojisinde sinyallerin, $y = \boldsymbol{\Phi}g$ doğrusal izdüşümler ile

[2] 1B vektör değişkenleri normal, matris değişkenleri ise koyu harflerler ile gösterilmiştir.

toplandığı kabul edilir; burada, $y \in \mathbb{C}^J$ ölçüm örneklerinin vektörüdür ve $J < Q$ olmakla birlikte $\mathbf{\Phi} \in \mathbb{C}^{J \times Q}$ ise ölçüm matrisi olarak adlandırılır. Bu doğrusal ölçüm modeli, y'nin Denklem (3.48)'deki sıkıştırılmış gösterimi dikkate alınarak, şu şekilde de ifade edilebilir;

$$y = \mathbf{\Phi} g = \mathbf{\Phi\Psi}\alpha = \mathbf{\Theta}\alpha \tag{3.49}$$

burada $\mathbf{\Theta} = \mathbf{\Phi\Psi}$ matrisi $J \times Q$ boyutundadır. SA teorisine göre, eğer $\mathbf{\Theta}$, sınırlandırılmış izometri özelliğini (Restricted Isometry Propert-RIP) sağlarsa, bilinmeyen vektor α'nın seyrek yaklaşımı Denklem (3.49)'den elde edilebilir. RIP özelliği de, ölçüm matrisi $\mathbf{\Phi}$ ve gösterim tabanı $\mathbf{\Psi}$ arasındaki karşılıklı faz-uyumsuzluğu (mutual incoherence) ile yakından ilişkilidir [86, 87]. Bu tekrar oluşturma, verilen ölçümler y için, en seyrek $\tilde{\alpha}$ vektörünü arayarak gerçekleştirilebilir ve yaygın olarak, aşağıda ifadesi verilen "ℓ_0 −normlu optimizasyon problemi" olarak adlandırılır;

$$\mathrm{y} = \mathbf{\Phi\Psi}\tilde{\alpha} \text{ koşulu ile } \alpha = \mathrm{argmin}_{\tilde{\alpha}} \|\tilde{\alpha}\|_0 \tag{3.50}$$

burada $\|\cdot\|_0$ ile gösterilen ℓ_0 −normu bir vektördeki sıfırdan farklı eleman sayısını temsil eder. Fakat, bu problemin çözümü, pratikte kolaylıkla elde edilemeyecek türden olan NP-zor (non-deterministic polynomial-time hard) problemdir. Bununla birlikte, seyrek çözüm, alternatif olarak ya ℓ_0 −norm minimizasyonunu ℓ_1 −norm minimizasyon ile değiştirerek, ya da ortogonal uyumlanmış uğraşı (orthogonal matching pursuit-OMP) gibi bir hırslı (greedy) algoritma kullanarak bulunabilir. Şunu da belirtmek gerekir ki, *S*-seyrekli sinyal α'nın bir kararlı, tek çözümü, rasgele gürültü-tarzlı ölçüm matrisleri $\mathbf{\Phi}$ için ve $J \geq O\big(S \log(Q/S)\big)$ koşulunu sağlayan toplam J sayıda ölçümler için yüksek olasılıkla elde edilebilmektedir.

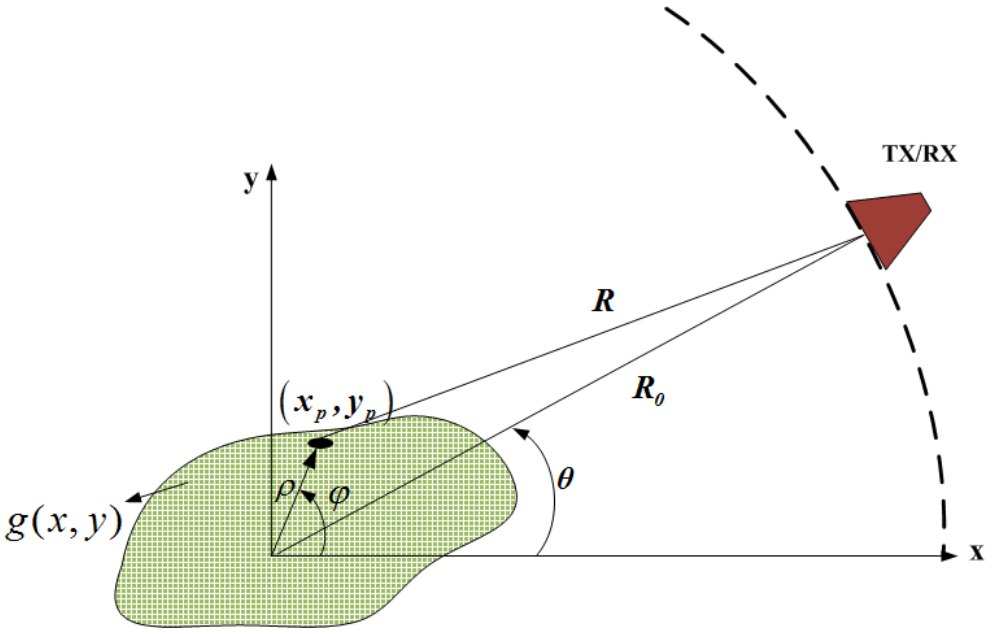
Sistem ve Sinyal Modeli

Şekil (3.15)'de 2B monostatik dairesel açıklıklı SAR/TSAR veri toplama geometrisi görülmektedir. Hedef ile radar anteni arasındaki farklı bakış açıları θ, ya

antenin dairesel bir güzergâh boyunca hareket ettirilmesi ile (SAR) ya da eşdeğer olarak antenin belirli bir konumda sabit tutulup, hedefin kendi ekseni etrafında döndürülmesi ile (TSAR) sağlanır. SAR modunu kabul ederek, $g(x,y)$ yansıtırlık fonksiyonu ile gösterilen hedefin, sahne merkezine sabit bir R_0 uzaklıktaki TX/RX anteni tarafından adım frekanslı dalgaşekli ile aydınlatıldığını varsayalım. Hedefin toplam P sayıda bağımsız noktasal saçıcıdan oluştuğunu ve sıfır-faz noktasının anten çıkışı olduğunu kabul ederek, herhangi bir θ bakış açısında alınan yankı sinyali şu şekilde ifade edilebilir;

$$E_\theta(k_r) = \sum_{p=1}^{P} g_p \exp\left(-jk_r R_p(\theta)\right) \tag{3.51}$$

burada $R_p(\theta) = \sqrt{\left(x_p - R_0\cos(\theta)\right)^2 + \left(y_p - R_0\sin(\theta)\right)^2}$ anten konumundan p'inci saçıcıya olan yakın-alan menzilini, (x_p, y_p) de saçıcı koordinatlarını belirtmektedir. Hedef cevabının farklı bakış açılarında ölçülmesi sonucu, 2B TSAR verisi $\mathbf{E}(\mathbf{k_r}, \boldsymbol{\theta})$ elde edilebilir.



Şekil 3.15. Dairesel tarama için 2B monostatik görüntüleme geometrisi.

Sıkıştırılmış Algılama ile SAR/TSAR Görüntüleme

Frekans ve açısal verilerinin, sırasıyla K ve L noktada toplandığını kabul edelim. Dolayısıyla $K \times L$ boyutunda yankı verisi $\mathbf{E}(\mathbf{k_r}, \boldsymbol{\theta})$ oluşur. 2B görüntüleme sahnesi $M \times N$ piksele bölünürse, Denklem (3.51)'deki alınan sinyalin ifadesi;

$$E\left(k_{r,u}, \theta_v\right) = \sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{M} g(x_{mn}, y_{mn}) \exp\left(-jk_{r,u} R_{mn}(\theta_v)\right) \tag{3.52}$$

burada $R_{mn}(\theta_v) = \sqrt{(x_{mn} - R_0 \cos(\theta_v))^2 + (y_{mn} - R_0 \sin(\theta_v))^2}$ görüntü piksellerinin θ_v bakış açısı için antene olan menziller, (x_{mn}, y_{mn}) piksel koordinatları, $u = 1,2,\dots,K$, $v = 1,2,\dots,L$'dir. Yankı sinyalinin ölçüm matrisi olarak, elemanları $A_{uv}(x_{mn}, y_{mn}) = \exp\left(-jk_{r,u} R_{mn}(\theta_v)\right)$ olan bir $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{KL \times MN}$ matrisini tanımlayalım ve 2B $\mathbf{E} \in \mathbb{C}^{K \times L}$ ve $\mathbf{g} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ matrislerini, sütünlarını alt alta getirerek 1B vektörlere dönüştürelim. Bu durumda, Denklem (3.52) vektörel formda aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$E = \mathbf{A}g + n \tag{3.53}$$

burada n toplanır gürültüyü ifade etmektedir. Hedef yansıtırlığı g'nin S-seyreklikli bir vektör olduğunu, yani sadece $S(S \ll MN)$ sayıda ve sahnenin önemli ölçüdeki bilgisini barındıran sıfırdan farklı elemanları içerdiğini kabul edelim. Bu yansıtırlık fonksiyonu, $\mathbf{\Psi} \in \mathbb{C}^{MN \times MN}$ ortonormal tabanında şu şekilde ifade edilebilir;

$$g = \mathbf{\Psi}\alpha \tag{3.54}$$

burada α, g'nin katsayı dizisidir ve sıfırdan farklı elemanları S sayıdaki en şiddetli saçılım merkezlerini temsil etmektedir. Bu durumda, Denklem (3.53)'de verilen ölçüm sinyalinin doğrusal gösterim modeli;

$$E = \boldsymbol{A\Psi}\alpha + n \tag{3.55}$$

şeklinde elde edilir. SA teorisine göre, seyrek vektör α'yı, ölçüm sinyali E'nin çok küçük sayıdaki örnekleri ile tam olarak tekrar oluşturmak mümkündür. Bunun için, ölçüm matrisi $\mathbf{A}$'nın J $(S \leq J \ll KL)$ sayıdaki satırı ve bunlara karşılık gelen E değerleri, RIP şartını da sağlamak için rasgele biçimde seçilir. Bu durumda, SA tekrar oluşturma işlemi için, ölçüm sinyalinin yeni modeli şu hale gelir;

$$E_p = \boldsymbol{\Phi A \Psi}\alpha + n = \boldsymbol{\Theta}\alpha + n \tag{3.56}$$

burada $\boldsymbol{\Phi} \in \mathbb{R}^{J \times KL}$ $KL \times KL$ boyutlu birim matrisin J satırının rasgele seçimi ile oluşan ortonormal taban matrisini ve $\boldsymbol{\Theta}$ son ölçüm matrisini göstermektedir. SAR/TSAR yankı sinyali için oluşturulan bu model ile, α'nın seyrek yaklaşımı, önceki kısımda belirtilen optimizasyon tekniklerinden biri kullanılarak bulunabilir. Daha sonra ise, bulunan bu değerden, istenilen karmaşık yansıtırlık fonksiyonu g kolaylıkla elde edilebilir.

3.2.2.4. Silindirik Tarama Geometrisi İçin Örnekleme Kriterleri ve Çözünürlükler

Kısım 3.2.2.2'de anlatıldığı üzere, alınan radar verilerinden, hedef sahnesinin görüntülerini oluşturma işleminde kullanılan en yaygın metotlardan biri uzamsal frekans düzleminde çalışmaktır. Veri toplamada, hedef ile radar anteni arasındaki uzamsal ilişkinin değiştirilmesi suretiyle hedefin 3B uzamsal frekans uzayı $G\left(k_x, k_y, k_z\right)$'in bir bölümünün örneklenmesinin yapılabildiği açıklanmıştı. Ek olarak, Kısım 3.2.1.7'deki bilgiler ışığında, sonuç görüntülerindeki uzamsal çözünürlüklerin, tarama geometrisinin uzamsal frekans uzayında oluşturduğu bu veri destek bölgesinin biçimine ve boyutuna bağlı olduğu bilinmektedir. Birçok pratik uygulamalarda, frekans uzayının çok küçük bir bölgesinin gözlemi yapılabilmektedir. Örnek olarak, doğrusal bir sentetik açıklık, düzlemsel bir veri destek bölgesi oluşturur ve genel 3B işlem problemi, bu durumda hedefin 2B görüntülenmesi işlemine indirgenir. 3B görüntüleme amaçlarında ise çoğunlukla düzlemsel, silindirik veya küresel yüzeylerden oluşan 2B sentetik açıklıklar kullanılır.

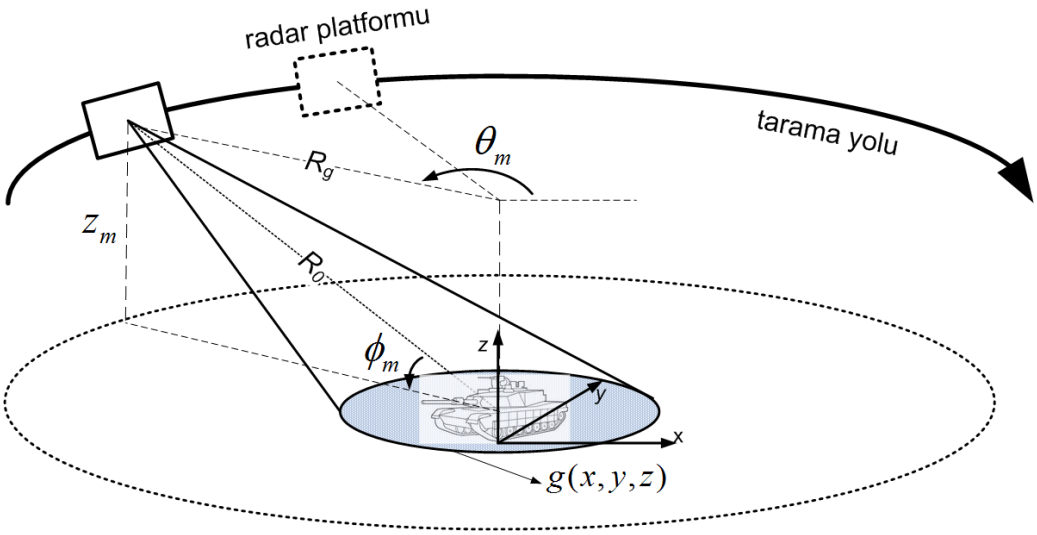
Sonuç görüntülerinin örtüşmeye uğramaması için, görüntülenmek istenen hedefin boyutları ve tarama geometrisi göz önüne alınarak, frekans ve uzamsal ölçüm yönlerindeki veri örnekleme aralıklarının, Nyquist kriterlerini sağlaması gerekir. Bu da uzamsal frekans uzayında, ölçümler sonucu sentezlenen veri destek bölgesinin kapsamları belirlenerek elde edilebilir. Yakın-alan silindirik tarama geometrilerindeki örnekleme kriterleri [88]'de küçük açısal açıklıklar için verilmiştir. Bu kısımda, örnekleme kısıtlamaları, azimutta tam açıklık, yani $360°$ toplam açısal kapsamın olduğu silindirik tarama geometrileri için çıkarılacaktır.

Geniş açı veri toplamının getirdiği bir diğer zorluk da, görüntü çözünürlüklerinin hesaplanması ile ilgidilir. Klasik dar-açı SAR/TSAR'da dar-açı veri ölçümlerinden dolayı, uzamsal frekans düzleminde, yaklaşık olarak kübik yapıda olan küçük bir bölgenin tarandığı kabul edilir. 3B koordinat sisteminin ayrılabilir olduğu bu durumlar için, görüntü eksenlerindeki çözünürlükler birbirinden bağımsızdır ve 2B için Denklem (3.4) ve Denklem (3.7)'de verilen klasik formüller ile hesaplanabilirler. Geniş açı durumunda ise, görüntü çözünürlüklerinin birbirlerine bağımlı olması, klasik formüllerin kullanılmasını engeller. Analitik çıkarımların da zor olduğu bu geniş açı veri toplama durumları için, çözünürlükler nümerik yaklaşımlar ile elde edilebilmektedir. Bu tarz bir çözünürlük hesaplamasına dayalı bir tekniğin işleyişi ile ilgili bilgiler bu kısımın sonunda anlatılacaktır.

Monostatik Dairesel-SAR Görüntülemenin Sistem Modeli

3B monostatik dairesel-SAR görüntülemenin veri toplama geometrisi Şekil 3.16'da görülmektedir. z_m yüksekliğindeği bir anten, R_g yarıçapına sahip hedef-merkezli bir daire boyunca hareket etmektedir. Antenin, azimut açı pozisyonları θ_m'in düzgün örneklenmiş noktalarında adım-frekanslı dalgaşekli gönderdiğini kabul edelim. Yine, görüntülenmek istenen hedef yansıtırlık fonksiyonu $g(x,y,z)$'nin bakış açısı ve frekanstan bağımsız olduğunu varsayalım. Hedef sahne merkezi, Kartezyen koodinatlarda $(0,0,0)$ noktası seçilerek, antenden sahne merkezine nişan-çizgisi (LOS) mesafesi, slant-menzili R_0 diye adlandırılır ve $R_0 = \sqrt{R_g^2 + z_m^2}$ bağıntısı ile hesaplanabilir. z_m yüksekliğine karşılık gelen alçalış (yükseklik) açısı $\emptyset_m$'nin ifadesi de basit olarak $\emptyset_m = \tan^{-1}(z_m/R_g)$ bağıntısı ile bulunabilir.

Dairesel-SAR terminolojisinde, tam-açıklık (yani 360°) azimut ölçümleri, eğer tek bir yükseklik için yapılırsa *tek-geçişli*, farklı yükseklikler için de yapılırsa *çok-geçişli* vei toplama olarak adlandırılır. Çok-geçişli veri toplamıyla, dikey (yükseklik) yönde de çözümleme sağlanarak, hedeflerin 3B görüntüleri oluşturulabilmektedir.



Şekil 3.16. Monostatik dairesel-SAR görüntüleme için veri toplama geometrisi.

Sıfır-faz merkezini anten uçlarından alarak, belirli bir bakış noktası $(\theta_m, \emptyset_m)$'da alınan frekans çeşitlikli yankı sinyali şu şekilde yazılabilir;

$$E_{\theta_m,\emptyset_m}(k_r) = \iiint_{-\infty}^{\infty} g(x,y,z)\exp(-jk_r R_m)dxdydz \tag{3.57}$$

burada $k_r = 4\pi f/c$ ve R_m antenden, aydınlatılan bölgedeki saçıcılara olan menzildir. $(x,y,z) = (\rho,\varphi,z)$ koordinatındaki bir saçıcı için, yakın-alan menzili R_m aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$R_m = \sqrt{\left(x - R_g\cos\theta_m\right)^2 + \left(y - R_g\sin\theta_m\right)^2 + (z - z_m)^2}$$
$$= \sqrt{{R_g}^2 + \rho^2 - 2R_g\rho\cos(\varphi - \theta_m) + (z - z_m)^2} \tag{3.58}$$

Daha sonra, Denklem (3.57)'dekki toplanan uzamsal frekans verisi $E(k_{r,}\theta_m, \emptyset_m)$, önceki kısımda anlatılan görüntüleme tekniklerinden biri kullanılarak, odaklı dairesel-SAR görüntülerine dönüştürülebilir.

Örnekleme Kriterleri

Tekrar oluşturulan görüntülerde, örtüşmeden (aliasing) kaçınmak için, frekans ve uzamsal yönlerdeki örnekleme aralıklarının, Nyquist örnekleme kriterini sağlamaları gerekmektedir. Diğer yandan, geniş-açı SAR/TSAR toplamaları için örnekleme kısıtlamalarının, klasik dar-açı toplamalarında geçerli olanlardan çok daha sınırlayıcı olduğu bilinmektedir. Hatta dairesel-SAR veya tam-açıklıklı döner-tabla TSAR sistemlerinde ise genellikle $360°$'ye kadar azimutsal açıklıkların kullanılması, bu sistemlerde daha da küçük ölçüm adımların kullanılmasının gerektiği anlamına gelmektedir. Örtüşme içermeyen görüntüleme için gerekli örnekleme kısıtlamaları, her bir ölçüm yönü için aşağıda anlatıldığı şekilde hesaplanabilir.

Radyal yönde, verilen bir belirsiz olmayan menzil mesafesi $R_{\max}$ için, Nyquist kriterini sağlayan frekans adımı şu şekilde belirlenebilir. Öncelikle çift-yol dalga yayılımı için tanımlanan radyal uzamsal frekans k_r'nin örnekleme yoğunluğu δk_r için Nyquist koşulu tanımlanır;

$$\delta k_r \leq \frac{2\pi}{R_{\max}} \tag{3.59}$$

Frekans verisinin toplam N noktada toplandığı kabul edilirse, bu durumda Denklem (3.59) şu formda gösterilebilir;

$$\frac{4\pi(f_{\max}-f_{\min})}{cN} \leq \frac{2\pi}{R_{\max}} \tag{3.60}$$

burada $f_{\max}$ ve $f_{\min}$ sırasıyla iletilen maksimum ve minimum frekanslardır. Bu durumda, frekans adımı $\delta f = (f_{\max} - f_{\min})/N$ için Nyquist örnekleme aralığının ifadesi aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$\delta f \leq \frac{c}{2R_{\max}} \tag{3.61}$$

Örtüşme içermeyen görüntüleme için gerekli maksimum azimut adımı $\delta\theta_m$'i belirlemek için, toplanan verinin Δk_{θ_m} ile gösterilebilecek açısal yöndeki spektral bantgenişliğinin hesaplanması gerekir. Bunun için öncelikle, Denklem (3.57)'de verilen $E_{\theta_m,\emptyset_m}(k_r)$ sinyalinin, anlık açısal uzamsal frekansı k_{θ_m} yaklaşık olarak şu şekilde yazılabilir;

$$k_{\theta_m} = \frac{\partial}{\partial\theta_m}\{\arg[E_{\theta_m,\emptyset_m}(k_r)]\} \approx \frac{k_r R_g \rho \sin(\varphi-\theta_m)}{\sqrt{{R_g}^2+\rho^2-2R_g\rho\cos(\varphi-\theta_m)}} \tag{3.62}$$

Hedefin, 360° azimut kapsamı boyunca izotropik saçılıma sahip olduğu varsayılırsa, k_{θ_m}'in maksimum ve minimumları, aşağıdaki θ_m değerlerinde gerçekleşir

$$\theta_m|_{k_{\theta_m}\max} = \varphi - \cos^{-1}(\rho/R_g)$$
$$\theta_m|_{k_{\theta_m}\min} = \varphi + \cos^{-1}(\rho/R_g) \tag{3.63}$$

Bu durumda, spektral bantgenişliği Δk_{θ_m}'nin ifadesi şu şekildedir;

$$\Delta k_{\theta_m} = \left(k_{\theta_m}\max - k_{\theta_m}\min\right) = 2k_r\rho \tag{3.64}$$

Bu bantgenişliği, $\rho_{\max}$ hedefin çapraz-menzildeki maksimum boyutunu göstermekle birlikte, $f = f_{\max}$ ve $\rho = \rho_{\max}$ değerlerinde maksimum değerini alır. Böylece, bu en kötü durumda Nyquist kriterini sağlayan azimut açısal çözünürlük adımı aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\delta\theta_m \leq \frac{2\pi}{\Delta k_{\theta_m}|_{f=f_{\max},\rho=\rho_{\max}}} = \frac{2\pi}{2k_{r\max}\rho_{\max}} = \frac{\lambda_{\min}}{4\rho_{\max}} \tag{3.65}$$

burada $\lambda_{\min}$ iletilen en küçük dalgaboyudur. Eğer, Denklem (3.62)'deki anlık açısal uzamsal frekansı k_{θ_m}'nin ifadesinde, yaklaşım yapılmadan, $z-$eksenindeki yüksekliğin de etkileri göz önüne alınırsa, Denklem (3.65)'de verilen azimut açısı örnekleme kriterinin daha kesin ifadesi aşağıdaki formül ile gösterilir;

$$\delta\theta_m \leq \frac{\lambda_{\min}}{4\rho_{\max}\cos(\emptyset_m)} \tag{3.66}$$

burada $\emptyset_m$ elevasyon veya alçalış açısıdır.

Elevasyon yönünde, uzamsal frekans destek bandı Δk_{z_m}, antenin elevasyon yönündeki -3 dB ışın-genişliği $\emptyset_z$ ile belirlenir ve şu şekilde ifade edilir;

$$\Delta k_{z_m} = \left[-k_r \sin\left(\frac{\emptyset_z}{2}\right),\ k_r \sin\left(\frac{\emptyset_z}{2}\right)\right] \tag{3.67}$$

Bu bantgenişliği $k_r = k_{r\max} = 4\pi f_{\max}/c$ değerinde maksimum değerine ulaşır. Bu durumda, z_m ekseninde, yankı sinyallerini toplamadaki Nyquist örnekleme aralığı δz_m, aşağıda verilen eşitsizliği sağlamalıdır;

$$\delta z_m \leq \frac{2\pi}{2k_{r\max}\sin\left(\frac{\emptyset_z}{2}\right)} = \frac{\lambda_{\min}}{4\sin\left(\frac{\emptyset_z}{2}\right)} \tag{3.68}$$

Elevasyon yönündeki ışın-genişliğinin en çok alabileceği değer olarak $\emptyset_z = 180°$ seçilirse, bu uç durumda örnekleme aralığının maksimum değeri şu şekilde elde edilir;

$$\delta z_m \leq \frac{\lambda_{\min}}{4} \tag{3.69}$$

Çözünürlük Analizi

Önceki kısımda açıklanan uzamsal frekans veri destek bandı ve örnekleme kriterleri, 3B uzamsal frekans uzayında kaplanan hacimin boyutlarına bağlıdırlar. Bu sebeple, oluşan 3B yansıtırlık görüntüsünün çözünürlükleri, sinyal bantgenişliği,

merkez frekansı, sentetik açıklığın kapsamı ve hedeflerin homojenlik özellikleri ile belirlenir. Ancak, geniş-açı ve özellikle de tam-açıklık azimutsal taramalar için klasik dar-açı formülleri geçerli olmadığından ve bu durumlarda analitik çözümler bulmanın da zor olmasından dolayı, çözünürlük değerleri yaklaşımlar ile elde edilebilir. Bu çözünürlükleri tahmin etmede basit bir yaklaşım [29]'de önerilmiştir. Teknik, kısaca İmpals Yanıtı (İPY) fonksiyonunun nümerik hesaplanmasına dayalıdır ve aşağıdaki adımlar ile gerçekleştirilebilir:

i) Verilen $(k_r, \theta_m, \emptyset_m)$ kümesi için İPY görüntüsünü oluştur ve normalize et.
ii) İstenilen çözünürlük eşik değerini (örneğin -4 dB) aşan görüntü hücrelerinin sayısını belirle.
iii) Hücrelerin sayısı ile tek bir hücre boyutunu çarp.

Elde edilen sonuç, görüntünün Çözünürlük Hücre Hacmi (ÇHH)'dir ve çözünürlük hesaplaması için pratik olarak kullanılabilecek bir ölçevdir.

3.2.3. Yakın-alan TSAR Görüntülemenin RKA Kestirimi Uygulamasında Kullanımı

Yakın-alan TSAR görüntülemenin en önemli uygulamalarından biri, askeri savunma için çok kritik bir konu olan, hava veya yer tabanlı araçların RKA kestirimlerinin elde edilmesidir. Bu sebeple, askeri operasyonlarda kullanılacak araçların, radar yansıtırlıklarının önceden belirlenip, bu sayede RKA değerlerinin azaltılması gerekmektedir. RKA kestirimi için yapılacak radar ölçümleri, uzak-alanda ve çok maliyetli sistemler ile yapılmayı gerektirmektedir. Bu işlem alternatif olarak, hedeflerin yakın-alan TSAR görüntüleri kullanılarak da yapılabilmektedir. Bu kısımda [24] ve [52]'de sunulan, yakın-alan TSAR ölçümlerinden RKA kestirim metotlarına benzer bir karma teknik anlatılacaktır.

Şekil 3.15'de görülen ölçüm geometrisini tekrar göz önüne alalım. Antenin hedef merkezli, R_0 sabit yarıçaplı bir daire üzerinde hareket ederek, hedefi tam açıklıktaki ölçümler boyunca aydınlattığını kabul edelim. Ölçüm verilerinin, Denklem (3.31)'deki kalibrasyon metodu ile kalibre edilmiş olduğu varsayılırsa, saçılan elektrik alanın ifadesi şu şekilde yazılabilir;

$$E(k_r,\theta)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{g(x,y)}{C(k_r)}\frac{{R_0}^2}{R^2}e^{-jk_r r_m}\,dxdy \tag{3.70}$$

burada $R(\rho,\varphi-\theta)=\sqrt{{R_0}^2+\rho^2-2R_0\rho\cos(\varphi-\theta)}$, $r_m=R-R_0$, $k_r=4\pi f/c$ ve C kalibrasyon nesnesinin yansıtırlığıdır. RKA'nın standart tanımı kullanılarak, C ile kalibrasyon nesnesinin RKA değeri σ_{kal}, arasındaki ilişki şu şekildedir;

$$C(k_r)=k_r R_0\sqrt{\frac{\sigma_{\text{kal}}}{4\pi{R_0}^2}} \tag{3.71}$$

Hedef ve kalibrasyon nesnesinin yansıtırlık fonksiyonlarının oranı olan g/C, yeni bir yansıtırlık fonksiyonu $\psi(x,y)$ ile tanımlanırsa, saçılım parametresi;

$$E(k_r,\theta)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\psi(x,y)\frac{{R_0}^2}{R^2}e^{-jk_r r_m}\,dxdy \tag{3.72}$$

şeklinde gösterilebilir. Bu durumda, hedefin RKA'sı ile saçılım parametresi arasındaki ilişki şu şekilde yazılabilir [89];

$$\sigma(k_r,\theta)=|E^{\text{FF}}(k_r,\theta)|^2 \tag{3.73}$$

burada $E^{\text{FF}}(k_r,\theta)$, Denklem (3.72)'deki hedef saçılım parametresinin, uzak-alan mesafesinden daha uzak mesafelerde (yani, hedefin düzlemsel dalga ile ayınlatıldığındaki durumda) ölçülen değerleridir. R_0'ın Denklem (3.2)'de verilen uzak-alan koşulunu (i.e. $R_0\geq 2\,W^2/\lambda$) sağladığı durumlar için, şu yaklaşımlar yapılabilir.

$$r_m=R-R_0\approx-\rho\cos(\varphi-\theta)\text{ ve }R^2\approx{R_0}^2 \tag{3.74}$$

Bu durumda, Denklem (3.72) şu formda yazılabilir;

$$E^{\mathrm{FF}}(f,\theta),= \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x,y)\, e^{j(4\pi f/c)\rho\cos(\varphi-\theta)}\, dxdy$$

$$= \int_0^{\rho_{\max}}\int_0^{2\pi} \psi(\rho,\varphi)\, e^{j(4\pi f/c)\rho\cos(\varphi-\theta)}\, \rho\, d\rho d\varphi \qquad (3.75)$$

Önceki kısımlarda anlatılan yakın-alan görüntüleme tekniklerinden biri kullanılarak hedef yansıtırlık görüntüsü ψ elde edilebilir. Bu durumda, Denklem (3.75)'deki uzak-alan verisi $E^{\mathrm{FF}}(f,\theta)$, elde edilen ψ görüntüsünden hesaplanabilir. Daha sonra, hedef RKA'sı, Denklem (3.73)'deki ifadeden elde edilebilir. Teknik özet olarak, aşağıda verilen adımlarla RKA değerlerini hesaplar:

i) Yansımasız oda ortamında, hedeflerin frekans ve açıya bağlı olarak yakın-alan TSAR ölçüm verileri $E^{\mathrm{NF}}(f,\theta)$'ni elde et.

ii) Kalibrasyonlu veriye, yakın-alan görüntüleme algoritmasını uygulayarak, hedef yansıtırlık görüntüsü $\psi(\rho,\varphi)$'yi oluştur. Oluşan görüntü kutupsal formattadır.

iii) Denklem (3.75) ile yansıtırlık görüntüsü $\psi(\rho,\varphi)$'den, uzak-alan saçılım verisi $E^{\mathrm{FF}}(f,\theta)$'yi hesapla. Bu durumda, istenilen bir bakış açısında, geri-saçılan alanın uzak-alan frekans cevabı, Fourier-uzayı verisinin bu açıya karşılık gelen radyal doğru boyunca olan değerleri ile elde edilir. Benzer olarak, istenilen bir frekanstaki uzak-alan saçılma paterni, Fourier-uzayı verisinin bu frekansa karşılık gelen sabit yarıçaptaki değerleri ile belirlenir.

iv) Denklem (3.73)'den hedef RKA (dB)'sı $\sigma(f,\theta)$'yı hesapla.

v) Elde edilen RKA değerlerini, görüntüleme sistemeninin İPY fonksiyonu ile normalize ederek, mutlak RKA (dBsm)'yı hesapla. Bu işlem, koordinat merkezine birim RKA değerin sahip bir noktasal hedef için $\sigma(f,\theta)$ değerlerini oluştururak ve her bir frekans ve açı için hesaplanan hedef RKA'larını bu değerlere bölerek gerçekleştirilebilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının iki temel amacından biri, geniş azimutsal açıklık ve yakın-alan gerisaçılım verilerinin toplandığı, dairesel-SAR/TSAR görüntüleme sistemleri için yakın-alan görüntüleme tekniklerinin geliştirilmesi, bu tekniklerin etkinliklerinin benzetim ve gerçek veriler üzerinde geçerlenmesidir. Diğer bir asıl amaç da, geliştirilen bu görüntüleme teknikleri ve mevcut radar donanım imkânları ile yakın-alan SAR/TSAR görüntülemenin bazı güncel uygulamalarının problemlerine çözümler sağlamaktır. Bu kapsamda, izleyen kısımlarda, ilk olarak, Kısım 3'de formülasyonları verilen üç farklı yakın-alan görüntü oluşturma algoritmalarının doğrulukları ve performans analizleri, farklı veri toplama parametreleri, hedef kombinasyonları ve sinyal işleme adımları için incelenmiş, karşılaştırmalar ile birbirlerine olan üstünlük ve zayıflıkları belirlenmiştir. Daha sonra, yakın-alan SAR/TSAR görüntüleme tekniğinden faydalanan gizlenmiş nesne algılaması, dairesel-SAR görüntüleme ile OHT ve RKA kestirimi uygulamalarının başarılı hedef algılama ve tanıma amaçlarına yönelik gerçek deneyler ile çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular ve yorumlar bu bölümde verilecektir.

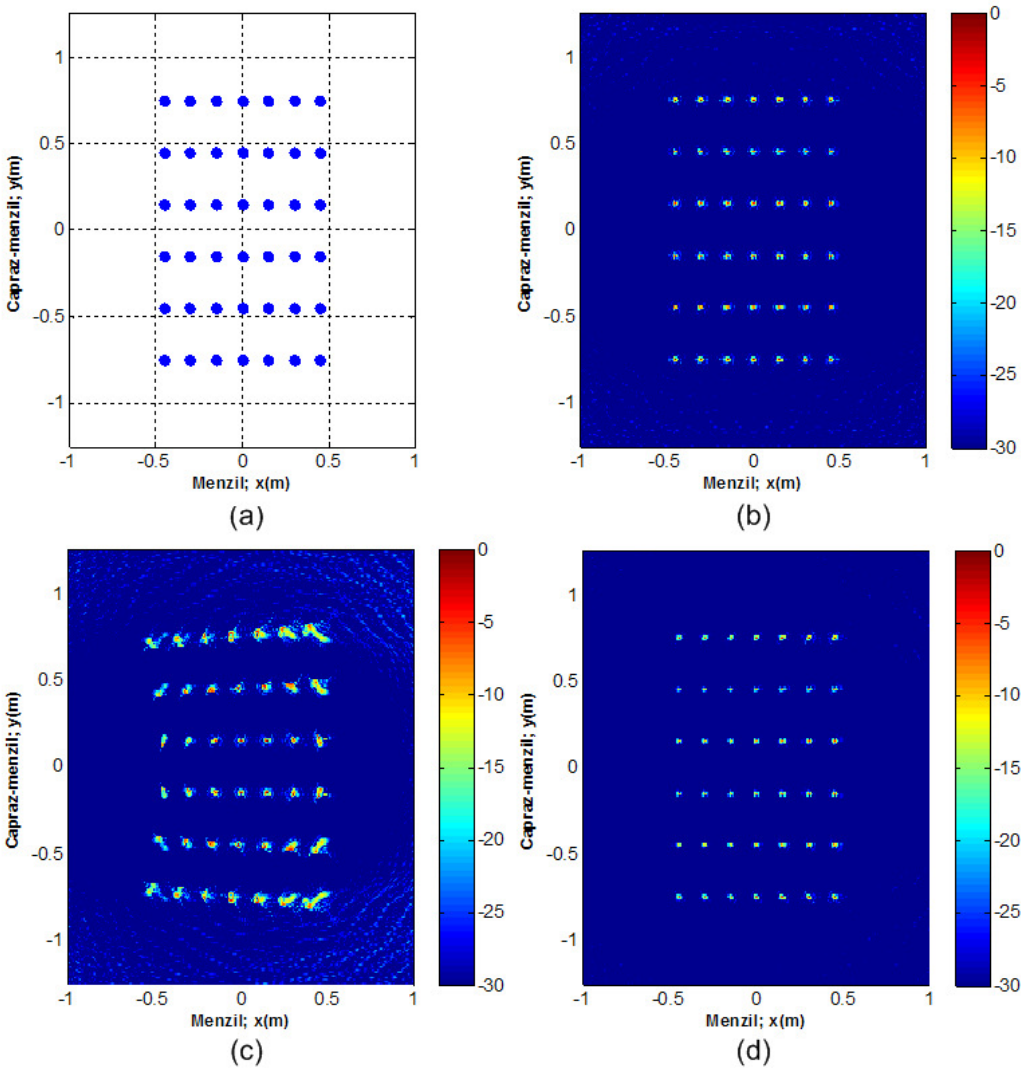
4.1. Gİ ALGORİTMASI İLE GENİŞ-AÇI VE YAKIN-ALAN GÖRÜNTÜLEME ANALİZLERİ

Kısım 3'de, geniş-açı yakın-alan SAR/TSAR görüntüleme ile ilgili olarak, odaklı görüntü oluşturma problemi, örnekleme adımlarının görüntüleme üzerindeki etkileri, uzamsal frekans düzleminde oluşan veri destek bölgeleri ve buna bağlı görüntü çözünürlükleri, geniş-açı kullanımının çözünürlük iyileştirmesi gibi çeşitli konularda çıkarımlar yapılmıştı. Bu çıkarımların, öncelikle benzetim verileri üzerinde doğrulanmaları gerekmektedir. Bu doğrultuda, Gİ algoritmasının Kısım 3.2.2.4'de verilen formülasyonunu temel alarak, küresel dalga yayılımının faz etkilerini kompanze eden ve dalga genliğinin menzil ile ters orantılı olarak (yani "$1/r$" faktörü ile) azalması etkilerini de hesaba katan bir yakın-alan versiyonu gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, geniş-açı yakın-alan 2B monostatik SAR/TSAR görüntülemenin belirtilen karakterisitkleri, benzetim verileri ve gerçekleştirilen Gİ

görüntü tekrar oluşturma algoritması kullanılarak analiz edilmiştir. Benzetimlerde, hedeflerin bağımsız ideal noktasal saçılar olduğu varsayımı kabul edilmiştir. Tanım olarak noktasal saçıcılar, gelen bir EM dalgayı, herhangi bir yönelim açısında bulunan bir gözlemciye aynı cevabı verecek şekilde, yani eksensel simetrik yapıda yansıtırlar. Saçıcılar arasında herhangi bir etkileşim olmazsa, bu saçıcılar aynı zamanda *bağımsız* olarak da nitelendirilirler. İdeal noktasal saçılım varsayımı geniş-açı sistemleri için çok geçerli olmasa da, görüntüleme tekniklerinin doğrulanması ve analizleri açısından önemli bir olumsuz etki meydana getirmemektedir. Bu kısımda dolayısıyla, bu varsayım ile elde edilen benzetim sonuçları verilecektir.

4.1.1. Uzak-alan Gİ ileYakın-alan Gİ Algoritmalarının Karşılaştırılması

Düzlemsel dalga varsayımında, aynı menzil konumundaki saçıcılara çarpan dalgaların, saçıcıların yanca konumlarına bağlı olmadan aynı fazda olduğu kabul edilir. Ancak, Green fonksiyonunun küresel doğası, gerçek faz hem menzil hem de çapraz-menzil konumlarına göre değişir. EM dalgaönü eğikliğini dikkate almayan ve hedef gelen dalgaların düzlemsel kabul eden uzak-alan Gİ algoritmasının, yakın-alan verileri için nasıl sonuçlar vereceğini gözlemlemek için, konumları Şekil 4.1(a)'da görülen ve eşit genliklere sahip bir dizi noktasal saçıcı hedef olarak seçilmiştir. Monostatik ölçüm ile, frekans verisi $16{\sim}22$ GHz aralığında 201 adımda, azimut verisi de $-75°{\sim}75°$ aralığında 601 adımda örneklenmiştir. Hedefin maksimum boyutu $W = 1.5$ m olduğundan, uzak-alan kriteri, anten faz merkezinden sahne merkezine olan menzili R_0 ile göstererek, $R_0 \geq 330$ m olarak hesaplanmıştır. Düzlemsel dalga formülasyonuna dayalı uzak-alan Gİ algoritmasının $R_0 = 500$ m ve $R_0 = 5$ m için sonuçları sırasıyla Şekil 4.1(b) ve Şekil 4.1(c)'de görülmektedir. Şekil 4.1(c)'den, uzak-alan kriterinin sağlanmadığı durumda, dalgaönü eğikliğinden dolayı görüntü sahnesinin de eğildiği görülmektedir. Üst ve alt konumdaki saçıcılar ile antenin EM aydınlatılmısını yaptığı sağ tarafa yakın olan saçıcıların da, yine aynı olgudan dolayı odaklama sorunları içerdiği görülmektedir. Şekil 4.1(d)'de yakın-alan Gİ algoritmasının sonucu görülmektedir. Dalgaönü eğikliği tam olarak düzeltilerek, saçıcıların doğru genlikleri ile doğru konumlarına atanmaları sağlanmıştır.



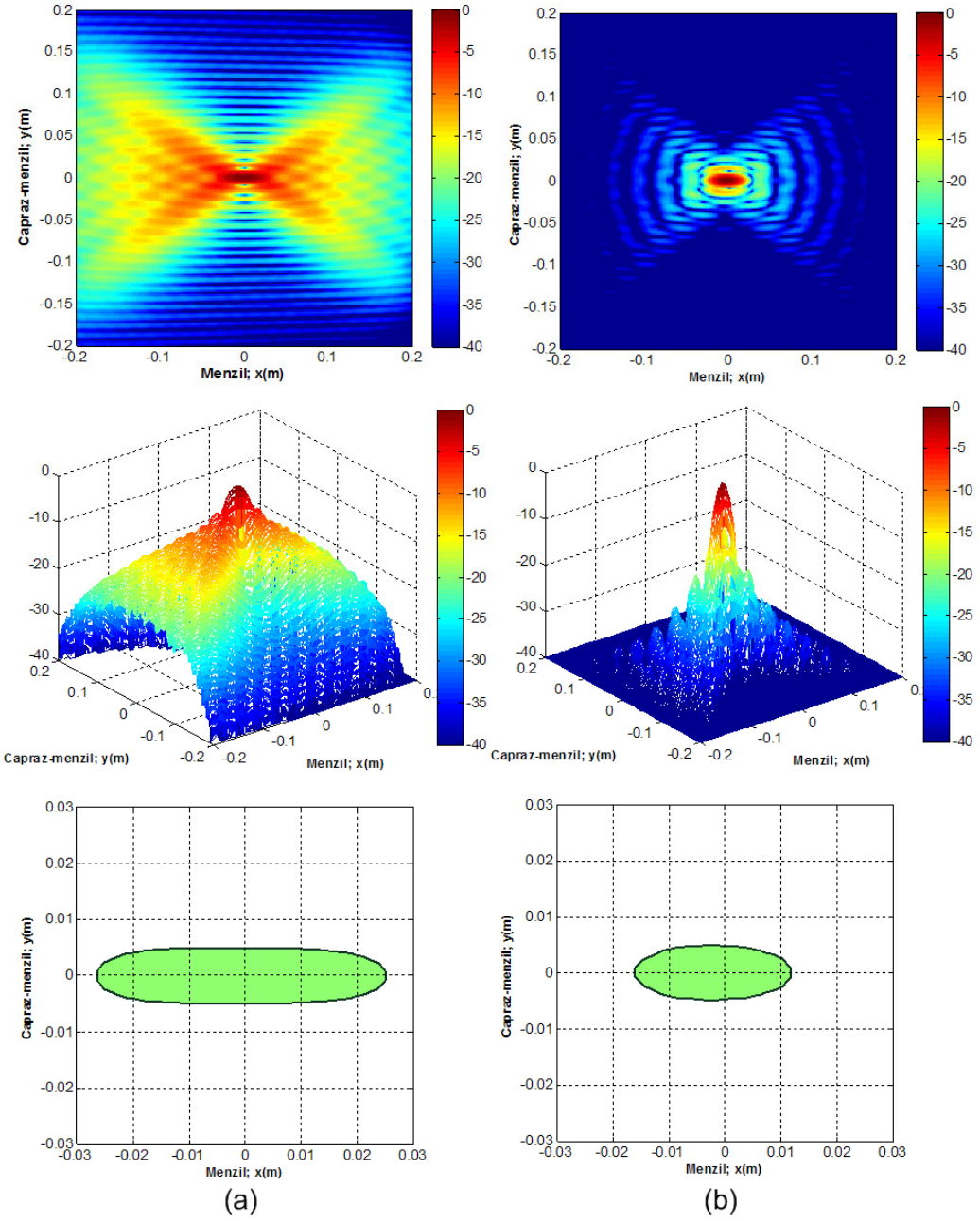
Şekil 4.1. Uzak ve yakın-alan görüntüleme algoritmalarının karşılaştırılması. (a) Noktasal hedeflerin konumları. Uzak-alan Gİ algoritmasının (b) uzak-alan (c) yakın-alan menzili için sonuçları. (d) Yakın-alan Gİ algoritması sonucu.

4.1.2. Geniş-açı Veri Toplamının Çözünürlük Analizi

Geniş-açı SAR/TSAR veri toplamının ve Gİ görüntü oluşturma prosedürünün, çözünürlük performansını değerlendirmek için İPY fonksiyonlarından yararlınalabilir. İPY fonsiyonları, görüntüleme sahnesinin, koordinat sistemi merkezindeki tek bir noktasal saçıyı içerdiği durumu için, sahne yankılarına, tekrar oluşturma algoritması uygulanarak elde edilen SAR/TSAR görüntüleridir [14]. Yani

İPY fonksiyonu $g(x,y,z) = \delta(x,y,z)$ (veya uzamsal frekans verisi $G(k_x, k_y, k_z) = 1$) seçildiği durumda, belirtilen toplama geometrisi için oluşturulan SAR/TSAR görüntüsüdür. İPY'ler, değişik veri toplama geometrileri, radar parametreleri ve işlem algoritmaları sonucu oluşan görüntülerin çözünürlük ve yan-lob (sidelobe) ölçevlerinin hesaplanmasında sıklıkla kullanılırlar. İdeal olarak, İPY fonksiyonları delta fonksiyonları olmalıdır, fakat $\Delta\theta$ ve B'nin kısıtlı olması İPY'nin genişlemesine yol açar.

Geniş-açı veri toplamanın, belki de en cezbedici karakteristiği çok yüksek çözünürlüklü görüntülemeler üretebilmesidir. Küçük $\Delta\theta$ varsayımını kabul eden klasik yaklaşımlar ile teoriksel SAR/TSAR görüntü çözünürlüklerini hesaplama yöntemleri Kısım 3.2.1.4.'de sunulmuştu. Küçük-açı varsayımını kullanan bu hesaplamalar, geniş-açı veri toplama durumunda, geçerliliklerini kaybederler. Bu olguyu daha iyi görebilmek için, tek bir noktasal saçıcının geniş-açı (yani $\Delta\theta = 90°$) açıklık verisine Gİ görüntüleme işlemi uygulanmıştır. İkisi de $f_c = 10$ GHz merkez frekansına sahip, biri genişbantlı ($B = 5$ GHz), diğeri de darbantlı ($B = 0.5$ GHz) olmak üzere iki farklı veri toplama senaryosu göz önüne alınmıştır. Elde edilen İPY fonksiyonları Şekil 4.2.'de görülmektedir. Üst ve ortadaki şekiller, Gİ ile oluşturulan görüntülerin 2B ve 3B gösterimleridir. Alltaki şekiller ise bu görüntülerin -4 dB kontür çizgilerini göstermektedir. Şekil 4.2(a)'daki darbant ve Şekil 4.2(b)'deki genişbant sonuçlarına genel bakıştan, -4 dB çözünürlüklerinin benzer olmasının yanında, bantgenişliğindeki düşüşün, önemli derecede yan-lob seviyelerinin oluşmasına yol açtığı görülmektedir.



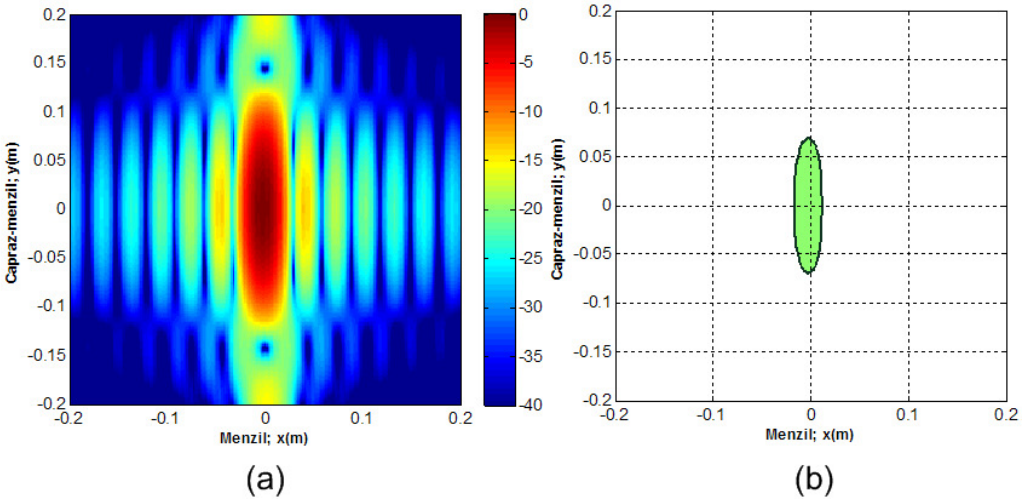
Şekil 4.2. Geniş-açı ($\Delta\theta = 90°$) veri toplamanın İPY ve -4 dB kontur grafikleri. (a) $B = 0.5$ GHz (b) $B = 5$ GHz frekans bantgenişliği için sonuçlar. (Üst: 2B İPY gösterimi, Orta: 3B İPY gösterimi, Alt: -4 dB kontur çizgileri).

Çizelge 4.1. Geniş-açı veri toplamının teorik ve ölçülen çözünürlükleri.

Açıklık	Bant-genişliği	Teorik Çözünürlük		Ölçülen Çözünürlük	
$\Delta\theta$ (°)	B (GHz)	$\delta x = c\ /\ (2B)$ (cm)	$\delta y = c\ /\ (2f_c\Delta\theta)$ (cm)	δx (cm)	δy (cm)
90°	5	3	0.95	2.82	0.94
90°	0.5	30	0.95	5.01	1.09

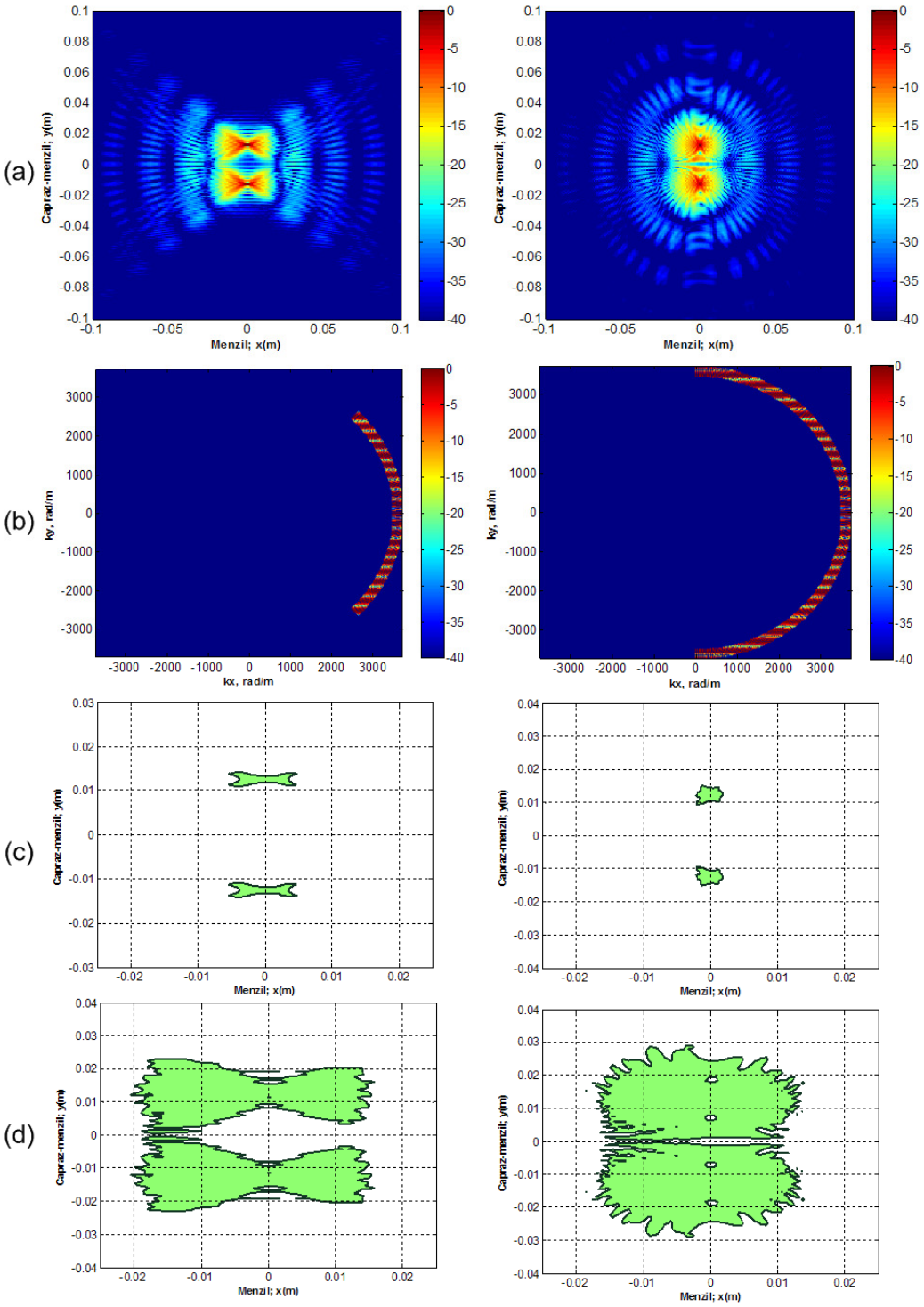
Çizelge 4.1'de her iki geniş-açı veri toplama sisteminin tahmin edilen ve asıl gözlemlenen çözünürlükleri verilmiştir. Çizelgeden, genişbant durumu için, teorik çözünürlüklerin gözlemenen çözünürlükler ile uyumlu olduğunun görülmesiyle birlikte, darbant için teoriksel menzil çözünürlüğü değerinin gözlemlenen değerinden çok farklı olduğu görülmektedir. Bu şu anlama gelir; geniş-açı durumunda menzil ve çapraz-menzil çözünürlükleri bağımsız değildirler ve klasik dar-açı çözünürlük formülleri uygulanamaz. Diğer yandan, bu örnekte, frekans bantgenişliğindeki 10 kat azalmanın, menzil çözünürlüğünde sadece 1.7 kat kötüleşmeye sebep olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, geniş-açı görüntüleme ile darbant dalgaşekillerinin kullanıldığı durumlarda bile, yüksek menzil çözünürlüğü sağlanabilmektedir. Darbant dalgaşekillerinin radar donanımını ve çalışmasını basitleştirmesinden dolayı çok tercih edilmeleri de göz önüne alınırsa, geniş-açı kullanımın bu faydası daha net anlaşılabilir. Tabi bu, Şekil 4.2(a)'nın ortasındaki şekilden görüleceği üzere, yüksek yan-lob seviyelerinin oluşması pahasına sağlanır.

Geniş-açı düzeneğinin bu faydasının yanında, çapraz-menzil yönündeki çözünürlük geliştirimi kolayca dar-açı ve geniş-açı çözünürlük değerlerinin karşılaştırılması ile görülebilir. Bu sebeple, Şekil 4.3'de $B = 5$ GHz bantgenişliği için toplam $\Delta\theta = 6°$ genişliğe sahip darbant veri toplamının İPY görüntüsü ve karşılık gelen -4 dB kontur çizgileri görülmektedir. Bu durumda, görüntünün çapraz-menzil yönündeki çözünürlük değeririnin $\delta y = 13.6$ (teorik değeri 14.32 cm) cm ve geniş-açı değerine göre çok daha kötü olduğu gözlemlenmiştir. Bu çapraz-menzil yönündeki çözünürlük geliştirimi, geniş-açı açıklıklarının en önemli karakteristiğidir.



Şekil 4.3. Dar-açı ($\Delta\theta = 6°$) veri toplamanın İPY ve -4 dB kontur grafikleri. $B = 5$ GHz frekans bantgenişliği için (a) İPY görüntüsü, (b) -4 dB kontur çizgileri.

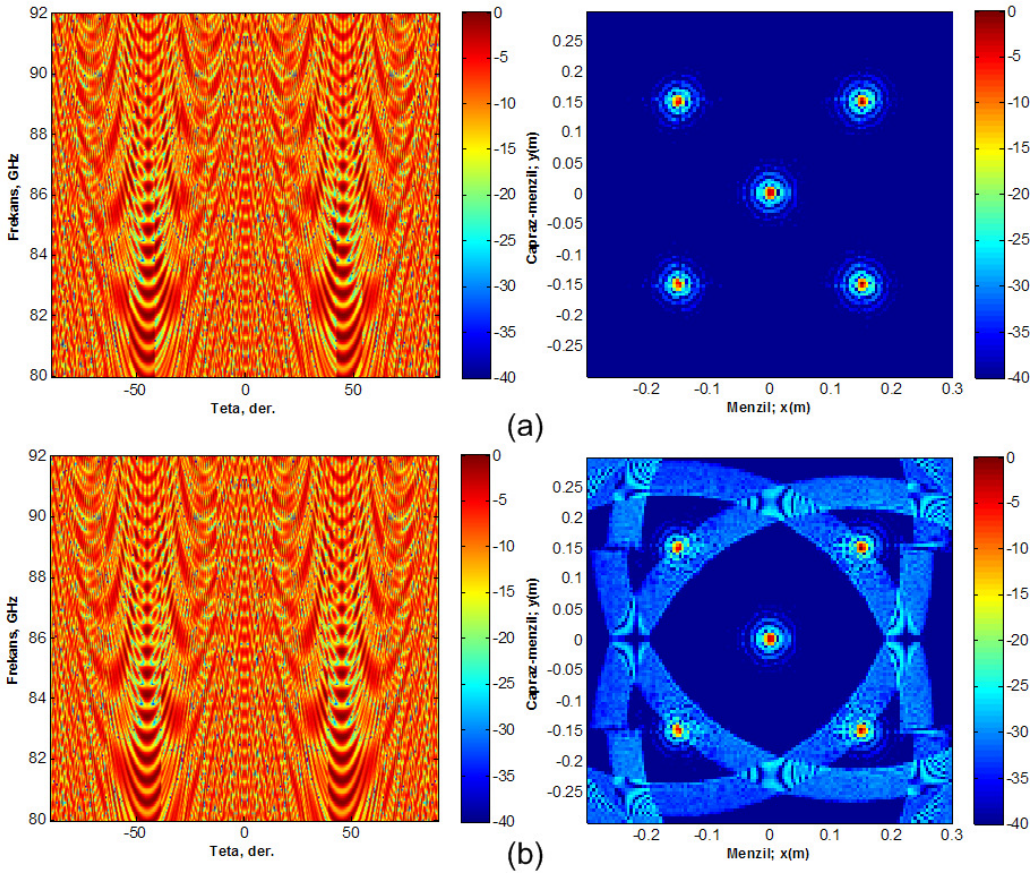
Farklı geniş-açı değerlerinin görüntü çözünürlüğüne etkilerini belirlemek için; farklı açısal bantgenişliklerine sahip, iki veri toplama geometrisi göz önüne alınmıştır. Hedef olarak $(x_1, y_1) = (0, 1.25)$ cm ve $(x_2, y_2) = (0, -1.25)$ cm koordinatlarına yerleştirilmiş iki noktasal saçıcı seçilmiştir. Her iki durumda, azimut örnekleme adımı $0.25°$ seçilmiş, frekans verisi de $83{\sim}89$ GHz arasında 201 noktada toplanmıştır. $\Delta\theta = 90°$ ve $\Delta\theta = 180°$ için elde edilen sonuçlar Şekil 4.4'ün sırasıyla sol ve sağ sütün şekillerinde görülmektedir. Şekil 4.4(b)'de (k_r, θ) düzleminde toplanan verilerin uzamsal frekans düzlemi (k_x, k_y)'ye atanmış gösterimi görülmektedir. $\Delta\theta = 180°$ için, çapraz-menzil yönündeki uzamsal frekans kapsamın daha geniş olmasına rağmen, Şekil 4.4(a)'daki görüntülerin görsel analizinden, bu durum için, çapraz-menzil yönünde herhangi bir çözünürlük kazanımı görülememektedir. Bunu daha iyi anlamak için, Şekil 4.4(a)'daki sonuç görüntülerinin -6 dB ve -24 dB kontur çizgileri sırasıyla Şekil 4.4(c) ve Şekil 4.4(d)'de verilmiştir. Şekil 4.4(c)'den, azimut açısı kapsamınının $90°$'den $180°$'ye yükselmesinin, -6 dB çözünürlüğünde sadece menzil yönünde iyileştirmeye yol açtığı görülmektedir. Şekil 4.4(d)'den ise, -24 dB çözünürlüğü açısından, azimutsal kapsam değerinin yükselmesinin, hem menzil hem de çapraz-menzil çözünürlüğüne olumlu bir katkı yapmadığı görülmektedir.



Şekil 4.4. Farklı geniş-açısal açıklıkların görüntü çözünürlüğüne etkileri, Sol: $\Delta\theta = 90°$, Sağ: $\Delta\theta = 180°$ için sonuçları: (a) Monostatik TSAR görüntüleri. (b) Toplanan verilerin uzamsal frekans düzlemi gösterimi. Sonuç görüntülerinin (c) -6 dB, (d) -24 dB kontur çizgileri.

4.1.3. Açısal Örnekleme Aralığının Görüntülemeye Etkisi

SAR/TSAR görüntülemede, örtüşmesiz görüntüleme oluşturabilmek için, hedef öçümlerinin Nyquist kriterini sağlayan örnekleme adımları ile yapılması gerektiği Kısım 3.2'de açıklanmıştı. Diğer yandan, birçok geniş-açı yakın-alan SAR/TSAR görüntüleme uygulamasında, genellikle göreceli olarak büyük boyutlu hedeflerin yüksek çözünürlüklü görüntüleri talep edilir. Dolayısıyla, özellikle, azimut açısı örnekleme adımı çok küçük ve karşılık gelen ölçüm sayısı da çok büyük olmaktadır. Bu doğrultuda, Denklem (3.66)'da verilen, azimut açısının Nyquist kriterinin geçerliliği, yine W-bant frekans bant aralığındaki ($75\sim110$ GHz) görüntüleme benzetimleri ile test edilmiştir. Çapraz-menzil yönünde maksimum 0.3 m genişliğe sahip 5 noktasal saçıcıdan oluşan hedef sahnesi seçilmiştir. Frekans verisi $80\sim92$ GHz aralığında 201 noktada toplanmıştır. Hedef dairesinin yarıçapı $\rho_{\max} = 0.21$ m alınarak, görüntü örtüşmesine yol açmayan azimut açı kriteri $\delta\theta \leq \lambda_{\min}/4\rho_{\max} = 0.22°$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.5(a)'da toplam bantgenişliğin $\Delta\theta = 180°$ ve örnekleme adımının $\delta\theta = 0.125°$ olduğu durum için toplanan saf veri ve odaklanmış görüntüsü görülmektedir. Şekil 4.5(b)'de ise yine aynı bantgenişliği için ve $\delta\theta = 0.25°$ olduğu durumda elde edilen sonuçlar görülmektedir. Nyquist kriterinin sağlanmadığı bu durumda, görüntüde örtüşmelerin meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte, Denklem (3.66) kriteri en koruyucu durum için formüle edildiğinden ve kullanılan adımın kriter koşuluna çok yakın olmasından dolayı, bu bozulmaların hedefin genel görüntüsünü bozacak kadar olmadığı da görülmektedir.

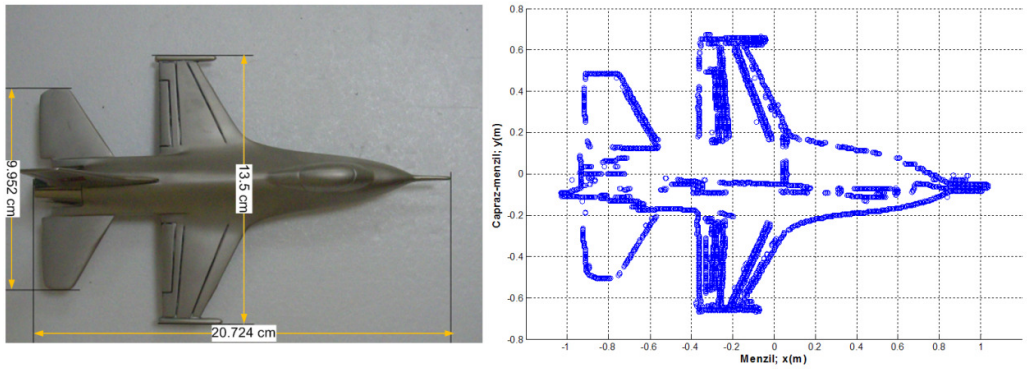


Şekil 4.5. Açısal örnekleme adımının monostatik TSAR görüntülemeye etkisi. Nyquist kriterinin (a) sağlandığı, (b) sağlanmadığı açısal aralık adımı sonuçları (Sol: Veri toplama koordinatlarındaki ham veri, Sağ: Gİ algoritması ile görüntüleme sonucu).

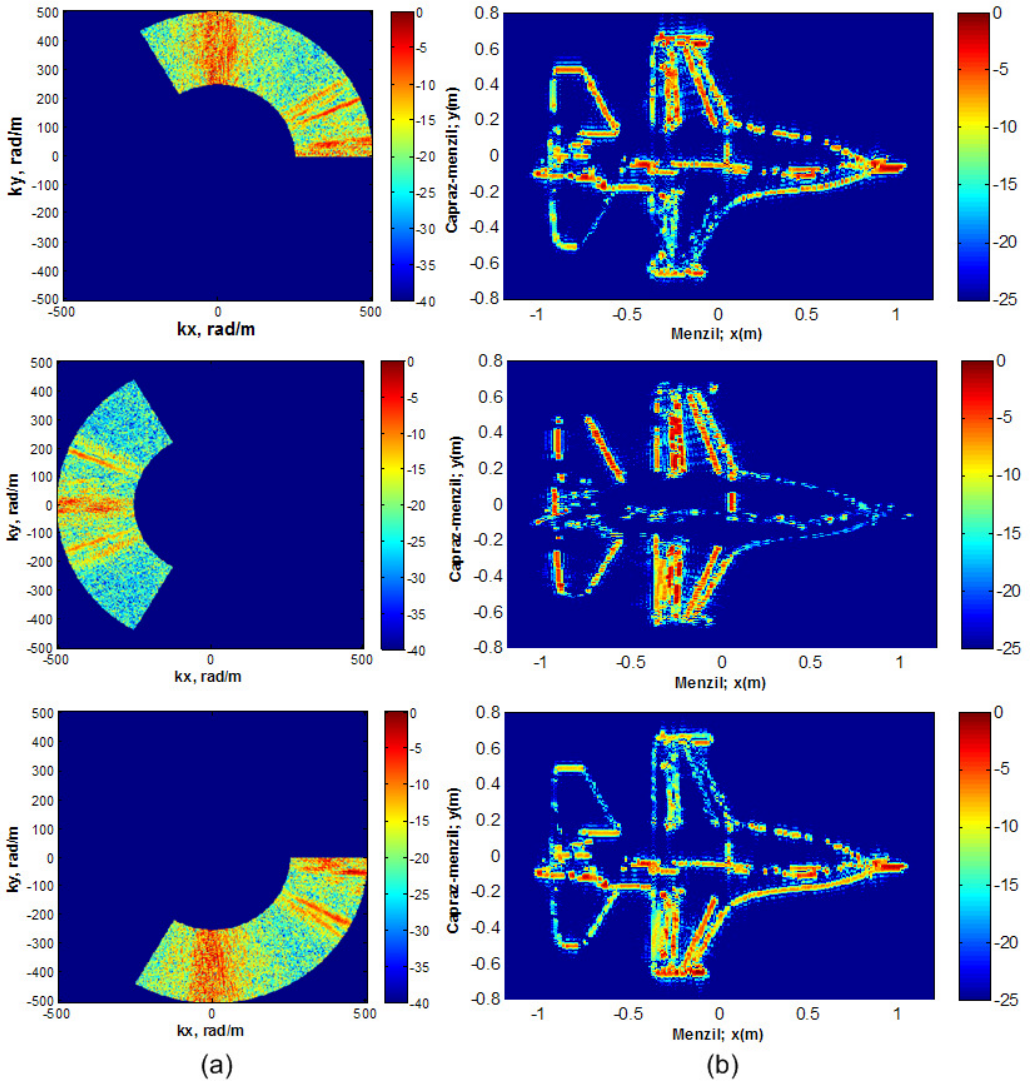
4.1.4. Farklı Bakış Açılarının Görüntülemeye Etkisi

Bu benzetimde, azimut açı kapsamı sabit tutularak, hedef gerisaçılım verilerini farklı perspektiflerden toplamanın, görüntüleme üzerinde oluşturduğu etkiler araştırılmıştır. Bu nedenle, öncelikle Şekil 4.6(a)'da gösterilen F-16 savaş uçağının maketinin fotoğrafından faydalanılarak, Şekil 4.6(b)'deki noktasal saçılar ile modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, noktasal saçıcıların eşit genliğe sahip olduğu kabul edilerek, her biri 120°'lik azimut açı kapsamına sahip, 3 farklı perspektifli veri toplama yapılmıştır. TX/RX anteni monostatik modda ve hedef merkezinden 10 m mesafede konumlandırılmıştır. Frekans verisi 6~12 GHz

aralığında 201 noktada, azimut verisi de 0.25° artışlarla toplanmıştır. Şekil 4.7(a)'da bu veri toplama geometrilerinin uzamsal frekans düzleminde tesis ettiği veri destek bölgeleri görülmektedir. Bu verilere karşılık gelen yakın-alan TSAR görüntüleri de Şekil 4.7(b)'de görülmektedir. Beklenildiği üzere, EM aydınlatılmasının yapıldığı yönlerde, hedef gerisaçılım şiddetinin daha güçlü olduğu görülmektedir. Pratikte, hedef gerisaçılım mekanizmasının çok farklılık göstermesine rağmen, buradaki örnekler ile yakın-alan Gİ algoritmasının performansınının birbirlerine çok yakın konumda olan zor bir hedef varyasyonu için iyi sonuçlar ürettiği anlaşılmıştır.



Şekil 4.6. Farkı bakış açılarından görüntüleme benzetiminin hedefi. (a) F-16 uçak maketinin fotoğrafı. (b) Maketin noktasal saçıcılar ile temsil edilen modeli.

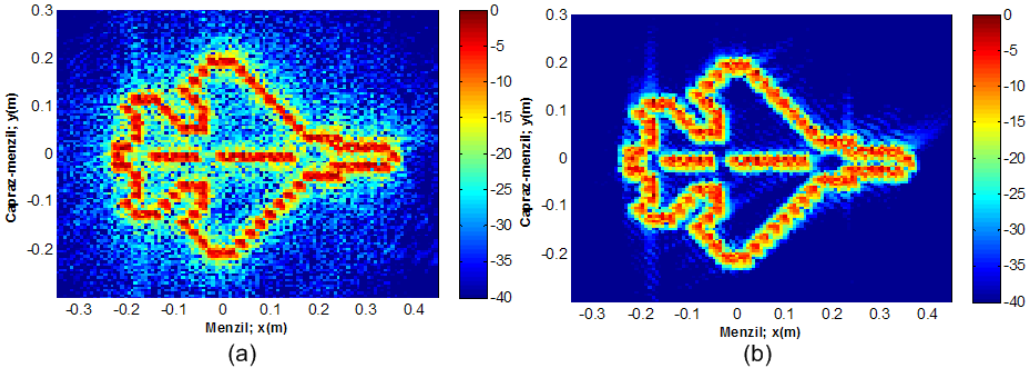


Şekil 4.7. Farkı bakış açılarından görüntüleme benzetiminin sonuçları. (a) Toplanan verilerinin uzamsal frekans gösterimi. (b) Karşılık gelen yakın-alan TSAR görüntüleri.

4.1.5. Veri İşlem Tekniklerinin Etkileri

SAR/TSAR görüntülemede, her bir bakış açısı noktasında toplanan frekans verisi, görüntüleme tekniğinin interpolasyon veya diğer sinyal işlem adımlarını kolaylaştırmak için genellikle sıfır-ekleme işlemine tabi tutulur. Zaman düzleminde interpole edilen menzil profilleri üreten bu teknik, SAR/TSAR görüntülemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıklıkla kullanılan bir diğer veri işlem tekniği de,

verilere genlik pencerelerinin uygulanmasıdır. Bu pencereleme işlemi temel olarak yan-lob kontrolü için yapılır. Yüksek yan-lob seviyeleri, güçlü saçılardan kaynaklanan enerjilerin, görüntünün büyük parçası üzerine yayılmasına ve dolayısıyla zayıf enerji seviyeli istenilen hedef yankılarının maskelenmesine sebep olmaktadır. Pencereleme işleminin geniş-açı verilerindeki etkilerini gözlemlemek için, farazi bir uçak yapısının noktasal saçıcılar ile oluşturulan modelinin gerisaçılım verileri elde edilmiştir. Frekans menzili 35~45 GHz, azimut menzili de 0°~120° olarak alınmıştır. Şekil 4.8(a)'da pencereleme işlemi yapılmadan elde edilen görüntü, Şekil 4.8(b)'de de her bir azimut noktasındaki veriye Hanning penceresi uygulaması yapılarak elde edilen görüntü görülmektedir. Pencereleme işleminin Şekil 4.8(a)'da görülen yan-lob seviyelerini bastırdığı, fakat aynı zamanda da görüntü çözünürlüğünü de düşürdüğü görülmektedir. Bu tez çalışmasının, görüntüleme tekniklerinin analizi ile ilgili olan kısımlarında, algoritma karakteristiklerinin tam olarak çıkarılması amacı ile her hangi bir pencereleme işlemi uygulanmamıştır. Deneysel kısımlarda ise bazı durumlarda, pencereleme işlemi yapılmış ve belirtilmiştir.



Şekil 4.8. TSAR frekans verisine pencereleme işleminin etkileri. (a) Pencere yapılmamış, (b) "Hanning pencereleme" işlemi yapılmış görüntü.

4.2. Gİ VE OOD ALGORİTMALARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Radar görüntülemede önemli olan bir konu, farklı görüntüleme tekniklerinin performanslarının hız, doğru odaklama, gürültü oluşturmaya yatkınlıkları gibi ölçütler ile karşılaştırılmalarının yapılması ve özel bir uygulama için en optimal

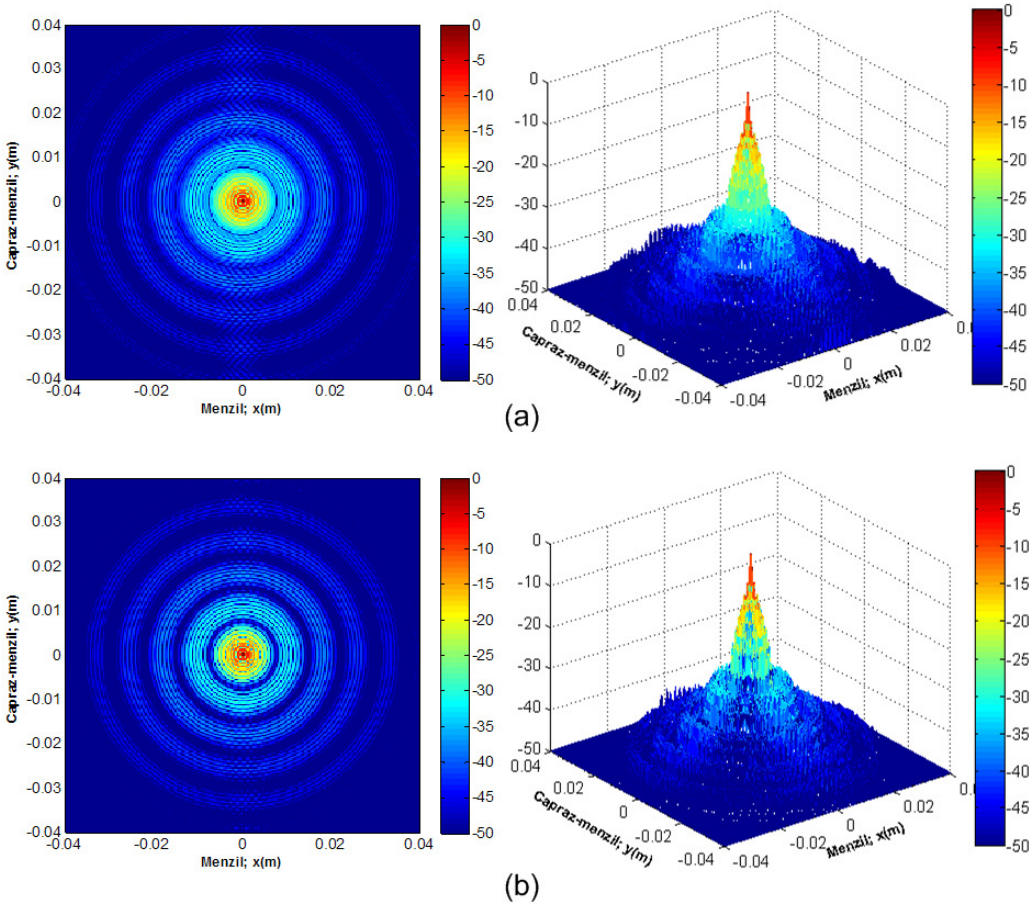
tekniğin belirlenmesidir. Bu yüzden, Gİ algoritmasına ek olarak, Kısım 3.2.2.4'de tekniği açıklanan, OOD algoritmasının da bilgisayarda gerçekleştirimi yapılmıştır. OOD algoritması, geniş-açı yakın-alan SAR/TSAR sentetik açıklık verilerine uygulanabilecek yapıya sahiptir ve yaklaşım içermeyen bir teknik olarak öne çıkmaktadır. Diğer yandan metot, çok fazla işlem yükü gerektirdiği için pratik uygulamalar için elverişli değildir. Bununla birlikte OOD algoritması, özellikle yakın-alan görüntüleme tekniklerinin karşılaştırılmasında referans olarak kullanılabilmektedir. Literatürde, OOD algoritmasının bazı yakın-alan görüntüleme uygulamaları için, deneysel veriler üzerindeki performans sonuçları bulunmaktadır [21, 22, 24, 25]. Ancak, bu kısıtlı sayıdaki sonuçlar, genelde RKA kestirimine yönelik olup, görüntüleme tekniğinin kapsamlı incelenmesi üzerine sadece [88]'de sunulan tek bir çalışma göze çarpmaktadır. Dolayısıyla, tez çalışmasında, bu tekniğin çeşitli benzetim ve deneysel verilere uygulama sonuçları elde edilmiş, bu sonuçlar daha sonra Gİ algoritmasının sonuçlarını değerlendirmede referans görüntüler olarak alınmıştır.

4.2.1. İPY Fonksiyonları ve Hesaplama Zamanları

Gİ ve OOD görüntüleme algoritmalarının, verilen bir geniş-açı yakın-alan veri toplama geometrisi için, İPY fonksiyonları elde edilerek, çözünürlük ve yan-lob analizleri gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında asıl odaklanılan konu, tam-açıklık ve genellikle yüksek frekanslar (örneğin MMD) kullanan SAR/TSAR görüntüleme sistemleri olduğu için, bu kısımdaki analizlerde W-bant ($75\sim110$ GHz) operasyonu ve aşağıda detayları verilen, iki farklı tam-açıklıklı veri toplama geometrisi göz önüne alınmıştır.

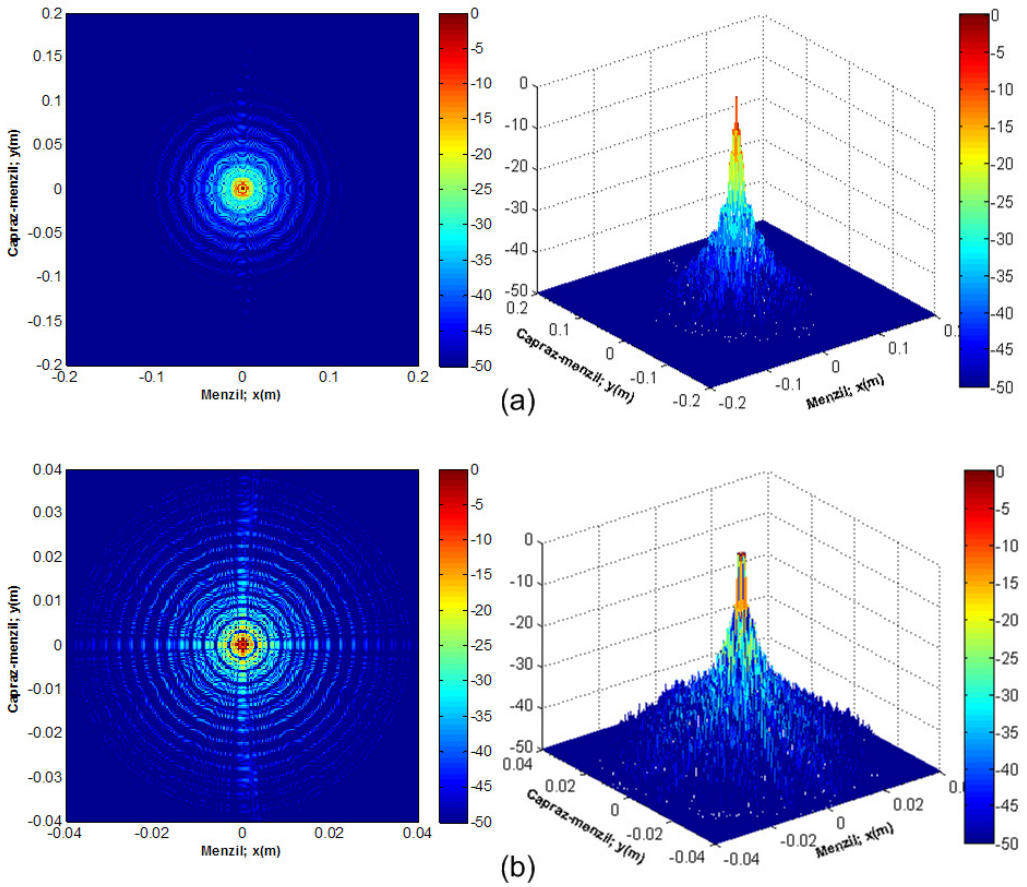
Birinci veri toplama durumununda, azimut açısı $\theta = 0°$'den $360°$'ye 361 örnekleme noktasında, frekans $f = 80$ GHz'den 100 GHz'e 256 örnekleme noktasında alınmıştır. Monostatik çalışma modunda TX/RX anteninin hedef merkezine olan uzaklığı 1.3 m olarak seçilmiştir. Gİ ve OOD algoritması görüntüleme sonuçları sırasıyla Şekil 4.9(a) ve Şekil 4.9(b)'de verilmiştir. Görüntüler kıyaslanırsa, iki algoritmanın da yaklaşık olarak aynı yan-lob seviyelerini ürettiği görülmektedir. Çözünürlük ölçevi olarak, Kısım 3.2.2.4'de anlatılan ve geniş-açı veri

toplama geometrilerinde menzil ve çapraz-menzil çözünürlüklerinin analitik olarak elde edilme zorluklarına pratik bir çözüm olan nümerik teknik [29] kullanılmıştır. 2B görüntülemeden dolayı, bu hesaplama prosedürü, çözünürlük hücre alanı (ÇHA) değerini verecek şekilde, Şekil 4.9'daki iki sonuç görüntüsü için hesaplanmış ve her iki görüntünün de -4 dB ÇHA değeri, 0.3936 mm^2 olarak elde edilmiştir. Özet olarak, incelenen mevcut veri toplama durumu için, iki görüntüleme algoritması da aynı çözünürlükte ve yaklaşık olarak aynı yan-lob seviyeli İPY görüntüleme karakteristiği sergilemişlerdir.



Şekil 4.9. Gİ ve OOD'nin ilk veri toplama durumu için karşılaştırılması. Açısal taramanın $0° \sim 360°$'ye 361 noktada ve frekans taramasının $80 \sim 100$ GHz'e 256 noktada olduğu durum için İYF görüntüleri: (a) Gİ, (b) OOD sonucu (Sol: 2B, Sağ: 3B gösterim).

İkinci veri toplama durumunda, azimut açısı $\theta = 0°$'den $360°$'ye 1441 örnekleme noktasında ve frekans $f = 80$ GHz'den 90 GHz'e 256 örnekleme noktasında alınmıştır. TX/RX anteni yine monostatik konfigürasyonda ve hedef merkezine 1.3 m mesafesi olacak şekilde yerleştirilmiştir. Gİ ve OOD algoritmaları ile elde edilen İYF görüntüleri sırasıyla Şekil 4.10(a) ve Şekil 4.10(b)'de verilmiştir. Görüntülerin ilk bakışta görsel olarak kıyaslanması sonucu, Gİ algoritması sonucunun daha düşük yan-lob genlik seviyesine sahip olduğu görülebilir. Bunun sebebi, Gİ algoritmasının bilgisayar gerçekleştirimininde, toplanan frekans verisine, frekans düzleminde sıfır ekleme (zamanda interpolasyon) işleminin yapılmasındandır. Çözünürlük ölçevi olarak yine ÇHA kavramı kullanılmış ve Gİ ve OOD algoritmalarının görüntüleri için sırasıyla 9.84 mm^2 ve 78.73 mm^2 olarak hesaplanmıştır. Yani, bu veri toplama ve işlemi için Gİ algoritmasının daha yüksek çözünürlüklü görüntü oluşturduğu görülmektedir. Bu, çözünürlük farkının sebebini bulmak için, "*gürültü varyansı ile çözünürlük arasında ters ilişki olduğu*" teorik bilgisinin ışığı altında, iki algoritmanın veri işleme adımlarında, gürültü oluşturabilecek ve yaklaşımların yapıldığı adımların belirlenmesi gerekir. OOD algoritmasında hiçbir yaklaşım yapmadan direkt olarak hedef yansıtırlık fonksiyonunu hesaplar. Fakat hesaplanan fonksiyon, silindirik koordinatlardadır ve Kartezyen koordinatlarında istenilen görüntüyü hesaplamak için silindirikten-Kartezyene 2B interpolasyon (ara-değerleme) işleminin yapılması gerekir. Genel olarak bilindiği üzere, interpolasyon işlemi gürültüye sebep verdiği için radar görüntülemede istenmeyen bir işlemdir. Dolayısıyla, OOD algoritmasında bu işlemin, özellikle göreceli olarak darbant frekans verileri için daha fazla gürültü oluşturduğu kestirilebilir. Öte yandan, Gİ algoritmasında da geriye-izdüşüm işlemi, 1B aradeğerleme ile yapılmaktadır. Fakat Gİ algoritmasında yapılan bu aradeğerleme işleminin, yankı sinyalinin sert salınımlı değişimlerinden bağımsız olduğu (alçak-geçiren filtrelemeye bağlı olarak), dolayısıyla görüntü oluşturmada çok iyi doğrulukta genlik ve faz bilgisini verdiği bilinmektedir. Bu sebeple, frekans bantgenişliğinin 20 GHz'den 10 GHz'e düştüğü mevcut veri toplama durumu için, Gİ algoritması OOD algoritmasına göre daha iyi çözünürlüklü görüntüleme üretmiştir.



Şekil 4.10. Gİ ve OOD'nin ikinci veri toplama durumu için karşılaştırılması. Açısal taramanın $0° \sim 360°$'ye 1441 noktada ve frekans taramasının $80 \sim 90$ GHz'e 256 noktada olduğu durum için İYF görüntüleri: (a) Gİ, (b) OOD sonucu (Sol: 2B, Sağ: 3B gösterim).

İki algoritmanın görüntü oluşturma işleminde harcadıkları süreler Çizelge 4.2'de verilmiştir. Önceki kısımda verilen, iki veri toplama durumu da göz önüne alınmıştır. Algoritmalar 1.66 GHz işlemcili ve 2 GB RAM hafızalı bilgisayarda koşturulmuş ve görüntüler 256×256 piksel boyutlu Kartezyen ızgara için hesaplanmıştır. Sonuçlardan görüleceği üzere, OOD algoritması çok yüksek hesaplama zamanına ihtiyaç duymaktadır. Bunun sebebi, bu algoritmanın basit ve doğrudan bir teknik ile toplanan veri üzerinde eleman-eleman tarzında işlem yapmasıdır. Şöyleki, $N_\rho N_\varphi$ boyutundaki silindirik görüntü için ve $N_{k_r} N_{\theta_m}$ boyutundaki veri matisi için, algoritmanın hesaplama yükü, aradeğerleme işlemindeki operasyonlar hariç $O\left(N_\rho N_\varphi N_{k_r} N_{\theta_m}\right)$'dir. Diğer yandan, $N_x N_y$

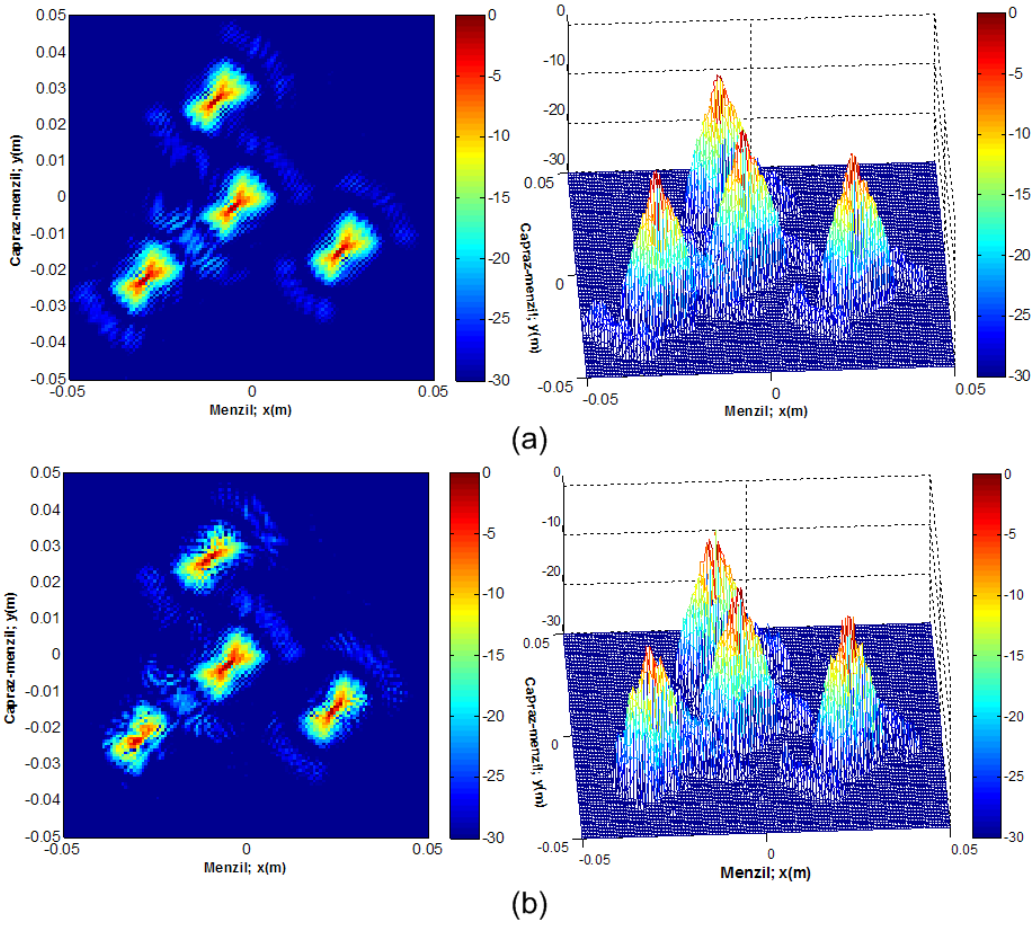
boyutundaki Kartezyen görüntü için, Gİ algoritmasının, yine aradeğerleme işlemindeki operasyonlar hariç, sayısal hesaplama yükü $O\left(N_x N_y N_{\theta_m}\right)$ olarak bulunmaktadır. Yani, N_f frekans yönündeki örnekleme sayısı olmak üzere Gİ algoritmasının, OOD algoritmasından N_f katı kadar daha az operasyon içerdiği görülmektedir. Bu çalışmada, OOD algoritmasının pratik uygulamalar için kullanılabilirliğinin testi amaçlanmadığından, bu çok fazla hesaplama yükü olması gözardı edilerek, sadece görüntüleme kalitesi dikkate alınmıştır. Gİ algoritmasının Çizelge 4.2'de verilen hesaplama zamanları göz önüne alınırsa, pratik bir 3B görüntüleme uygulamasında, daha hızlı görüntülemeye ihtiyaç duyulacağı aşikardır. Bu da Gİ algoritmasının son yıllarda geliştirilen hızlı versiyonlarının [90] paralel işlem seçeneği ile tatbiki ile mümkün olabilir.

Çizelge 4.2. Gİ ve OOD algoritmalarının hesaplama zamanları.

Veri Toplama	*Gİ Algoritması Zaman (saniye)*	*OOD Algoritması Zaman (dakika)*
$\theta = 0° \sim 360°, 361\ nok.$ $f = 80 \sim 100\ GHz, 256\ nok.$	19.12	93.68
$\theta = 0° \sim 360°, 1441\ nok.$ $f = 80 \sim 90\ GHz, 256\ nok.$	78.88	391.77

4.2.2. Çoklu Noktasal Saçıcılar İçin Görüntüleme Performansları

Bu benzetim örneğinde, 4 noktasal saçıcı hedef sahnesi olarak seçilmiş, frekans verisi $80\sim92$ GHz frekans aralığında 201 adımda ve $0\sim90^{\circ}$ açı aralığında 181 adımda toplanmıştır. Gİ ve OOD algoritmalarının görüntüleme sonuçları sırasıyla Şekil 4.11(a) ve Şekil 4.11(b)'de görülmektedir. Bu veri toplama ve hedef kombinasyonu için, algoritma odaklama performanslarının birbirine yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 4.11. Gİ ve OOD'nin çoklu noktasal hedef durumu için karşılaştırılması. (a) Gİ, (b) OOD ile odaklanmış görüntüler (Sol: 2B, Sağ: 3B gösterim).

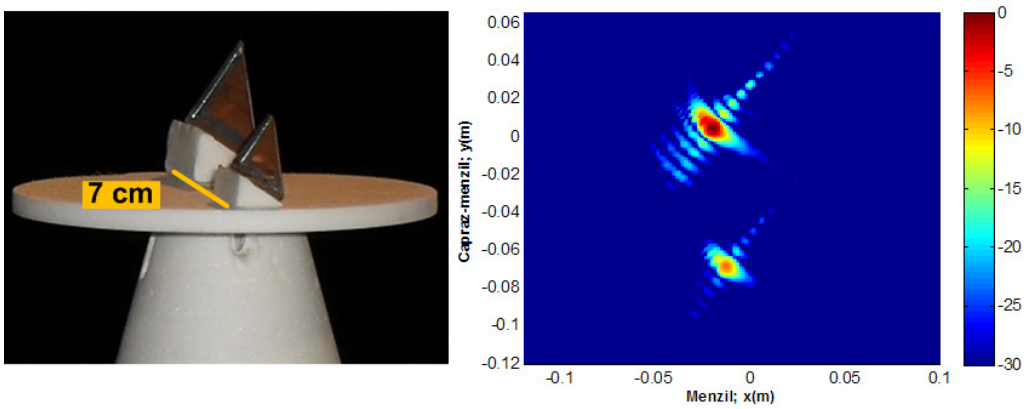
4.3. 2B YAKIN-ALAN TSAR GÖRÜNTÜLEMENİN DENEYSEL ANALİZLERİ

Kısım 4.1'de Gİ algoritması ile geniş-açı yakın-alan SAR/TSAR görüntülemenin çeşitli analizleri, benzetim verileri kullanılarak yapılmıştı. Bu analizleri gerçek veriler üzerinde doğrulamak için, TÜBİTAK-MAM'ın yansımasız odasının kontrollü ortamında, çeşitli 2B yakın-alan TSAR görüntüleme deneyleri yapılmıştır. Bilindiği üzere, gerçek hedeflerin saçılım karakteristikleri, aydınlatma açısı ve aydınlatma frekansına bağlı olarak önemli ölçüde değişim gösterir. Bu değişimler temel olarak, EM dalgasının görüntüleme sahnesindeki elemanlar ile etkileşmesinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla bu kısımda, hedef saçılım karakteristikleri, yakın-alan odaklama tekniğinin performansı ve geniş-açı veri

toplamının etkileri, farklı karmaşıklığa sahip hedeflerin TSAR gerisaçılım verileri üzerinden incelenmiştir. Tüm deneylerde, TX/RX anteni yarı-monostatik modda ve hedef merkezinden 1.3 m mesafede konumlandırılmıştır. Yine tüm toplamalarda hedefler, 0.25° artışlarla ve toplam 60°'lik azimut penceresi ile pespektiflenmiştir. Yansımasız odanın arkaplan yansımasının, hedef yansımasına göre çok düşük şiddetle sahip olmasından dolayı, gerisaçılım verileri, Denklem (3.31)'deki daha basit gerçekleştirime sahip prosedür ile kalibre edilmiştir. Görüntülerde EM aydınlatılması sağ taraftan yapılmıştır.

4.3.1. İki Köşegen Yansıtıcı Hedefi

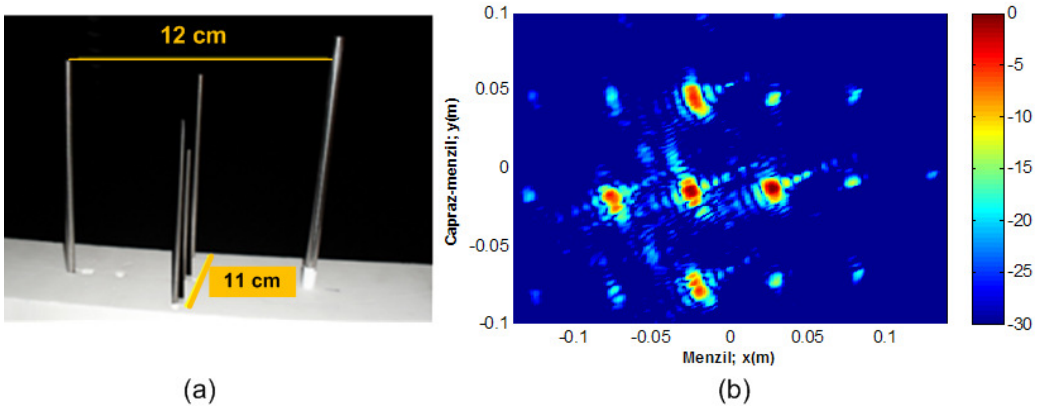
Bu deneyde, hedef olarak iki adet metal köşegen yansıtıcı (corner reflector) seçilmiştir. Biri diğerine göre biraz daha büyük olan köşegen yansıtıcıların strafor üzerindeki yerleştirilme düzeni ve aralarındaki mesafe Şekil 4.12(a)'da görülmektedir. Frekans verisi $80\sim101.8$ GHz aralığında 256 noktada toplanmıştır. Gİ algoritması ile odaklanan TSAR görüntüsü Şekil 4.12(b)'de görülmektedir. Görüntüde hedef merkezi, kalibrasyon hatasına bağlı olarak, orijinden bir miktar sapma göstermiştir. Bu hata aynı zamanda, yansıtıcı iç bölgesine tam karşıdan bakış açısının, tam olarak 0° olmadığı anlamına gelmektedir. Görüntüde beklendiği üzere, daha büyük boyuta sahip köşe yansıtıcısı, daha güçlü gerisaçılım şiddetleri üretmiştir. EM dalgasının, hedeflerin iç hacminde çoklu-yol saçılımı sergilemesinden dolay, her iki yansıtıcı hedef etrafında da benzer ve düzgün paternli ekstra genlikler gözlemlenmektedir. Bununla birlike, köşegen yansıtıcıların saçılım karakteristiğinden ötürü, yansıtıcılar arasında bir etkileşim gözlemlenmemektedir (yani bağımsız saçıcılardır).



Şekil 4.12. İki köşegen yansıtıcı hedefinin TSAR görüntülenmesi. (a) Hedeflerin deney esnasındaki fotoğrafı, (b) Gİ algoritması ile tekrar oluşturulmuş görüntüsü.

4.3.2. Beş Metal Silindir Hedefi

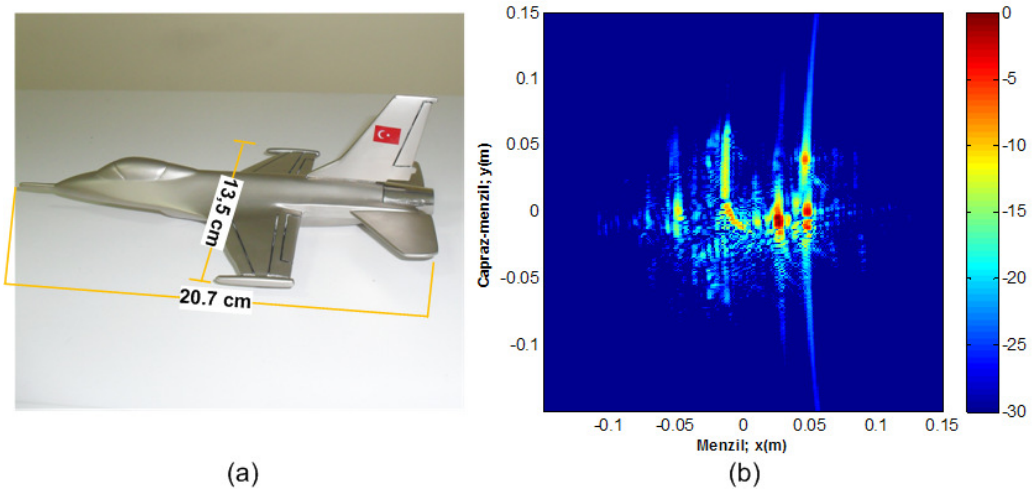
Bu deneyde, hedef olarak değişik kalınlıklarda 5 adet silindirik metal çubuk seçilmiştir. Çubukların strafor üzerindeki yerleştirilme düzeni ve aralarındaki mesafe Şekil 4.13(a)'da görülmektedir. Frekans verisi 80~101.8 GHz aralığında 256 noktada toplanmıştır. Gİ algoritması ile odaklanan TSAR görüntüsü Şekil 4.13(b)'de görülmektedir. Deneyden önce yapılan kalibrasyonun hassas olarak yapılamamasından dolayı, faz merkezinde yine küçük bir sapma meydana gelmiştir. Silindirik yapıdan dolayı, hedef sahnesinin, bağımsız ideal noktasal saçıcılardan oluştuğu yaklaşımı ve dolayısıyla gerisaçılım verilerinin etkin şekilde odaklanması beklenmesine rağmen, Şekil 4.13(b)'den gerçek saçılım ilişkilerinin biraz daha karmaşık olduğu anlaşılmaktadır. Bu olgu, görüntüde, özellikle ortadaki silindirin etrafında daha çok yoğunlaşmış ekstra saçılım şiddetlerinden daha iyi anlaşılabilir. Bu durum, silindir hedefleri arasındaki etkişiminin bir sonucudur ve radar enerjisinin bir saçıcıya çarptıktan sonra, antene dönmeden önce bir diğer saçıya çarpmasına bağlı olarak meydana gelir. Bu etkileşimler, görüntüde, ekstra menzil mesafelerinde düşük seviyeli yankılar olarak kendilerini göstermektedirler.



Şekil 4.13. Beş metal silindir hedefinin TSAR ile görüntülenmesi. (a) Hedeflerin deney esnasındaki fotoğrafı, (b) Gİ algoritması ile tekrar oluşturulmuş görüntüsü.

4.3.3. F-16 Uçak Maketi Hedefi

Bu deneyde, daha karmaşık bir radar hedefi olarak, Kısım 4.1.4'ün benzetim örneklerinde de kullanılan, F-16 savaş uçağının maketi seçilmiştir (bakınız Şekil 4.6). Uçağın yandan görünüşü Şekil 4.14(a)'daki fotoğrafta görülmektedir. Modelin tüm yüzeyleri, radar aydınlatma frekanslarına opak görünmeleri için metalden yapılmıştır. Frekans verisi 75~110 GHz aralığında 256 noktada toplanmıştır. Şekil 4.14(b)'deki Gİ algoritması ile oluşturulmuş, uçağın 60°'lik görüntüsü görülmektedir. Hedefin önü sola bakmaktadır. Uçağın, özellike gövde ve arka kısmındaki yatay kanat yapısının, güçlü saçılım merkezleri oluşturduğu farkedilmektir. Hedef yüzeyinin W-bant aydınlatma frekanslarında, göreceli olarak düz (smooth) olmamasından, yüzeyin eğimli yapısından ve kısıtlı açısal bantgenişliği (yani 60°) taramasından dolayı, uçağın genel hatları tam olarak oluşturulamamıştır.



Şekil 4.14. F-16 uçak maketi hedefinin TSAR ile görüntülenmesi. (a) Hedefin fotoğrafı, (b) Gİ algoritması ile tekrar oluşturulmuş görüntüsü.

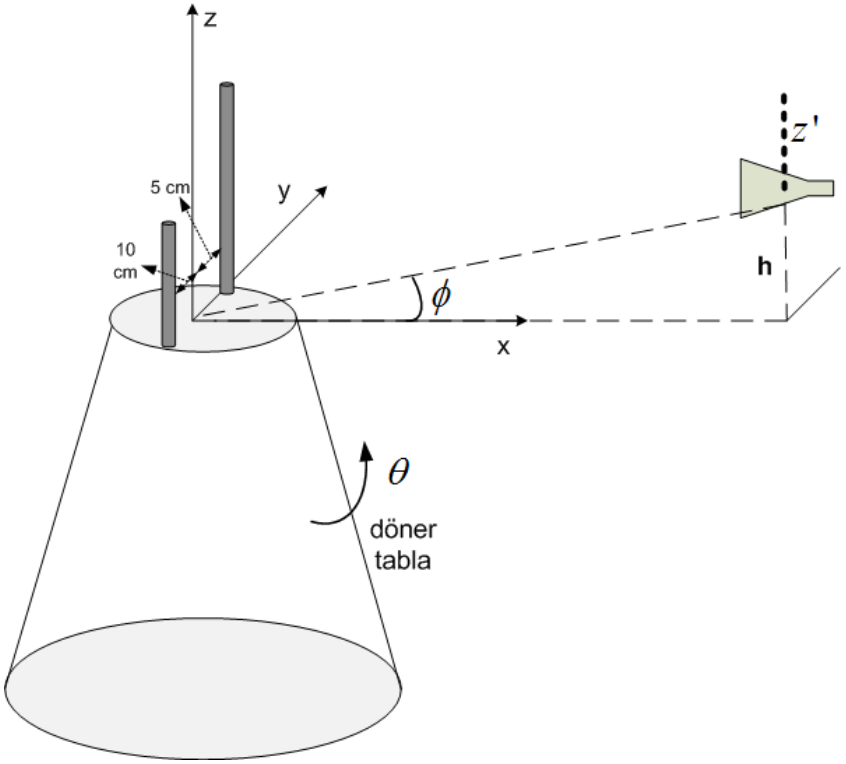
4.4. 3B YAKIN-ALAN TSAR GÖRÜNTÜLEME

Küresel tarama geometrili SAR/TSAR düzeneklerinin, kompleks ve pahalı sistemler olmasından dolayı, silindirik açıklık kullanan 3B SAR/TSAR sistemleri üzerine çalışılmış, çeşitli nümerik ve deneysel görüntüleme sonuçları elde edilmiştir. 3B görüntülemenin çok fazla hesaplama yükünden dolayı, veriler düşük örnekleme oranları ile örneklenmiş, görüntüleme hacimi de $64 \times 64 \times 64$ piksel boyutu ile sınırlandırılmıştır.

4.4.1. İki Noktasal Hedefin 3B TSAR Görüntüleme Benzetimi

Şekil 4.15'de, 3B monostatik SAR/TSAR görüntülemenin, silindirik açıklıklı tarama geometrisi ile gerçekleştirimi görülmektedir. Alıcı-verici anteni, z eksenindeki her bir ölçüm noktasında (ya da karşılık gelen alçalış açısı $\emptyset$'de), döner-tabla yardımıyla $360°$'lik azimut örnekleme noktalarına ayarlanabilen hedefin, bu bakış açılarındaki gerisaçılım verilerini toplar. Kısım 3.2.2.4.'de sunulan yakın-alan algoritmalarının hepsi, bu geometriye uygulanabilir olmakla birlikte, bu kısımda elde edilen 3B yakın-alan TSAR görüntüleri Gİ algoritması ile görüntülenmiştir.

Algoritma, önce silindirik geometriye adapte edilmiş, daha sonra TSAR benzetim verilerine uygulanmıştır.

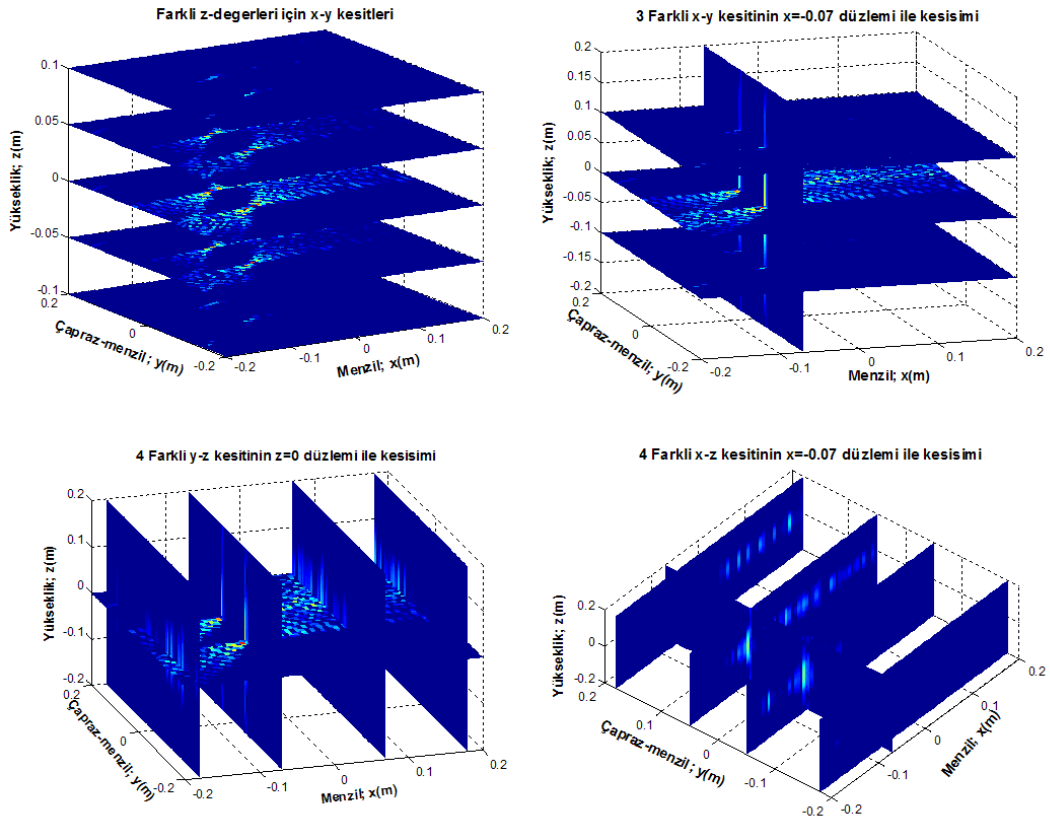


Şekil 4.15. Silindirik tarama geeometrili TSAR ölçüm düzeneği.

Hedef olarak, (x, y, z) koordinatları $(-0.07, -0.05, 0)$ ve $(-0.07, 0.05, 0)$ olan iki noktasal saçıcı şeçilmiştir. Monostatik konfigürasyonda anten, hedef merkezine $5\,m$ mesafede konumlandırılmıştır. Frekans verisi $30 \sim 40\ GHz$ bandında 201 noktada, azimuth açısı $0 \sim 60°$ bandında 201 noktada ve yükseklik de $-0.1 \sim 0.1\ m$ bandında 101 noktada alınmıştır. Bu değerler ile azimut açısının artışı $\delta\theta = 0.3°$'ye, yükseklikteki artışı da $\delta z = 0.2$ cm'ye denk gelmektedir. Hedefin çapraz-menzildeki maksimum boyutu 5 cm alınırsa, Denklem (3.65)'e göre Nyquist kriterinin azimut açsısı için en sıkı koşulu $\delta\theta \leq 2.14°$ olur; dolayısıyla seçilen azimut açı adımı uygundur. Antenin elevasyon yönündeki ışıngenişliği, $\emptyset_z = 180°$ alınırsa, yükseklik yönündeki Nyquist kriteri ise $\delta_z \leq 0.19$ cm olarak hesaplanır. Benzetimde seçilen artış değeri, bilgisar hafıza kısıtlamasına

bağlı olarak, bu kriterin az bir farkla dışında (yani $\delta z = 0.2$ cm) kalacak şekilde alınmıştır.

3B görüntülemenin çok fazla hesap yükü gerektirmesinden dolayı, Gİ algoritmasının uygulanması sonucu elde edilen 3B sonuç görüntüsünün, bazı düzlemsel kesitleri Şekil 4.16'da sunulmuştur. Görüntüler incelendiğinde görüntüleme çözünürlüğünün düşük olmasına rağmen, hedeflerin doğru yerlerinde odaklanmalarının yapıldığı görülmektedir. Bununla birlikte, Nyquist örnekleme kriterinin, yükseklik ekseninde sağlanamamasına bağlı olarak, saçıcı enerjilerinin, bu eksen doğrultusunda yayıldığı da farkedilmektedir.

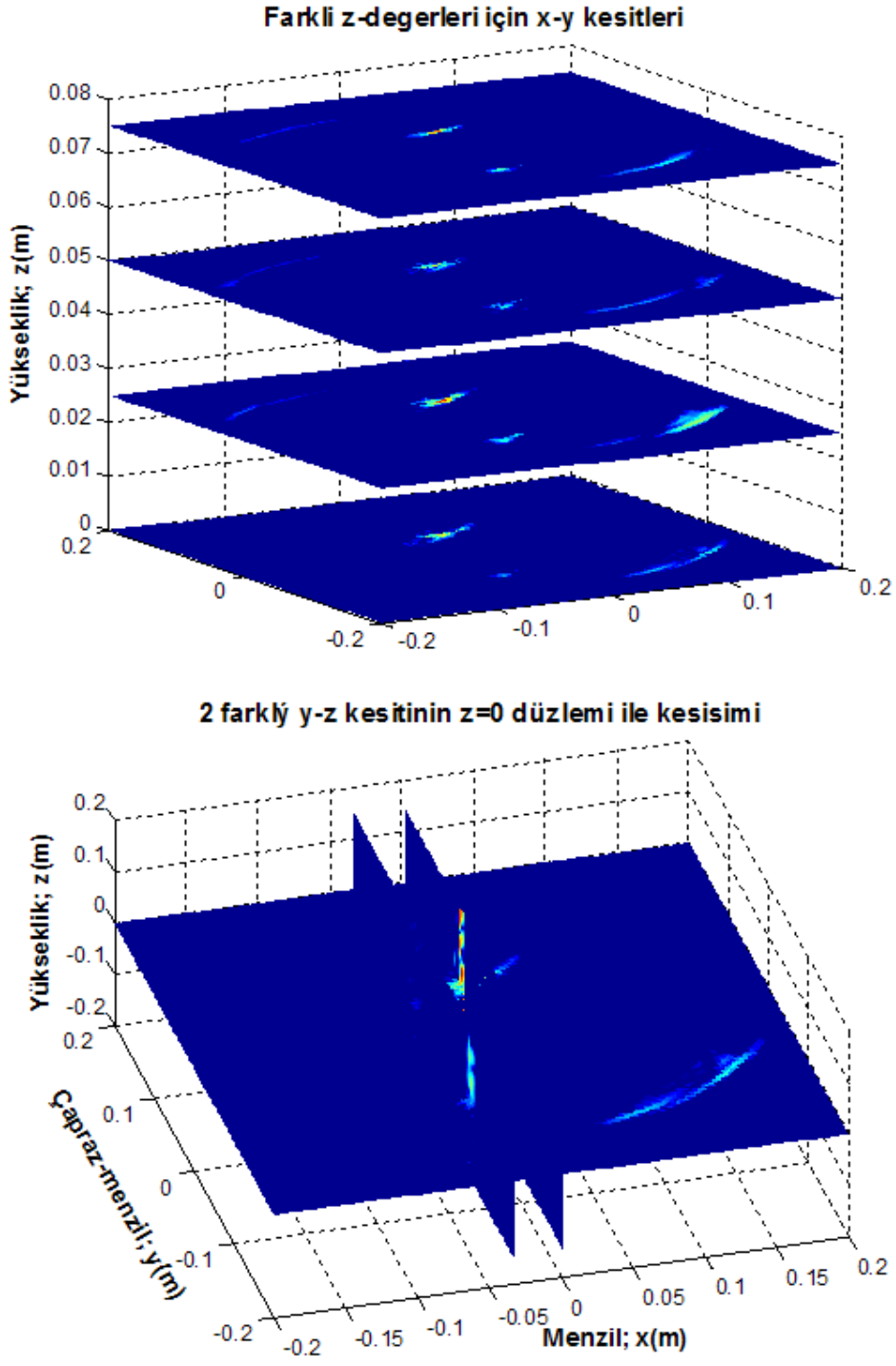


Şekil 4.16. İki noktasal hedefin, 3B TSAR görüntüleme benzetimi. Görüntüler Gİ algoritması ile odaklanmıştır. 3B verinin görüntülenmesi zor olduğundan, hacimsel görüntü, farklı düzlem kesitleri halinde gösterilmiştir.

4.4.2. İki Metal Çubuğun 3B TSAR ile Görüntülenmesi Deneyi

Yansımasız oda ortamında, Şekil 4.15'de görülen silindirik tarama geeometrili TSAR ölçüm düzeneği oluşturulmuştur. $z-$ekseni yönünde, özellikle milimetre dalga bandı çalışması için, örtüşmesiz görüntülemeyi sağlayan örnekleme aralığı göreceli olarak düşük olur. Bu ölçümleri hassas ve otomatik şekilde gerçekleştiren konumlandırıcı donanınmı, karmaşık ve pahalı olmasından dolayı temin edilememiştir. Bu sebeple, elevason verileri, hedef yüksekliklerinin tripod yardımıyla ve manuel olarak değiştirilmesi ile toplanmıştır. SAR/TSAR görüntülemede, toplanan verilerin eşzamanlılığı çok önemli olduğundan dolayı, bu tip ölçümlerin tam sağlıklı sonuçlar üretmeme olasılığı da bulunmaktadır. Yine, bu ölçüm zorluğuna bağlı olarak, $z-$ekseninde kısıtlı sayıdaki yükseklik noktalarında ölçümler alınmıştır.

Deneyde, Şekil 4.15'deki gibi konumlandırılmış, farklı uzunluktaki iki metal çubuk, hedef olarak alınmıştır. TX/RX anteni yarı-monostatik modda koordinat orijininden 1.3 m mesaye yerleştirilmiştir. Frekans verisi $80{\sim}90\ GHz$ aralığında 256 noktada, açısal veri $0°{\sim}45°$ aralığında 91 noktada ve yükseklik verisi $0{\sim}7.5\ cm$ aralığında 15 noktada toplanmıştır. Tabi, z-ekseni ölçümlerinin bu değerleri ile yine Nyquist kriterinin dışında kaldığı kolayca hesaplanabilir. Şekil 4.17'de Gİ algoritması ile oluşturulmuş 3B görüntülemenin bazı kesitleri görülmektedir. Bu imajlar incelenirse, uzun metal çubuğun, kısa çubuğa göre daha güçlü gerisaçılıma sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.17'nin alt görüntüsüne bakılırsa, iki hedefin yanca konumları doğru olmakla birlikte, kısa çubuğun menzil koordinatında bir sapma olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, deneyde yarı-monostatik modda iki antenin kullanılmasına rağmen, görüntülemede menzil ifadesinin, tam monostatik olarak modellenmesinden kaynaklanmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle milimetre frekanslarında, yankı sinyalinin faz bilgisinde önemli yanlışlıklara yol açmakta, dolayısıyla hedeflerin menzil konumları, tam doğrulukla görüntülenememektedir. Bu durumu gözardı ederek, Şekil 4.17'deki görüntülerde, dikey (z-yönünde) gerisaçılım genliklerinin değişmesi, dikey filtrelemenin olduğunu ve 3B görüntülemenin doğru çalıştığını göstermektedir.



Şekil 4.17. İki metal çubuğun, 3B TSAR görüntüleme deneyi. Üst: farklı $x-y$ kesitleri, Alt: iki farklı $y-z$ kesitinin $z=0$ ile kesişimi.

4.5. MİLİMETRE-DALGA GÖRÜNTÜLEME İLE GİZLENMİŞ HEDEF ALGILAMASI DENEYLERİ

4.5.1. Motivasyon

İnsan üzerinde, giysilerin altındaki metal veya dielektrik tehdit nesnelerin algılanabilmesi için, hem MMD kullanılması hem de insan vucudunun tüm perspektiftlerden görüntüsünü sağlayan 3B görüntülerin oluşturulması gerekmektedir [59, 61]. Donanımsal olarak bu işlem, hem MMD verilerin ölçülmesi ve toplanması konusunda, hem de 2B anten tarama geometrisinin hassas şekilde yapılması konusunda zorluklar içerir. Görüntüleme tekniği de, 3B için daha karmaşık hale gelmekte ve işlem yükü oldukça artmaktadır. Ek olarak, tehdit objelerinin ve gizleyici tekstil malzemesinin, çok fazla çeşitlilikte ve materyal yapısında olması da, başarılı görüntülemeyi zorlayıcı etkenlerdir.

Son yıllarda, havaalanı kontrol noktalarında duran insanların, 20~30 GHz bandında (Ka bant) aktif görüntülemelerini sağlayan sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemlerde, insan vücüduna MMD ışıması, mekaniksel olarak 270° dönen sensörler ile düşük düzeyde gönderilmekte ve geriyansıyan sinyaller kullanılarak vücut konturlarının görüntülenmesi yapılabilmektedir. Görüntüdeki anormallikler, bir insan tarafından analiz edilerek birkaç santimetre boyutundaki hedeflere kadar algılama gerçekleştirilebilmektedir. Ancak, geliştirilen bu sistemler, önceki paragrafta belirtilen zorluklarından dolayı, henüz tam başarı sağlayamamışlardır.

Probleme, [60]'deki doktora tezinde, düzlemsel SAR tarama geometrisi ile gerçekleştirilen MMD görüntüleme deneyleri ile yaklaşılmıştır. Çeşitli hedef, veri toplama parametreleri ve gizleyici malzeme kombinasyonları için elde edilen 2B MMD görüntülemeleri, 94 GHz prototip sistemi üzerinden çalışılmıştır. Bu tezde de, bu çalışmaya paralel olarak, farklı sistem parametrelerinnin, MMD görüntüleme performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ancak, gizlenmiş nesne algılanması uygulamasında, insan vücudunun tüm perspektiflerden taranmasının en iyi yolu, taramayı silindirik koordinatlarda menzil (derinlik), açı ve yükseklik boyunca yapmak olduğundan, bu tezde, dairesel tarama geometrisi kabul edilmiştir.

4.5.2. Yansımasız Oda Veri Örnekleri

Çeşitli tekstil malzemeleri (polyester, pamuk, kışlık mont) altında gizlenmiş, metal ve dielektrik hedeflerin (1 cm^3 küp, 2 cm^3 küp ve gerçek bir tabanca), yansımasız oda ortamında W-bant ölçümleri alınmış, 2B TSAR görüntülemeleri elde edilerek, görüntüler hedef algılama ve tanıma problemi açısından değerlendirilmiştir. Tüm deneylerde, TX/RX anteni yarı-monostatik modda ve hedef merkezinden 1.3 m mesafede konumlandırılmıştır. Ek olarak, toplanan tüm veriler Denklem (3.31)'de verilen formüle göre kalibre edilmiş, tüm görüntülemeler, kıyaslama amaçlı olarak hem Gİ, hem de OOD algoritmaları kullanılarak yapılmıştır. Bu kısımda elde edilen sonuçlar [91, 92, 93, 94]'de verilen kaynaklarda da sunulmuştur.

4.5.2.1. Metal ve Dielektrik Küp Hedefleri

Bu deneyin amacı, MMD görüntülemenin kabiliyet ve kısıtlamalarını, farklı tekstil malzemeleri altına gizlenmiş değişik yapıdaki ve boyuttaki küp deneyleri için test etmekti. Bu sebeble, üç değişik küp modeli hedef olarak alınmıştır; 2 cm^3 metal küp, 1 cm^3 metal küp ve 2.1 değerinde dielektrik sabite sahip 1 cm^3 teflon küp. Ölçümlerde küplerin üzerini örtmek için, biri % 100 pamuk içerikli (bundan sonra COTT ile adlandırılacak), diğeri de % 100 polyester içerikli (bundan sonra POLY ile adlandırılacak), iki farklı tekstil malzemesinden yararlanılmıştır. Bu malzemelerin yapıları ve ölçülen bağıl iletkenlikleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. Daha sonra, Çizelge 4.4'de verilen hedef-örtü kombinasyonları için yakın-alan TSAR ölçümleri yapılmıştır. Bütün ölçümlerde, frekans menzili $80{\sim}100$ GHz aralığında, azimut menzili de $0°{\sim}360°$ aralığında seçilmiştir. Maksimum boyutlu küp hedefini kapsayan çemberin yarıçapı $\sqrt{2}$ cm alınırsa, karşılık gelen frekan/açı örnekleme gereksinimleri Denklem ve Denklem 'den hesaplanmış, frekans ve açı ölçümlerinin minimum sayıları, sırasıyla $N_f \geq 176$ ve $N_\theta \geq 119$ olarak bulunmuştur. Bu hesaplamalara dayanarak, deneyde kullanılan frekans ve azimut açısı örnekleme sayıları sırasıyla, $N_f = 256$ ve $N_\theta = 361$ olarak alınmıştır. Bu veri toplamanın, Gİ ve OOD algoritmaları için elde edilmiş İYF görüntüleri, daha önce Şekil 4.9'da sunulmuştu. İki algoritmanın İYF sonuçları hemen hemen aynı olmasına rağmen,

deneysel performansları farklılık gösterebileceğinden, burada iki tekniğin de görüntüleme sonuçları sunulacaktır. Yine, daha önceki aynı İPY analizi sonucundan, görüntüleme ÇHA değerlerinin, bu veri toplamı için 0.3936 mm^2 civarında olacağı tahmin edilmişti. Şekil 4.18'deki fotoğraflarda, 1 cm^3 küpün örtüsüz durumda olduğu ölçümlerinden bir sahne ve POLY tekstili görülmektedir.

Çizelge 4.3. Küp hedeflerini gizlemekte kullanılan tekstiller ve özellikleri.

Malzeme Adı	*Yapısı*	*Ölçülen Elektriksel Geçirgenliği (F/m)*
COTT	100 % pamuk	$1.6859 \times (8.85 \times 10^{-12})$
POLY	100 % polyester	$1.2451 \times (8.85 \times 10^{-12})$

Çizelge 4.4. Küp deneylerinin ölçüm senaryoları.

Senaryo	*Hedef*	*Örtüleme Durumu*
1	metal küp (2 cm^3)	örtüsüz
		1 katmanlı *COTT*
		3 katmanlı *COTT*
		3 katmanlı *POLY*
2	metal küp (1 cm^3)	örtüsüz
		1 katmanlı *COTT*
		1 katmanlı *POLY*
		3 katmanlı *POLY*
3	teflon küp (1 cm^3)	örtüsüz
		1 katmanlı *COTT*
		1 katmanlı *POLY*
		3 katmanlı *POLY*



Şekil 4.18. Küp hedeflerinin MMD ile görüntülenmesi deneyinden fotoğraflar. (a) 1 cm^3 küpün örtüsüz ölçümünden bir sahne, (b) küplerin üstünü örtmek için kullanılan tekstil malzemesi (POLY diye adlandırılmıştır).

2 cm^3 Metal Küp İçin Sonuçlar

2 cm^3 metal küpün, Çizelge 4.4'de görülen Senaryo 1 ölçümlerinin görüntüleme sonuçları Şekil 4.19'da verilmiştir. Şekil 4.19(a)'da verilen OOD algoritması sonuçlarının, Şekil 4.19(b)'de verilen Gİ algoritması sonuçları ile neredeyse birebir örtüştüğü görülmektedir. Bu da Gİ algoritması ile yapılan görüntülemenin doğruluğunu ispatlamaktadır. MMD algılamanın performansını ölçmek için, farklı örtü durumundaki görüntüler kıyaslanırsa şu bilgiler elde edilir:

i) Küp, örtüsüz durum görüntüsünde kolaylıkla belirlenmiştir. Diğer örtülü durum görüntüleri, bu referans görüntüsüne göre az veya çok bozulmalar göstermiştir.

ii) "1 katmanlı *COTT*" görüntüsü ile "3 katmanlı *COTT*" görüntüsü kıyaslanırsa, gizleyici tekstilin kalınlığının, algılamayı olumsuz olarak etkilediği açıkça görülmektedir.

iii) "3 katmanlı *COTT*" ve "3 katmanlı *POLY*" görüntüleri kıyaslanırsa, örtü kalınlıklarının bu iki durumda aynı olmasına rağmen, POLY sonucunun COTT sonucuna göre daha az bozulum gösterdiği görülmektedir. COTT

tekstilinin daha yüksek dielektrik sabitine sahip olduğu göz önüne alınarak, yüksek dielektrik sabitlerine sahip tekstil materyallerinin olduğu durumlarda MMD algılamanın daha zor olduğu sonucuna ulaşılabilir.

Şunu da belirtmekte fayda vardır ki, bu tip düz yüzeylere sahip hedefler, yüzeyleri aydınlatma yönüne normal (dik) oldukları zaman dominant enerji yansıtırlar. Elde edilen sonuçlar, bu mekanizmanın, düşük iletim özelliklerine sahip dielektrik tekstil örtüsü ile değiştiği durumlarda, hedef tanımlama işleminin zorlaşacağını göstermektedir.

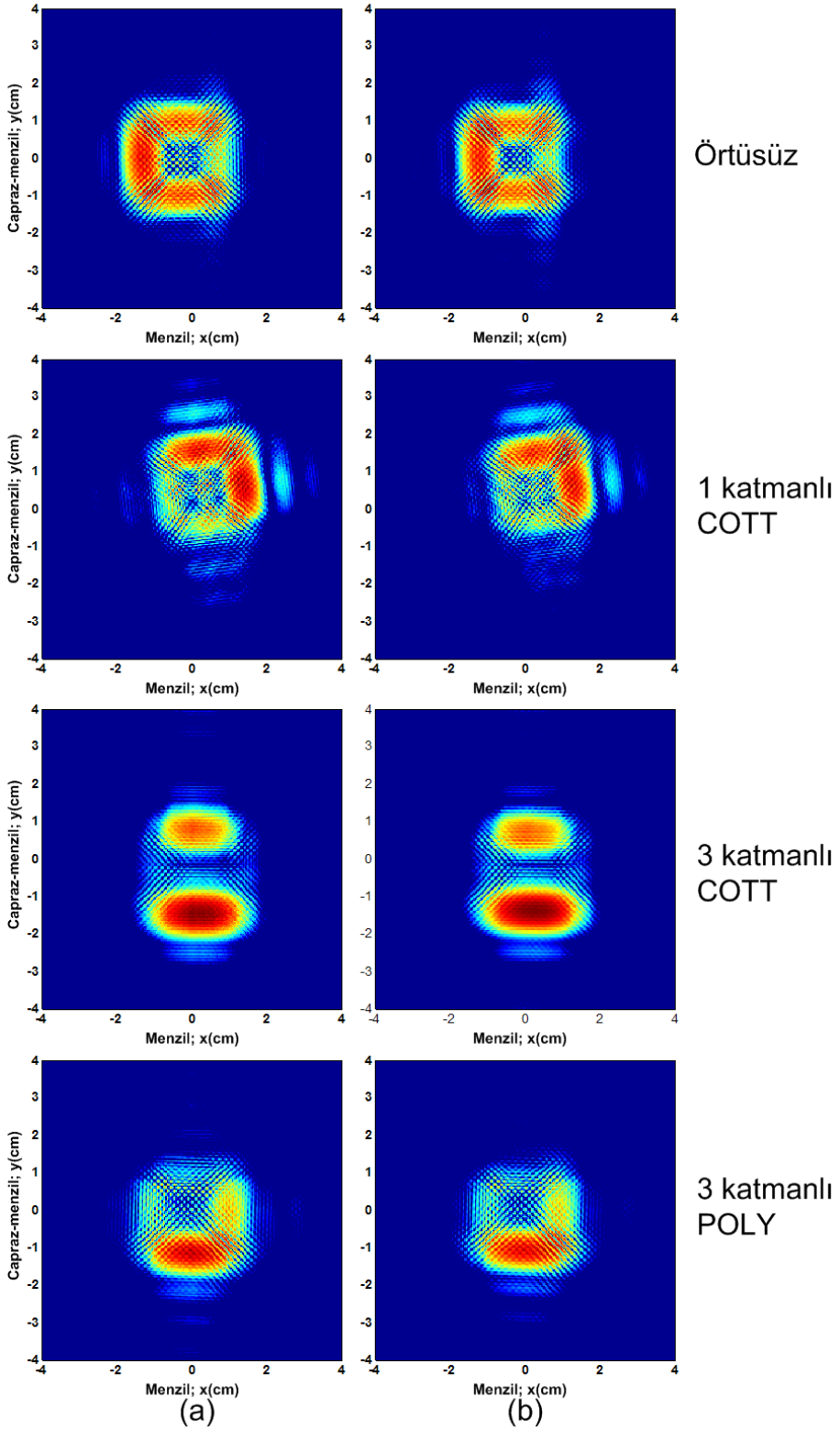
1 cm^3 Metal Küp İçin Sonuçlar

1 cm^3 metal küpün, Çizelge 4.4'deki Senaryo 2 ölçümlerinin sonuçları Şekil 4.20'de görülmektedir. Şekil 4.20(a) ve Şekil 4.20(b)'den görüleceği üzere, iki görüntüleme algoritması, yine benzer görüntüler oluşturmuştur. Önceki örnekteki 2 cm^3 sonuçları göz önüne alınırsa, küp boyutunun küçülmesi ile küp kenarları görüntüde düz olarak oluşturulamamıştır. Fakat yine de hedef, doğru boyutta ve konumda görüntülenmiştir. "1 katmanlı *COTT*" görüntüsünün, örtüsüz referans görüntüsünden çok farklı yapıya sahip olması, bu tip küçük nesnelerin yüksek dielektrikli gizleyici tekstiller altında tanımlanmalarının zor olduğunu gösterir. "1 katmanlı *POLY*" görüntüsü de göz önüne alınırsa, gizleyici materyalin elektriksel geçirgenliğinin düşük olması durumunda, bu hedef tanıma görevinin çok daha zorlaşacağı anlaşılmaktadır.

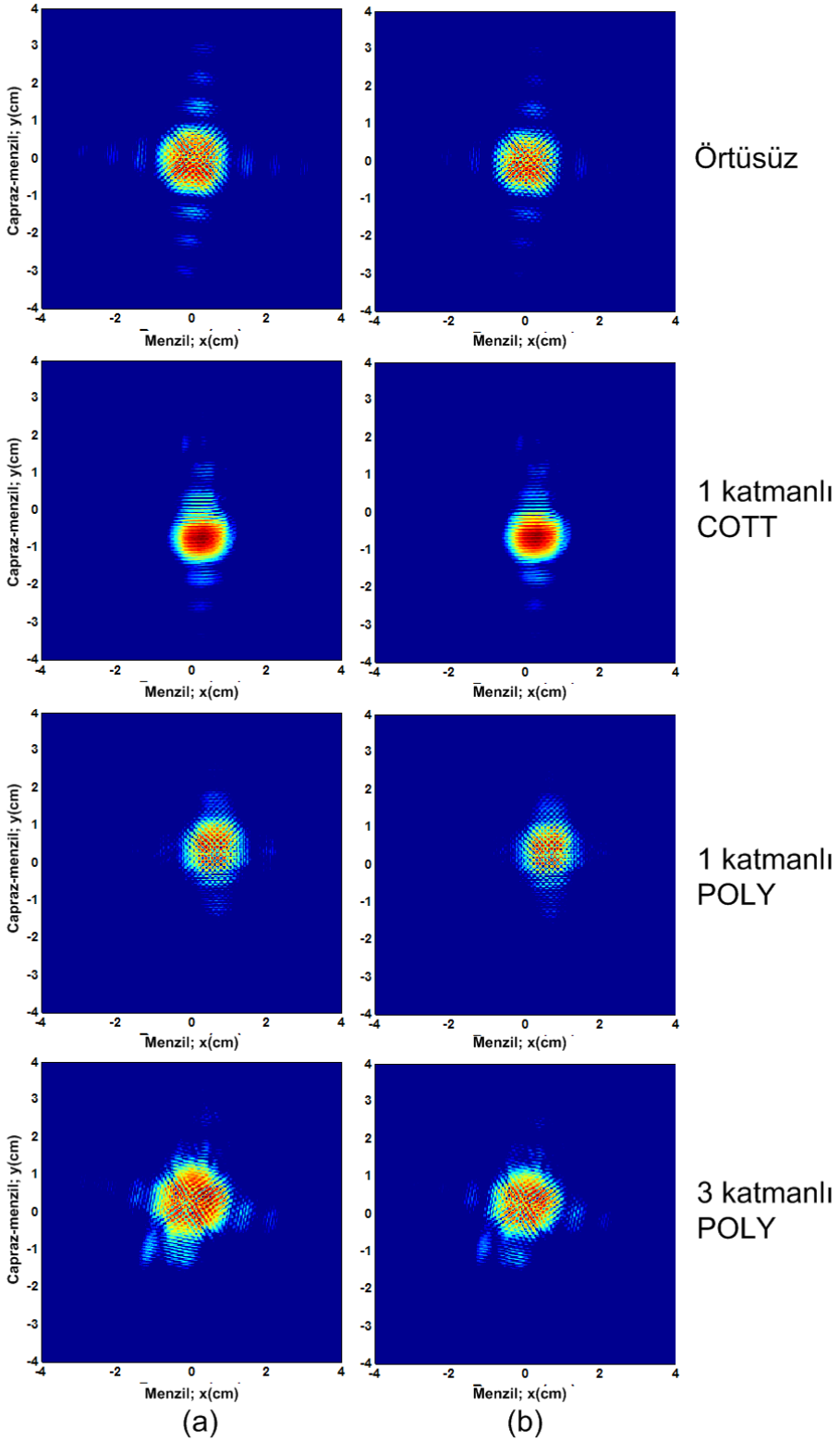
1 cm^3 Teflon Küp İçin Sonuçlar

1 cm^3 teflon küpün Çizelge 4.4'deki Senaryo 3'de listenelen örtü durumları için elde edilen görüntüleme sonuçları Şekil 4.21'de sunulmuştur. Sonuçlardan görüleceği üzere küp yalıtkan yapıda olmasına rağmen her iki tekstil malzemesi altında da başarı ile algılanabilmiştir. Ancak, dielektrik küpün tam şeklinin, bütün görüntülerde elde edilemediği göze çarpmaktadır. Yansıyan enerji, bütün azimut açıları boyunca dağılmıştır. Bu olay, küpün dielektrik malzeme yapısında olmasından dolayı, EM dalganın içine penetre etmesinden ve iç köşegenlerinde meydana gelen

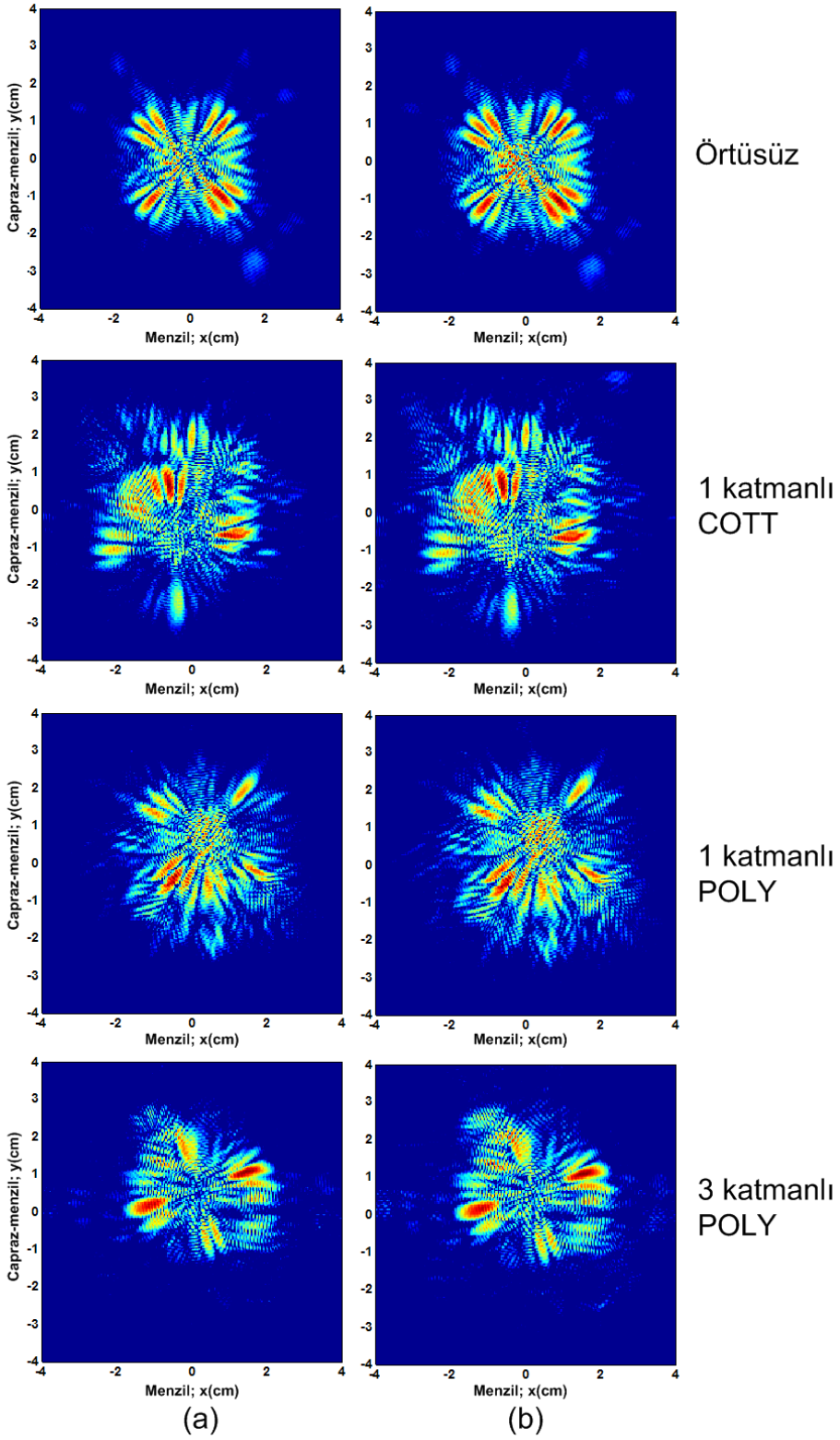
geriyansıma olgusundan kaynaklanmaktadır. Metal küpler, EM dalganın, küpün kenarına dik olarak geldiği durumda geriyansıma yaptıkları halde, dielektrik küplerde bu olay diğer açılarda da gerçekleşmektedir. Dolayısıya, örtüsüz durum görüntüsünde daha belirgin görülen, düzgün (ya da simetrik) yansıma mekanizmaları oluşmuştur. Diğer tüm örtü durumlarında ise mekanizmanın bozulduğu ve rasgele biçimde kendini gösterdiği görülmektedir. Bu durumda, gizlenmiş küçük dielektrik hedeflerin MMD ile algılanmaları ile ilgili olarak, bu tip nesnelerin algılanmaları yapılsa bile, tanımlanmalarının, diğer bir ifade ile hedef hatlarının belirlenmesinin oldukça zor olduğu söylenilebilir.



Şekil 4.19. 2 cm^3 metal küpün farklı örtü durumları için MMD radar görüntüleri: (a) OOD (b) Gİ algoritması ile görüntüleme (görüntü dinamik menzili: -20 dB).



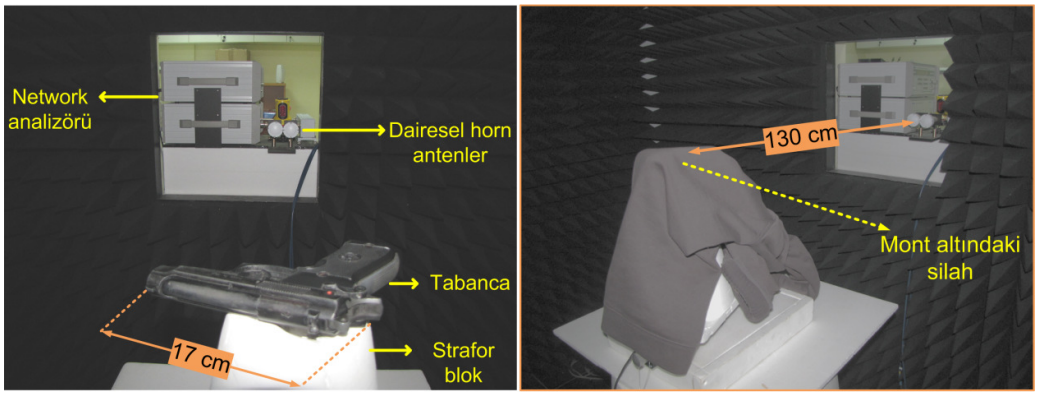
Şekil 4.20. 1 cm^3 metal küpün farklı örtü durumları için MMD radar görüntüleri: (a) OOD (b) Gİ algoritması ile görüntüleme (görüntü dinamik menzili: −20 dB).



Şekil 4.21. 1 cm^3 teflon küpün farklı örtü durumları için MMD radar görüntüleri: (a) OOD (b) Gİ algoritması ile görüntüleme (görüntü dinamik menzili: -20 dB).

4.5.2.2. Tabanca Hedefi

Bu deneyde, görüntüleme sisteminin performansının, daha gerçekçi tehdit nesnelerinin olduğu durumlar için test edilmesi amacıyla, metal bir tabanca hedef olarak seçilmiştir. Önceki deneylerde kullanılan COTT ve POLY gizleme tekstillerine ek olarak, bu deneyde bir kışlık mont (% 70 pamuk and % 30 polyester) giysi materyali de kullanılmış, Çizelge 4.5'deki listenen örtü durumları için tabanca hedefinin MMD ölçümleri alınmıştır. Şekil 4.22'deki fotoğraflarda, ölçüm düzeneğini ve kışlık mont altındaki tabanca ölçümününden sahneler görülmektedir. Bu deneyde, hedefi çevreleyen çember yarıçapını 19 cm kabul ederek ve örnekleme kriterlerini buna göre hesaplayarak, frekans verisi 80~90 GHz aralığında 256 noktada, yanca verisi de 0°~360° aralığında 1441 adımda toplanmıştır. Dolayısıyla, bu durumda, küp deneylerinden farklı olarak, frekans bantgenişliği 10 GHz azaltılmış, azimut artış miktarı da 1°'den 0.25°'ye düşürülmüştür. Kısım 4.2.1'de bu veri toplamanın İPY fonksiyonu analizinden, OOD ve Gİ algoritmalarının ÇHA değerleri, sırasıyla 78.73 ve 9.84 mm^2 olarak hesaplanmıştı.

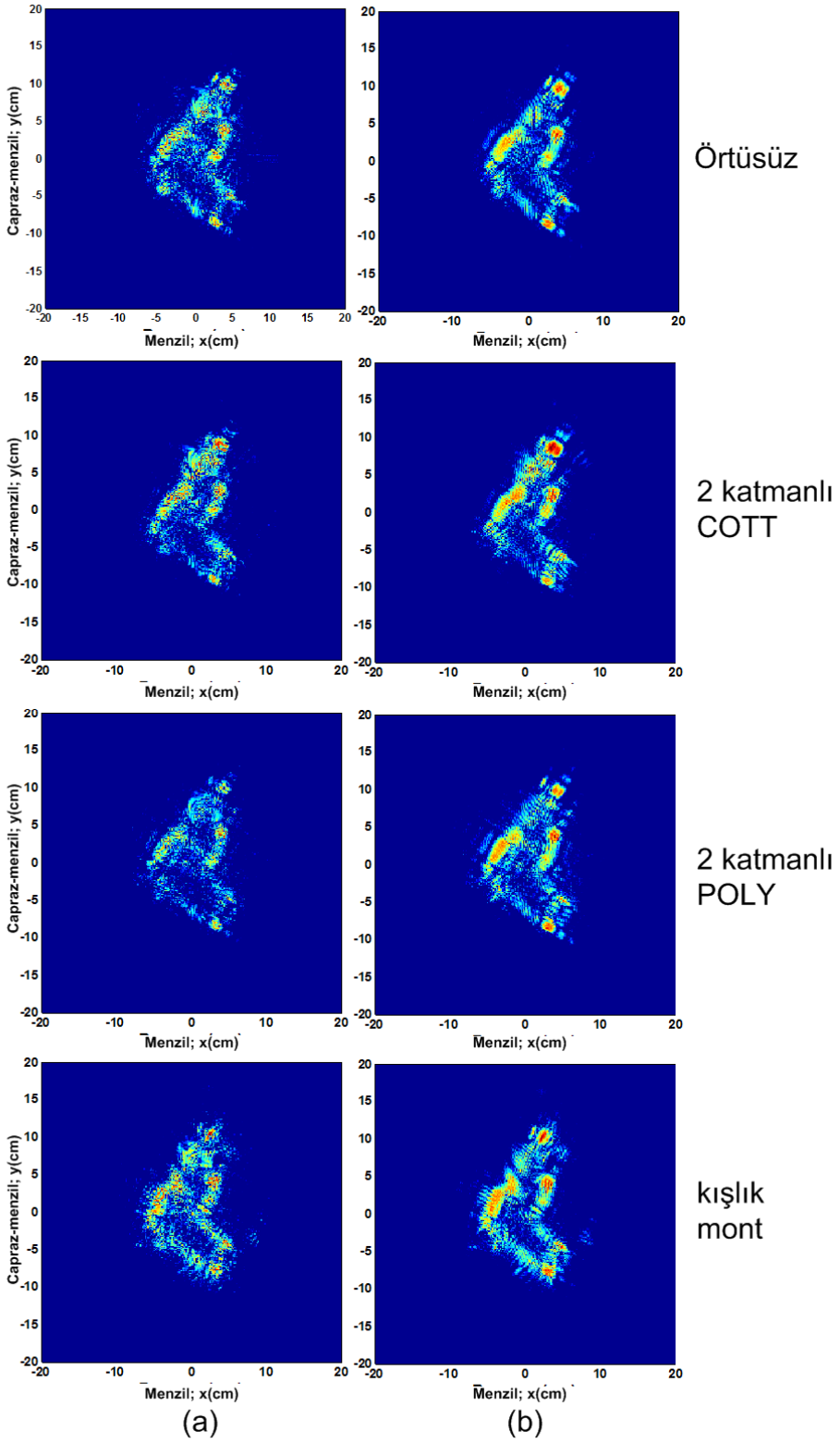


Şekil 4.22. Tabanca hedefinin MMD ile görüntülenmesi deneyinden fotoğraflar. (a) örtüsüz (b) kışlık mont ile örtülmüş ölçümlerinden sahneler.

Çizelge 4.5. Tabanca hedefi ölçümlerinin örtüleme konfigürasyonları.

Hedef	*Örtüleme Durumu*
Tabanca	Örtüsüz
	2 katmanlı *COTT*
	2 katmanlı *POLY*
	Kışlık mont

Çizelge 4.5'deki farklı örtüleme durumları için elde edilen OOD ve Gİ algoritmalarının görüntüleme sonuçları, sırasıyla Şekil 4.23(a) ve Şekil 4.23(b)'de görülmektedir. OOD algoritmasının sonuçları ile Gİ algortimasının sonuçları karşılaştırılırsa, tabancanın genel şeklinin ve baskın saçıcılarının Şekil 4.23(b)'deki görüntülerde daha net olduğu görülmektedir. Yani, bu veri toplama için, Gİ algoritmasının, OOD algortimasına göre daha iyi performans verdiği görülmektedir. Bu sonucun, algoritmaların önceki kısımlarda verilen ve bu veri toplama parametreleri için İPY görüntüleri üzerinden hesaplanan ÇHA değerleri ile uyumlu olduğunu da belirtmekte fayda vardır. Buradaki asıl amaç da, Gİ algoritmasının pratik bir yakın-alan geniş-açı görüntüleme uygulamasındaki performansının belirlenmesi olduğundan, elde edilen sonuçlar Gİ algoritmasının görüntüleme peroformasının yüksek olduğuna işaret etmektedir. Diğer yandan, her iki algortimanın da sonuç görüntülerinin, tabancanın tüm tekstil malzemeleri altında tanımlanmasını verecek düzeyde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, kışlık mont altındaki tabancanın MMD TSAR görüntüsünde hafif bozulmalar olduğu görülmektedir. Bu da, giysi kalınlığının, güvenilir algılamayı engelleyici olumsuz etkilerinin derecesi hakkında, deneysel bilgi sağlamaktadır.



Şekil 4.23. Tabanca hedefinin farklı gizleme durumları için MMD görüntüleri: (a) OODA, (b) GİA sonuçları. (görüntü dinamik menzili: -20 dB).

4.6. YAKIN-ALAN TSAR GÖRÜNTÜLEME İLE RKA KESTİRİMİ

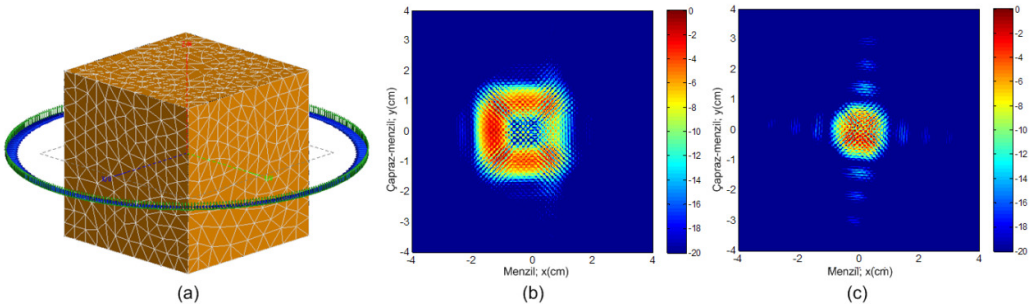
Kısım 2.4.1 ve Kısım 3.2.3'de açıklandığı üzere, TSAR görüntülemenin en önemli uygulama alanlarından biri, RKA odalarında toplanan yakın-alan gerisaçılım verileri ile hedeflerin uzak-alan RKA'larının kestirilmesi problemidir. Genellikle askeri hava araçlarının toplam RKA değerlerini belirlemek, kontrol etmek ve azaltmak amacı ile gerçekleştirilen bu problem, bu çalışmada, MMD bandı kullanımı, yakın-alan kalibreli yansımasız oda ölçümleri ve farklı yansıtırlıklı karmaşık küçük boyutlu nesneler için incelenmiştir. Bu doğrultuda önce, incelenen nesnelerin farklı azimut açı menzillerinde yakın-alan TSAR ölçümleri, genişbant adım-frekanslı dalgaşekli kullanılarak elde edilmiştir. Sonra, yüksek çözünürlüklü hedef görüntüleri oluşturularak, hedefler üzerindeki baskın saçıcılar belirlenmiştir. Daha sonra, Kısım 3.2.3'de anlatılan prosedür ile, hedeflerin uzak-alan RKA değerleri kestirilmeye çalışılmıştır.

Uygulamada, hedef görüntülemesini direkt olarak kutupsal koordinatlarında yapmasından dolayı, OOD algoritması seçilmiştir. Hedef nesneleri olarak, tez çalışmasının önceki deneysel görüntülemelerinde kullanılan, **2** cm^3 metal küp, **1** cm^3 metal küp, gerçek tabanca ve metal yapılı F-16 uçak maketi seçilmiştir. Bu hedeflerin, yakın-alan TSAR görüntüleri, daha önceki kısımların ilgili yerlerinde verilmişti. Bu kısımda sunulacak RKA kestirimi sonuçları, bu görüntüler ve karşılık gelen veri toplama parametreleri için elde edilmişlerdir.

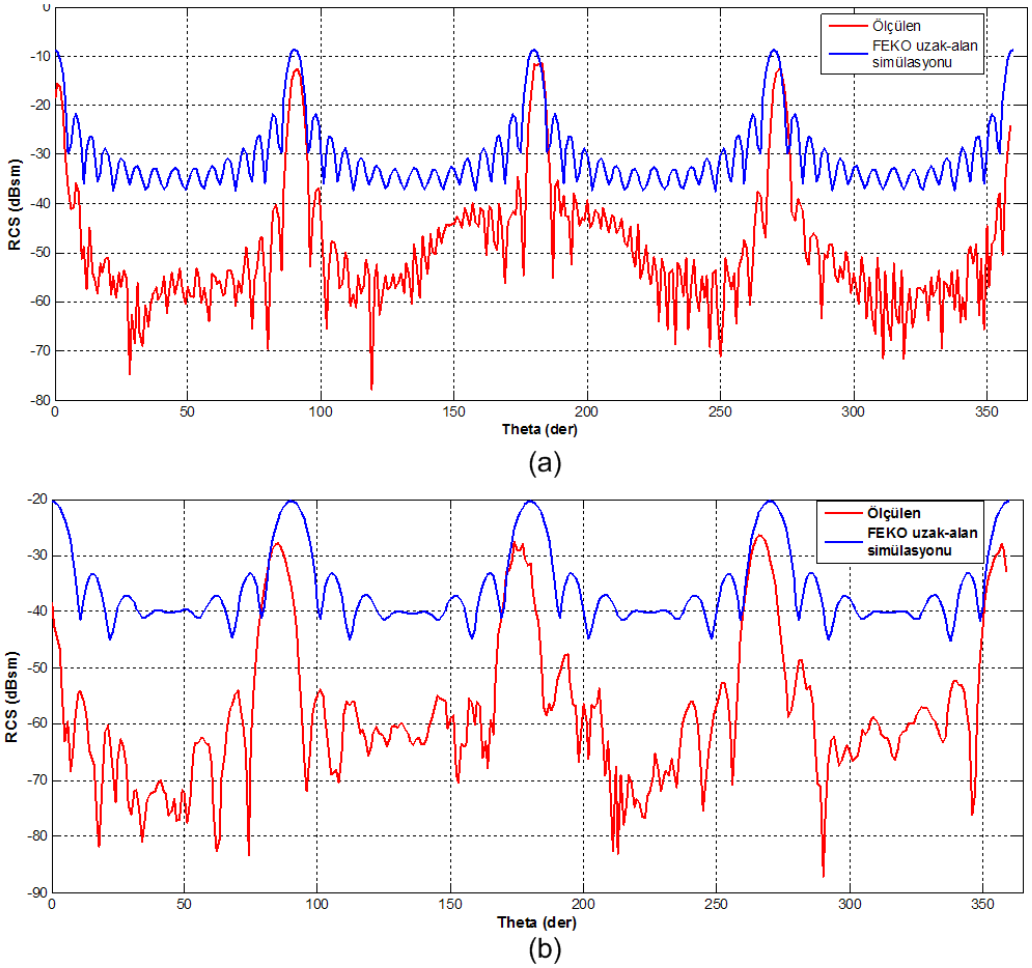
4.6.1. Küp Hedefleri için Sonuçlar

Metalik yapıdaki ve 2 cm^3 ve 1 cm^3 hacimlerindeki küp hedeflerinin $80{\sim}100$ GHz bandı için ve $1°$ açısal artışlarla örneklenmiş tam açıklık verisi için elde edilen TSAR görüntüleri, Kısım 4.4.2.1'de sunulmuştu. Bu görüntülerin, OOD algoritması ile elde edilenleri, RKA kestirimi amacına yönelik, Şekil 4.24'de tekrar sunulmuştur. OOD algortiması, hedef yansıtırlık görüntüsü $\psi(\rho,\varphi)$'yi yapısal olarak kutupsal formatta hesaplar. Kısım 3.2.3'de anlatılan RKA kestirimi prosedüründe ise, zaten $\psi(\rho,\varphi)$ görüntüsüne gereksinim duyulduğundan, OOD algoritması ile elde edilen kutupsal formattaki görüntü, bu prosedüre direkt girdi olur. Bu prosedürün,

küp hedeflerinin OOD ile oluşturulan yakın-alan yansıtırlık görüntülerine uygulanması sonucu ve 80 GHz frekansı için elde edilen ve mutlak RKA grafikleri Şekil 4.25'de görülmektedir. Hedeflerin, Şekil 4.24(a) da görülen benzetim ölçüm modeli ile FEKO'da uzak-alan RKA değerleri de hesaplanmış ve karşılaştırma amaçlı olarak Şekil 4.25'deki grafiklerde verilmiştir. Beklendiği şekilde, küp yüzeyinin, EM aydınlatmasına dik olduğu açılarda yüksek şiddetli gerisaçılım görülmektedir. Her iki küpün de ölçülen RKA değerlerinin, bu maksimum noktalarda, teorik değerleri ile örtüştüğü görülmektedir. Küp yüzeyinin EM ışımasına dik olamdığı diğer açılar için, pratikte ölçülen değerlerin, teorik RKA değerlerinin biraz aşağısında olduğu, fakat patern olarak aynı yapıda olduğu da görülmektedir.



Şekil 4.24. Küp hedeflerinin RKA kestirimi ile ilgili şekiller. (a) metal küpün FEKO benzetim modeli. (a) 2 cm^3 küp, (b) 1 cm^3 küp için yansımasız odada ölçülen yakın-alan TSAR görüntüleri.

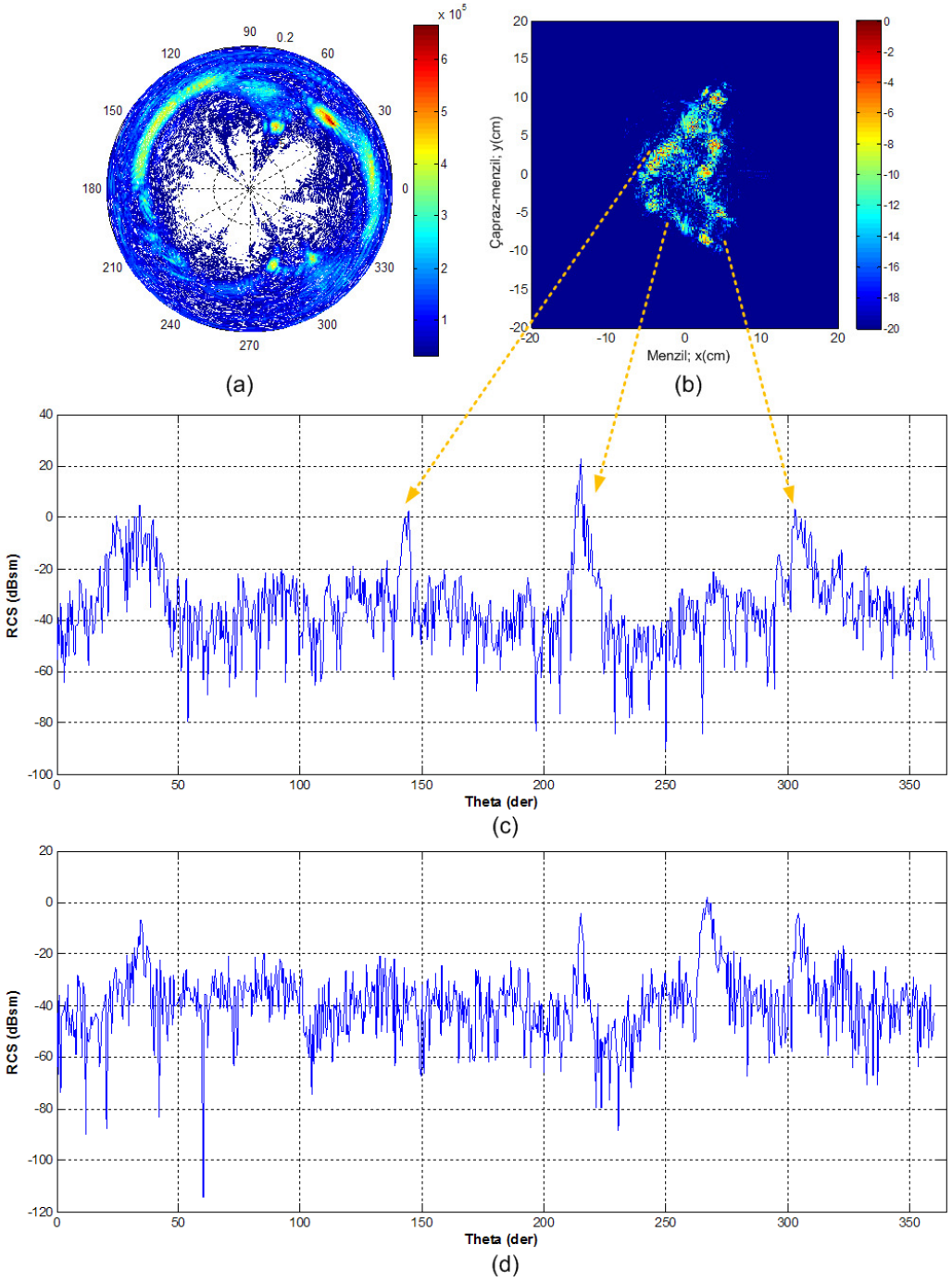


Şekil 4.25. Küp hedeflerinin, gerçek RKA (FEKO) ve ölçülen RKA grafikleri. (a) 2 cm^3, (b) 1 cm^3 küpün 80 GHz için sonuçları.

4.6.2. Tabanca Hedefi için Sonuçlar

Tam açıklıktaki 0.25° açısal adımlarla ve 80~90 GHz bandı için gerisaçılım verileri toplanan tabanca hedefinin (bakınız Şekil 4.22(a)), OOD algoritması sonucu elde edilmiş kutupsal ve kartezyen formattaki yansıtırlık görüntüleri, sırasıyla Şekil 4.26(a) ve Şekil 4.26(b)'de görülmektedir. Hedefin, kutupsal formattaki yakın-alan görüntüsünden elde edilen, 80 GHz ve 90 GHz'deki uzak-alan RKA değerleri, sırasıyla Şekil 4.26(c) ve Şekil 4.26(d)'de sunulmuştur. 80 GHz için hesaplanan grafikten, tabancanın yüksek RKA'larının, beklenildiği üzere, EM aydınlatılmasının tabancanın düz olduğu kısımlara ve tetik bölgelerine tam

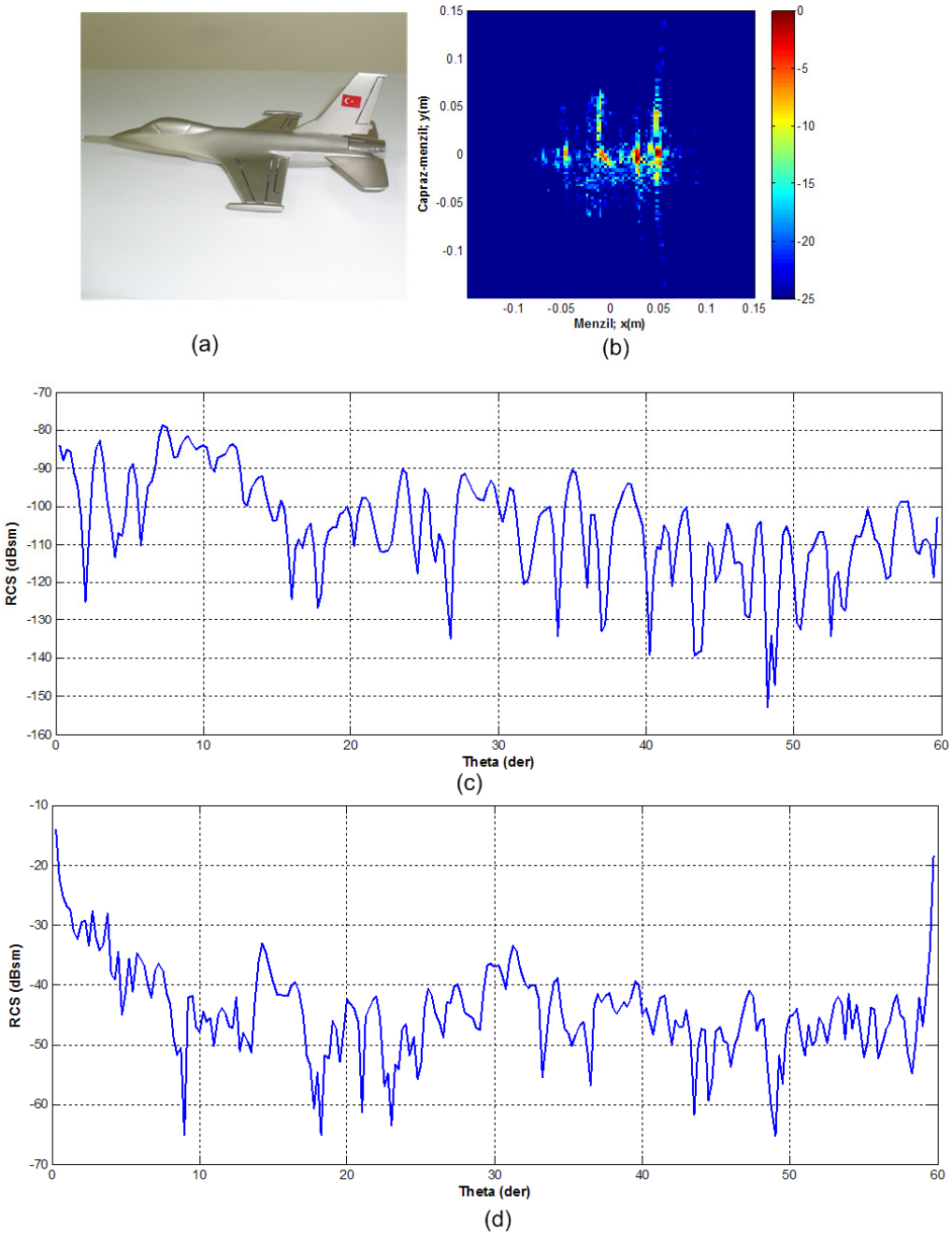
karşıdan baktığı durumlarda oluştuğu görülmektedir. 90 GHz'de ise RKA değerlerinin biraz düştüğü fark edilmektedir.



Şekil 4.26. Tabanca hedefinin RKA kestirimi. (a) kutupsal, (b) kartezyen formattaki yakın-alan TSAR görüntüleri. (c) 80 GHz, (d) 90 GHz için ölçülen RKA değerleri.

4.6.3. F-16 Uçak Maketi Hedefi için Sonuçlar

Şekil 4.6'da fotoğrafı görülen uçak maketinin, 75~110 GHz ve 0~60° için elde edilen kutupsal ve kartezyen düzlemindeki görüntüleri, sırasıyla Şekil 4.27(a) ve Şekil 4.27(b)'de görülmektedir. Uçak maketinin, 92.4 GHz ve 110 GHz'deki uzak-alan RKA çizimleri ise, sırasıyla Şekil 4.27(c) ve Şekil 4.27(d)'de verilmiştir. Uçağın fiziksel yapısı itibarı ile özellikle 90 GHz civarlarındaki frekanslarda çok düşük RKA değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu değerler, frekansın yükselmesiyle birlikte, önemli artış göstermiştir.



Şekil 4.27. F-16 uçak maketi hedefinin RKA kestirimi. (a) Hedefin fotoğrafı. (b) Yakın-alan TSAR görüntüsü. (c) 92.4 GHz, (d) 110 GHz için ölçülen RKA değerleri.

4.7. SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA TABANLI TSAR GÖRÜNTÜLEME

4.7.1. Sıkıştırılmış Algılama ve Önemi

Son yıllarda geliştirilen sıkıştırılmış algılama (SA) teorisi, seyrek (sparse) veya sıkıştırılabilir sinyallerin, doğrusal ölçümlerinin çok küçük bir kümesi ile tekrar oluşturulabileceğini belirtmektedir. Birçok mühendislik uygulamasında, sistemlerin kısıtlı örnekler ile veri toplama, kaydetme ve işleme, kapasitesine sahip olması olması kritik önem arz etmektedir. Mesela, medikal alanındaki manyetik rezonans görüntülemede (MRI), hastanın elektromanyetik ışımaya maruz kalma süresinin azaltılması çok zaruridir. Bu problemin çözümü, kararlı ve etkin görüntülemeyi, mümkün olduğu kadar az sayıda EM ölçümlerden elde etmek suretiyle sağlanabilir. SAR bağlamında ise bu yüksek düşük-örnekleme (undersamling) kabiliyeti, gönderilen/alınan sinyallerin azaltılmasına, veri depolama kısıtlamalarının giderilmesine vs. imkân tanır. Bununla birlikte SA, sinyalin seyrek olduğu ön bilgisini uygularak sinyal alma (ölçme) ve tekrar-oluşturma işlemini gerçekleştirir. Dolayısıyla tekniğin başarısı, incelenen sinyalin seyreklik seviyesi ile doğrudan ilişkilidir. İlginç şekilde, gerçek hayattaki çoğu sinyaller seyrek yapıdadır. Yani, dalgacık (wavelet) düzlemi gibi bir düzlemde gösterildikleri zaman, sıfıra yakın ve sıfır olan çok fazla oranda katsayılar içerirler.

Kaynak araştırması kısımında sunulduğu üzere, SA tekniğinin SAR/TSAR YNR ve DAR görüntülemedeki değerinin belirlenmesine yönelik çalışmalara başlanılmıştır. Bu çalışmalardan, SA tekniğinin radar görüntülemeye uygulanmasının zor bir problem olduğu ve sinyallerinin seyreklik sevisyesinin başarıda önemli rol oynadığı görülmüştür. Etkin görüntülemeyi etkileyen diğer faktörler ise, spesikif tarama geometriler ile elde edilen SAR/TSAR sinyallerinin SA'ya uygun şekilde modellenmesi, hali hazırdaki birçok sinyal tekrar-oluşturma (ya da sıkıştırmayı açma) algoritmalarının performanslarının, deneysel veriler üzerinde denenerek sinyallerin optimal geri-kazanımlarının sağlanması, sinyallerin gürültü seviyesinin ve kullanılacak toplam ölçüm sayısının algoritma performansı üzerindeki etkileridir.

4.7.2. SA ile Yakın-alan TSAR Görüntüleme Sonuçları

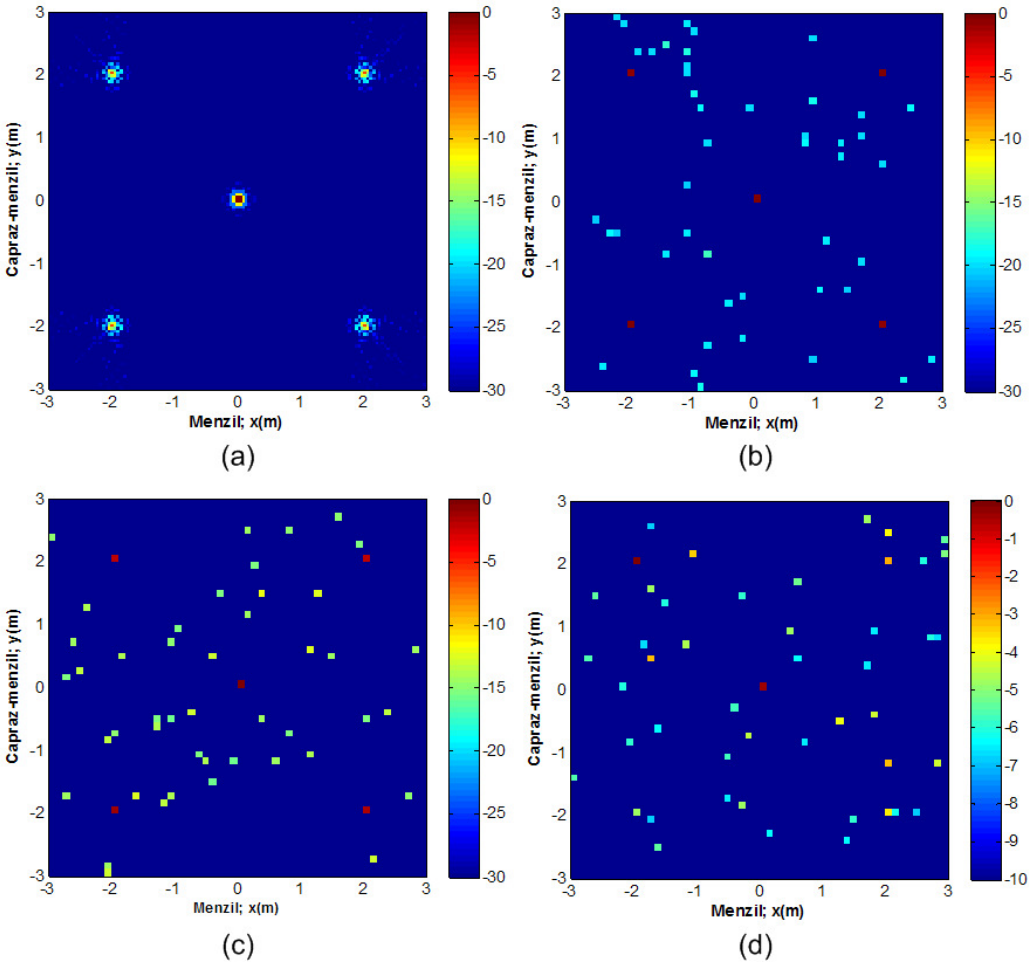
Önceki kısımda belirtilen faktörlerin başarılı ve kararlı görüntüleme üzerindeki etkileri, yakın-alan 2B TSAR görüntüleme için ve hem benzetim hem de deneysel veriler kulllanılarak incelenmiştir. Bu doğrultuda, öncelikle Kısım 3.2.2.4'de sunulan SA-tabanlı TSAR görüntüleme tekniği geliştirilmiş, daha sonra teknik, çeşitli hedeflerin ve geniş-açı veri toplamlarının nümerik ve deneysel verilerine uygulanmıştır. Tüm örneklerde, yakın-alan ışıması kabul edilmiştir ve Gİ algoritmasının görüntüleme sonuçları de referans amaçlı olarak sunulmuştur. Tüm benzetim ve deneysel örneklerde, Gİ görüntüleri 128×128 piksel boyutu için, SA görüntüleri ise bilgisayar hafıza kısıtlamasından dolayı 55×55 piksel boyutu için elde edilmişlerdir. Geliştirilen SA-tabanlı TSAR görünütleme tekniğinde, hedef yansıtırlık fonksiyonları, yaygın olarak bilinen COSAMP tekrar-oluşturma algoritması [95] ile elde edilmiştir.

4.7.2.1. Benzetim Sonuçları

Beş Noktasal Saçıcı Hedefi

Noktasal saçıcı varsayımını kabul ederek, çeşitli benzetim örnekleri elde edilmiştir. İlk önce, en basit yapılı hedef geometrisi olarak 5 noktasal saçıcı seçilmiş, frekans ve açı örnekleri sırasıyla, $4.5{\sim}6$ GHz arasında 501 noktada ve $0°{\sim}360°$ arasında 1441 noktada alınmıştır. Şekil 4.29(a)'da Gİ sonucu görülmektedir. Toplanan toplam $501 \times 1441 = 721941$ sayıdaki örneğin, sadece $\%\ 0.58$'ine denk gelen 4200 rasgele seçilmiş verisi ile oluşturulan SA sonucu ise Şekil 4.29(b)'de görülmektedir. Aynı dinamik menzile sahip bu iki görüntüden, Gİ görüntüsünün daha az gürültü içermesinin yanında, Sİ görüntüsüne göre daha düşük çözünürlükte olduğu fark edilmektedir. SA ile oluşturulan görüntüden, 5 hedefin de doğru yerlerinde tekrar oluşturulduğu görülmektedir. SA-tabanlı görüntülemenin, daha realistik durumlardaki performansını tespit etmek için, toplanan benzetim verilerine gürültü eklenerek, görüntülemeler yapılmıştır. Gürültü standart sapmasının, hedef sinyalin maksimum genliğine oranının 0.5 ve 1.5 oranında durumlar için elde edilen

SA sonuçları sırasıyla, Şekil 4.28(c) ve (d)'de görülmektedir. Sinyal-gürültü-oranının $\mathrm{SNR}_{dB} = -3.5$'a denk geldiği durumdaki Şekil 4.28(d)'ün görüntüsünde, sadece ortadaki ve üst sol bölgedeki noktasal saçıcılar, gürültü seviyesinin üzerinde kalmışlardır. Bu durumda eklenen gürültü seviyesinin yüksek olmasını da göz önüne alarak, COSAMP tekrar elde etme algoritmasının, gürültülü sinyaller durumundaki performansının iyi olduğu sonucu çıkarılabilir.



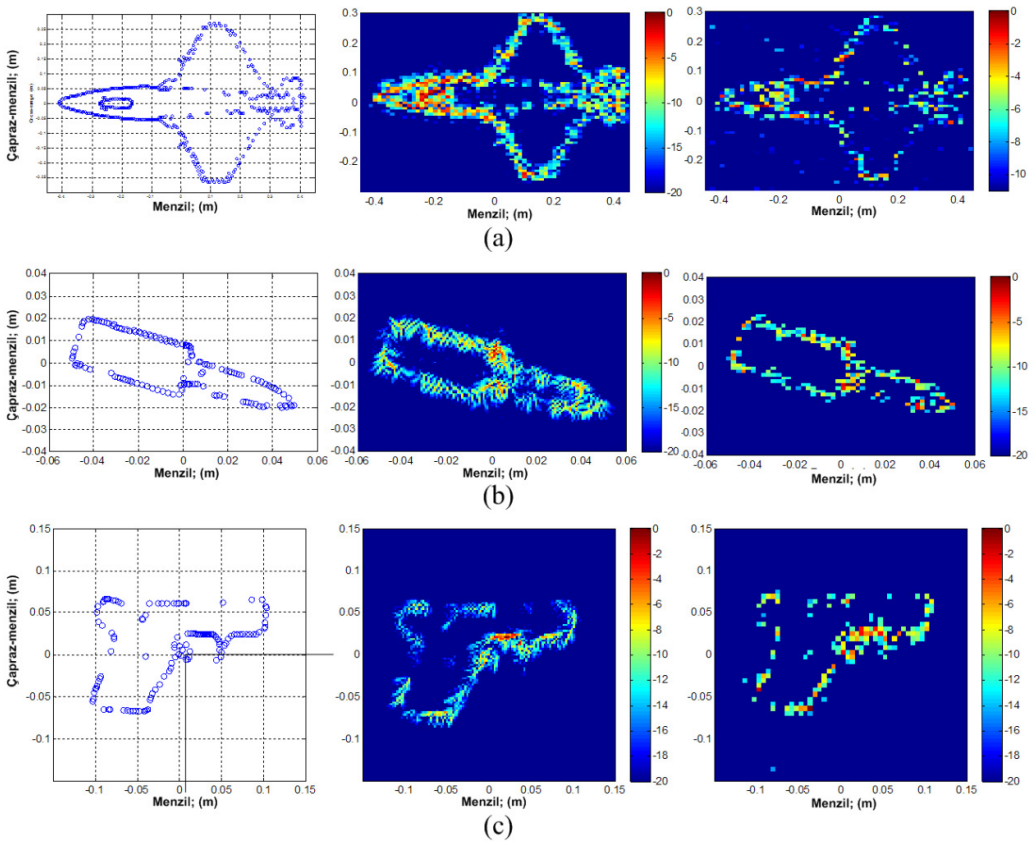
Şekil 4.28. Beş noktasal saçıcı hedefinin SA-tabanlı TSAR ile görüntülenmesi. (a) Gİ sonucu. Toplam verinin % 0.58'ini kullanan SA-tabanlı algoritmanın (b) gürültüsüz, (c) $\mathrm{SNR}_{dB} = 6.02$, (d) $\mathrm{SNR}_{dB} = -3.5$ olduğu durumlar için görüntüleme sonuçları.

Çeşitli Nesnelerin Noktasal Saçıcı Modelleri

İlk hedef olarak, Şekil 4.29(a)'da solda görülen F-35 savaş uçağının noktasal saçıcılar ile temsili modeli seçilmiştir. Ka bandının 5 GHz bantgenişliğinde ve $0°{\sim}180°$ aralığında, toplam 289121 adet farklı (f,θ) ölçümü alınmıştır. Şekil 4.29(a)'ın sağında, bu verinin $\%\,0.76$'sına denk gelen ve rasgele seçilmiş 2200 sayıdaki örneklerini kullanarak elde edilen SA-tabanlı tekrar-oluşturma sonucu görülmektedir. Karşılaştırma amaçlı olarak, Şekil 4.29(a)'nın orta şekilinde, Gİ sonucu da verilmiştir. Gİ algoritmasının daha az gürültülü görüntüleme yaptığı, SA tekniğinin de daha yüksek çözünürlük sağladığı görülmüştür. Bunun yanıında SA tekniği, çok kısıtlı sayıdaki gerisaçılım verilerinden hedef şeklini doğrulukla üretebilmiştir.

İkinci hedef olarak, Şekil 4.29(b)'nin solunda görülen ve 139 noktasal saçıcı ile oluşturulan bir küçük bıçak modeli seçilmiştir. Frekans $f = 80{\sim}100$ GHz arasında 401 adımda, azimuth açısı $\theta = 0{\sim}180°$ arasında 721 adımda değiştirilmiştir. Toplam verinin, yine $\%\,0.76$'sı ile oluşturulmuş SA sonucu Şekil 4.30(b)'nin sağındaki şekilde görülmektedir. SA sonucu ile Gİ sonucu ile karşılaştırılırsa, SA tekniğinin saçılım mekanizmalarını, uygun şiddet değerleri ile doğru yerlerine atadığı görülmektedir. İki görüntünün de dinamik menzilinin -20 dB olduğu da not edilirse, SA tekniğinin, çözünürlük karakteristiğinin daha iyi olduğu anlaşılır.

Son benzetim hedefi olarak bir silah hedefinin, Şekil 4.29(c)'nin solunda görülen, 123 noktasal saçıcı ile oluşturulmuş modeli alınmıştır. Hedef gerisaçılımı 85 to 95 GHz ve $0°{\sim}90°$ menzillerinin sırasıyla, 401 ve 721 adımda örneklenmesi ile toplanmıştır. 5200 örnek kullanan Şekil 4.30(c)'deki SA sonucu, tekniğin sentetik veriler üzerindeki başarılı performansını, açıkça ortaya koymaktadır.



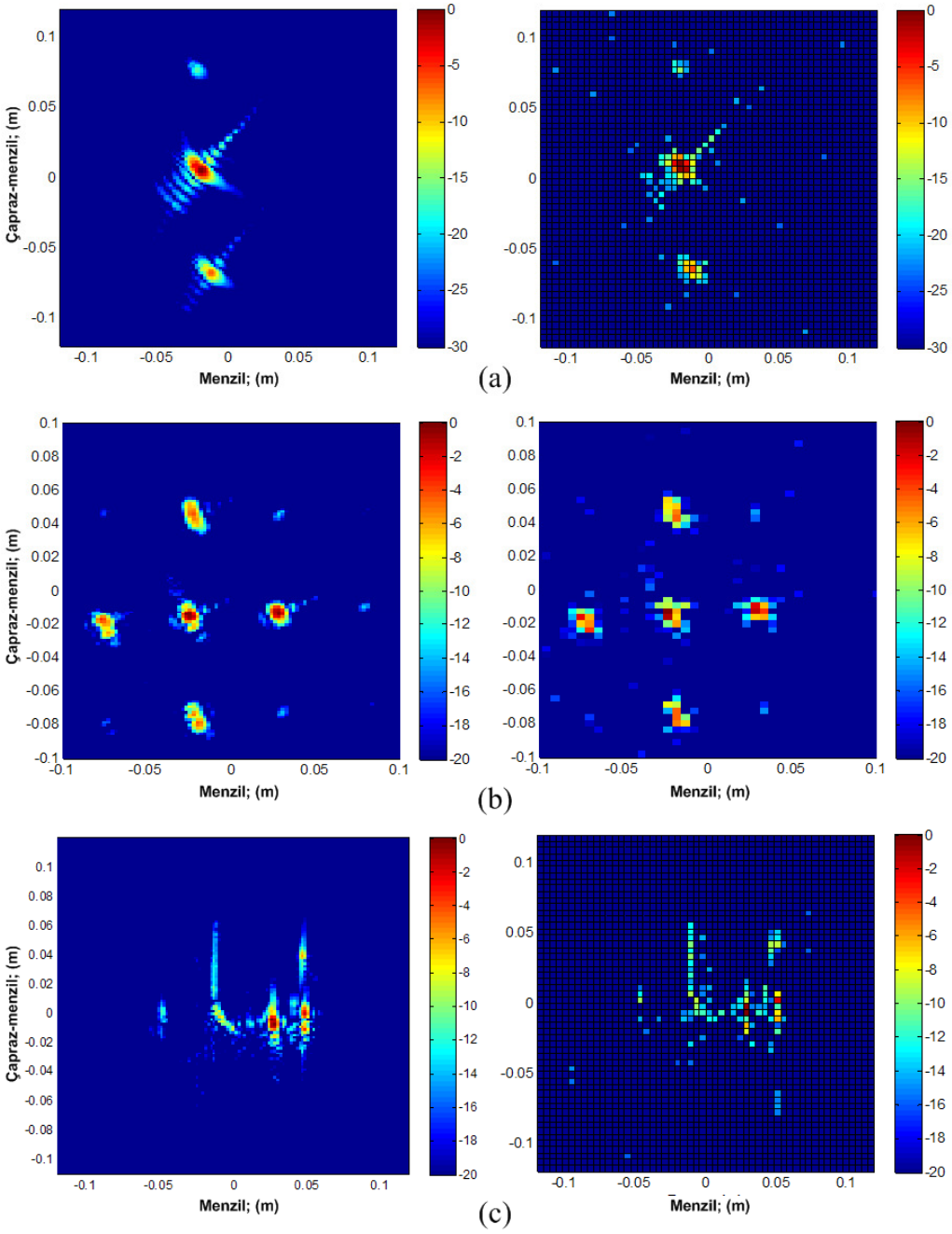
Şekil 4.29. Benzetim hedeflerinin SA-tabanlı TSAR ile görüntülenmesi (Sol: noktasal saçıcı modeli, Orta: Gİ sonucu, Sağ: SA sonucu). (a) uçak, (b) bıçak, (c) silah.

4.7.2.2. Deneysel Sonuçlar

Çeşitli Hedef Sahneleri

Bu kısımda, Gİ algoritması ile daha önce görüntüleme sonuçları sunulan ve köşe yansıtıcı, metal silindir ve F-16 uçak maketi hedeflerinden oluşan hedef sahnelerinin, SA-tabanlı görüntüleme sonuçları verilecektir. Bu hedeflerin ölçümleri, W-bandın farklı bantgenişliklerinin $K = 256$ adımda örneklenmesi ve $0°{\sim}60°$ aralığının $L = 241$ noktada örneklenmesi ile alınmıştı. Dolayısıyla, bütün ölçümlerin veri boyutu $K \times L = 61696$'dır. Bu verilerin küçük kümesinden elde edilen SA-tabanlı görüntüleme sonuçları, Şekil 4.30'un sağ şekillerinde görülmektedir. Gİ sonuçları da Şekil 4.30'da soldaki şekillerinde verilmiştir. SA-tabanlı görüntülemede

kullanılan yankı örnek sayısının, toplam veri sayısına oranı bütün hedefler için % 9.4 olarak alınmıştır. Görüntülerden, her üç durumda da hedef yansıtırlıklarının doğru ve etkin gösterimleri, bu kısıtlı sayıdaki (yani 5800) ölçüm verilerinden elde edilebilmiştir. Köşe yansıtıcıların ve metal silindirlerin, nokta-tarzı geri-saçılım karakteristiğine benzer gerisaçılıma sahip olmasından dolayı, bu hedeflerin olduğu sahnelerden kaynaklanan gerisaçılım sinyallerinin seyreklik seviyesi genelde düşük olur. Diğer yandan karmaşık yapıya sahip F-16 uçak maketinin de TSAR görüntüsünün de, az sayıdaki güçlü saçılım merkezlerinden oluştuğu görülmektedir. Yani, bu hedef kombinasyonlarında, SA'nın gereksinim duyduğu "sinyalin seyrek olması koşulu" genellikle sağlanmış olduğundan, etkin görüntülemeler yapılabilmiştir diyebiliriz.

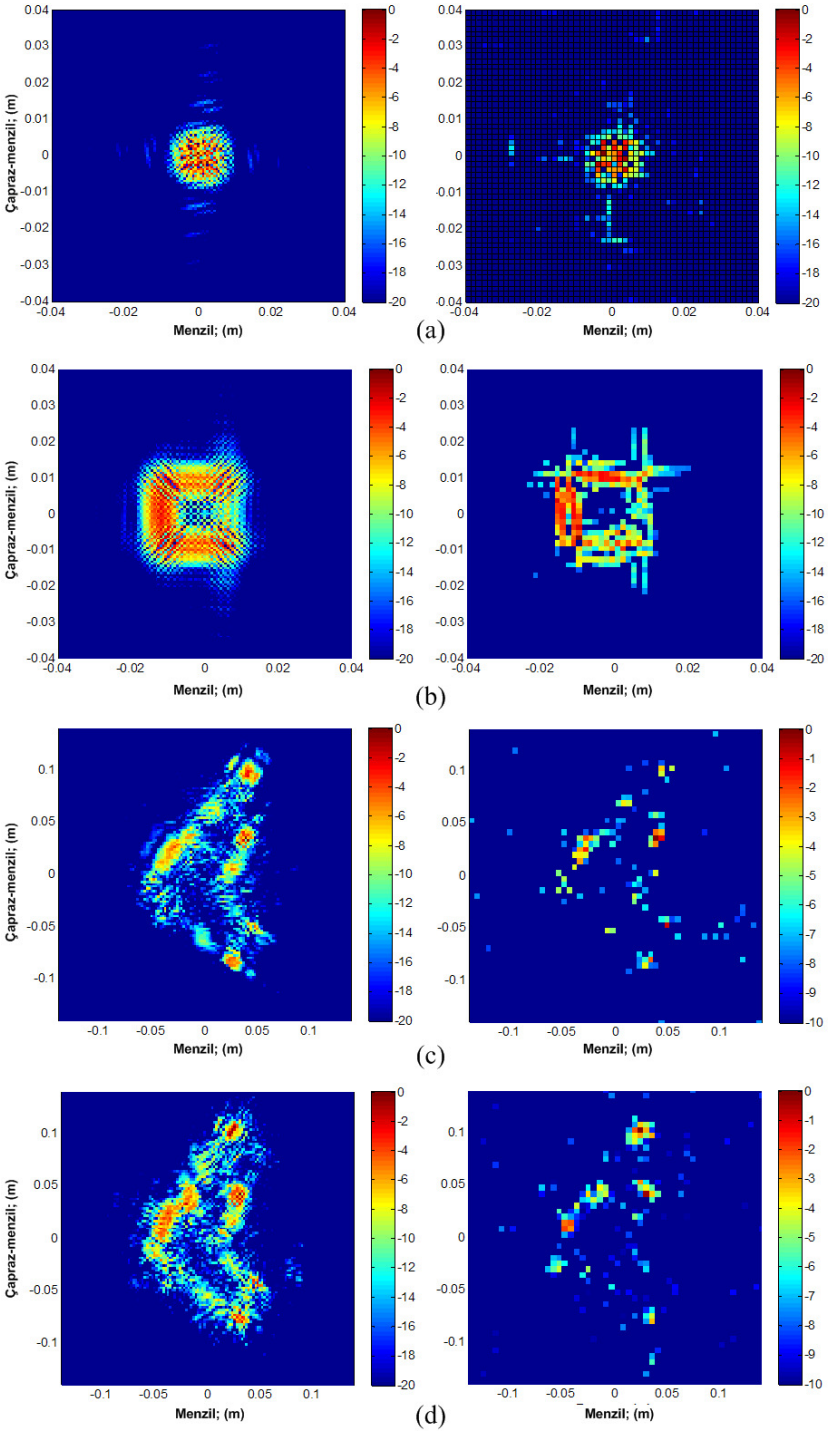


Şekil 4.30. Deneysel hedef sahnelerinin SA-tabanlı TSAR ile görüntülenmesi (Sol: Gİ Sağ: SA sonucu). (a) iki köşegen yansıtıcı, (b) beş metal silindir, (c) F-16 uçak maketi.

Gizlenmiş Nesne Algılaması Deneylerinde Kullanılan Hedefler için Sonuçlar

Gizlenmiş hedef nesnelerinin MMD görüntüleme ile algılanmaları deneylerinde kullanılan, küp ve tabanca hedeflerinin SA-tabanlı görüntüleme çalışmaları yapılmıştır. SA tekniği, özellikle bu tarz tam-açıklık ve yüksek çözünürlük gerektiren ve/veya 3B görüntüleme ihtiyacı duyan uygulamalar için, büyük faydalar sağlayabilecek bir tekniktir. Kısım 4.7.2.1'de bıçak ve silah hedeflerinin noktasal saçılım modellerinin, başarılı SA görüntülemeleri sunulmuştu. Önceki kısımlarda ise, tam-açıklık olmayan (ya da $60°$) verilere SA-tekniği uygulanmıştı. Burada, tam-açıklık taramalı TSAR ölçümlerinin, yüksek boyutlu verileri için SA-tabanlı görüntüleme sonuçları verilecektir. Hedeflerin veri toplama parametreleri ve SA-tabanlı görüntülemede kullanılan örnek sayısının, toplam veri sayısına yüzde oranı Çizelge 4.6'da görülmektedir. Tüm hedeflerde frekans adım sayısı $K = 256$ olmakla birlikte, tabanca hedefinde açısal adım sayısının $L = 1441$ gibi büyük bir sayıda olması, karşılaşılan veri boyutunu oldukça yükseltmektedir. Dolayısıyla, bu ölçümler SA-tabanlı görüntüleme için uygun bir test verisi olarak değerlendirilebilir.

SA ile görüntüleme sonuçları Şekil 4.31'in sağdaki şekillerinde, Gİ sonuçları da soldaki şekillerinde görülmektedir. Küçük boyutlu küp hedefleri, $360°$ açıklık verilerinin az sayıdaki örneklerinden, SA tekniği ile etkin şekilde görüntülenmiştir. Şekil 4.31(c) ve Şekil 4.31(d)'deki tabanca görüntüleme sonuçları ise, SA tekniğinin bu karmaşık hedefi görüntülemede zorlandığını göstermektedir. Tabanca üzerindeki dominant saçılım merkezlerini, SA görüntülerinde belirgin olmalarına karşın, tabancanın diğer göreceli olarak düşük şiddetli gerisaçılım karakteristiğine sahip bölgeleri, tam olarak elde edilememiştir. Bununla birlikte, tabancanın genel şekli, her iki SA-tabanlı görüntüleme sonucunda da rahatça anlaşılabilmektedir. Görüntülemede, kullanılan veri örnekleri sayısının arttırılmasının, SA sonucunda önenmli bir iyileşme sağlamadığı da görülmüştür. Buradaki asıl belirleyici faktörün, tabanca hedefine ait gerisaçılım sinyalinin seyreklik seviyesi olduğu gözlemlenmiştir. Son olarak, Şekil 4.31(c) ve Şekil 4.31(d)'nin sağdaki şekillerinden, tabancanın giysi malzemesi ile gizlenmesinin SA tekniğine önemli bir olumsuz etkisi olmayacağı da anlaşılmaktadır.



Şekil 4.31. Küp ve tabanca hedeflerinin SA-tabanlı TSAR ile görüntülenmesi (Sol: Gİ Sağ: SA sonucu). (a) 1 cm^3 metal küp, (b) 2 cm^3 metal küp, (c) örtüsüz tabanca, (d) kışlık mont ile kaplanmış tabanca.

Çizelge 4.6. Küp ve tabanca hedeflerinin SA ile görüntüleme parametreleri.

Hedef	f, (GHz)	K	θ, (°)	L	*SA tekniği örnek sayısının tüm veri sayısına yüzdesi*
1 cm^3 metal küp	$80-100$	256	$0°-360°$	361	% 6.27
2 cm^3 metal küp					
Örtüsüz tabanca	$80-90$	256	$0°-360°$	1441	% 1.57
Mont altında gizlenmiş tabanca					

4.8. GENİŞ-ALANLI DAİRESEL-SAR GÖRÜNTÜLEME

Dairesel-SAR'da, temel olarak çözünürlük ihtiyacından dolayı, hedef taramaları genellikle $360°$ tam azimutsal açıklık boyunca gerçekleştirilir. Fakat bu geniş-açı kullanımı, veri toplama ve görüntü oluşturmaya ilişkin ek zorluklar getirir. Örneğin, göreceli olarak büyük hedef sahnelerinin, bu tip geniş-açı koşullarında, 2B görüntülenmesi işlemi, görüntü kalitesini ciddi şekilde düşürebilecek "*üstedüşüm (layover)*" etkisine maruz kalır. Tez çalışmasında, 2B dairesel-SAR'ın bu üstedüşüm karakteristiği ve geniş-alan görüntüleme senaryolarına özgü diğer görüntüleme karakteristikleri, çeşitli yakın-alan dairesel-SAR görüntüleme örnekleri ile incelenmiştir (doğrusal-SAR tekniği ile yakın-alan SAR görüntüleme çalışmaları için [96, 97, 98, 99]'daki kaynaklara başvurulabilinir). Şekil 3.16'daki geometri ve adım-frekanslı radar dalgaşekli kullanımı ile, noktasal saçıcıların ve gerçek karmaşık hedeflerin görüntülenmeleri, Çizelge 4.7'de verilen toplama parametreleri ile elde edilmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere, benzetim ve deneysel görüntüleme örneklerinde, üç değişik alçalış açısı θ_m değerinden biri kullanılmıştır. Toplanan veriler, dairesel-SAR geometrisine göre uyarlanmış ve Kısım 3.2.2.4'de formülasyonu verilen küresel Gİ algoritması ile görüntülenmiştir.

Çizelge 4.7. Benzetim ve deneysel dairesel-SAR ölçümlerinin parametreleri.

Parametre	*Değeri*
Tarama Yarıçapı R_g	10.4 m (Benzetim) 21.9 m (Deneysel)
Orijine göre Alçalış Açısı $\emptyset_m$	23.5° 25.9° (Deneysel) 35° (Benzetim)
Frekans Menzili f	4.5 ~ 6 GHz
Frekans Örnekleme Aralığı δf	3.75 MHz
Azimut Açısı Örnekleme Aralığı $\delta\theta$	0.125° (Benzetim) 0.25° (Deneysel)
Antenden Olan Maksimum Algılama Menzili	39.9 m
Antenin Yarıgüç Işın-genişliği	29° (Deneysel)

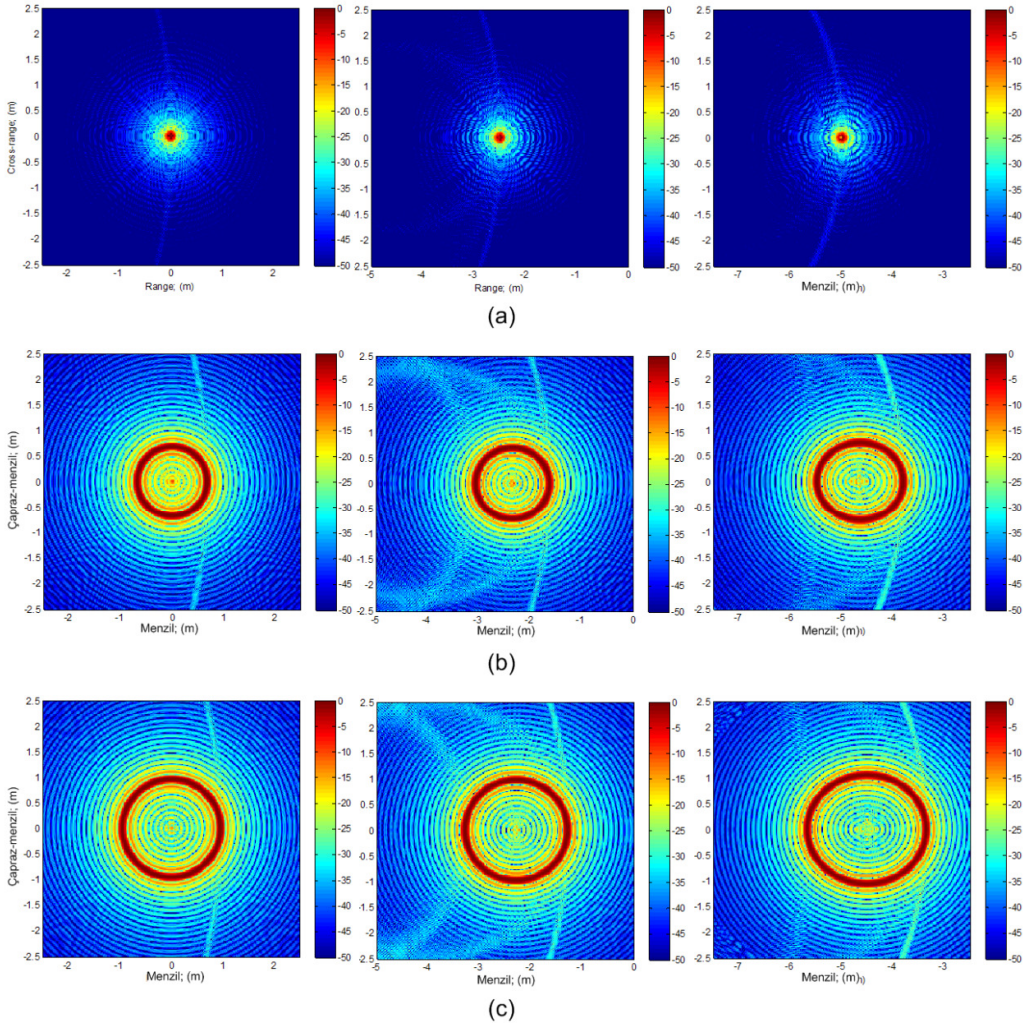
4.8.1. Benzetim Sonuçları

Biri tek nokta hedefi, diğeri de çoklu noktaların kombinasyonu olmak üzere, iki farklı, tam-açıklık görüntüleme benzetimu gerçekleştirilmiştir: İlk benzetimde, alçalış açısı $\emptyset_m = 23.5°$ olarak ayarlanmış ve Kartezyen koordinat sisteminin değişik pozisyonlarına yerleştirilmiş, tek bir saçıcıdan kaynaklanan yankılar, üstedüşüm etkilerini anlamak için, farklı görüntüleme düzlemleri üzerine görüntülenmiştir. Koordinat merkezindeki ve merkezden x-yönünde -2.5 ve -5 m kaymış noktanın yer-düzlemi görüntüleme sonuçları Şekil 4.32(a)'nın ilgili fügürlerinde görülmektedir. Aynı prosedür daha sonra, yerden yükseklikleri $z_f = 2$ m ve $z_f = 4$ m olan iki farklı görüntüleme düzlemi için tekrarlanmış, elde edilen görüntüler Şekil 4.32(b) ve Şekil 4.32(c)'nin ilgili şekillerinde verilmiştir. İlk olarak, hedef yüksekliği ile görüntüleme düzlemi arasındaki bağıl mesafenin değişiminin, görüntülemeye etkileri Şekil 4.32'in sütun görüntülerinden incelenebilir. Bu görüntülerden şu sonuçlar çıkarılabilir:

i) Görüntüleme cevabı, hedef yüksekliği z_t'nin görünütleme düzlemi z_f'ye eşit olduğunda odaklanır (bakınız Şekil 4.32(a)), aksi halde, kendini odaksızlık halkası olarak gösterir (bakınız Şekil 4.32(b) ve Şekil 4.32(c)).

ii) z_f ve z_t arasındaki fark arttıkça, bu odaksızlık halkasının yarıçapı artar.

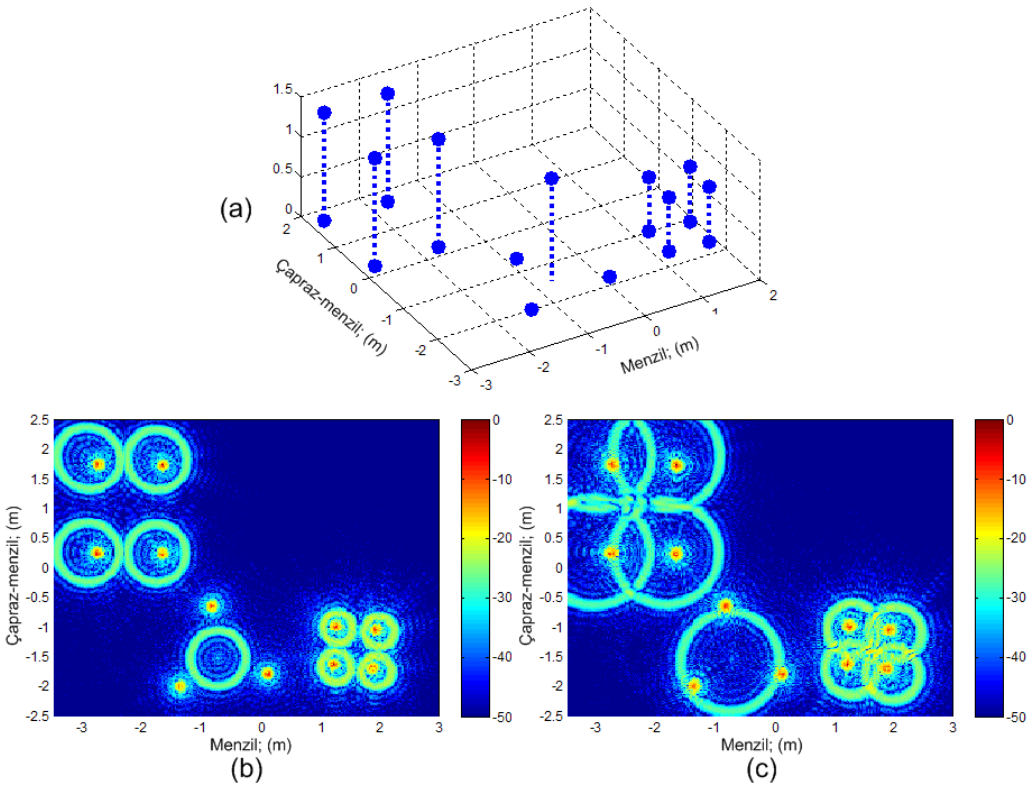
İkinci olarak, hedefin orijinden kayma değişimimin etkileri, Şekil 4.32'nin satır görüntülerinin yorumlanması ile değerlendirilebilir. Şekil 4.32(a)'dan görüntüleme düzlemi ile hedef yüksekliğinin aynı olduğu durumda, noktanın orijinden kaymasının görüntülemeye bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Diğer durumlarda ise, noktanın x-eksenindeki kayma miktarına bağlı olarak, odaksızlık halkasının daireselden eliptik hale geldiği Şekil 4.32(b) ve Şekil 4.32(c)'deki görüntülerden görülmektedir. Bununla birlikte, kaymış hedeflerin $x-$konumlarının -2.5 m ve -5 m olduğu not edilirse, odaksızlık halkasının merkezinin, yine kayma miktarına bağlı olarak daire merkezinden kaydığı da fark edilebilir. Bunu daha iyi görebilmek için, Şekil 4.32(c)'nin sağındaki, -5 m kaymış hedef için elde edilen görüntüyü göz önüne alalım. Bu görüntüde, odaksızlık halkasının merkezinin, $x = -5$ m noktasından belirgin biçimde saptığı, yani $z-$eksenine göre asimetrik hale geldiği görülmektedir. Diğer yandan, Şekil 4.32(c)'nin solundaki görüntüde, hedef merkezde olduğu için, hedefin $x-$konumu ile odaksızlık halkasının merkezi aynı konumda olmaktadır.



Şekil 4.32. Görüntüleme düzlemi z_f'nin farklı değerleri için İPY görüntüleri. (a) $z_f = 0$ yer düzlemi, (b) $z_f = 2$ m ve (c) $z_f = 4$ m düzlemleri (Sol: Nokta koordinat merkezinde. Orta ve Sağ: Noktanın x −yönünde sırasıyla -2.5 m ve -5 m kaymış olduğu durum.

İkinci görüntüleme benzetiminde, noktasal saçıcıların kombinasyonundan oluşan bir hedef sahnesi seçilmiştir. Saçıcılar, 3B uzayının 20 farklı konumuna Şekil 4.33(a)'da görüldüğü şekilde yerleştirilmiş ve daha sonra gerisaçılın verisi, alçalış açısının iki farklı değeri için toplanmıştır. $\emptyset_m = 23.5°$ ve $\emptyset_m = 35°$ için elde edilen yer-düzlemi görüntüleme sonuçları Şekil 4.33(b) ve Şekil 4.33(c)'de görülmektedir. Bu imajların, önceki paragrafta tespit edilen tüm olguları, daha görsel biçimde sergilediği görülmektedir. Ek olarak, alçalış açısının daha büyük, yani $\emptyset_m =$

35°'değeri için, odaksızlık halkasının yarıçapının arttığı görülmüştür. Dolayısıyla, alçalış açısının artmasıyla, görüntü kalitesinin, halkanın etki alanındaki genişlemeye bağlı olarak azaldığı fark edilmektedir. Ayrıca, Şekil 4.33(c)'deki görüntünün Şekil 4.33(b)'deki görüntüden daha kötü çözünürlük karakteristiğine sahip olması, alçalış açı değerinin yükselmesinin, görüntü kalitesine olan bir diğer olumsuz etkisini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.33. Çoklu noktasal saçıcıların dairesel-SAR ile görüntülenmesi. (a) Saçıcıların 3B uzaydaki konumları. (b) $\emptyset_m = 23.5°$, (c) $\emptyset_m = 35°$ alçalış açısı için yer-düzlemi görüntüleme sonuçları.

4.8.2. Ölçüm Sonuçları

Geniş-alan dairesel-SAR geoemetrilerinde karşılaşılan görüntüleme zorlukları, Çizelge 4.7'de verilen parametrelere sahip gerçek deneyler ile de incelenmiştir. Yakın-alan dairesel-SAR verilerini toplayabilmek için, Mersin Üniversitesi Mimarlık Fakültesi binasının yay yapılı terasından faydalanılmıştır.

Binanın fotoğrafı ve deneysel kullanımının şematik gösterimi, sırasıyla Şekil 4.34(a) ve Şekil 4.34(b)'de görülmektedir. Bu şekillerden görüleceği üzere, teras, yerden $z_m = 9.54$ m yüksekliğe sahiptir ve hedeflerin $R_g = 21.9$ m tarama yarıçaplı, 270°'lik dairesel güzergah boyunca gözlemlenmesine olanak tanımaktadır. Bu geometri ile, tarama çemberinin, yerdeki merkezine yerleştirilen çeşitli araçların, yakın-alan geri-saçılım verileri toplanmıştır. Hedeflerin ortalama $\rho_{max} = 4$ m yarıçaplı bir hedef dairesi ile kapsanacağı varsayılırsa, bu durumda, hedef yarıçapının, tarama yarıçapına oranı, geniş-alan kriterlerini sağlayacak şekilde 18.2 % olur. Açısal örnekleme adımı, Denklem 3.66'daki Nyquist kriterini sağlayacak şekilde $\delta\theta = 0.25°$ olarak alınmıştır. Bu değer, 270° açıklık durumunda, 1081 adet açısal ölçümün yapılmasını gerektirir. Yapılan deneylerde, yüksek çözünürlüklü görüntüleme elde etmek için, tüm açısal bantgenişliğinden faydalanılmıştır. Yarı-monostatik anten geometrisi seçilmiş ve HH polarizasyona göre ayarlanmış boynuz antenler, tekerlekli bir platforma monte edilerek, manuel olarak hareket ettirilmişlerdir. Deneylerde, SFCW prensibi ile çalışan el tipi VNA kullanılmış, hedeflere daha çok güç basmak için VNA'nın IF bantgenişliği düşük değerlere (tipik olarak 1 KHz) ayarlanmıştır. Bu deney çalışmalarında kullanılan materyaller, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'deki fotoğraflarda görülmektedir.

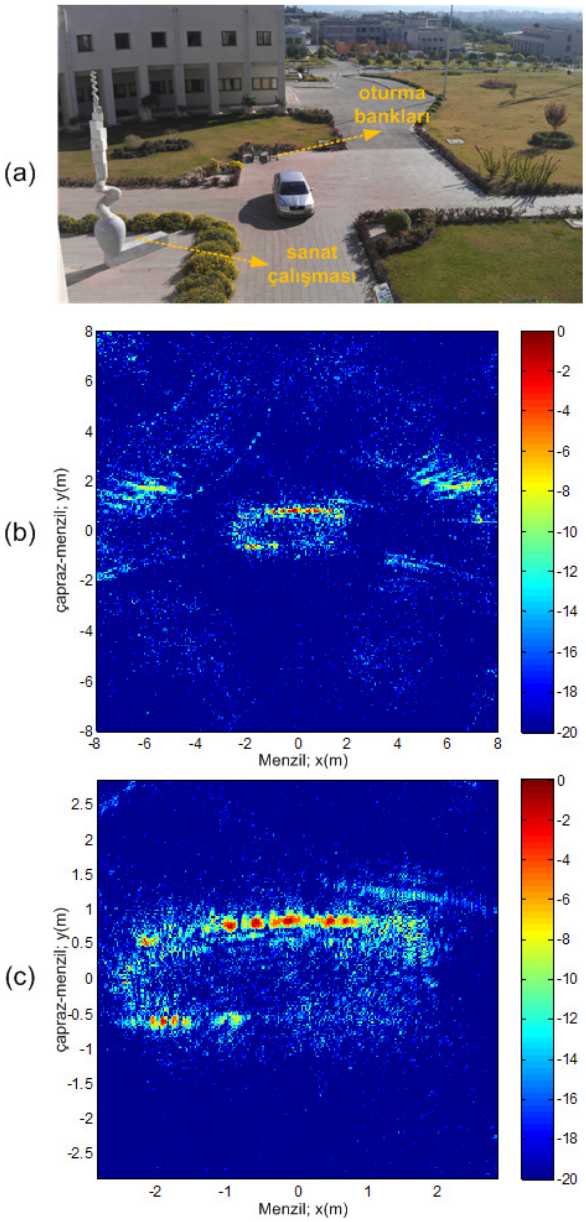


Şekil 4.34. Yer tabanlı dairesel-SAR görüntülemenin deneysel geometrisi. (a) 270° yay yapısına sahip bir bina (b) binanın dairesel-SAR ölçümleri için kullanımının şematik diyagramı.

İlk çalışma olarak, Skoda Octavia model bir sedan araba, $\emptyset_m = 23.5°$ alçalış açısı değeri ile taranmıştır. Bu aracın ölçümler esnasındaki pozu ve hedef

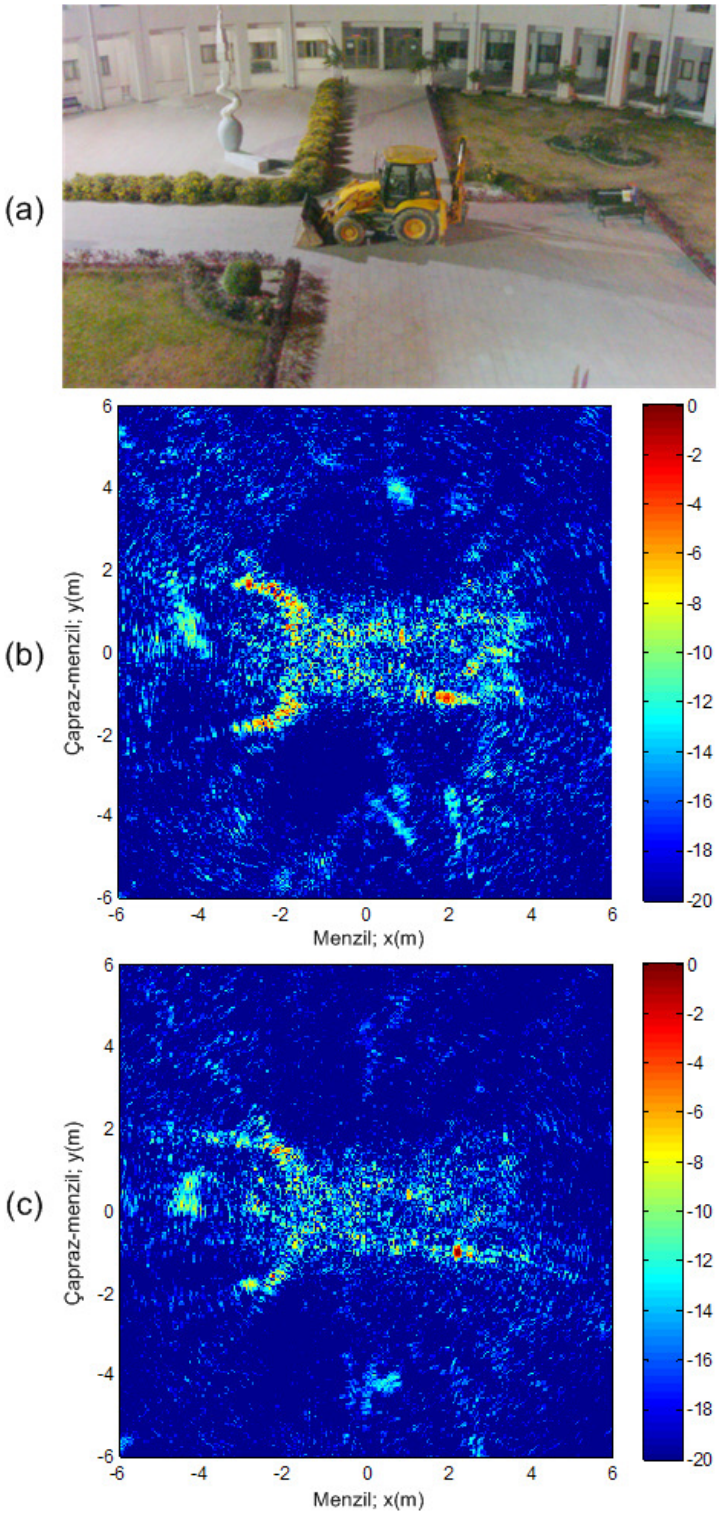
sahnesi Şekil 4.35(a)'da görülmektedir. Araba, *Uzun./Geniş./Yük.(mm) = 4569 / 1769 / 1462* ölçülerine sahiptir. Ölçümlerde, antenden hedef merkezine olan nişan çizgi (LOS) mesafesi 23.8 m alındığından, bu geometri ile araba hedefi, antenin yakın-alanında olur. Toplanan frekans verilerine, Gİ algoritmasının zaman düzlemindeki interpolasyon adımını kolaylaştırmak amacı ile sıfır-ekleme işlemi de uygulanmıştır. Yer-düzlemi görüntüleme sonuçları Şekil 4.35(b) ve Şekil 4.35(c)'de verilmiştir. Azimut açısının 0°'si arabanın arka kısmına denk gelmektedir. Şekil 4.35(b), hedef sahnesinin geniş perspektiften görüntüsünü, Şekil 4.35(c) ise araba hedefinin daha yakından görüntüsünü sağlamaktadır. Geniş perspektifli görüntüden, sahne içindeki, araba, oturma bankları ve bazı bahçe bitkilerinin güçlü geriyansıma karakteristiklerine sahip oldukları görülmektedir. Sahnede bulunan uzun, betornarme yapıdaki bir sanat çalışmasının, görüntüde kendini iç içe halkalar olarak gösterdiği yorumlanabilir. Bu halkaların merkez noktalarının aynı olduğu ve sanat çalışmasının gerçek koordinatı ile birebir örtüştüğü de görülmüştür. Kısım 4.8.1'deki benzetim sonuçlarında da tartışıldığı üzere, bu odaksızlık halkaları, göreceli olarak çok uzun yapıdaki, bu betonarme hedef üzerindeki saçıcıların yükseklikleri ile görüntüleme düzlemi (bu durumda yer-düzlemi) arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, 2B dairesel-SAR görüntülemenin bu karakteristiği deneysel olarak da doğrulanmıştır. Diğer yandan, arabanın arkasındaki oturma banklarının, düzensiz gerisaçılım paternlerine sahip olduğu ve şekillerinin tam olarak çıkarılamadığı görülmüştür. Buna zıt olarak, arabanın şekli, hemen hemen tam doğruluk ile elde edilen uzunluk ve genişlik ölçüleri ile birlikte görüntülenmiştir. Bu bilgiler ışığında, araba görüntü sinyallerinin, arabanın hedef tanımlamasını zorlaştıracak veya engelleyecek kadar bir üstedüşüm mekanizması göstermediği anlaşılmaktadır. Bunda, arabanın göreceli olarak düşük yüksekliğe ve gerisaçılım karakteristiği açısından fazla karmaşık olmayan bir fiziksel yapıya sahip olmasının payı vardır. Şöyleki, 4.35(c)'deki ayrıntı görüntüsü dikkate alınırsa, güçlü gerisaçılımların, arabanın yan tarflarında yoğunlaştığı fark edilir. Bu olgu, arabanın yan kenarları ile yer-düzlemi arasında oluşan dihedral açı ile oluşan çoklu-yol EM yayılımınından kaynaklanır. Bu durumda, EM dalgasının, önce arabanın yan kenarına çarpıp, daha sonra yere ve daha sonra antene dönmesi ile yüksek yansıma mekanizması gerçekleşir. Arabanın ön ve arka kısımlarının, gövdeye göre, hem daha az yüksekliğe

hem de düşük boyuta sahip olmasından dolayı, bahsedilen çoklu-yol mekanizmasının, bu kısımlar için daha az meydana geldiği ve gerisaçılım şiddetinin daha az olmasına yol açtığı yorumlanabilir. Son olarak, 270° açıklık ile kapsanmayan, arabanın sol arka kısımı, beklenildiği üzere, görüntüde zayıf şiddetli sinyaller olarak kendini göstermiştir.



Şekil 4.35. Dairesel-SAR ile araba görüntüleme deneyinin görüntüleri. (a) ölçümlerden bir sahne. Yer düzlemi görüntüleme sonuçları: (b) geniş perspektifli, (c) hedefe odaklı oluşturulan görüntü.

İkinci çalışma olarak, daha karmaşık bir hedef olan JCB 3CX model numaralı bir iş makinasının (yükleyici kepçe) geniş-alan dairesel-SAR görüntülemesi gerçekleştirilmiştir. Bu hedef ve ölçüm sahnesindeki oryantasyonu Şekil 4.36(a)'daki fotoğrafta görülmektedir. İş makinası, bu duruşu için, *Uzun./Geniş./Yük.(m) = 7.49 / 2.4 / 2.87* ölçülerine sahiptir ve bu ölçülerin maksimumunun tarama yarıçapına oranı 34%'e denk gelmektedir. Yani, önceki araba deneyine göre, bu geometri, daha geniş-alanlı dairesel-SAR görüntülemeye tekabül eder. Bu deneyde, $\emptyset_m = 23.5°$ ve $\emptyset_m = 25.9°$ olacak şekilde iki farklı alçalış açısı için hedef ölçümleri yapılmıştır. Sonraki durum, bina terasının $z_m = 9.54$ m olan baz yükseltisinin üstündeki anten platformunun, 1 m yukarı kaldırılması ile sağlanmıştır. Şekil 4.36(b)'de $\emptyset_m = 23.5°$ olduğu durumda elde edilen radar görüntüsü görülmektedir. Önceki deneye göre daha büyük boyuta sahip bu hedefin, görüntü karakteristiğinin, daha karmaşık gerisaçılım mekanizmaları içerdiği görülmektedir. Bununla birlikte, aracın toplam uzunluğu ve genişliği, gerçek değerleri ile uyumlu şekilde görüntülenmiştir. Ek olarak, aracın önündeki yükleyici bölümü, görüntüdeki U-biçimli yansıma paterni ile kolayca ayırt edilmektedir. İş makinasının deneysel duruşunda, bu yükleyici bölümün yere indirilmesi, üstedüşüm etkilerinden biraz daha az etkilenmesini sağlamıştır. Ek olarak, iş makinasının bu ön kısmının, köşegen yansıtıcıya benzer gerisaçılım karakteristiği de not edilirse, görüntü şiddetlerinin, neden bu bölüm için fiziksel yapıya uygun olarak lokalize olduğunun sebebi anlaşılabilir. Diğer yandan iş makinasının, kabin gibi diğer bölümlerinin, yükseltilerinin fazla olmasından dolayı, şiddetli üstedüşüm etkilerine maruz kalarak, görüntüde tam odaklanamadıkları görülmektedir. Şekil 4.36(c)'de $\emptyset_m = 25.9°$ olduğu durumda elde edilen radar görüntüsü, bu üstedüşüm etkilerinin, daha yüksek alçalış açısı için daha da şiddetli olduğunu göstermektedir. Bu durumda, hedef gerisaçılımları, doğru yerlere atanamadıkları için, sinyallerin eş zamanlı toplamı, odaklamayı arttırmamış ve hedef görüntüsü daha az lokalize olmuştur. Dolayısıyla, benzetim sonuçları ile uyumlu olarak, alçalış açısının yükselmesi ile görüntü kalitesi azalmıştır.



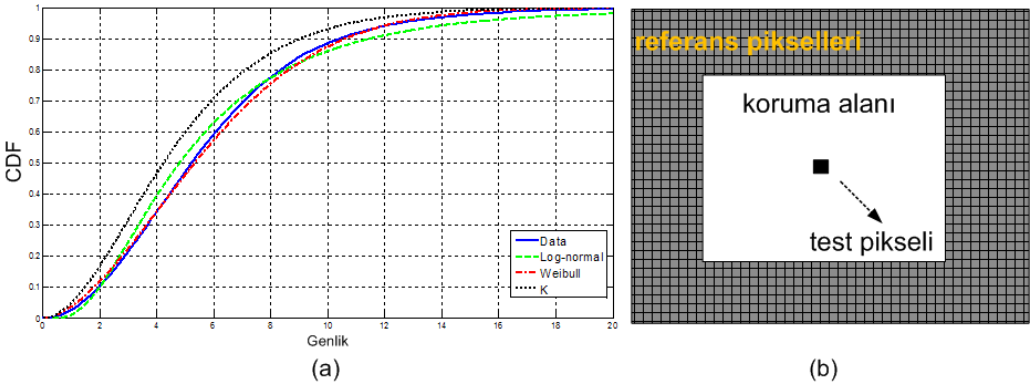
Şekil 4.36. Dairesel-SAR ile iş makinası görüntüleme deneyinin görüntüleri. (a) ölçümlerden bir sahne. Yer düzlemi görüntülemenin farklı alçalış açısı $\emptyset_m$ değerleri için elde edilen sonuçları: (b) $\emptyset_m = 23.5°$ (c) $\emptyset_m = 25.9°$.

4.8.3. CFAR Algılama Sonuçları

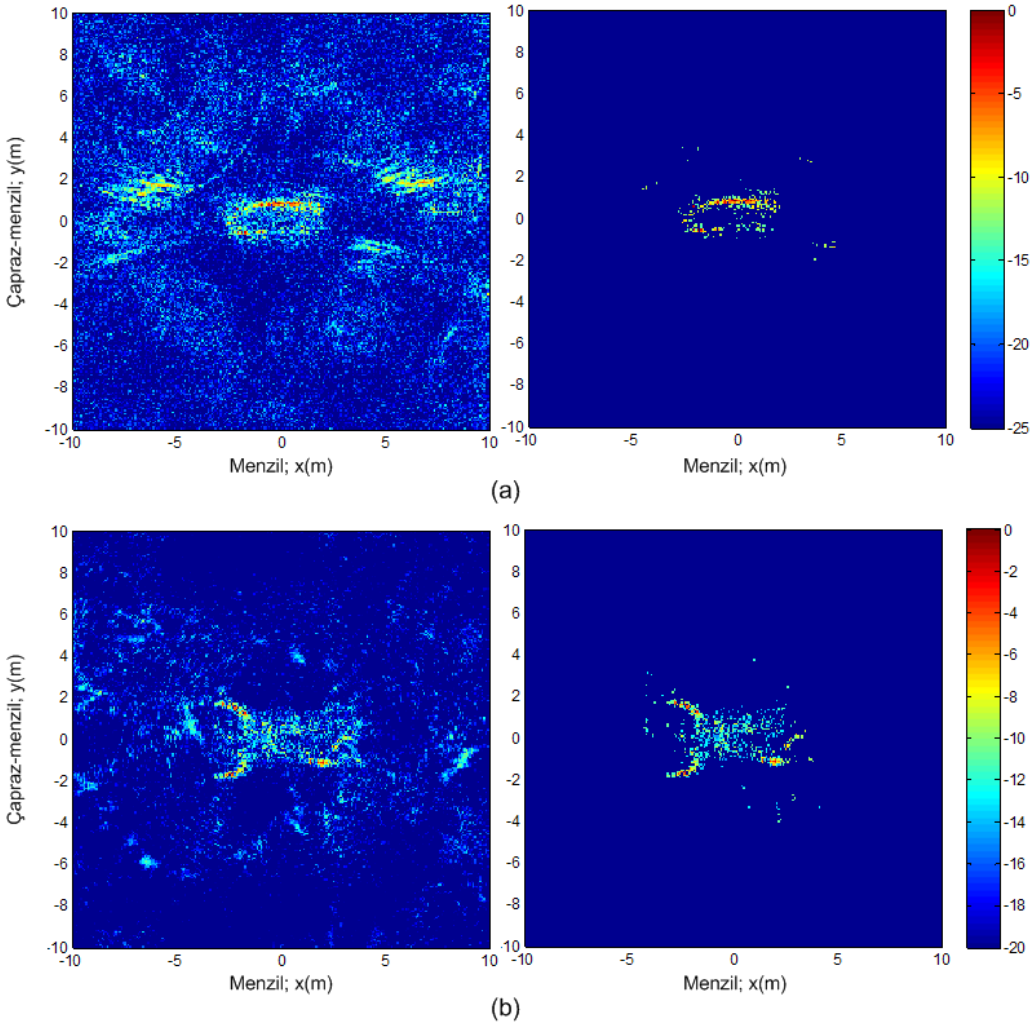
Önceki kısımda elde edilen, araba ve iş makinası hedeflerinin dairesel-SAR görüntüleri, özellikle de iş makinası için elde edilenlerin, hedef sinyalleri ile girişim gösteren yüksek seviyeli istenmeyen yankı (clutter) sinyalleri içerdiği görülmektedir. İncelenen bir geri-saçılım sinyalinin, hedefe mi, yoksa arkaplana mı ait olduğunun bilinmesi, hedefin üstedüşümden etkilenen noktalarının doğru şekilde belirlenmesini sağlar. Bu da OHT amaçlı olarak, üstedüşüm olgusunu terslyen ve 3B görüntüleme amaçları için bu noktaları tekrar doğru yerlerine atayan prosedürlerde önem arz eder. Dolayısıyla oluşturulan bu dairesel-SAR görüntülerine, bir sabit-yanlış-alarm-oranı (CFAR) algılama şeması (detaylar için [100]'deki kaynağa bakınız) uygulanarak, sadece hedefe ait gerisaçılım sinyallerini içeren görüntüler oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu sebeple, öncelikle istenmeyen yankıların tanımlanması gerçekleştirilmiştir. Görüntülerdeki, hedef sinyallerini içermeyen bölümlerin, genlik verileri çıkarılmış ve bu verileri en iyi modelleyen istatistiksel dağılım tespit edilmiştir. İstenmeyen yankıların modellenmesinde yaygın şekilde kullanılan dağılımlar, yani, Log-normal, Weibull ve K-dağılımı seçilmiş ve bu dağılımların ölçüm verilerine en iyi uyan parametreleri, maksimum olabilirlik (ML) kestirim metodu ile elde edilmiştir. Kestirilen bu parametreler ile, dağılımların birikimli dağılım fonksiyonları (CDF) hesaplanarak, istenmeyen yankıların örnek verisinden elde edilen deneysel CDF ile karşılaştırılmışlardır. Şekil 4.37(a)'da elde edilen bu sonuçlar görülmektedir. Weibull dağılımının, deneysel CDF'yi diğerlerine göre daha yakından takip ettiği ve dolayısıyla mevcut istenmeyen yankı verileri için en iyi model olduğu görülmüştür.

Daha sonra, Weibull modeline dayanan, iki-parametreli bir CFAR algılayıcı geliştirilmiş ve görüntülerin genlik verilerine uygulanmıştır. CFAR algılayıcıda kullanılan eşik değerleri, Şekil 4.37(b)'de görülen kayan pencere düzeneği ile adaptif olarak hesaplanmıştır. Kısaca, her bir test pikseli noktası için, referans piksellerinden Weibull dağılımının parametreleri kestirilmiş, bu model kullanılarak verilen bir yanlış-alarm olasılığı P_{fa} değeri için karşılık gelen eşik değeri belirlenmiştir. Bu eşik değeri ile her bir pikselin hedef/istenmeyen yankı sınıflandırılması yapılmıştır. $P_{fa} = 0.01$ değerli böyle bir CFAR algılayıcısının, ölçülen dairesel-SAR

görüntülerine uygulanması sonuçları Şekil 4.38'de sunulmuştur. Sol sütundaki imajlar orijinal imajları, sağ sütundakiler ise algılayıcı sonuçlarını göstermektedir. Hedef sinyallerinin, istenmeyen yankı sinyalleri ile aynı veya daha az şiddet seviyesine sahip olduğu durumlarda bile doğru şekilde sınıflandırıldığı görülmektedir.



Şekil 4.37. İstenmeyen yankı tanımlaması ve giderilmesi. (a) İstenmeyen yankı örnek verisinin deneysel CDF'si ve bu veriye uyumlanan dağılımların teorik CDF'leri. (b) CFAR algılayıcısındaki adaptif eşik değerinin belirlenmesinde kullanılan kayan pencere düzeneği.



Şekil 4.38. Dairesel-SAR görüntülerine CFAR algılayıcı uygulama sonuçları. (a) Scoda Octavia (b) iş makinası deneyi (Sol: orijinal görüntüler, Sağ: Weibull istenmeyen yankı modeline dayalı ve $P_{fa} = 0.01$ değerli CFAR algılayıcı çıkışı).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde birçok önemli yer tabanlı ve kısa mesafeli uzaktan algılama probleminin çözümleri için SAR ve TSAR görüntülemenin kullanılabilirliği, kapsamlı bir araştırma konusudur. Bu uygulamalara örnek olarak şunlar gösterilebilir; (i) genellikle kapalı ortamlarda ve kritik yerlerde insan üzerinde giysi altına gizlenmiş tehdit nesenelerinin, güvenlik amaçlı olarak algılanması, (ii) yansımasız odanın yakın-mesafe ölçümleri ile askeri hedeflerin uzak-alan RKA'larının kestirimi, (iii) havaalanı pistlerinde uçak iniş ve kalkışında tehlike yaratacak her türlü döküntü nesnelerinin tespiti, (iv) malzeme kusurlarının tahribatsız muayene ile belirlenmesi, (v) kanserli hücrelerin insan sağlığına zararlı etkileri olamayan teknikler ile tespit edilmesi (vi) duvar arkasının ve yer altının görüntülenmesi. Bu uygulamalar için, şu anda en öne çıkan ve yararlanılmak istenen veya yararlanılan teknik SAR/TSAR görüntülemedir. Fakat SAR/TSAR görüntüleme tekniği ile bu uygulamalardaki başarılı hedef tanımlamalarını yapabilme görevi, ciddi gerçekleştirim zorlukları içerir. Her birinde radar fiziksel gerisaçılım olgusunun, veri toplama geometrisinin ve hedef senaryosunun farklı olduğu bu ugulamalarda etkin, odaklı ve hızlı hedef görüntülemelerinin ve karakterizasyonlarının yapılması için birçok faktörün uygulamaya özgü olarak gözönüne alınması gerekmektedir. Donanımsal ve çevresel faktörler, iletilen güç, anten verimliliği ve tipi, monostatik veya bistatik veri toplama, kalibrasyon tipi, hedef yapısı ve elektriksel özellikleri, frekans ve dalgatipi seçimi bunlara örnek olarak gösterilebilir. Bunların dışında, iki temel zorluk SAR/TSAR görüntülemenin bu uygulamalardaki etkinliğini kısıtlamaktadır. Bunlardan ilki, yakın-alan hedef gerisaçılım sinyallerinden odaklı ve etkin görüntülemeler üretilebilmesidir. Bu problemin çözümüne yönelik, klasik SAR/TSAR için geliştirilen menzil-göçü ve Gİ algoritmalarının farklı tarama geometrili sistemler (silindirik, düzlemsel, küresel, veya rasgele) için formülasyonları ve bunların deneysel olarak doğrulanmaları üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bir diğer zorluk da, bu uygulamalarının birçoğunda yüksek çözünürlük veya hedeflerin farklı perspektiflerden taranması gereksiniminden dolayı, geniş-açı taramanın istenmesi ve bunun da sistem üzerinde özellikle hızlı görüntülemeye kısıtlama getirmesidir. Bu zorluk şu an için, bu yer tabanlı

uygulamalarıda karşılaşılan en önemli sorundur diyebiliriz. Farklı açılardan veri toplama işlemi, dizi antenler kullanımı ile hızlı olarak gerçekleştirilebilse de, görüntü oluşturma işleminde, bu büyük miktardaki veri, sistemleri oldukça yavaşlatmaktadır.

Bu tezde yukarıda bahsedilen iki temel problemin çözümüne yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, farklı yakın-alan SAR/TSAR görüntüleme tekniklerinin, çeşitli faktörleri de içeren genelleştirilmiş formülasyonları yapılmış, daha sonra algoritmaların doğrulukları, çok farklı geniş-açı yakın-alan ve MMD ölçümleri ile test edilmiştir. Bu sayede, MMD bandı için çeşitli metal silindir, köşegen yansıtıcılar, uçak maketleri gibi test objelerinin geniş-açı TSAR görüntüleme karakteristikleri çıkarılmıştır. Teorik testler için genelde kullanılan noktasal saçıcılar modeli, geniş-açı durumunda geçerliliğini yitirmektedir. Dolayısıyla farklı hedeflerin 360°'ye kadar varan ve anizotropik yapıdaki gerisaçılım karakteristikleri ancak gerçek ölçümler ile analiz edilebilir. Bu tez çalışmasında, kontrollü yansımasız oda ortamında toplanan çeşitli hedeflerin, geniş-açı verilerinin, odaklanmış TSAR görüntüleri elde edilerek, gerçek gerisaçılım mekanizmaları analiz edilmiştir. Hedeflerin güçlü gerisaçılım merkezlerini gösteren bu geniş-açı görüntülemeye ait elde edilen bulgular ve çıkarımlar, yukarıda bahsedilen ve MMD ile gizlenmiş hedef algılaması gibi uygulamalar için temel eğitici veri ve bulgular olarak kullanılabilir.

İkinci temel problemin çözümüne yönelik olarak, mühendislik camiasında şu an için oldukça popüler bir konu olan Sıkıştırılmış Örnekleme (SA) yaklaşımının, geniş-açı TSAR görüntülemedeki kullanımı üzerine çalışılmıştır. Bu yaklaşıma dayalı ve toplam ölçüm verilerinin çok az bir kısmını kullanarak Gİ algoritması sonuçlarına eşdeğer görüntülemeler üretebilen bir TSAR görüntüleme tekniği geliştirilmiştir. Yansımasız oda TSAR verileri üzerinde başarılı sonuçlar veren bu SA-tabanlı görüntüleme tekniği özellikle, MMD ile gizlenmiş nesne algılamasının pratik 3B görüntüleme uygulamasında karşılaşılan, büyük miktardaki veri sorunu etkin çözüm olacağı anlamına gelmektedir. Çok küçük boyuttaki metal ve dielektrik nesnelerin, farklı giysi malzemeleri altında 2B görüntüleri, bu teknik ile, çok kısıtlı ölçümler ile elde edilebilmiştir. Bu sebeple, tekniğin, bu uygulamalarda asıl olarak kullanılan 2B tarama geemetrisi ve 3B görüntüleme üzerindeki performansının değerlendirilmesinin önemli olacağı düşünülmektedir.

Tez çalışmasınnın, yer tabanlı 2B dairesel-SAR görüntüleme kısmında elde edilen çeşitli araçların radar görüntüleri, hedef gerisaçılım mekanizmaları hakkında, teori ile bire bir örtüşen bulgular sağlamıştır. Bu çalışmaların temel motivasyonu, özellikle askeri alanda, yer hedeflerinin, hava tabanlı bir radar sistemi ile farklı bakış açıları ve hedef konumları altında nasıl karakteristik göstereceğinin belirlenmesidir. Bu, pratikte bir uçak platforumu ile havadan dairesel güzergâh boyunca hedeflerin yankı verilerinin toplanması ile yapılır. Sistem karmaşıklığından dolayı, bu işlem alternatif olarak, döner-tabla üzerine yerleştirilen hedeflerin bir kule gibi yüksek bir düzeneğe monte edilen dışarı TSAR sistemleri ile de yapılabilmektedir. Bu tezde, daha pratik bir şekilde elde edilen bu tip geometriye sahip ölçümler ile gerçek araçların 2B dairesel-SAR görüntülemeleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yer tabanlı böyle bir sistemin hedef saçılım analizlerinde güvenle kullanılabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, böyle bir dairesel geometrili sistemin veya kule/döner-tabla TSAR sistemlerinin geliştirilerek, 2B/3B SAR/TSAR görüntülemelere ulaşılmasının, askeri uygulamalar açısından fayda sağlayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Skolnik, M. I. "Introduction to Radar Systems", McGraw Hill, Boston, MA, 3 edition, 772 p., (2001).

[2] Kingsley, S. and Quegan, S. "Understanding Radar Systems", SciTech Publishing, Mendham, 375 p., (1999).

[3] Wehner, D. R. "High Resolution Radar", Artech House, Norwood, MA, 472 p., (1987).

[4] Curlander, J. C. and McDonough, R. N. "Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing", John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 672 p., (1991).

[5] Soumekh, M., "Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms", Wiley-Interscience, New York, 648 p., (1999).

[6] Wiley, C. A. "Pulsed Doppler Radar Methods and Apparatus". U.S. patent no. 3, 196,436, (1953).

[7] Brown, W. M. "Synthetic aperture radar" IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES, 3(2): 217–229, (1967).

[8] Wiley, C. A. "Synthetic aperture radars", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-21(3): 440–443, (1985).

[9] Carrara, W. G., Goodman, R. S. and Majewski, R. M. "Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms", Artech House, Norwood-MA, 554 p., (1995).

[10] Mensa, D. L. "High Resolution Radar Imaging", Artech House, Norwood-MA, 198 p., (1982).

[11] Elachi, C. "Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing (2^{nd} edition)", John Wiley and Sons, New York, 616 p., (1987).

[12] Ausherman, D. A., Kozma, A., Walker, J. L., Jones, H. M. and Poggio, E. C., "Developments in radar imaging", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-20(4): 363-400, (1984).

[13] Walker, J. L. "Range-doppler imaging of rotating objects", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-16(1): 23–52, (1980).

[14] Ozdemir, C., "Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging With MATLAB Algorithms", Wiley-Interscience, New York, 408 p., (2012).

[15] Richards, M. A. "A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 22(9): 5-29, (2007).

[16] Jakowatz, C. V., Wahl, Jr. D. E., Eichel, P. H., Ghiglia, D. C. and Thompson, P. A. "Spotlight-mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach, Springer, Norwell-MA, 448 p., (1996).

[17] Munson, D. C. Jr. and Visentin, R. L. "A signal processing view of strip-mapping synthetic aperture radar", IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 37: 2131–2147, (1989).

[18] Gao, G. and Torres-Verdin C. "High-order generalized extended Born approximation for electromagnetic scattering", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 54(4): 1243-1256, (2006).

[19] Mensa, D. L., Halevy, S., and Wade, G. "Coherent Doppler tomography for microwave imaging", Proceedings of the IEEE, 71(2): 254-261, (1983).

[20] Broquetas, A., Jofre, L. and Cardama, A. "A near field spherical wave inverse synthetic aperture radar technique", Proceedings of the IEEE AP-S International Symposium and URSI Radio Science Meeting, Chicago, 2: 1114–1117, (1992).

[21] Anguela, X. and Broquetas, A. "A near-field 3D radar imaging technique", Proceedings of the 23rd European Microwave Conference, Madrid, 377–379, (1993).

[22] Fortuny, J. "An efficient 3-D near field ISAR algorithm", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 34(4): 1261-1270, (1998).

[23] Fortuny, J. and Sieber, A. J. "Fast algorithm for a near-field synthetic aperture radar processor", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 42(10): 1458-1460, (1994).

[24] Broquetas, A., Palau, J., Jofre, L. and Cardama, A. "Spherical wave near-field imaging and radar cross section measurement", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 46: 730–735, (1998).

[25] Vaupel, T. and Eibert, T. F., "Comparison and application of near-field ISAR imaging techniques for far-field radar cross section determination", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 54(1): 144-151, (2006).

[26] Munson, D. C., O'Brien, J. D. and Jenkins, W.K. "A tomographic formulation of spotlight-mode synthetic aperture radar", Proceedings of the IEEE, 71(8): 917–925, (1983).

[27] Bauck, J. L and Jenkins. W. K. "Tomographic processing of spotlight mode synthetic aperture radar signals with compensation for wavefront curvature," International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing ICASSP-88, New York, 2: 1192–1195, (1988).

[28] Li, H. J., Lin, F. L., Shen, Y. and Farhat, N. H. "A generalized interpretation and prediction in microwave imaging involving frequency and angular diversity," Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 4(5): 415-430, (1990).

[29] Luminati, J. E., "Wide-Angle Multistatic Synthetic Aperture Radar: Focused Image Formation and Aliasing Artifact Mitigation", Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, Ph.D. Thesis, 341 p., (2005).

[30] Baraniuk, R. and Steeghs, P. "Compressive radar imaging", 2007 IEEE Radar Conference, Waltham-Massachusetts, 128–133, (2007).

[31] Herman, M. A. and Strohmer, T. "Compressed sensing radar", 2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), Las Vegas, 1509–1512, (2008).

[32] Herman, M. A. and Strohmer, T. "High-resolution radar via compressed sensing", IEEE Transactions on Signal Processing, 57: 2275–2284, (2009).

[33] Stojanovic, I., Karl, W. C. and Cetin, M. "Compressed sensing of mono-static and multi-static SAR", Proceedings of SPIE 7337, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVI, 733705, (2009).

[34] Bhattacharya, S., Blumensath, T., Mulgrew, B. and Davies, M. "Fast encoding of synthetic aperture radar raw data using compressed sensing", The 2007 IEEE Workshop on Statistical Signal Processing, Madison-USA, 448 – 452, (2007).

[35] Zhu, X. X. and Bamler, R. "Tomographic SAR inversion by L1 –norm regularization: the compressive sensing approach", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48(10): 3839 –3846, (2010).

[36] Rilling, G., Davies, M. and Mulgrew, B. "Compressed sensing based compression of SAR raw data", Proceedings of Signal Processing with Adaptive Sparse Structured Representations- SPARS'09, Saint-Malo (F), 2009.

[37] Wei, S.-J., Zhang, X.-L., Shi, J. and Xiang, G. "Sparse reconstruction for SAR imaging based on compressed sensing", Progress In Electromagnetics Research, 109: 63-81, (2010).

[38] Yu, L. and Zhang, Y. "Random step frequency CSAR imaging based on compressive sensing," Progress In Electromagnetics Research C, 32: 81-94, (2012).

[39] Lin, Y., Hong, W., Tan, W.-X. and Wang, Y.-P. "Compressed sensing technique for circular SAR imaging", IET International Radar Conference, Guilin-China, 1-4, (2009).

[40] Austin, C., Ertin, E. and Moses, R. L. "Sparse multipass 3D imaging: Applications to the GOTCHA data set", Proceedings of SPIE 7337, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVI, 733703, (2009).

[41] Austin, C., Ertin, E. and Moses, R. L. "Sparse signal methods for 3-D radar imaging", IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 5(3): 408–423, (2011).

[42] Qiong, H., Lele, Q., Bingheng, W. and Guangyou, F. "UWB through-wall imaging based on compressive sensing", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48(3): 1408-1415, (2010).

[43] Gurbuz, A. C., McClellan, J. and Scott Jr. R., "A compressive sensing data acquisition and imaging method for stepped frequency GPRs", IEEE Transactions on Signal Processing, 57(7): 2640–2650, (2009).

[44] Lagunas, E., Amin, M. G., Ahmad, F. and Nájar, M. "Compressive sensing for through wall radar imaging of stationary scenes using arbitrary data measurements", 11th International Conference on Information Science,

Signal Processing and their Applications (ISSPA 2012), Montreal-Canada, 1347-1352, (2012).

[45] Yoon, Y.-S. and Amin, M. G. "Compressed sensing technique for high-resolution radar imaging, Proceedings of SPIE 6968, Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XVII, 69681A, (2008).

[46] Duman, M. and Gurbuz, A. C. "Performance analysis of compressive-sensing-based through-the-wall imaging with effect of unknown parameters", International Journal of Antennas and Propagation, Article ID 405145, doi:10.1155/2012/405145, (2012).

[47] Wei, S.-J., Zhang, X. L. and Shi, J. "Linear array SAR imaging via compressed sensing", Progress In Electromagnetics Research, 117, 299-319, (2011).

[48] Patel, V. M., Easley, G.R., Healy Jr. D.M. and Chellappa, R. "Compressed sensing for synthetic aperture radar imaging", IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2009), Cairo-Egypt, 2141-2144, (2009).

[49] Currie, N. C. "Radar Reflectivity Measurement: Techniques & Applications", Artech House, Norwood-MA, 767 p., (1989).

[50] Li, H. J. and Lin, F. L. "Near-field imaging for conducting objects", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 39: 600 -605, (1991).

[51] Odendaal, J. W. and Joubert, J. "Radar cross section measurements using near-field radar imaging", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 45: 948–954, (1996).

[52] Nicholson, K. J. and Wang, C. H. "Improved near-field radar cross-section measurement technique", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 8: 1103-1106, (2009).

[53] Appleby, R. and Anderton, R. N. "Millimeter-wave and submillimeter-wave imaging for security and surveillance," Proceedings of the IEEE, 95(8): 1683-1690, (2007).

[54] Appleby, R., Wikner, D. A., Trebits, R. and Kurtz, J. L. "Mechanically scanned real-time passive millimeter-wave imaging at 94 GHz,"

Proceedings of SPIE 5077, Passive Millimeter-Wave Imaging Technology VI and Radar Sensor Technology VII, 1, (2003).

[55] Fetterman, M. R., Grata, J., Jubic, G., Kiser, Jr. W. L. and Visnansky, A. "Simulation, acquisition and analysis of passive millimeter-wave images in remote sensing applications", Optics Express, 16(25): 20503-20515, (2008).

[56] Hua-Mei, C., Seungsin, L., Rao, R. M., Slamani, M. A. and Varshney, P. K. "Imaging for concealed weapon detection: a tutorial overview of development in imaging sensors and processing," IEEE Signal Processing Magazine, 22(2): 52-61, (2005).

[57] Yeom, S., Lee, D., Son, J., Jung, M., Jang, Y., Jung, S. and Lee, S. "Real-time outdoor concealed object detection with passive millimeter wave imaging", Optics Express, 19(3): 2530-2536, (2011).

[58] Essen, H., Fuchs, H., Hagelen, M., Stanko, S., Notel, D., Erukulla, S., Huck, J., Schlechtweg, M. and Tessmann, A. "Concealed weapon detection with active and passive millimeter-wave sensors, two approaches", German Microwave Conference, Karlsruhe, Germany, 1-4, (2006).

[59] Sheen, D. M., McMakin, D. L. and Hall, T. E. "Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 49(9): 1581-1592, (2001).

[60] Zhang, L. "Millimetre Wave Imaging for Concealed Target Detection", University of London, Ph.D. Thesis, 214 p., (2011).

[61] Detlefsen, J., Dallinger, A., Huber, S. and Schelkshorn, S. "Effective reconstruction approaches to millimeter-wave imaging of humans," Proceedings of the XXVIIIth URSI General Assembly, New Delhi, 23-29, (2005).

[62] Sheen, D. M., McMakin, D. L. and Hall, T. E. "Near-field three-dimensional radar imaging techniques and applications," Applied Optics, 49(19): E83-E93, (2010).

[63] Qi, Y. L., Tan, W., Wang, Y., Hong, W. and Wu, Y. "3D bistatic omega-k imaging algorithm for near range microwave imaging systems with bistatic

planar scanning geometry," Progress In Electromagnetics Research, 121: 409-431, (2011).

[64] Bertl, S., Dallinger, A. and Detlefsen, J. "Broadband circular interferometric millimetre-wave ISAR for threat detection," Advances in Radio Science, 5: 147-151, (2007).

[65] Bertl, S., Dallinger, A. and Detlefsen, J. "Bistatic extension for coherent MMW-ISAR-imaging of objects and humans, Advances in Radio Science, 6: 63-66, (2008).

[66] Bertl, S., Dallinger, A. and Detlefsen, J. "Interferometric focusing for the imaging of humans," IET Radar Sonar & Navigation, 4(3): 457-463, (2010).

[67] Cantalloube, H. M. J., Colin-Koeniguer, E. and Oriot, H. "High resolution SAR imaging along circular trajectories," Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2007, Barcelona, 850-853, (2007).

[68] Liu, Q., Hong, W., Tan, W. X., Lin, Y., Wang, Y. P. and Wu, Y. R. "An improved polar format algorithm with performance analysis for geosynchronous circular SAR 2D imaging," Progress In Electromagnetics Research, 119: 155-170, (2011).

[69] Bryant, M. L., Gostin, L. L. and Soumekh, M. "3-D E-CSAR imaging of a T-72 tank and synthesis of its SAR reconstructions," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 39: 211–227, (2003).

[70] Casteel, C. H., Gorham, Jr. L. A., Minardi, M. J., Scarborough, S. M., Naidu, K. D. and Majumder, U. K. "A challenge problem for 2D/3D imaging of targets from a volumetric data set in an urban environment," Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XIV (Editors: Zelnio, E. G., Garber, F. D.), Proceedings of the SPIE 6568, (2007).

[71] Ertin, E., Austin, C., Sharma, S., Moses, R. L. and Potter, L. C. "GOTCHA experience report: Three-dimensional SAR imaging with complete circular apertures," Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XIV (Editors: Zelnio, E. G., Garber, F. D.), Proceedings of the SPIE 6568, (2007).

[72] Dungan K. E. and Potter, L. C. "Classifying civilian vehicles using a wide-field circular SAR," Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVI

(Editors: Zelnio, E. G., Garber, F. D.), Proceedings of the SPIE 7337, (2009).

[73] Dungan, K. E., Austin, C., Nehrbass, J. and Potter, L. C. "Civilian vehicle radar data domes," Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVII (Editors: Zelnio, E. G., Garber, F. D.), Proceedings of the SPIE 7699, (2010).

[74] Dungan, K. E. and Potter, L. C. "3-D Imaging of vehicles using wide aperture radar," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 47(1): 187-200, (2011).

[75] Yu, L. and Zhang, Y. "A 3D target imaging algorithm based on two-pass circular SAR observations," Progress In Electromagnetics Research, 122: 341-360, (2012).

[76] Kempf, T., Peichl, M., Dill, S. and Suess, H., "3D tower-turntable ISAR imaging," Proceeding of the 4th European Radar Conference, Munich, 114-117, (2007).

[77] MATLAB, User reference for MATLAB, ver.7.0.0 (R14), May 2004.

[78] Kovaly, J. J. "High Resolution Radar Fundamentals", Artech House, Boston, MA, (1977).

[79] Cumming, I. G. and Wong, F. H. "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation", Artech House, Boston, 660 p., (2005).

[80] Potter, L. C. "DARPA Gotcha Seedling", Technical Report, Ohio State University, (2003)

[81] Mensa, D. L., Heidbreder, G. and Wade, G. "Aperture synthesis by object rotation in coherent imaging", IEEE Transactions on Nuclear Science, 27: 989–998, (1980).

[82] Mersereau, R. and Oppenheim, A. "Digital reconstruction of multidimensional signals from their projections," Proceedings of the IEEE, 62(10): 1319–1338, (1974).

[83] Demirci, S., Ustun, D., Ozdemir, C., "Imaging of wide-angle near-field inverse synthetic aperture radar data using back-projection algorithm",

Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium-PIERS 2011, Marrakech-Morocco, 554-557, (2011).

[84] Demirci, S., Yigit, E., Eskidemir, I. H., Ozdemir, C., "Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method," NDT & E International, 47: 35-42, (2012).

[85] Vertiy, A., Cetinkaya, H., Panin, S., Pavlyuchenko, A., Tekbas, M., Unal, A., Kizilhan, A., Kaya, A., Ozdemir, C., Demirci, S., Yigit, E., "Image reconstruction in SAR, ISAR and tomography applications at millimeter-wave band", Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS)-2011, Kiev-Ukraine, 184-189, (2011).

[86] Candes, E., Romberg, J. and Tao, T. "Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements", Communications on Pure and Applied Mathematics, 59(8): 1207–1223, (2006).

[87] Donoho, D. L. "Compressed sensing", IEEE Transactions on Information Theory, 52: 1289–1306, (2006).

[88] Fortuny, J. "Efficient Algorithms for Three- Dimensional Near-Field Synthetic Aperture Radar Imaging", Faculty of Electrical Engineering, University of Karslruhe, Ph.D. Thesis, 132 p., (2001).

[89] Mensa, D. L. "Wideband radar cross section diagnostic measurements", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 33: 206–214, (1984).

[90] Yegulalp, A. F. "Fast backprojection algorithm for synthetic aperture radar", The Record of the 1999 IEEE Radar Conference, Waltham-MA, 60–65. (1999).

[91] Cetinkaya, H., Kizilhan, A., Vertiy, A., Demirci, S., Ozdemir, C., Yigit, E., "The millimeter-wave imaging of concealed objects", The 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting, Spokane-USA, 228-231, (2011).

[92] Cetinkaya, H., Kizilhan, A., Tekbas, M., Demirci, S., Yigit, E., Ozdemir, C., Vertiy, A., "The millimeter-wave ISAR imaging of concealed objects", 2011 URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul-Turkey, (2011).

[93] Demirci, S., Cetinkaya, H., Tekbas, M., Yigit, E., Ozdemir, C., Vertiy, A., "Back-projection algorithm for ISAR imaging of near-field concealed objects", 2011 URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul- Turkey, 1-4, (2011).

[94] Demirci, S., Cetinkaya, H., Yigit, E., Ozdemir, C. and Vertiy, A. "A study on millimeter-wave imaging of concealed objects: Application using back-projection algorithm," Progress in Electromagnetics Research (PIER), 128: 457-477, (2012).

[95] Needell, D. and Tropp, J. A. "CoSaMP: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples", Applied and Computational Harmonic Analysis, 26(3): 301-321, (2009).

[96] Yigit, E., Demirci, S., Unal, A., Ozdemir, C. and Vertiy, A. "Millimeter-wave ground-based synthetic aperture radar imaging for foreign object debris detection: Experimental studies at short ranges" Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 33(12): 1227-1238, (2012).

[97] Yigit, E., Demirci, S., Ozdemir, C., Unal, A., Vertiy, A., "Application of efficient back-projection algorithm to millimeter wave ground-based synthetic aperture radar systems", 12th Mediterranean Microwave Symposium (MMS 2012), (2012).

[98] Yigit, E., Unal, A., Demirci, S., Vertiy, A., Ozdemir, C., "An adapted matched-filter algorithm for millimeter wave ground based squint mode SAR", The 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves-IRMMW-THz 2011, Houston-USA, (2011).

[99] Yigit, E., Unal, A., Kaya, A., Demirci, S., Cetinkaya, H., Ozdemir, C., Vertiy, A., "Millimeter-wave ground based synthetic aperture radar measurements", 2011 URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul-Turkey, (2011).

[100] Demirci, S., Ozdemir, C., Akdagli, A., Yigit, E. "Clutter reduction in synthetic aperture radar images with statistical modeling: an application to MSTAR data," Microwave and Optical Technology Letters, 50(6): 1514-1520, (2008).

ÖZGEÇMİŞ VE ESERLER LİSTESİ

Adı Soyadı: Şevket DEMİRCİ

Doğum Tarihi: 24/01/1976

Öğrenim Durumu:

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lise	Mühendislik Sınıfı	Adana Anadolu Lisesi	1987-1994
Lisans	Elektrik ve Elektronik Mühendisliği	Çukurova Üniversitesi	1994-1998
Yüksek Lisans	Elektrik ve Elektronik Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2002-2005

(Varsa) Görevler:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Araştırma Görevlisi	Çukurova Üniversitesi	1998-1999
Araştırma Görevlisi	Mersin Üniversitesi	2001-(Devam)

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

Makaleler

1. Yigit E, **Demirci S**, Unal A, Ozdemir C, Vertiy A, "Millimeter-wave ground-based synthetic aperture radar imaging for foreign object debris detection: Experimental studies at short ranges" *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 33(12), pp. 1227-1238, 2012.
2. **Demirci S,** Cetinkaya H, Yigit E, Ozdemir C, Vertiy A, "A study on millimeter-wave imaging of concealed objects: Application using back-projection algorithm," *Progress in Electromagnetics Research* (*PIER),* 128, pp. 457-477, 2012.
3. **Demirci S,** Yigit E, Eskidemir IH, Ozdemir C, "Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method," *NDT & E International*, 47, pp. 35-42, (2012).
4. Ozdemir C, **Demirci S,** Yigit E, "Practical algorithms to focus B-scan GPR images: theory and application to real data," *Prog Electromagn Res B-PIER B*, 6, pp. 109-122, (2008).
5. **Demirci S**, Ozdemir C, Akdagli A, Yigit E, "Clutter reduction in synthetic aperture radar images with statistical modeling: an application to MSTAR data," *Microw Opt Technol Lett*, 50(6), pp. 1514-1520, (2008).

6. Yigit E, **Demirci S**, Ozdemir C, Kavak A, "A synthetic aperture radar-based focusing algorithm for B-scan ground penetrating radar imagery," *Microw Opt Technol Lett*, 49(10), pp. 2534-2540, (2007).
7. Ozdemir C, **Demirci S**, Yigit E, Kavak A, "A hyperbolic summation method to focus B-scan ground penetrating radar images: an experimental study with a stepped frequency system," *Microw Opt Technol Lett*, 49(3), pp. 671–676, (2007).

Bildiriler (Yurt Dışı)

1. Ozdemir C, **Demirci S**, Yigit E, "A review on the migration methods in B-scan ground penetrating radar imaging", Proceedings of Progress in Electromagn. Research Symposium (PIERS 2012), Kuala Lumpur-Malaysia, 767-771, March 27-30, 2012, (sözlü).
2. Yigit E, Unal A, **Demirci S**, Vertiy A, Ozdemir C, "An adapted matched-filter algorithm for millimeter wave ground based squint mode SAR", The 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2011), Houston-USA, October 2-7, 2011, (poster).
3. Vertiy A, Cetinkaya H, Panin S, Pavlyuchenko A, Tekbas M, Unal A, Kizilhan A, Kaya A, Ozdemir C, **Demirci S**, Yigit E, "Image reconstruction in SAR, ISAR and tomography applications at millimeter-wave band", Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS)-2011, Kiev-Ukraine, pp. 184-189, August 25-27, 2011, (sözlü).
4. Cetinkaya H, Kizilhan A, Vertiy A, **Demirci S**, Ozdemir C, Yigit E, "The millimeter-wave imaging of concealed objects", The 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting, Spokane-USA, pp. 228-231, July 3-8, 2011, (sözlü).
5. **Demirci S**, Yigit E, Ozdemir C, "Detection of movement and impedance changes behind surfaces using ground penetrating radar", Proceedings of Progress In Electromagn. Research Symposium (PIERS 2011), pp. 1526-1529, Marrakech-Morocco, March 25-27, 2011, (sözlü).
6. **Demirci S**, Ustun D, Ozdemir C, "Imaging of wide-angle near-field inverse synthetic aperture radar data using back-projection algorithm", Proceedings of Progress In Electromagn. Research Symposium (PIERS 2011), pp. 554-557, Marrakech-Morocco, March 25-27, 2011, (sözlü).
7. Ozdemir C, Yigit E, **Demirci S**, "A comparison of focusing algorithms for ground based SAR system", Proceedings of Progress In Electromagn. Research Symposium (PIERS 2011), pp. 548-553, Marrakech-Morocco, March 25-27, 2011, (sözlü).
8. Yigit E, **Demirci S**, Ozdemir C, "On the imaging applications of ground penetrating radar," URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS 2010), Berlin-Germany, pp. 253-256, August 16-19, 2010, (sözlü).
9. Yigit E, **Demirci S**, Ozdemir C, "Ground penetrating radar image focusing using freguency-wavenumber based synthetic aperture radar technique," Int. Conf. on Electromagnetics in Adv. Applic. (ICEAA 07), Torino-Italy, pp. 344-347, September 17-21, 2007 (sözlü).

10. Ozdemir C, **Demirci S**, Yigit E, "A focusing method for B-Scan GPR images," 11th International Conference on Ground Penetrating Radar, Columbus-ABD, June 19-22, 2006 (sözlü).

Bildiriler (Yurt İçi)

1. Yigit E, **Demirci S**, Ozdemir C, Unal A, Vertiy A, "Application of efficient back-projection algorithm to millimeter wave ground-based synthetic aperture radar systems", 12th Mediterranean Microwave Symposium (MMS 2012), İstanbul, September 2-5, 2012, (sözlü).
2. Yigit E, Unal A, Kaya A, **Demirci S**, Cetinkaya H, Ozdemir C, Vertiy A, "Millimeter-wave ground based synthetic aperture radar measurements", 2011 URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul-Turkey, August 13-20, 2011, (sözlü).
3. Cetinkaya H, Kizilhan A, Tekbas M, **Demirci S**, Yigit E, Ozdemir C, Vertiy A, "The millimeter-wave ISAR imaging of concealed objects", 2011 URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul-Turkey, August 13-20, 2011, (sözlü).
4. **Demirci S**, Cetinkaya H, Tekbas M, Yigit E, Ozdemir C, Vertiy A, "Back-projection algorithm for ISAR imaging of near-field concealed objects", 2011 URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul- Turkey, August 13-20, 2011, (poster).
5. Ozdemir C, **Demirci S**, Yilmaz B, Ak C, Yigit E, "A new and practical formulation of bistatic inverse synthetic aperture radar imaging and verification of the formulation using numerical examples," Int. Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO'2009), Bursa, Vol. 2, pp. 161-163, 2009, (sözlü).
6. Ozdemir C, **Demirci S**, Yigit E, "High resolution 2D and 3D image generation at microwave frequencies: application to real soil measurements," Symp. Geophysics Remote Sens. in Determination of Near-Surface Structures (GARS 2008), İzmir, pp. 121-124, Nisan 30, 2008, (sözlü).
7. Ozdemir C, **Demirci S**, Yigit E, "3-boyutlu C-tarama görüntülerinin elde edilmesi," Elektr., Elektron. ve Bilgisayar Müh. Semp. (ELECO'2006), Bursa, 2006, (sözlü).
8. Ozdemir C, Yigit E, **Demirci S**, "Ground penetrating radar studies at Mersin University," IV. International Workshop on Electromagnetic Wave Scattering, Gebze, Eylül 18-22, 2006, (sözlü).
9. Yiğit E, Özdemir C, **Demirci Ş**, "Bir yapay açıklıklı radar tekniği ile odaklanmış yere nüfüz eden radar görüntülerinin elde edilmesi," URSI-TÜRKİYE'2006 Bilimsel Kongresi, Ankara, pp. 229-231, Eylül 06-08, 2006, (sözlü).
10. Özdemir C, **Demirci Ş**, Yiğit E, "B-tarama yere nüfuz eden radar görüntüleri için bir odaklama algoritması," URSI-TÜRKİYE'2006 Bilimsel Kongresi, Ankara, pp. 244-246, Eylül 06-08, 2006, (sözlü).
11. **Demirci S**, Bektaser F, Ozdemir C, "Clutter modelling and cancellation in SAR images: application to MSTAR data," Int. Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO'2005), Bursa, pp. 160-164, 2005, (sözlü).
12. Bektaşer F, **Demirci Ş**, Özdemir C, "Basitleştirilmiş gerçek frekans tekniğini kullanarak anten bant genişliklerinin arttırılması: tasarımlı örnekler," Elektr.,

Elektron. ve Bilgisayar Müh. 11. Ulusal Kongresi, İstanbul, pp. 36-39, 2005, (sözlü).

13. **Demirci Ş**, Kavak A, Özdemir C, " İstenmeyen yankıları giderme metotlarının gerçek SAR görüntülerine uygulanması," Elektr., Elektron. ve Bilgisayar Müh. 11. Ulusal Kongresi, İstanbul, pp. 328-331, 2005, (sözlü).