

**ELEKTROMAGNETİK ALAN ÖLÇÜMLERİYLE
YERALTINDAKİ NESNELERİN TESPİT EDİLMESİ
VE YERE NÜFUZ EDEN RADAR (YNR)
GÖRÜNTÜLERİNİN ELDE EDİLMESİ**

ENES YİĞİT

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MERSİN
EKİM – 2007**

**ELEKTROMAGNETİK ALAN ÖLÇÜMLERİYLE
YERALTINDAKİ NESNELERİN TESPİT EDİLMESİ VE YERE
NÜFUZ EDEN RADAR (YNR) GÖRÜNTÜLERİNİN ELDE
EDİLMESİ**

ENES YİĞİT

**Mersin Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Ana Bilim Dalı**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Caner ÖZDEMİR**

**MERSİN
Ekim -2007**

Bu tezin gerek bilimsel içerik, gerekse elde edilen sonuçlar açısından tüm gerekleri sağladığı kanaatine ulaşan ve aşağıda imzaları bulunan biz jüri üyeleri, sunulan tezi oy birliği ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul ediyoruz.

Tez Danışmanı
(İmza)
Doç. Dr. Caner ÖZDEMİR

Jüri Üyesi
(İmza)
Doç. Dr. Turgut İKİZ

Jüri Üyesi
(İmza)
Yrd. Doç. Dr. Ali AKDAĞLI

Bu tezin Fen Bilimleri Enstitüsü yazım kurallarına uygun olarak yazıldığı Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../.....tarih ve/..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mahir TURHAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

ÖZ

Yere nüfuz eden Radar (YNR) kısaca Yüzey altındaki nesnelere ve katmanların elektromanyetik teknikler ile algılanması ve konumlandırılması olarak ifade edilebilir. YNR, gömülü kara mayınları, patlamamış askeri mühimmat, güç hatları ve yeraltı katmanları gibi geniş uygulama alanlarına sahiptir. YNR uygulamaları sonrası elde edilen görüntülerde en fazla göze çarpan, hedef merkezli hiperbollerdir. Bu hiperbollerin gidermek ve hedefleri asıl yerlerinde odaklanmış olarak elde etmek asıl amaçtır.

Bu çalışmada, YNR da görüntüleme ve odaklama teknikleri incelenmiş ve yeraltının 2 boyutlu (2-B) ve 3 boyutlu (3-B) görüntüleri elde edilmiştir. Bu yapılırken tarama, frekans bölgesinde Frekans Adımlı Sürekli Dalga Radar (SFCW) tekniğiyle gerçekleştirilmiştir. 2-B B-tarama görüntüleri sonrası elde edilen imajların odaklanması için iki adet göç ettirme (migration) algoritması sunulmuştur. Sunulan algoritmaların benzetim sonuçlarını görmek için, sadece homojen ve kayıpsız ortamlarda karışık metal nesnelere saçılmayı tahmin edebilen ve seken ışın (shooting and bouncing ray (SBR)) tekniğini kullanan Fiziksel Optik (PO) bazlı Yüksek Frekans Saçılma Kodu kullanılmıştır. Daha sonra algoritmalar laboratuvar ortamında hazırlanmış deneysel düzenekle elde edilen YNR görüntülerine uygulanarak deneysel sonuçlar incelenmiştir. Son olarak, YNR görüntüleme ve odaklama algoritmaları gerçek toprak uygulamalarında denenmiş ve başarılı bir şekilde odaklanmış YNR görüntüleri elde edilmiştir. Sunulan iki algoritma birbiriyle karşılaştırılarak artı ve eksi yönleri kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: SAR, YNR, SFCWR, Odaklama

ABSTRACT

Ground Penetrating Radar (GPR) can be defined as a detection and identification by electromagnetic techniques of the structures and layers within the ground. GPR has a wide application space, like buried land mines, unexploded military munitions, power lines and subsurface layers. The images which are obtained after the GPR applications, the most noticeable phenomenon is target centered hyperboles. The main aim is to removing these hyperboles and obtaining focused target images with their own location.

In this thesis, focusing and imaging techniques for GPR were examined and two dimensional (2-D) and three dimensional (3-D) images of subsurface were obtained. While these were executed, the scanning was performed with the Stepped Frequency Continues Wave (SFCW) Radar techniques. In order to focus images which are obtained after the 2-D B-Scan, there were two migration algorithms presented. In order to understand the results of the simulations of the proposed algorithm, a physical optics (PO) based High Frequency Scattering simulator that can successfully estimate EM scattering from metallic targets only for homogeneous mediums and utilizes the shooting and bouncing ray (SBR) technique were employed. Than the algorithms were applied to the measured GPR images in the laboratory medium and experimental results were examined. Lastly GPR imaging and focusing algorithms were tested in real soil medium and well focused GPR images were obtained successfully. Two utilized algorithms were compared with each other and their positive and negative sides were presented.

Key Words: SAR, GPR, SFCWR, Focusing

TEŐEKKÖRLER

Bu tezin hazırlanmasında emeği geen baŐta tez danıŐmanım Do. Dr. Caner ÖZDEMİR' e ve alıŐmaların her aŐamasında desteğini hi esirgemeyen Arş. Gör. Őevket DEMİRCİ' ye ve tez dÖnemi boyunca maddi manevi desteklerini hiç esirgemeyen ve her zaman dualarıyla arkamda olan kardeŐlerime Őükranlarımı sunarım.

Ayrıca bu çalıŐmayı, EEEAG–104E085 proje koduyla destekleyen TÜBİTAK'a, laboratuvar imkânlarını sağlayan Mersin Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne ve deneylerde kullanılan kum malzemesini hibe eden Mersin Trakya Cam Sanayi A.Ő. 'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>SAYFA</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. ELEKTROMANYETİKTE TERS PROBLEM.....	3
2.2. BASİT YNR İLKELERİ.....	5
2.3. ELEKTROMANYETİK VE FOURİER TRANSFORM KAVRAMLARI.....	6
2.3.1. Temel Elektromanyetik Kavramlar.....	6
2.3.2. Dalga Denklemi.....	8
2.3.3. Genel Düzlemsel Dalga.....	9
2.3.4. Green Fonksiyonu.....	11
2.3.5. Kirchoff İntegral Formülü.....	13
2.4. FOURİER DÖNÜŞÜMÜ.....	14
2.4.1. Sürekli Fourier Dönüşümü.....	14
2.4.2. Kesikli Fourier Dönüşümü.....	14
2.4.3. DFT Parametrelerinin Hesaplanması.....	16
2.5. FREKANS ADIMLI SÜREKLİ DALGA RADAR (SFCW).....	18
2.5.1. Adım Frekans Sürekli Dalga Radar(Sfcwr) Kullanarak DFT ve IDFT Gerçekleştirme.....	20
2.6. YNR de MENZİL PROFİLİ.....	21
2.6.1. Tek Boyutta Menzil Profili.....	21
2.6.2 Farklı 2 Konumdan, Tek Bir Noktasal Hedefin İncelenmesi.....	23
2.6.3. İki Boyutlu Menzil Profili ve Hiperbollar.....	24
2.6.4. A-Tarama.....	27
2.6.5. B-tarama.....	27
2.6.6. C-Tarama.....	28

3. MATERYAL VE METOT.....	30
3.1. KULLANILAN MATERYAL.....	30
3.1.1. Deneysel Düzenek.....	30
3.1.2. Tez kapsamında İmal edilen Antenler.....	33
3.1.2.1. Düşük frekanslı antenler.....	33
3.1.2.2. Yüksek kazançlı dar bant antenler.....	35
3.1.2.3. C-bant (0.8–5 GHz) boynuz anten.....	38
3.1.3. Kullanılan Yazılımlar.....	40
3.1.3.1. Fiziksel Optik (PO) bazlı yüksek frekans saçılma kodu.....	40
3.1.3.2. Matlab.....	41
3.2. KULLANILAN METOT.....	42
3.2.1. YNR Görüntüleme Algoritması.....	42
3.2.2. Yer Ortamının Dielektrik Sabitinin Bulunması Deneyi.....	44
3.2.3. Hiperbolik Toplama (HT) Odaklama Metodu.....	47
3.2.4. Şerit-Harita SAR bazlı YNR Odaklama Algoritması.....	48
4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	52
4.1. BENZETİM SONUÇLARI.....	52
4.2 DENEYSEL BULGULAR.....	55
4.2.1 Monostatik B-tarama deneyleri ve elde edilen YNR görüntüleri.....	55
4.2.2 Bistatik B-tarama deneyleri ve elde edilen YNR görüntüleri.....	58
4.2.3 B-Tarama Deneyleri Ve Odaklama Algoritmaları.....	61
4.3 GERÇEK TOPRAK YNR BULGULARI.....	63
4.3.1 Deney Düzeneğinin Hazırlanması.....	64
4.3.2 Monostatik Ve Bistatik Konfigürasyon İçin Bulgular.....	65
4.3.2.1. Monostatik konfigürasyon.....	65
4.3.2.2. Bistatik konfigürasyon.....	67
4.3.3. Gerçek Toprak Deneylerinde SAR Algoritması.....	69
4.4. C-TARAMA YNR DENEY BULGULARI.....	71
4.4.1. Monostatik C-Tarama YNR Deneyleri.....	72
4.4.2. Bistatik C-Tarama YNR Deneyleri.....	76
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	81
KAYNAKLAR.....	84
ÖZGEÇMİŞ.....	88

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>SEKİL</u>	<u>SAYFA</u>
Şekil 2. 1. İleri ve Geri Problemin grafiksel gösterimi	4
Şekil 2. 2. YNR tarama geometrisinin temsili	7
Şekil 2. 3. Zaman bölgesi kesikli Fourier Dönüşümü	19
Şekil 2. 4. SFCWR deki Frekans Adımlarının temsili	21
Şekil 2. 5. SFCWR verisine sıfır ekleme temsili	23
Şekil 2. 6. Mükemmel iletkenin tek boyutlu düzlemsel dalgayla aydınlatılması	25
Şekil 2. 7. İki farklı nokta için tek bir noktasal hedefin menzili	26
Şekil 2. 8. Tek bir hedef için 2 noktadan elde edilen menzil profili	27
Şekil 2. 9. Monostatik B-tarama geometrisi	28
Şekil 2.10. Hedeflerden oluşan hiperbollerin grafiksel temsili	30
Şekil 2.11. İki adet hedef için A-tarama sonrası menzil profili	31
Şekil 2.12. Belirli bir hat boyunca B-tarama sonrası elde edilen menzil profili	32
Şekil 2.13. (a) C-Tarama grafiksel gösterim. (b) C-tarama deney düzeneği	33
Şekil 3. 1. (a) Oluşturulan YNR düzeneği geometrisi. (b) Gerçek deney fotoğrafı	36
Şekil 3. 2. (a) GPIB portuyla birbirine bağlı Network Analizör ve Dizüstü Bilgisayar (b) Deneyleerde kullanılan C-bant Boynuz Anten (AHS Systems SAS-584)	37
Şekil 3. 3. C-Bant Boynuz Antenin NA ile ölçülen S_{11} verisinin frekansa göre çizimi	38
Şekil 3. 4. C-Bant Boynuz Antenin (a) yatay, (b) dikey paternlerinin 7 GHz'de çizimleri (Üretici firma tarafından sağlanmıştır.)	39
Şekil 3. 5. E.E.M bölüm öğrencilerince imal edilen Boynuz Antenler. (a) 2.17-4.17 GHz arası çalışan Boynuz anten (b) 3.0 – 7.2 GHz arası çalışan Boynuz anten	40

Şekil 3. 6. İmal edilen antenlerin S_{11} ölçümleri (a) 2.17- 4.17 GHz arası anten (b) 3.0 – 7.2 GHz arası anten	41
Şekil 3. 7. Tarafımızdan imal edilen standart boynuz antenlerin fotoğrafları	42
Şekil 3. 8. Standart boynuz antenlerin besleme ünitesinin imalatından bir an	43
Şekil 3. 9. İmal edilen standart boynuz antenlerin ölçülen geri-yansıma katsayıları (a) 1. anten (b) 2. anten	44
Şekil 3.10. Satın alınan çift sırtlı boynuz antenlerden birinin fotoğrafı	45
Şekil 3.11. Çift sırtlı boynuz antenlerin geri-yansıma katsayısı ölçümleri (a)1. anten (b) 2. anten	46
Şekil 3.12. YNR geometrisi (Monostatik durum)	49
Şekil 3.13. (a) Yeralında bulunan 2 adet noktasal hedef (b) 1-B FT sonrası elde edilen YNR görüntüsü	51
Şekil 3.14. Dielektrik sabitinin ölçülmesi için yapılan deney düzeneklerinin geometrisi (a) hava deneyi (b) kum deneyi	52
Şekil 3.15. Dielektrik sabitinin ölçülmesi için yapılan deney düzeneklerinin fotoğrafları (a) hava deneyi (b) kum deneyi	53
Şekil 3.16. (a) Hava ve kum ortamında ölçülen S_{21} verisinin fazlarının 5.8-8.5 GHz arası değişimi, (b) Kum ortamının hesaplanan dielektrik sabitinin 5.8-8.5 GHz arası değişimi	55
Şekil 4. 1. (a) Gömülü hedeflerin simülasyonu (b) B-tarama $E_s(x,t)$ verisi (c) HT sonrası odaklanmış görüntü (d) SAR algoritması sonrası odaklanmış görüntüsü	63
Şekil 4. 2. Boş ve dolu pet şişelerin B-tarama YNR deneysel düzeneği	65
Şekil 4. 3. Boş ve dolu pet şişelerin B-tarama görüntüsü	66
Şekil 4. 4. Boş ve dolu pet şişelerle beraber gömülen küçük metal nesnenin B-tarama YNR deneyi (a) deneysel düzenek (b) B-tarama Görüntüsü	67
Şekil 4. 5. (a) Aynı derinlikteki 7 farklı hedefin Bistatik B-tarama düzeneği (b) Deney esnasında gömülen hedeflerin üstleri kumla Örtülmeden önceki görünümüleri	69
Şekil 4. 6. Birbirinden farklı 7 hedef için B-tarama Bistatik YNR görüntüsü	70

Şekil 4. 7. (a) Kum havuzunda farklı noktalara gömülmüş boruların görünümü (b) B-tarama sonrası orijinal görüntü (c) HS algoritması sonucu elde edilen odaklanmış görüntü (d) SAR algoritması sonucu elde edilen odaklanmış görüntü	74
Şekil 4. 8. Mersin Üniversitesi Çiftlikköy Yerleşkesi arazisinde gerçekleştirilen B-tarama YNR deneyi	76
Şekil 4. 9. Bilgisayar kontrollü adım motorlu B-tarama düzeneği	76
Şekil 4.10. Gerçek toprak deneyinde kullanılan küçük metal plaka metal boru ve su dolu pet şişe	78
Şekil 4.11. (a) Metal plaka, metal boru ve su nesnelere gömülü olduğu toprak ortamının uzay-frekans verisi (b) Elde edilen B-tarama uzay-zaman YNR görüntüsü	79
Şekil 4.12. (a)gömülü nesnelere elde edilen uzay-frekans verisi (b) elde edilen 2-B uzay-zaman YNR görüntüsü	81
Şekil 4.13. (a) Deneyden bir görüntü (b) Orijinal odaklanmamış görüntü (c) SAR algoritması sonrası odaklanmış görüntü	84
Şekil 4.14. C-tarama YNR deney düzeneği geometrisi	85
Şekil 4.15. Monostatik C-tarama deneyi hedeflerin konumları	86
Şekil 4.16. Monostatik konfigürasyonda elde edilen 3-B C-tarama YNR görüntüsünün değişik Z değerleri için elde edilen 2-B X-Y düzlemi kesitleri	88
Şekil 4.17. Monostatik konfigürasyonda elde edilen 3-B C-tarama YNR görüntüsünün değişik Z değerleri için elde edilen 2-B X-Y düzlemi YNR kesitleri	89
Şekil 4.18. Bistatik C-tarama deneyi (a) X-Z düzlemi izdüşümü (b) Y-Z düzlemi izdüşümü	91
Şekil 4.19. Bistatik konfigürasyonda elde edilen 3-B C-tarama YNR görüntüsünün değişik Z değerleri için elde edilen 2-B X-Y düzlemi YNR kesitleri	93
Şekil 4.20. Bistatik konfigürasyonda elde edilen 3-B C-tarama YNR görüntüsünün değişik Z değerleri için elde edilen 2-B X-Y düzlemi YNR kesitleri	94

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\delta(t-\tau)$:Direc delta fonksiyonu
$\psi(r,t)$:Scaler alan çözüümü
ψ	:Temel dalga denklemi
ϵ	:Dielektrik sabiti veya elektriksel geçirgenlik,
ρ	:Elektrik yük yoğunluğu
μ	:Manyetik geçirgenlik,
σ	:Ortamın iletkenliği
λ	:Dalga boyu
1-B	:Bir Boyutlu
2-B	:İki Boyutlu
3-B	:Üç Boyutlu
B	:Manyetik akı yoğunluğu,
BW	:Bant Genişliği
D	:Elektrik akı yoğunluğu,
DFT	:Kesikli Fourier Transformu
DIFT	:Ters Kesikli Fourier Transformu
E	:Elektrik alan şiddeti
E_{gelin}	:Kaynaktan gönderilen Elektrik Alan şiddeti
EM	:Elektromanyetik
E_{yans}	:Yansıyan Elektrik Alan şiddeti
f	:Frekans
F_{sample}	:Örnekleme frekansı
FT	:Fourier Transformu
$G(\tau,t)$:Green Fonksiyonu
GPIB	:General Purpose Instrumentation Bus
H	:Manyetik alan şiddeti
H_{gelin}	:Kaynaktan gönderilen Manyetik Alan şiddeti
HPBW	:Yarı-güç-demet genişliği
HT	:Hiperbolik Toplam
H_{yans}	:Yansıyan Manyetik Alan şiddeti

IFT	:Ters Fourier Transform
J	:Akım yoğunluğu
k	:Dalga numarası
L	:Diferansiyel operatör
NA	:Network Analizör
PEC	:Mükemmel Elektirik İletkeni
PO-	:Fiziksel Optik)
SAR	:Yapay Açıklıklı Radar
SFCW	:Frekans adımlı sürekli dalga radar
VNA	:Vektör Network Analizör
w	:Açısal Frekans
YNR	:Yere Nüfuz Eden Radar

1. GİRİŞ

Dünya üzerinde 60 ülkede yaklaşık 120 milyon kayıp kara mayını bulunmaktadır [1]. Amerika birleşik devletleri ordusu, Harici Bilim ve Teknoloji Merkezi (Foreign Science and Technology Centre (FSTC))' nin tahminlerine göre sadece, Afrika da 18 ila 30 milyon arasında patlamamış kara mayını bulunmaktadır [2]. Bu da Afrika'yı dünyanın en fazla mayına sahip kıtası yapmaktadır. Hali hazırdaki mayın tespit metotları oldukça yavaş ve pahalıdır. Bu yüzden yeni mayın tespit teknolojileri geliştirilmektedir. Yere nüfuz eden radar (Ground Penetrating Radar-YNR) mayın tespitinde bilinen en umut verici algılama tekniklerinden biridir.

YNR uygulamaları; mayın taramadan jeofizik uygulamalarına kadar bir çok bilimsel alanda uygulanmaktadır [3-8]. Özellikle Yapay Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar - SAR) bazlı YNR algoritmaları son yıllarda gelişmeler göstermiş ve yüksek çözünürlüklü YNR görüntülerinin elde edilmesinde önemli katkılar sağlamıştır [7-11].

Yirminci yüzyılın önemli mühendislik buluşlarından biri olan Yapay Açıklıklı Radar (SAR), genel olarak yeryüzünün ya da yeryüzü üzerindeki hedeflerin uzaktan algılama metotlarıyla yüksek çözünürlükte elektromanyetik (EM) haritalarını/görüntülerini çıkaran hava aracı veya uydu bazlı radar sistemi olarak tanımlanabilir [12]. Ancak SAR tekniklerinin YNR uygulamaları da mevcuttur [13–15].

Bu kapsamda, Hamlan [7] patlamamış askeri mühimmatın (Unexploded Ordinances - UXO) tespitinde; zaman-bölgesi dalga şekilleri kullanan SAR-bazlı bir algoritma geliştirmiştir. Benzer olarak, Sullivan [8] ve Vitebsky [9] UXO'ların tespit edilebilmesi için kısa-zamanlı sinyaller kullanarak ultra-geniş bant (Ultra Wide Band - UWB) SAR görüntüleri elde etmişlerdir. Ayrıca, Hough dönüşümü [10] ve geri-yayılm (back-propagation) [11] bazlı iteratif YNR algoritmaları da iyi çözünürlüklü YNR görüntüleri sağlayabilmektedir.

YNR uygulamalarında, gömülü olan nesnelerin yeri, büyüklüğü ve EM saçılma özelliklerinin belirlenmesi ana amaçtır. Bu yüzden tarama geometrisine bağlı olarak A-, B-, C-tarama gibi farklı tarama yöntemleri, değişik uygulamalar için kullanılmaktadır [12]. B-tarama YNR konfigürasyonunda, radar yüzey boyunca

doğrusal bir hat boyunca hareket ettirilirken, frekans çeşitliliği de kullanılarak iki boyutlu (2-B) uzay-frekans matrisi elde edilir. B-tarama uzay-zaman YNR görüntülerinde; hedefler, hiperbolik imajlar olarak görülmektedir [16]. Ancak nesnenin yansıtırlığı ile birlikte gerçek konumunu veren odaklanmış uzamsal görüntü bilgisi, çoğu uygulamada gereklidir. Bu amaçla, yakın zamanda birçok görüntü göç ettirme (migration) algoritmaları çalışılmıştır. YNR profilleri için ters-zaman göç ettirme algoritmaları, Hough-Dönüşüm teknikleri, sonlu-farklar zaman-düzlemi (FDTD) ters-zaman göç ettirme algoritmalarına dayanan geri-yayılm (back-propagation) teknikleri ve yapay açıklıklı radar algoritmaları [10,17,18] gibi farklı uygulamalar en bilinenleridir.

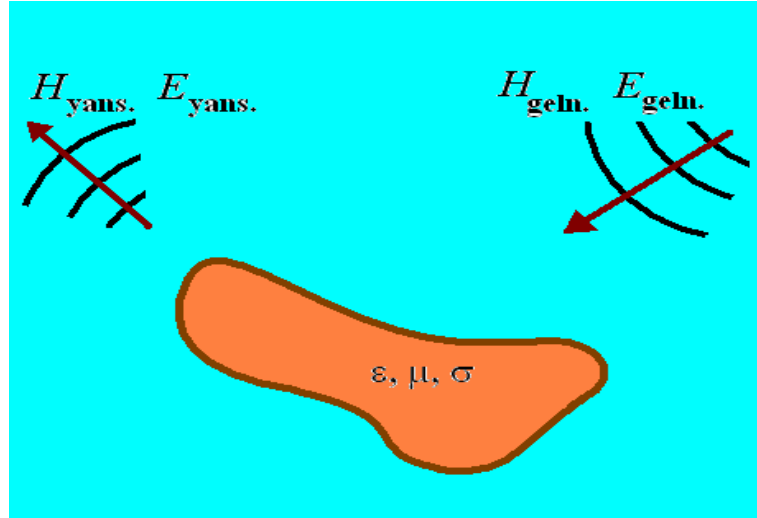
Bu çalışmada, elektromanyetik tekniklerle, yüzey altı ve hedefleri başarılı bir şekilde görüntülenmiştir. İki boyutlu (2-B) ve üç boyutlu (3-B) YNR görüntüleri elde edilmiş ve elde edilen 2-B YNR görüntülerinin odaklama problemi için, 2 çeşit algoritma sunulmuştur. Bunlardan birincisi, 2-B YNR görüntülerinde oluşan hiperbolik etkiden yola çıkan bir odaklama algoritması olurken [19], diğeri, bir tip şerit-harita SAR bazlı [12] göç ettirme algoritmasıdır. Uygulanan algoritmaların neticesinde, yüzey altının ve yüzey altı hedeflerinin yüksek çözünürlüklü gerçek uzay görüntüleri elde edilmiştir. Algoritmalar ayrıntılı olarak 2. bölümde verilmiştir. 3. bölümde ise; Uygulanan algoritmaların benzetim, deneysel ve gerçek toprak YNR verilerine uygulanması ve sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. ELEKTROMANYETİKTE TERS PROBLEM

Bu tezde YNR görüntülerinin nasıl elde edileceği ve elde edilen bu görüntülerdeki odaklama probleminin nasıl giderileceği incelenmiş ve bunun için gerekli teori verilmiştir. YNR den elde edilen imajların odaklanmasında, imajların aktarılması (Migration) metotlarından ikisi araştırılmış ve önerilmiştir. İncelenen bu metotlar literatür de Ters Problem (Inverse Problem) olarak bilinen, problemler kümesine girmektedir.

Ters problem, ileri problemle (Forward Problem) karşılaştırıldığında incelenmesi gereken olgu daha iyi anlaşılabilir. Elektromanyetikte saçılım probleminin genel fiziksel kümesi şekildeki gibidir (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. İleri ve Geri Problemin grafiksel gösterimi

İleri problemde gelen \mathbf{H}_{geln} ve \mathbf{E}_{geln} alanları ve maddenin fiziksel parametreleri olan ϵ , μ ve σ bilinirken saçılan alan hesaplanmaya çalışılır. Ters Problemde ise gelen alan \mathbf{H}_{geln} ve \mathbf{E}_{geln} bilgisine sahip olmakla beraber bazı saçılan (çoğu zaman sınırlıdır) alan \mathbf{H}_{yans} ve \mathbf{E}_{yans} bilgilerinden, hedefin fiziksel parametreleri olan ϵ , μ ve σ hakkındaki

bilgilerine ulaşılmak istenir. Tekillik teoremine (uniqueness theorem) (harrington [20]) göre ileri problemde dağılan dalga \mathbf{H}_{yans} , \mathbf{E}_{yans} tekildir. Ancak, Ters Problem çok daha karmaşıktır. Genel Ters problem, aşırı derece ilginç ve karmaşık bir problemidir.

Bu problemle ilgilenen matematikçiler için iki önemli soru ortaya çıkmaktadır. İlk olarak böyle bir problemin *çözümünün varlığı* sorgulanmakta ve eğer çözüm var ise, *tekillik durumu* incelenmektedir.

Oysaki YNR de görüntüleme esas olduğundan, ters görüntülemeye aynı zamanda üçüncü bir soru olan *kararlılık* durumu incelenmektedir. **Kararlı** kelimesiyle ifade edilen, girişteki (ölçülen saçılan alan) rasgele küçük değişmelerin, çözümde (fiziksel parametreleri) rasgele büyük değişikliklere sebep olmamasıdır. YNR de çözümün var olduğu bilinmektedir, çünkü elde edilmiş saçılan alan bilgisi mevcuttur. Zhdanov'a göre [21] 2 boyutlu ters problem için, tüm frekanslarda ($0 < f < \infty$) saçılan alanın bilinmesiyle problemin çözümü tekil olmaktadır.

Ancak pratik durumlarda tekil olmayan çözümlerle ilgilenilmektedir, çünkü gerçekte, ilgili objeyle ilgili dış yüzeyindeki tüm noktadaki tüm frekansları elde etmek mümkün değildir. Ayrıca, problem kararsız olarak gösterilebilir, çünkü girişteki rasgele değişimler, çözümü karıştıran çok büyük değişikliklere yol açmaktadır. Kararsız ve tekil olmayan problemler, *Kötü Konumlanmış (ill posed) problem* olarak adlandırılmaktadır.

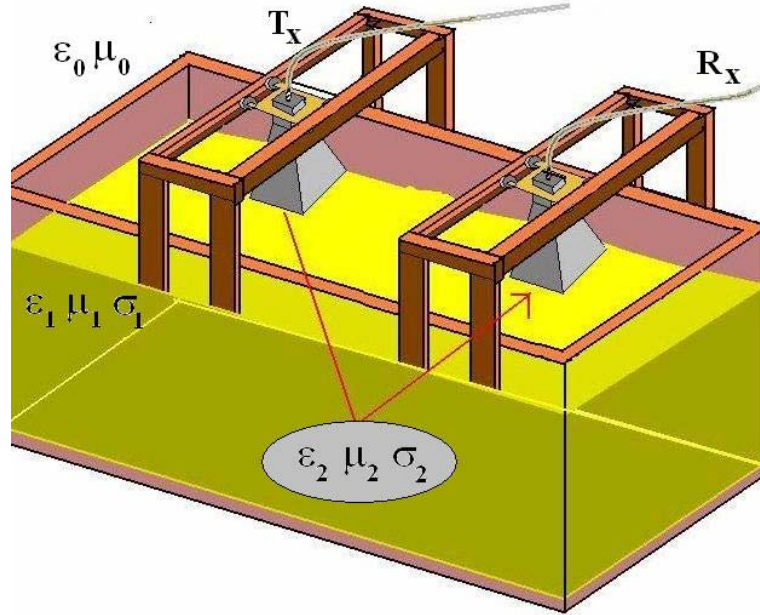
Ters problemin doğasının kötü konumlanmış olmasından dolayı, sonuçların mantıklı olması için, çözüm tekniklerinde sık sık basitleştirme ve varsayımlar yapılmalıdır. Tipik olarak önceden yapılan bu varsayımlar, materyal parametreleri hakkındadır. Bu olay, kabul edilebilir bir işlemdir, örneğin YNR de çoğu kez, mümkün hedefleri çevreleyen toprağın parametreleri bilinmektedir.

Sonuç olarak, YNR problemine, genelleştirilmiş Ters Problem'in özel bir durumu olarak bakılabilir. Bu tezde adı geçen SAR ve Hiperbolik Toplama (HT) kısımları Ters Problem kapsamında yer alacaktır. SAR/Migration algoritmaları, ters görüntüleme tekniklerine girmektedir. Bilinen Ters Problemlerde herhangi bir görüntü işleme olayı söz konusu değilken Ters Görüntüleme algoritmalarında hedefin yerinin,

konumunun ve bilgisinin görüntü matrisinde inşası ele alınmakta dolayısıyla görüntü işleme olgusu söz konusu olmaktadır.

2.2. BASİT YNR İLKELERİ

Basit bir YNR işlemi Şekil 2.2. de gösterilmiştir. YNR de bistatik veya monostatik olmak üzere iki çeşit tarama konfigürasyonu kullanılmaktadır. Bistatik konfigürasyonda verici ve alıcı anten kullanılırken, monostatik de tek bir anten hem verici hem de alıcı olarak kullanılır. YNR basit olarak, yeraltı veya yeraltı hedeflerinin elektromanyetik olarak uyarılması ve bu hedeflerden alınan geri saçılım sinyalleri toplanması olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.2. YNR tarama geometrisinin temsili

Elektromanyetik dalga bir ortamda ilerlerken, bulunduğu ortamdan farklı bir ortamlarla karşılaşır, EM enerjinin bir kısmı o ortama girerken bir kısmı da geri yansır. YNR deki en büyük problemlerden birisi hava toprak kesişimindeki yüksek yüzey yansımasıdır. Çünkü toprak ile hava arasındaki yüksek dielektrik farktan dolayı

elektromanyetik enerjinin çok az bir kısmı toprak ara yüzüne nüfuz edebilmektedir. Dolayısıyla yeraltı ve yeraltı hedeflerinden alınan geri yansıma çok az olmaktadır. Bu problemin giderilmesi için Bistatik konfigürasyon kullanılmaktadır. YNR de antenin bulunduğu ortamın özellikleri ϵ_0 ve μ_0 ve hedefin bulunduğu ortamda ϵ_1 μ_1 σ_1 ve hedef parametrelerinin σ_2 ϵ_2 μ_2 olduğunu varsayılırsa, her bir ortam için geri yansıma yapan EM enerjinin görüntü bilgisi farklı şiddetlerde algılanacaktır. Böylelikle YNR görüntüleri elde edilecektir.

2.3. ELEKTROMANYETİK VE FOURİER TRASNFORM KAVRAMLARI

YNR tekniklerini ayrıntılı bir şekilde anlayabilmek için temel EM denklemleri bilinmesi gerekmektedir. Özellikle sinyal işleme tekniklerinin kavranabilmesi, Fourier Transformunun (FT) ve buna ait kavramların bilinmesinden geçmektedir. Bu bölümde önemli elektromanyetik kavramlar anlatılacaktır. Ayrıca Kesikli Fourier Transformunun (DFT) basit kavramları, zaman/frekans ve uzay/frekans bilgileri de verilecektir. Bu tezdeki tüm **koyu** parametreler vektör olarak verilmektedir.

2.3.1. Temel Elektromanyetik Kavramlar

Tüm EM olgular Maxwel denklemleriyle ifade edilebilir. Temel Maxwell denklemleri şöyle sıralanabilir.

$$\nabla \times \mathbf{E}(r, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}(r, t) \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(r, t) = \mathbf{J}(r, t) + \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D}(r, t) \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(r, t) = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(r, t) = \rho(r, t) \quad (2.4)$$

Burada \mathbf{E} elektrik alan şiddeti vektörü, \mathbf{H} manyetik alan şiddeti vektörü, \mathbf{D} elektrik akı yoğunluğu vektörü, \mathbf{B} manyetik akı yoğunluğu vektörüdür, \mathbf{J} akım yoğunluğu vektörü ve ρ ise elektrik yük yoğunluğudur. Yukarıdaki denklemler yardımıyla süreklilik denklemi (equation of continuity) şu şekilde ifade edilebilir,

$$\nabla \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \rho(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (2.5)$$

ayrıca doğrusal bir ortamda, alan yoğunluğu, bünye denklemleri aracılığıyla, akı yoğunlukları ile ilişkilendirilebilir.

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.8)$$

Burada ϵ dielektrik sabiti veya elektriksel geçirgenlik, μ manyetik geçirgenlik, σ ortamın iletkenliğidir. Hepsi birlikte bu 3 parametre μ , ϵ ve σ , ortamın elektromanyetik alana nasıl tepki vereceğini saptamaktadır. Eğer zaman-harmonik bağımlılığı varsayılırsa ($e^{j\omega t}$) maxwell denklemleri, zaman harmonikleri cinsinden yazılabilir;

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = -j\omega \mathbf{B}(\mathbf{r}, \omega) \quad (2.9)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, \omega) = \mathbf{J}(\mathbf{r}, \omega) + j\omega \mathbf{D}(\mathbf{r}, \omega) \quad (2.10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, \omega) = 0 \quad (2.11)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, \omega) = \rho(\mathbf{r}, \omega) \quad (2.12)$$

Süreklilik eşitliği de

$$\nabla \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}, \omega) = -j\omega \rho(\mathbf{r}, \omega) \quad (2.13)$$

şeklinde yazılır.

Eğer ortamın admittivity [20] si

$$y = \sigma + j\omega\epsilon \quad (2.14)$$

şeklinde ve impedivity si de

$$z = j\omega\mu \quad (2.15)$$

şeklinde tanımlanırsa, dalga numarası da

$$k = \sqrt{-zy} \quad (2.16)$$

şeklinde tanımlanabilir. Kayıplı ortamda dalga numarasının gerçek değeri (real component) mevcut iken, kayıpsız ortamda sadece karmaşık değere sahiptir.

2.3.2. Dalga Denklemi

Uzayda $J(r,t)=0$, $\rho(r,t)=0$ olmak üzere kayıksız, doğrusal, izotropik ve homojen bölgesi için, frekans bölgesi maxwell denklemleri (2.9) ve (2.10) şu şekilde yazılabilir.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -z\mathbf{H} \quad (2.17)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = y\mathbf{E} \quad (2.18)$$

Bu iki denklemden aşağıdaki,

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} - k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (2.19)$$

denkleminde ulaşılır. 2. 19 denklemi *kompleks vektör dalga denklemi*(Complex Vector Wave Equation) olarak bilinmektedir. Aynı denklemin manyetik alan için eşiti şu şekildedir.

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} - k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (2.20)$$

Laplaz operatörünün tanımını kullanılarak

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.21)$$

ve \mathbf{E} ve \mathbf{H} 'nin diverjansının sıfır olması gerekliliği kullanılarak *vektör dalga denkleminde* (vektör wave equation) ulaşılır.

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (2.22)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (2.23)$$

\mathbf{E} ve \mathbf{H} nin her bir dörtgenel bileşeni *kompleks skaler dalga denklemini* veya *Helmoltz denklemini* ni sağlamaktadır.

$$\nabla^2 \psi + k^2 \psi = 0 \quad (2.24)$$

Burada ψ yerine E_x, E_y, E_z veya H_x, H_y, H_z bileşenlerinden her biri konulabilir.

$$\nabla^2 \psi - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \psi}{\partial t} = 0 \quad (2.25)$$

2.3.3. Genel Düzlemsel Dalga

Genellikle düzlemsel dalgaların birçoğu, bir fonksiyon tarafından ifade edilebilir. (Stratton pg 363) [22]:

$$\psi = e^{-jkh + j\omega t} \quad (2.26)$$

Burada h orijinden uzaklığı göstermektedir. Yayılan dalğanın normali ise $\mathbf{n} = n_x \hat{a}_x + n_y \hat{a}_y + n_z \hat{a}_z$ olduğundan h aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$h = \mathbf{n} \cdot \mathbf{R} = n_x x + n_y y + n_z z \quad (2.27)$$

Vektör dalga numarası şu şekilde tanımlanabilir

$$\mathbf{kn} = kn_x \hat{a}_x + kn_y \hat{a}_y + kn_z \hat{a}_z = k_x \hat{a}_x + k_y \hat{a}_y + k_z \hat{a}_z \quad (2.28)$$

Böylece temel dalga fonksiyonu şu şekilde yazılabilir

$$\psi = e^{-jk \cdot \mathbf{R} + j\omega t} \quad (2.29)$$

Aynı zamanda ψ fazör formda da yazılabilir

$$\underline{\psi} = e^{-jk \cdot \mathbf{R}} \quad (2.30)$$

Burada fazör terimi altı çizili olarak gösteriyoruz. Zaman bölgesi skaler dalga denkleminde (2.25), fazör olmayan dalga fonksiyon formu tanıtıldığında, *ayrılma denkleminde* (seperation equation) ulaşırız.

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \mu \epsilon \omega^2 - j \mu \sigma \omega = k^2 \quad (2.31)$$

Böylece üç, k_x, k_y, k_z ve w dan herhangi biri hesaplanırsa, dördüncü, ayrılma denkleminde (2.31) bulunabilir.

İki boyutlu bir problemde (uzamsal değişkenler x ve z), (2,21) denklemi

$$k_x^2 + k_z^2 = k^2 \quad (2.32)$$

Şeklini alır.

2.3.4. Green Fonksiyonu

Elektromanyetikte Green fonksiyonu 4 boyut gerektiren kullanıma sahiptir. Bu tezde kolaylık olması açısından, green fonksiyonunun en basit hali bir boyutlu olduğundan (zaman) tek boyutlu problem olarak gösterilmiştir. Green fonksiyonu hakkında çok daha ayrıntılı incelemeler Morse and Fashbach[23], ve D.S Jones [24] da bulunabilir. Buradaki amaç, kirchoff integral eşitliğindeki Green fonksiyonunun kullanımının anlaşılmasını sağlamaktadır. Buradaki türetimin aslı Adomin[25] den alınmakla birlikte türetimi anlaşılır kılmak için birçok detay, ilk koşullar ve sınır değerleri iptal edilmiştir.

$$Lu(t) = f(t) \quad (2.33)$$

Operasyonel eşitliği düşünüldüğünde, L lineer diferansiyel operatör, f kuvvet terimi, u ise bilinmeyen fonksiyondur. L lineer olduğundan tersi mevcut olup, u bilinmeyen fonksiyon için

$$u(t) = L^{-1}f(t) \quad (2.34)$$

elde edilir. L 'nin lineer bir diferansiyel işlem olduğu düşünüldüğünde, çözümün integral tipi;

$$u(t) = L^{-1}f(t) = \int G(t-\tau)f(\tau)d\tau \quad (2.35)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemden açıkça görülmektedir ki şayet probleme ilişkin bilinmeyen ve Green Fonksiyon olarak adlandırılan $G(\tau,t)$ fonksiyonu bulunabilirse, $u(t)$ de bulunabilir. Probleme ilişkin Green fonksiyonunu bulabilmek için denklem 2.35 'e L operatörünü uygulamak gerekmektedir.

$$Lu(t) = L \int G(t, \tau) f(\tau) d\tau \quad (2.36)$$

L nin doğrusallığından ve (2,33) den yararlanarak, aşağıdaki eşitlik yazılabilir;

$$f(t) = \int LG(t, \tau) f(\tau) d\tau \quad (2.37)$$

Bu denklemin tek çözümü;

$$LG(t, \tau) = \delta(t - \tau) \quad (2.38)$$

şeklinindedir. Böylece, kuvvet terimi (forcing term) direc delta fonksiyonu $\delta(t - \tau)$ olduğunda, Green fonksiyonu, operatör denkleminin çözümüdür. Ancak green fonksiyonunun çözümünde sınır koşulları önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle operatör denkleminin çözümü noktasal kaynak için sağlanmalıdır. Sonra 2.36' da ki $f(t)$ kuvvet fonksiyonuna eşit, ağırlık fonksiyonuyla, ağırlık toplamı tamamlanabilir.

Kolaylık olması için, fonksiyonların sadece t değişkenine bağlı olduğunu varsayılmıştır, ancak elektromanyetikte, nicelikler hem zaman hem de uzayla değişeceği için Green fonksiyonunu şu formda yazılmalıdır;

$$G(r, t | r', t') \quad (2.39)$$

Böylece, r' de konuşlandırılmış ve t' zamanında noktasal kaynaktan, r konumu ve t zamanındaki L operatör denkleminin çözümü şeklinde yazılabilir. Yukarıdaki türetimde kalan terimler kolayca modifiye edilebilir.

2.3.5. Kirchoff İntegral Formülü

Kirchoff integral formülü, denklem 2.24 deki skaler dalga denkleminin, integral çözümüdür. Serbest kaynaklı bir ortam için, skaler dalga denklemi için Kirchoff integral çözümü, D.S.Jones [24]

$$\psi(r, t) = \int_{t'} \oint_{S'} \left(\psi(r', t') \frac{\partial}{\partial n'} G(r, t | r', t') - G(r, t | r', t') \frac{\partial}{\partial n'} \psi(r', t') \right) dS' dt' \quad (2.40)$$

şeklindedir. Burada $\psi(r, t)$ skaler alan çözümü, S' çözümü bulmak için uygulanan hacmin yüzeyi, n' , S' nin dış normali ve $\psi(r', t')$ ise bu skaler alanın ölçüsünün temsilidir.

2.4. FOURIER DÖNÜŞÜMÜ

2.4.1. Sürekli Fourier Dönüşümü

Bu tezde $f(u)$ sinyalinin ileri fourier dönüşümü

$$F(k_u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(u) e^{-jk_u u} du \quad (2.41)$$

şeklinde ve ters fourier dönüşümü de

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(k_u) e^{jk_u u} dk_u \quad (2.42)$$

şeklinde verilecektir. Burada k_u fourier bölgesi değişkenidir. Eğer u zamanı temsil ederse $k_u = \omega$ genel frekans bölgesi fourier değişkenidir. x gibi uzamsal bir değişken için, $u = x$ ve $k_u = k_x$ 'i kullanılacaktır. İleri fourier transform için exponansiyel eşitlik olarak pozitif ve geri dönüşüm için negatif exponansiyel terimi kullanılacaktır.

2.4.2. Kesikli Fourier Dönüşümü

Kesikli zaman fourier dönüşümü (DFT), sürekli fourier dönüşümünün kesikli olarak örneklenmesi sonucu elde edilir. Eğer u bölgesi sinyali toplam N kesikli noktada, örnekleme periyodu Δu olmak üzere kesikli hale getirilirse;

$$F(k_u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{N\Delta u} f(u) e^{-jk_u u} du \quad (2.43)$$

şeklini alacak fakat, örnekleme söz konusu olduğundan 2. 43 şu şekilde yazılır;

$$F(k_u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta u) e^{-jk_u n\Delta u} \Delta u \quad (2.44)$$

Burada dikkat edilmesi gereken husus k_u 'nun hala sürekli değişken olmasıdır. k_u Tekrar kesikli noktalar kümesi olarak örneklendirir;

$k_u^m = 2\pi m / (N-1)\Delta u$ $m=0, 1, 2, \dots, N-1$ olur. Ve dönüşüm, $\sqrt{2\pi} / \Delta u \cdot k_u$ ile çarpılır ki bu değer $-k_{u\max}$ dan $k_{u\max}$ a kadar olan aralıktaki noktalar kümesidir.

DFT tanımlanırsa;

$$F(k_u^m) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta u) e^{-j2\pi m \frac{n}{N}} \quad (2.45)$$

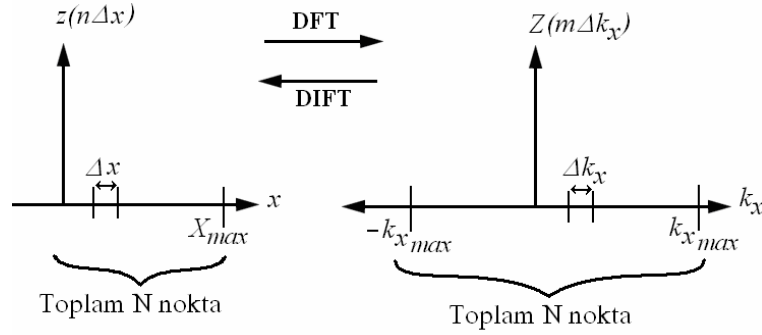
Ters DFT (IDFT) ise şöyle tanımlanabilir.

$$f(n\Delta u) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} F(k_u^m) e^{j2\pi m \frac{n}{N}} \quad (2.46)$$

2.4.3. DFT Parametrelerinin Hesaplanması

Bu tezde kullanılan görüntüleme algoritması, verinin toplanmasıyla ve ileri ve geri fourier dönüşümüyle doğrudan alakalıdır. Dolayısıyla görüntülemeyle Fourier transformu arasındaki ilişki incelenmiştir.

N tek sayı olmak üzere, bir u bölgesinde, $x=0$ dan $x=x_{\max}$ a kadar N kez örneklenmiş (örnekleme arasındaki ayrılık Δx dir) bir sinyal düşünülün. Böyle bir sinyalin DFT' si frekans bölgesinde $-k_{x\max}$ dan $k_{x\max}$ a giden N adet noktasal sinyal olarak kendini göstermektedir.



Şekil 2.3. Zaman bölgesi kesikli Fourier Dönüşümü

Frekans bölgesindeki örnekler arasındaki ayırım, Δk_x dir. Şekil 2.3 de temsil edilen DFT'nin türetimi için N-1 aralık içeren N örneklenmiş nokta düşünüldüğünde

$$X_{\max} = (N-1)\Delta x \text{ ve } 2k_{x\max} = (N-1)\Delta k_x \quad (2.47)$$

şeklinde olacaktır. Örnekleme frekansı F_{sample} şu şekilde yazılabilir,

$$F_{\text{sample}} = \frac{1}{\Delta x} \quad (2.48)$$

Nyquist örnekleme teoremine göre, k vektör dalga numarasının maksimum değeri,

$$k_{x\max} = \frac{2\pi F_{\text{sample}}}{2} = \frac{\pi}{\Delta x} \quad (2.49)$$

denklemleriyle verilir. $k_{x\max}$ ve Δx ile ilişki için gerekli eşitliklerin bulunmasıyla Δk_x ve X_{\max} denklem 2,47 kullanılarak tanımlanabilir

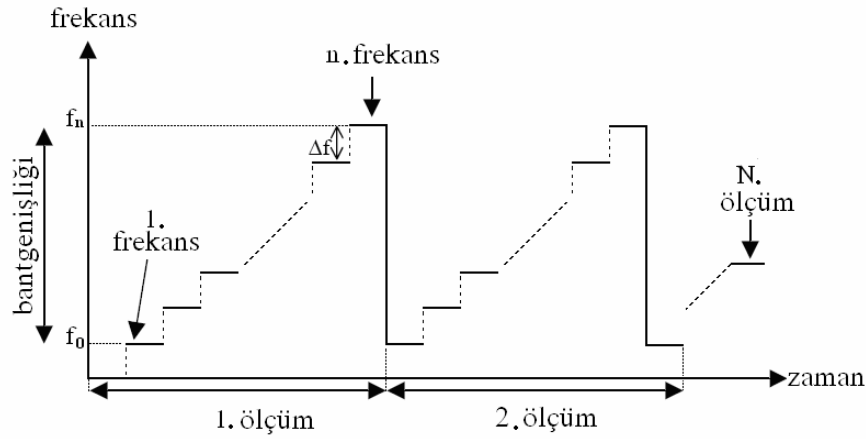
$$\Delta k_x = \frac{2k_{x\max}}{N-1} = \frac{2\pi}{(N-1)\Delta x} = \frac{2\pi}{X_{\max}} \quad (2.50)$$

$$X_{\max} = (N-1)\Delta x = \frac{\pi(N-1)}{k_{x\max}} = \frac{2\pi}{\Delta k_x} \quad (2.51)$$

2.50 ve 2.51 denklemlerini kullanarak, her bir kesikli ters fourier transform gibi ileri ve geri kesikli fourier transform için, birbiri arasında istenilen bütün eşitlikler ilişkilendirilebilir.

2.5. FREKANS ADIMLI SÜREKLİ DALGA RADAR (SFCW)

Frekans adimli sürekli dalga radarda, iletilen sinyal, yükselen adım frekanslarının miktarından oluşmaktadır (Şekil. 2.4.). SFCW de her bir adım frekans sinyaline göre alınan sinyalin faz ve genlik bilgisi ölçülür. Elde edile bu ölçümdeki, karmaşık diziyi içeren faz bilgisi, saçıcının hedef bilgisini vermektedir.



Şekil 2.4. SFCWR deki Frekans Adımlarının temsili

SFCW de başlangıç frekansına F_0 ve sabit yükselme frekansında Δf olduğunda alınan dizideki n ' inci örneğin frekansı,

$$F_n = F_0 + n\Delta f \quad n = 0 \dots M-1 \quad (2.52)$$

şeklinde olacaktır. Serbest bir uzayda, orijinden R mesafe uzaklıktaki bir noktasal saçıcı için, geri yansıyan elektrik alan sinyali, frekans bölgesinde şu şekilde ifade edilir;

$$E_s(n) = \rho e^{-j4\pi \frac{f_n d}{v}} \quad n = 0 \dots M-1 \quad (2.53)$$

Burada “ ρ ” hedefin yansıtırlığıdır ve v de dalganın ortamdaki hızıdır. Homojen ve kayıpsız bir ortam için bu hız; $v = c / \sqrt{\epsilon_r}$ şeklindedir.

Bu sinyal aynı zamanda dalga numarası k cinsinden ifadesi,

$$E_s(k) = \rho e^{-jk(2d)} \quad (2.54)$$

şeklindedir. 2. 54’ de “ k ” vektör dalga numarasıdır ve $k = 2\pi F_n / v$ şeklinde verilir. YNR’ de bir noktadaki ölçüme A-tarama denir. Ve 2 boyutlu B tarama datalarıysa, bir yapay açıklık boyunca, bu A-tarama verilerinin toplamıyla elde edilir. Bir x açıklığı boyunca N kesikli nokta için, (x_0, z_0) da konuşlanmış bir hedef için geri yansıma sinyali toplandığında, radar hedef uzaklığı “ d ” aşağıdaki formülle verilebilir.

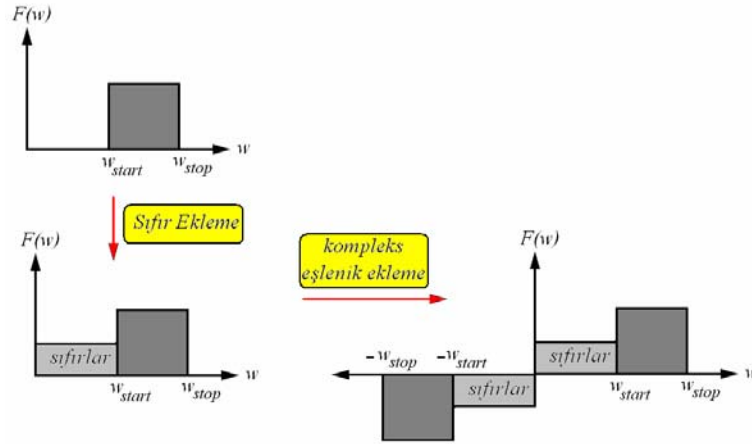
$$d = \sqrt{z_0^2 + (X - x_0)^2} \quad X = 1-2-3 \dots N \quad (2.55)$$

Böylece 2-B bir uzayda, radar anteni x yapay aralığı boyunca hareket ederken, elektromanyetik (EM) saçılmalar, her bir kesikli nokta için toplanır. (x_i, z_i) de konuşlandırılmış ve ρ_i ; $i=1 \dots S$ yansıtırlığına sahip S adet noktasal hedef için alınan $E_s(x, k)$ sinyali aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$E_s(x, k) = \sum_{i=1}^S \rho_i \cdot \exp(-jk(2\sqrt{z_i^2 + (x - x_i)^2})) \quad (2.56)$$

2.5.1. Adım Frekans Sürekli Dalga Radar (Sfcwr) Kullanarak DFT ve IDFT Gerçekleştirme

SFCWR' ın pratik durumlarında DFT ve IDFT gerçekleştirilirken sonlu bant genişlikli (finite bandwidth) veri problemiyle karşı karşıya kalınmaktadır. Bu problem verinin w_{start} ' tan w_{stop} ' a kadar toplanmasından dolayıdır. 2.50 ve 2.51 denklemlerinin uygulanabilmesi için, eldeki verinin tam bir bant genişliğine sahip olması gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmek için datanın $w=0$ dan $w=w_{start}$ a kadar olan kısmının sıfır ile doldurulması, sonrada sıfır doldurulmuş datanın karmaşık eşleniğinin alınması gereklidir. Yapılan bu işleme sıfır ekleme (zero padding) (Şekil 2.5.) denilir. Bu adım algoritmaya zaman kaybı olarak eklenir.



Şekil 2.5. SFCWR verisine sıfır ekleme temsili

2.6. YNR de MENZİL PROFİLİ

2.6.1 Tek Boyutta Menzil Profili

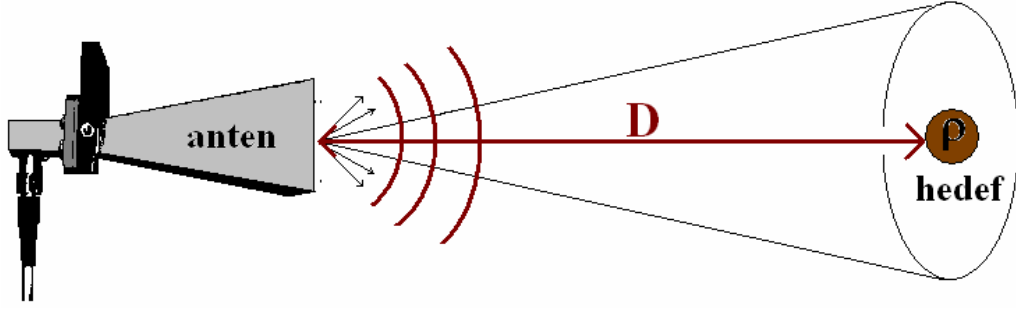
Bu tezde verilen görüntüleme algoritmasının iyi anlaşılabilmesi için, 1-B görüntülemenin iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu amaçla ilk olarak, menzil profili olarak da adlandırılan A-tarama gösterilecektir. Şekil 2.6. daki gibi bir problem düşünüldüğünde vericiden “D” mesafe uzaklıktaki noktasal bir hedefe çarpan düzlemsel dalga için, dönen sinyal $E_s(k)$ şu şekilde ifade edilir;

$$E_s(k) = \rho A e^{-j2\frac{w}{c}D} \quad (2.57)$$

Burada “A” aydınlatan düzlemsel dalganın genliği olup frekanstan bağımsızdır. “D” vericiyle iletken hedef arasındaki mesafe ve “c” ise çevrelenen ortamdaki ışığın hızıdır. $E_s(w)$ sinyalinin ters fourier transformu alındığında zaman-bölgesi sonucu şu şekilde olacaktır.

$$E_s(t) = \frac{\rho A}{\sqrt{2\pi}} \delta\left(t - 2\frac{D}{c}\right) \quad (2.58)$$

Bu denklem dirak delta fonksiyonudur ve sadece faz bilgisi kullanmaktadır. Bu datayı uzamsal düzleme aktarmak için, 2. 59 denklemiyle basitçe zaman eksenini ölçeklendirilebilir.



Şekil 2.6. Mükemmel iletkenin tek boyutlu düzlemsel dalgayla aydınlatılması

$$z = c \frac{t}{2} \quad (2.59)$$

Zamana bağlı 2. 58 verisi, uzamsal bölgeye aktarılırsa 2. 58 denklemi,

$$E_s(z) = \frac{\rho A}{\sqrt{2\pi}} \delta\left(\frac{2z}{c} - \frac{2D}{c}\right) \quad (2.60)$$

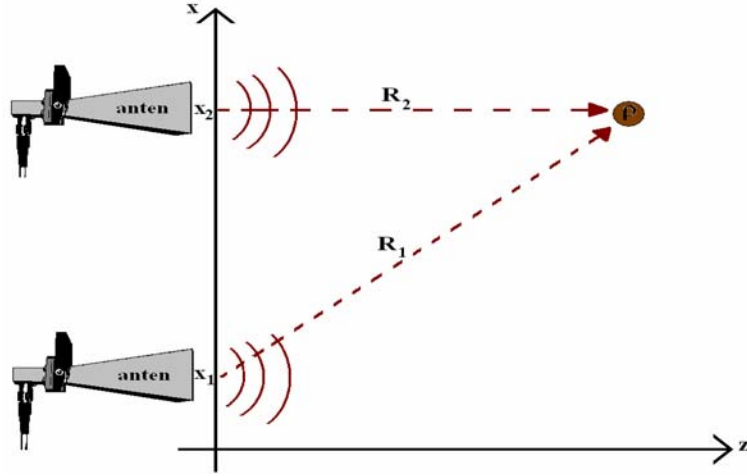
şeklini alır. Sabit ifadeler ortak paydaya alındığında 2. 60 ifadesi

$$E_s(z) = \frac{\rho A}{\sqrt{2\pi}} \delta\left(\frac{2}{c}(z - D)\right) \quad (2.61)$$

şeklinde olur Burada $\delta(\cdot)$, birim darbe fonksiyonudur. Dolayısıyla bu ifade, “D” uzaklıktaki noktasal saçıcının konum bilgisini mükemmel olarak vermektedir. Elde edilen bu veri, menzil profili olarak da adlandırılmaktadır. Yukarıdaki sonuç, frekans verisinin tüm frekans bandında toplanmasıyla elde edilecektir. Ancak, pratikte söz konusu geri saçılma verisi ancak sınırlı bir bant genişliğinde toplanabileceğinden Fourier kuramına göre yukarıdaki birim darbe fonksiyonu, z_0 etrafında *sinc* (*sinus cardinalis*) fonksiyonuna dönüşecektir

2.6.2 Farklı 2 Konumdan, Tek Bir Noktasal Hedefin İncelenmesi

Bu bölümde, tek bir hedef için çoklu anten pozisyonlarından oluşan menzil profilini elde edilmesi incelenmiştir. Problemin düzeneği Şekil 2.7. de gösterilmiştir. İlk olarak x_1 pozisyonundaki anten için, menzil profili sonrada x_2 pozisyonundaki anten için diğer menzil profili tanımlanarak toplam menzil profili elde edilmiştir.



Şekil 2.7. iki farklı nokta için tek bir noktasal hedefin menzili

Alınan her bir sinyal, $E_{S1}(k)$ ve $E_{S2}(k)$, şu şekilde modellenir;

$$E_{S1}(k) = \rho A e^{j2kR_1} \text{ ve } E_{S2}(k) = \rho A e^{j2kR_2} \quad (2.62)$$

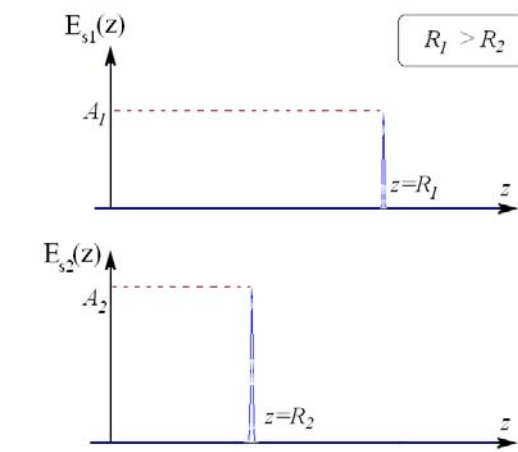
2. 62 eşitliklerinin zaman bölgesindeki ifadeleri,

$$E_{S1}(t) = \frac{\rho A}{\sqrt{2\pi}} \delta\left(t - \frac{2R_1}{c}\right) \text{ ve } E_{S2}(t) = \frac{\rho A}{\sqrt{2\pi}} \delta\left(t - \frac{2R_2}{c}\right) \quad (2.63)$$

şeklindedir. Zaman bölgesi, uzamsal bölge “z” ye aktarılırsa;

$$E_{s1}(z) = \frac{\rho A}{\sqrt{2\pi}} \delta(z - R_1) \text{ ve } E_{s2}(z) = \frac{\rho A}{\sqrt{2\pi}} \delta(z - R_2) \quad (2.64)$$

eşitliklerine ulaşılır. Dolayısıyla, bu iki sinyalin menzil profilleri şekil 2.4’de gösterildiği gibi oluşur.

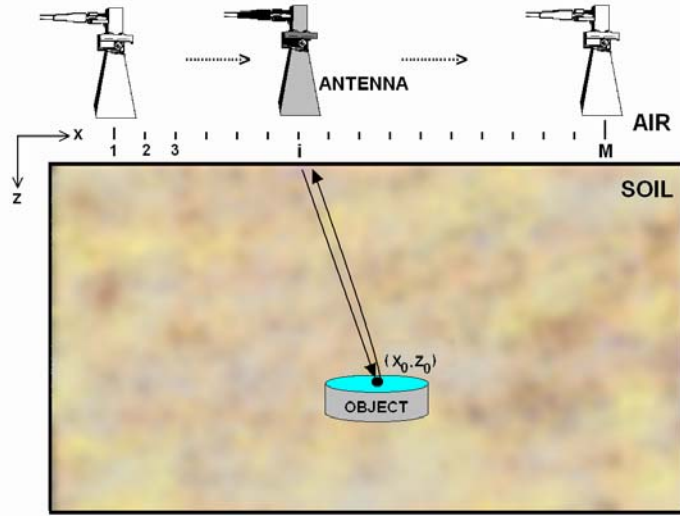


Şekil 2.8. Tek bir hedef için 2 noktadan elde edilen menzil profili

Böylece, z ekseninde ve hedef anten arasındaki mesafe R olacak şekilde konumlandırılmış tek bir hedef için standart menzil profilinin sonucunun Dirac delta fonksiyonu olduğu gerçekleştirilmiştir.

2.6.3. İki Boyutlu Menzil Profili ve Hiperbollar

Bu bölümde de, antenden R uzaklıkta bulunan bir noktasal hedef için, bir hat boyunca her bir noktadaki menzil profillerinin ardı ardına toplanması incelenmiştir. YNR sisteminde, radar yer yüzeyinde belirli bir hat boyunca hareket ederken, vericinin doğrultusu yeraltına doğrudur ve yeraltından gelen yansımaları toplar. (Şekil 2.9.)



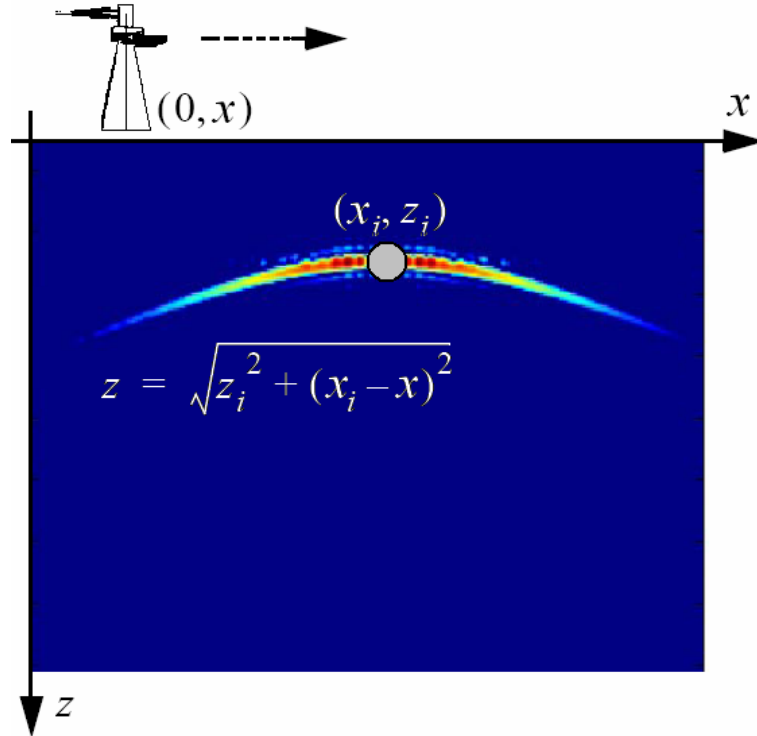
Şekil 2.9. Monostatik B-tarama geometrisi

Bistatik düzenek için radar düzenegi, bir noktasal saçıcıdan gönderilen EM dalganın diğer bir alıcı tarafından alınması prensibine dayanmaktadır. Monostatik düzenekte yüzeyden alınan şiddetli yansıma görüntü verisinde kendini gösterdiğinden diğer hedeflerden alınan yansımalar sönük kalmaktadır. Bistatik düzenekte yüzeyden gelen şiddetli yansımanın etkisi, görüntü verisinde görülmeyeceğinden diğer hedeflerden alınan geri yansıma sinyalleri bastırılmayacaktır bunu sonucunda yüzey altı görüntüsü daha şiddetli ve net olarak kendisini gösterecektir. Bistatik düzenekte verici ve alıcı birlikte hareket edebildiği gibi alıcı sabitken vericinin hareketli olduğu uygulamalarda vardır [14]. Ortak hareket düzeneginde geri saçılan sinyal, radar bir doğru boyunca hareket ettiğinden, her bir yatay aralıkta farklı gidiş – geliş mesafeleri kat eder. Radarın hareket güzergâhındaki her bir yapay aralık boyunca, her bir noktadaki geri saçılan sinyal, belirli bir frekans bant aralığında toplanır. Her bir noktadaki toplanan geri saçılım sinyalinin Ters Fourier Dönüşümü (IFT) alınarak, her bir noktada tek boyutlu (1-B) A-tarama menzil profili çıkarılabilir. Her bir noktadaki menzil profilleri yan yana toplandığında iki-boyutlu (2-B) B-tarama YNR görüntüsü oluşturulur. B-tarama düzeninde noktasal bir hedefin derinlik bilgisi; $z = v \cdot t / 2$ formülüyle bulunabilir. Burada v , dalga hızını; t EM dalganın yolculuk zamanını göstermektedir. Yatayda x_0 ve

düseyde z_0 noktasında bulunan noktasal bir hedef için, taramanın her bir i adımında EM dalganın aldığı mesafe

$$z_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + z_0^2} \quad i=0,1 \dots N \quad (2.65)$$

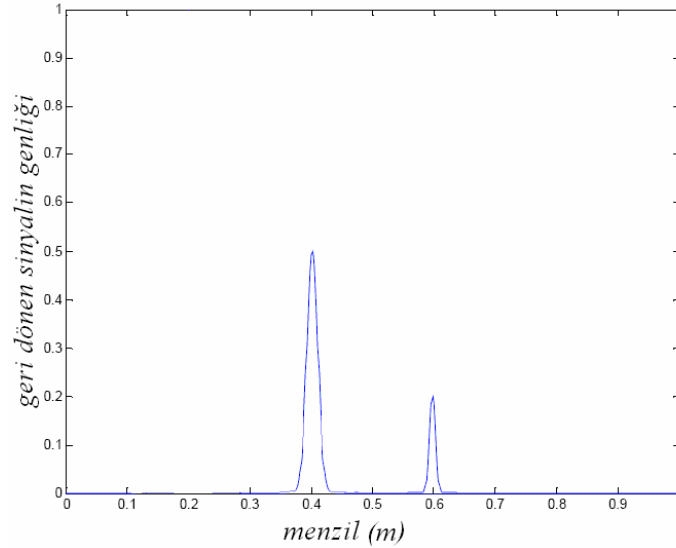
şeklinde olur. Dolayısıyla noktasal bir saçıcı, bu B-tarama YNR görüntüsünde hiperbol olarak görünür (Şekil 2.10.). Bu hiperbolun biçimi, gömülü nesnenin derinliğine, radar antenin demet genişliğine ve ortamın dielektrik sabitine bağlıdır. Nesnenin gerçek konumu, aslında bu hiperbolun tepe noktasıdır. Çok farklı görüntü işleme ve sinyal işleme teknikleriyle hedefler tespit edilmeye çalışılmaktadır. SAR ve HT bu uygulamalar arasındadır. Dolayısıyla noktasal hedefi doğru yerinde odaklayabilmek için bu algoritmalar incelenmiştir.



Şekil 2.10. Hedeflerden oluşan hiperbollerin grafiksel temsili

2.6.4. A-Tarama

YNR imajlarıyla ilgilenirken, bir kaç tip tarama tanımlanmaktadır. Bunlardan ilki A taramadır. A tarama; Kısaca Radarın tek bir darbesi veya frekans tarama neticesinde elde edilen menzil profili olarak adlandırılabilir. Bu tarama tipi şu şekilde ifade edilebilir. Tek bir noktada verici antenden yollanan darbe sinyalinin, aynı anten tarafından veya başka bir anten tarafından alınması ve bu sinyalin genliğinin yorumlanmasıdır. Yollanan bu sinyalin, hareket ortamının özelliği bilindiği sürece, uzamsal ekseninde alınan bu sinyal doğru bir şekilde ifade edilebilir. Yatayda 20 cm ve 40 cm e yerleştirilmiş iki hedef için elde edilen A tarama menzil profillerinin grafiksel gösterim Şekil 2.11. de gösterilmektedir.

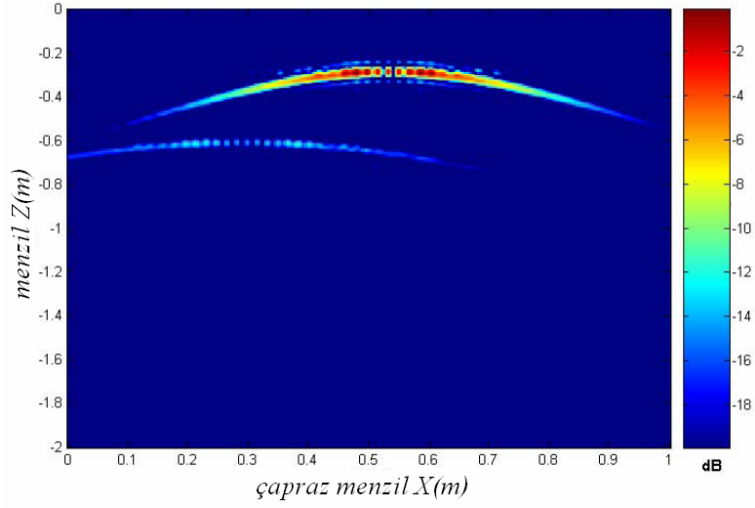


Şekil 2.11. İki adet hedef için A-tarama sonrası menzil profili

2.6.5. B-tarama

B-tarama kısaca A-taramaların ardı ardına eklenmesi şeklinde ifade edilebilir. B-tarama da, bir hat boyunca, her bir yapay aralıkta A-tarama verileri toplanarak, iki boyutlu(2-B) bir matris elde edilir. Bu iki boyutlu matris imaj ekseninde 2-B bir görüntü

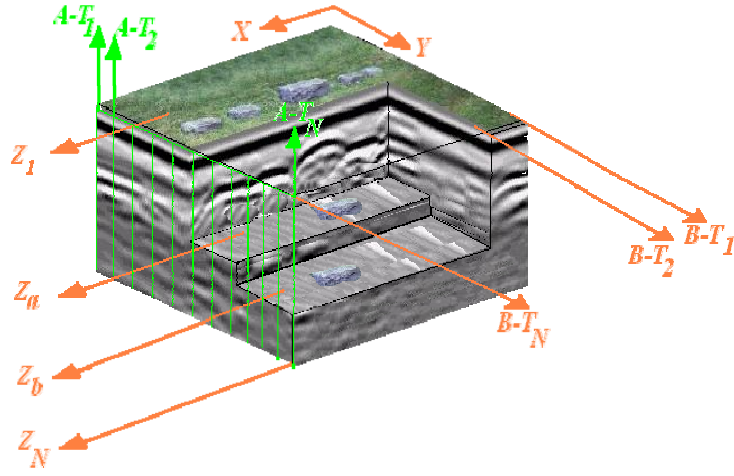
olarak karşımıza çıkar. 2-B bir uzayda yerleştirilmiş iki adet noktasal hedef için, B-tarama sonrası elde edile görüntü Şekil 2.12 deki gibi çıkacaktır. Burada *menzil* olarak tanımlanan ifade antenden olan uzaklığı gösterirken, *çapraz-menzil* olarak tanımlanan da, antenin hareket menzildir. B-tarama da, her bir nokta için alınan A-tarama verisinde, hedef menzil mesafesi değiştiğinden 2-B görüntü hiperbolik olarak çıkmaktadır.



Şekil 2.12. Belirli bir hat boyunca B-tarama sonrası elde edilen menzil profili

2.6.6. C-Tarama

C-tarama da B-tarama verilerinin ardı ardına toplanması olarak ifade edilebilir. Radar bir x hattı boyunca her bir noktada A-tarama verilerini toplaması sonrası elde edilen bu 2-B veriye B-tarama denildiğini söylemişti. C-taramada da bir y hattı boyunca, her bir y noktasında, x hattı boyunca B-tarama verilerinin yan yana toplanması neticesinde elde edilen üç boyutlu (3-B) menzil profilidir. Şekil 2.13' de 3-B bir düzlemde ki her bir A, B, ve C tarama yolları gösterilmektedir.



Şekil 2.13. C-Tarama grafiksel gösterim.

Yukarıda da bahsedildiği gibi C-tarama sonrası elde edilen veri 3 boyutlu bir veridir. Üç boyutlu bir verinin görüntülenmesi kolay olmadığından, C-tarama verisi genellikle, Z derinlik eksenini üzerindeki, ayrı ayrı konumlardaki, yatay X-Y dilimlerinin ardışık olarak gösterimi ile görüntülenebilir. Her bir dilim, B-taramanın dikey eksenine (Y) eşdeğer olan belirli bir derinlik seviyesine karşılık gelir.

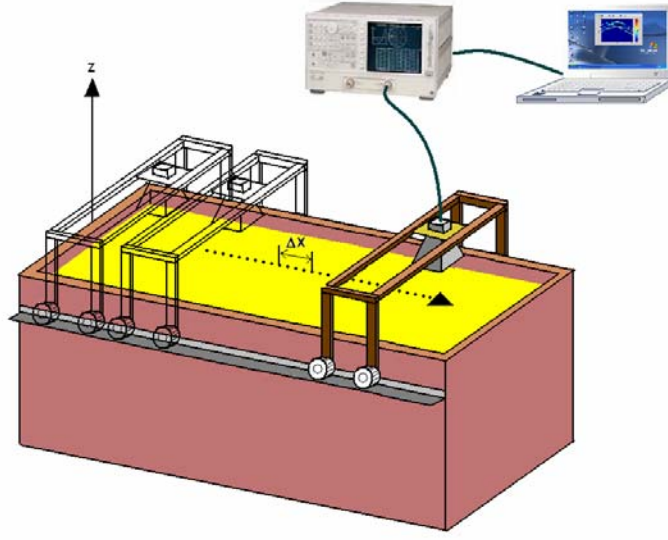
3. MATERYAL VE METOT

3.1. KULLANILAN MATERYAL

YNR uygulamalarında kullanılan algoritmanın etkinliği benzetim verilerine uygulandıktan sonra deneysel düzende sınandı, bunun için gerekli olan ve aşağıda isimleri geçen bütün cihazlar TÜBİTAK tarafından verilen destekle satın alındı. Bu çalışma TÜBİTAK tarafından, EEEAG-104E085 proje koduyla desteklenmiştir. Ayrıca deneysel ortamın hazırlanmasında, laboratuvar imkânları, Mersin Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü tarafından sağlanmış olup deneylerde kullanılan kum malzemesi, Mersin Trakya Cam Sanayi A.Ş. tarafından hibe edilmiştir.

3.1.1. Deneysel Düzeneç

YNR deneylerinin en temel cihazı olan Network Analizör (Agilent 5071B) aksesuarlarıyla birlikte (RF kablo, N-tipi Kalibrasyon kiti, N-tipi RF aksesuarları, GPIB ara yüzü, GPIB kablosu ve test/ölçüm yazılımı) satın alınmıştır. Ayrıca satın alınan anten sisteminde 2 adet boynuz tipi anten (AHS Systems SAS-584), 1 adet C-bant sirkülatör, 3m uzunluğunda 3 adet N-tipi kablo ve 2 adet tripod bulunmaktadır. Böylece Şekil 3.1. 'de görülen tipik deney düzeneği tamamlanmıştır. Deney düzeneği, içi kum ile doldurulmuş, 190cmx100cmx75cm boyutunda tahta-medefe'den imal edilmiş kum havuzu, N-tipi kablo ile Network Analizöre (NA) bağlanmış C-bant Boynuz tipi anten ve NA'ye GPIB portuyla bağlanmış bir dizüstü bilgisayar'dan oluşmaktadır. Şekil 3.1. 'de, NA, dizüstü bilgisayar ve boynuz antenden oluşan deney düzeneğini geometrisi ve resmi görülmektedir. Şekil 3.2.'de deneyler sırasında kullanılan Network Analizör NA, GPIB portu ile NA'ye bağlanmış dizüstü bilgisayar ve C-bant boynuz antenin resimleri verilmiştir.

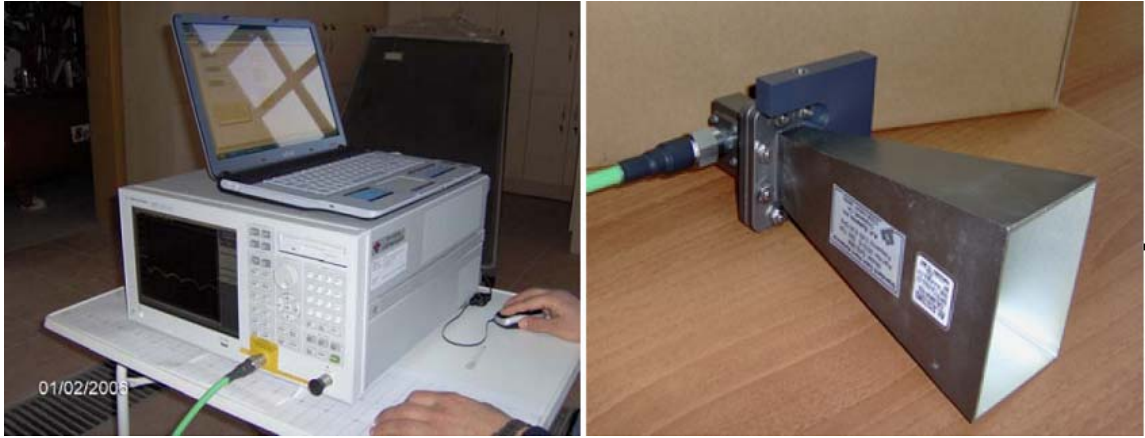


(a)



(b)

Şekil 3.1. (a) Oluşturulan YNR düzeneği geometrisi. (b) Gerçek deney fotoğrafı.

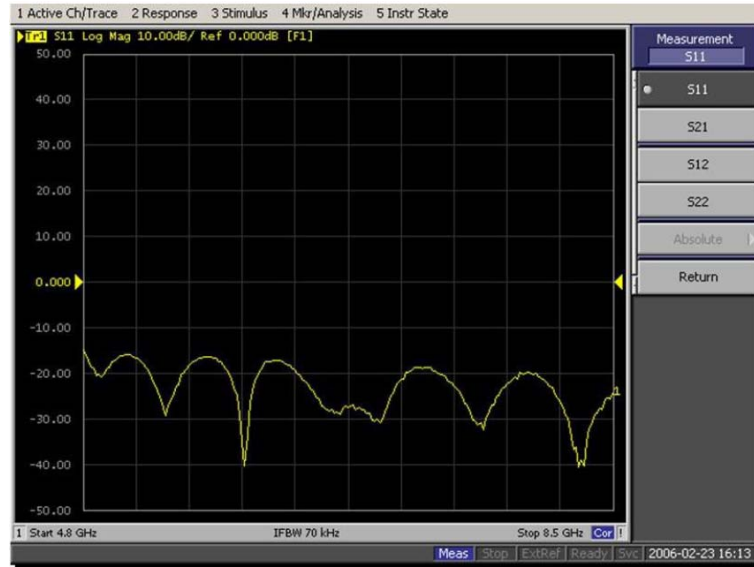


(a)

(b)

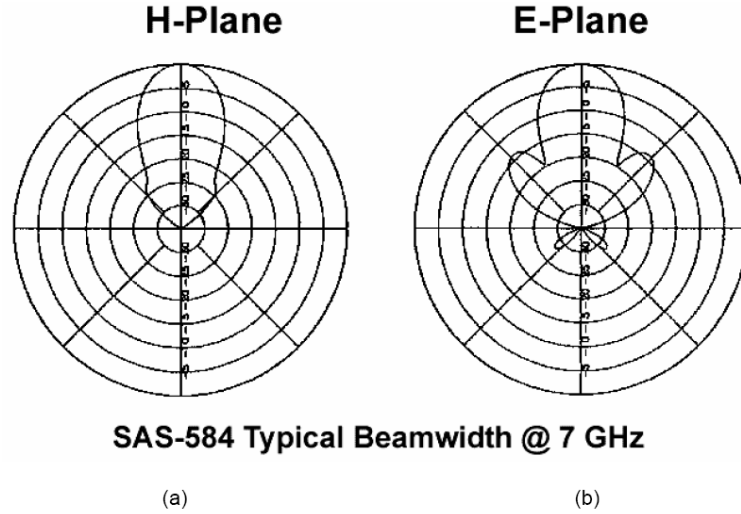
Şekil 3.2. (a) GPIB portuyla birbirine bağlı Network Analizör ve Dizüstü Bilgisayar (b) Deneilerde kullanılan C-bant Boynuz Anten (AHS Systems SAS-584)

Satın alınan boynuz antenin anten parametrelili ölçümleri, NA sayesinde gerçekleştirilmiştir. Antenin çalışma bandı 5.85–8.20 GHz olarak verilmesine rağmen; Şekil. 3.3.'de görüldüğü üzere, antenin 4.80–8.50 GHz arasında oldukça verimli olarak çalıştığı ölçülmüştür. Şekil 3.3.'de, anten geri-yansıma katsayısının (S_{11}) 4.80–8.50 GHz frekansları arasında ölçülen grafiği dB olarak verilmektedir.



Şekil 3.3. C-Bant Boynuz Antenin NA ile ölçülen S_{11} verisinin frekansa göre çizimi

Satın alınan C-Bant Boynuz Antenin, radyasyon paternleri üretici firma tarafından sağlanmıştır. Şekil 3.4.'de söz konusu antenin 7 GHz'de yatay ve düşey eksenlerdeki ölçülmüş radyasyon paternleri verilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere; antenin her iki eksendeki yarı-güç-demet genişliği (HPBW) oldukça dardır. Üretici firma tarafından sağlanan 5.85–8.20 GHz frekans bandına göre çizilmiş HPBW grafiğinde, yarı-güç-demet genişliklerin 12° ile 16° arasında değiştiği görülmüştür. Antenin nominal kazanç değeri 14.8 dB olarak verilmiştir. Dolayısıyla antenin demet genişliğinin dar ve direktifliğinin bu şekilde yüksek olması, YNR deneyleri sırasında daha derin bölgeleri görüntülememize imkân sağlayacaktır.



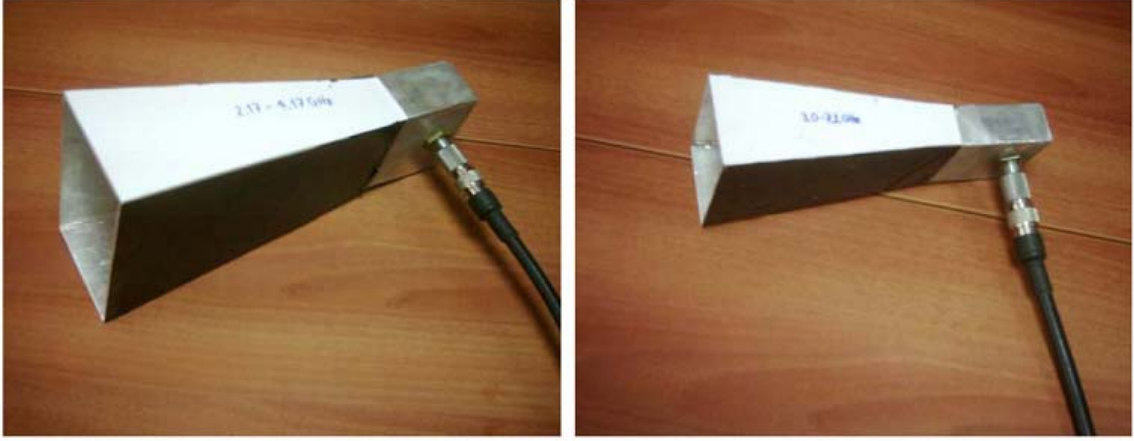
Şekil 3.4. C-Bant Boynuz Antenin (a) yatay, (b) dikey paternlerinin 7 GHz'de çizimleri (Üretici firma tarafından sağlanmıştır.)

3.1.2. Tez kapsamında İmal edilen Antenler

3.1.2.1. Düşük frekanslı antenler

YNR uygulamalarında, farklı bant genişliğinde ve farklı demet açılı antenlere ihtiyaç duyulunca, anten imalatı için gerekli araştırmalar yapılmış ve arzu edilen özelliklerden antenler imal edilmiştir. Bu bağlamda 2.17–4.17 GHz ve 3.0–7.2 GHz

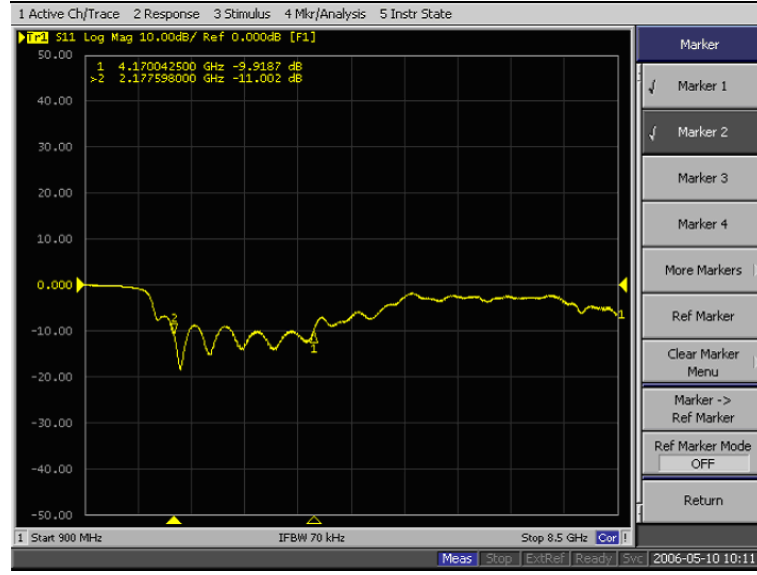
frekans aralıklarında çalışan 2 adet boynuz anten, Mersin Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü 2005–2006 Bahar dönemi bitirme projelerinde öğrenciler tarafından Mersin Sanayi Sitesi'nde imal ettirilmiştir [26]. İmal edilen antenlerin resimleri Şekil 3.5.'de verilmiştir. Bu antenler, toprak deneylerimizde başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Şekil 3.6.' da imal edilen antenlerin geri yansımaya katsayıları (S_{11}) ölçümü frekansa göre verilmiştir. Bu ölçümler *Agilent E5071B* VNA cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6.'dan de açıkça görüldüğü üzere kendi tasarım ve üretimimiz olan bu boynuz antenler listelediğimiz frekans aralıklarında %90 veya daha iyi verimlilikle çalışmaktadır ($S_{11} < -10\text{dB}$).



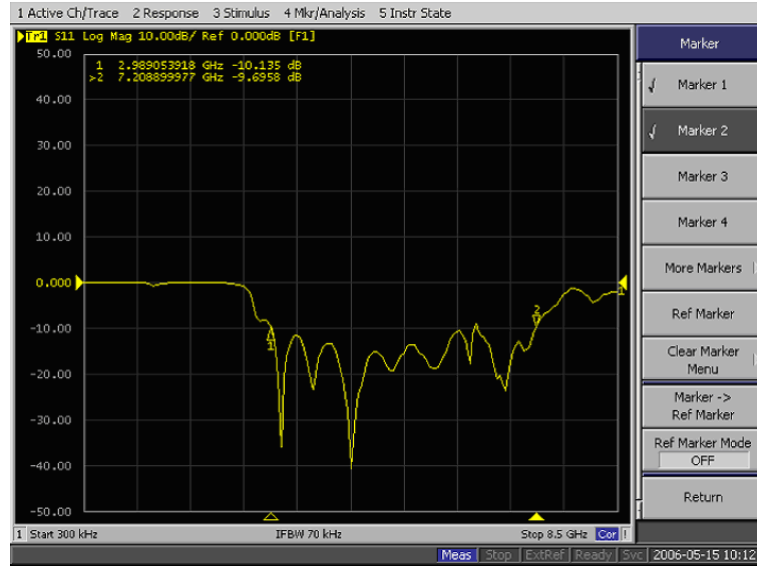
(a)

(b)

Şekil 3.5. E.E.M bölüm öğrencilerince imal edilen Boynuz Antenler. (a) 2.17-4.17 GHz arası çalışan Boynuz anten (b) 3.0 – 7.2 GHz arası çalışan Boynuz anten



(a)



(b)

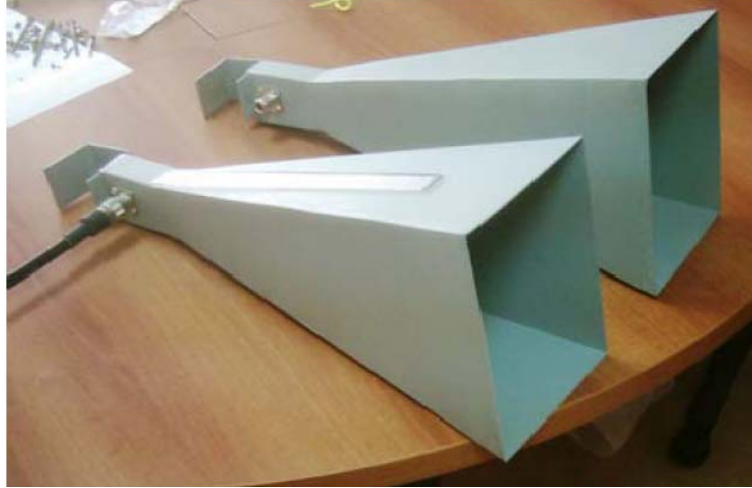
Şekil 3.6. imal edilen antenlerin S_{11} ölçümleri (a) 2.17- 4.17 GHz arası anten
(b) 3.0 – 7.2 GHz arası anten.

3.1.2.2. Yüksek kazançlı dar bant antenler

Gerçek toprak deneylerinde kullanılmak üzere, özellikle 3–5 GHz aralığında çalışan bir çift yüksek kazançlı dar bant boynuz anten imalatı düşünülmüştür. Bu

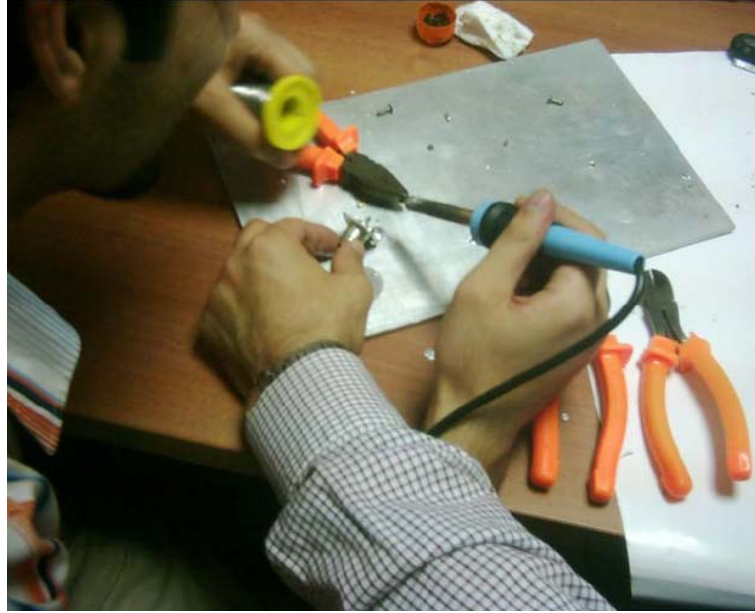
amaçla, söz konusu antenlerin tasarımı tarafımızdan gerçekleştirilmiş, daha sonra Mersin Sanayi Sitesine gidilerek, tasarlanan antenler imal edilmiştir. Daha sonra, antenlerin besleme ünitesi, bölümümüz laboratuvarlarında imal edilerek, antenlerin imalat işlemi tamamlanmıştır.

Şekil 3.7.'de imal edilen standart boynuz antenlerin bir resmi verilmiştir. Antenlerin uzunluğu 45.8cm olup, aralık boyutları 20.2cm x 15cm dir. Bu antenlerin besleme ünitesi, n-tipi bir konektöre, bakır tellerin “T” biçiminde lehimlenmesiyle tamamlanmıştır (Şekil 3.8.). En uygun besleme yapısının tasarımında, deneme-yanılma metodu kullanılmış, “T” biçimindeki uyarma beslemesinin boyutları değiştirilerek, antenlerin geri-yansıma katsayıları VNA ile ölçülerek, optimum besleme ünitesi geliştirilmiştir.

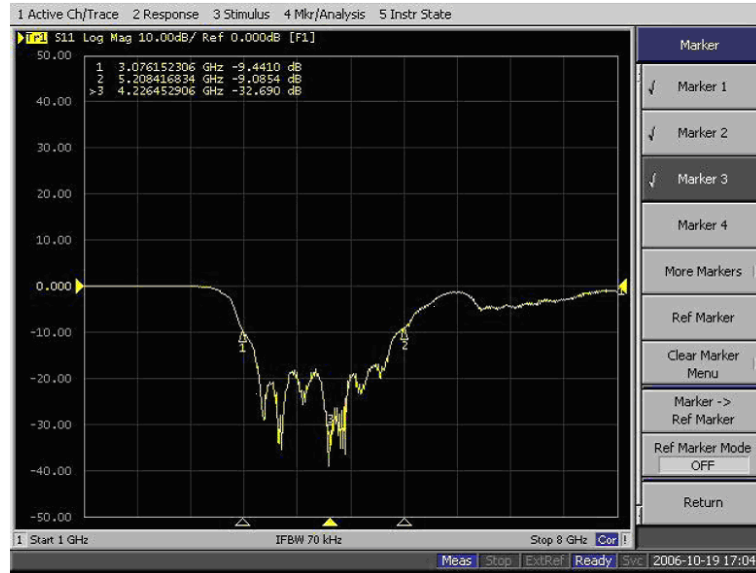


Şekil 3.7. Tarafımızdan imal edilen standart boynuz antenlerin fotoğrafları

Şekil 3.9.'da imalatı tamamlanmış standart boynuz antenlerin 1-8 GHz arası ölçülen geri-yansıma katsayıları (S_{11}) verilmiştir. Grafiklerden de görüleceği üzere, her iki anten de 3.1-5.2 GHz arasında -10dB 'in altında geri yansıma katsayısına sahiptir. Dolayısıyla her 2 anten de istenilen frekanslarda %90'dan daha iyi bir toplam verimlilik parametresiyle çalışmaktadır.

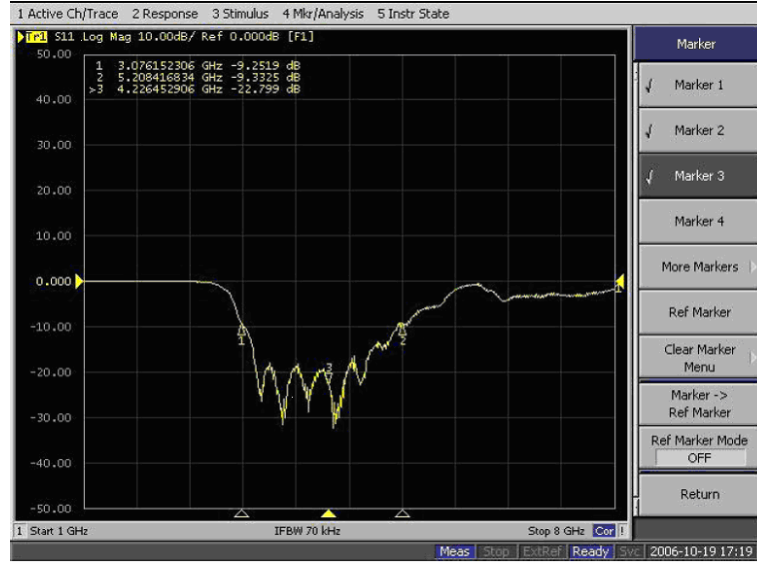


Şekil 3.8. Standart boynuz antenlerin besleme ünitesinin imalatından bir an



(a)

Şekil 3.9. İmal edilen standart boynuz antenlerin ölçülen geri-yansımaya katsayıları
(a) 1. anten



(b)

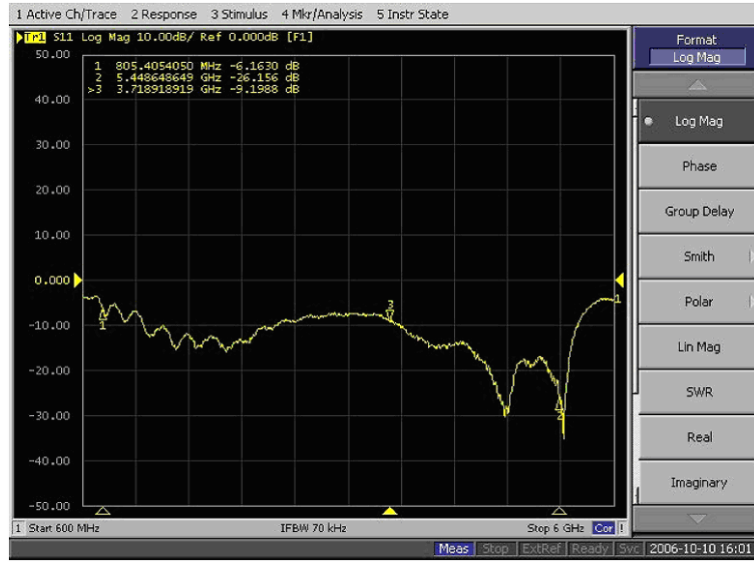
Şekil 3.9.(Devam) İmal edilen standart boynuz antenlerin ölçülen geri-yansıtma katsayıları (b) 2. anten.

3.1.2.3. C-bant (0.8–5 GHz) boynuz anten

YNR uygulamalarında, gerçek toprak deneylerinde, yüksek frekanslı antenlerle yeterli görüntü netliğine ve derinliğe ulaşamamıştır. Bu deneylerin sonunda elde edilen B-tarama YNR görüntülerinde, toprağa nüfuz etme derinliğinin sadece 30–35 cm civarında kaldığını gözlemlenmiştir. Zira söz konusu yüksek frekanslarda, metre başına sinyal zayıflaması oldukça fazla olmaktadır. Ancak düşük frekanslarda nüfuz etme derinliği daha fazla olmaktadır. Örneğin, 1 GHz’de kumlu toprak için metre başına sinyal zayıflaması 10dB’e kadar inmektedir [27]. Bu yüzden, daha derindeki nesnelerin tespitinin gerçekleştirilmesini sağlamak üzere, YNR literatüründe de en sık kullanılan frekans bandı olan 0.8–2 GHz bandında [27, 28 -30] deneylerimizi gerçekleştirebilmek amacıyla; 0.8–5 GHz frekans bandında çalışan 2 adet “Çift Sırtlı” (Double-Ridged) boynuz anten (EMC HA–085) satın alımı gerçekleştirilmiştir. Söz konusu antenlerden bir tanesinin resmi Şekil 3.10.’da verilmektedir. Şekil 3.11.’de ise, söz konusu antenlerden VNA ile ölçülen geri-yansıtma katsayısının (S) frekansa göre grafikleri verilmiştir.

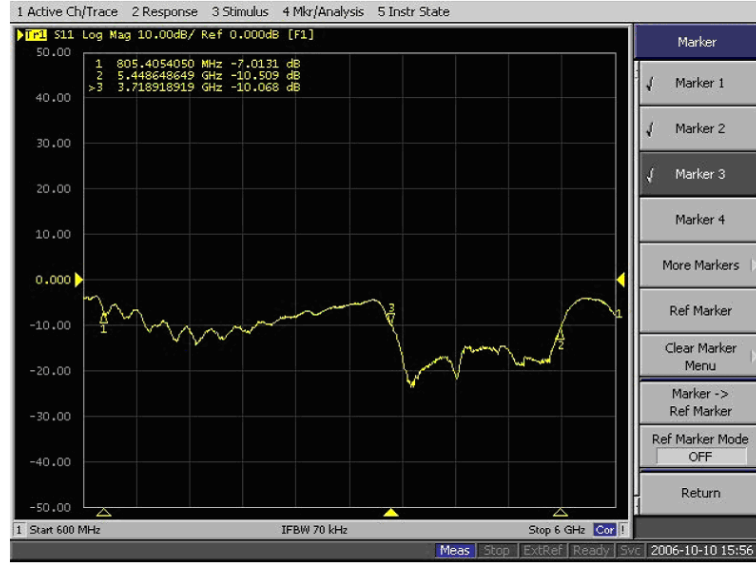


Şekil 3.10. Satın alınan çift sırtlı boynuz antenlerden birinin fotoğrafı



(a)

Şekil 3.11. Çift sırtlı boynuz antenlerin geri-yansımaya katsayısı ölçümleri
(a)1. anten



(b)

Şekil 3.11.(Devam) Çift sırtlı boynuz antenlerin geri-yansıtma katsayısı ölçümleri
(b) 2. anten

3.1.3. Kullanılan Yazılımlar

3.1.3.1. Fiziksel Optik (PO) bazlı yüksek frekans saçılma kodu

Önerilen algoritmalar öncelikle benzetim verilerine uygulanarak doğruluğu test edilmiştir. Bu amaçla gerçeğe yakın olarak benzetimini yapmak için, bir Fiziksel Optik (PO) bazlı Yüksek Frekans Saçılma Kodu kullanıldı. Bu kod, C-bant ve daha yüksek frekans bantlarında; homejen ve kayıpsız ortamlarda karışık metal nesnelere saçılmayı tahmin edebilen çok etkili bir koddur. Metal nesnelere CAD dosyaları olarak, programa girilmekte; program “Shooting and Bouncing Ray (SBR)” tekniğini [31] kullanarak; saçılma verisini değişik frekans, açı ya da uzaysal lokasyon da tespit edebilmektedir.

3.1.3.2. Matlab

Tez çalışmasında, tüm hesaplamalar, algoritmalar, veri analizleri ve grafikler için MATLAB [32] yazılım paketi kullanılmıştır. Spesifik olarak istatistik ve dalgacık araç kutularının m-dosyaları, çalışmalarda yararlı olmuştur.

MATLAB teknik hesaplamalar ve programlamayı, problemlerin ve çözümlerin benzer matematiksel gösterimleri ile ifade edildiği kolay kullanılabilir bir ortama tümleştirir.

Çeşitli kullanım alanları şunlardır:

- Matematik ve hesaplama
- Algoritma geliştirimi
- Veri edinme
- Modelleme, benzetim ve prototiplendirme
- Veri analizi, açın-sama, ve görüntüleme
- Bilimsel ve mühendislik tabanlı grafikler

Matlab, temel veri elemanı, boyutlandırmaya gerek duymayan dizi olan, bir entraktif sistemdir. Bu, birçok teknik hesaplama problemlerini, özellikle matris ve vektör formüllü olanları çok az bir zamanda çözmeyi sağlar.

MATLAB, geçmiş zaman zarfı boyunca birçok kullanıcıların katkısıyla çok gelişmiştir. Üniversite ortamlarında, matematik, mühendislik ve bilimdeki temel ve ileri dersleri için standart bir eğitimsel araçtır.

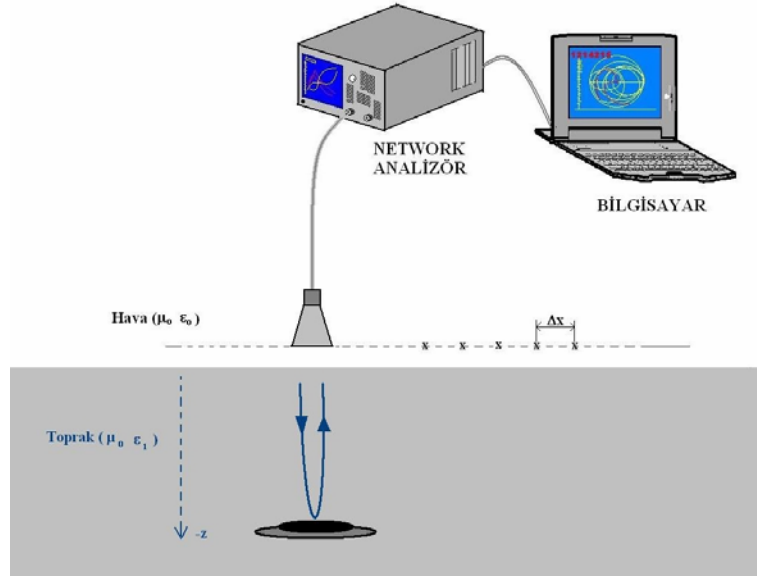
MATLAB, araç kutuları olarak adlandırılan eklenebilir uygulama-spesifik çözümler ailesi özelliğine sahiptir. MATLAB kullanıcıların birçoğu için çok önemli olan araç kutuları, spesifik teknolojiyi öğrenme ve uygulamaya olanak tanır. Araç kutuları, MATLAB ortamını, hususi problem sınıflarını çözmek için genişleten MATLAB fonksiyonlarının (M-dosyaları) kapsamlı koleksiyonlarıdır. Sinyal işleme, kontrol sistemleri, sinir ağları, bulanık mantık, dalgacıklar, görüntü işleme, benzetim ve birçok başka alanlarda araç kutularına sahiptir.

3.2. KULLANILAN METOT

3.2.1. YNR Görüntüleme Algoritması

YNR de kullanılan birçok görüntüleme algoritmaları olmasıyla beraber, bu tezde kullanılan teknik [14, 33] de verilen YNR görüntüleme algoritmasıyla paraleldir; Witten [34] ve Hansen'in [35] Fourier- bazlı algoritmalarından farklı olarak basitçe şu şekilde özetlenebilir: Algoritma; 3-B olarak mekan-mekan-frekans uzayında toplanan saçılma verisini, 3-B Fourier dönüşümü sayesinde; yine 3-B uzaklık-açı uzayına taşımaktadır. Bundan sonra ise; bu uzaydaki 3-B veri; uygulanan koordinat dönüşümleri ile gerçek dünya koordinatlarına taşınmaktadır.

Aşağıda sunulan algoritma hem monostatik hem de bistatik konfigürasyonlu YNR düzenekleri için uygulanabilir. Ancak, burada sadece geometrisi Şekil 3.12.'de verilen monostatik durum ele alınmıştır. Şekilden de görüleceği üzere, Radar anteni yüzey eksenini boyunca hareket ettirilmekte ve her Δx mesafesinde geri saçılma; S_{II} verisi toplamaktadır. Böylece toplam N tane “Yapay” dizi antenin toplayacağı kadar geri-saçılma bilgisi sadece bir anten kullanılarak elde edilmektedir. Her mekansal veri toplanması sırasında; orta frekans; f_c civarında M adet değişik frekans çeşitliliğinde verinin kaydedilmesiyle 2-B mekan-frekans saçılma elektrik alanı; $E_s(x,f)$ elde edilmektedir.

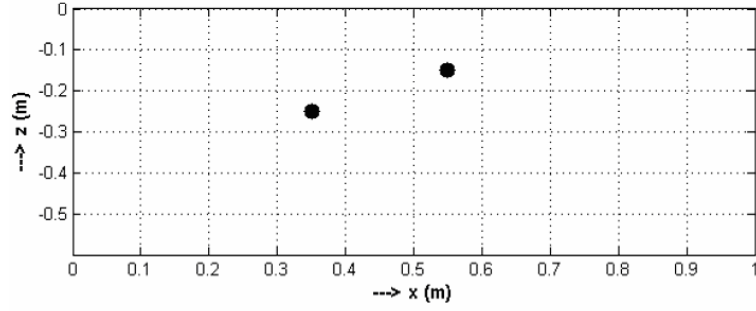


Şekil 3.12. YNR geometrisi (Monostatik durum)

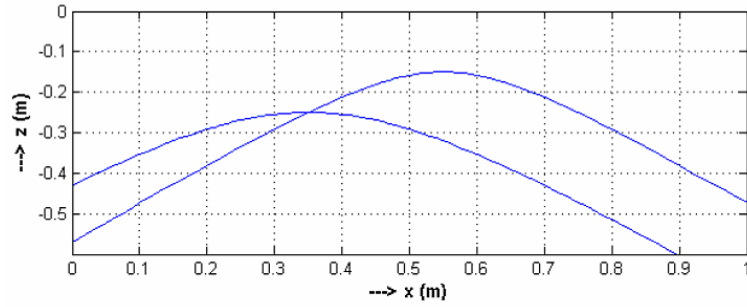
Elde edilen saçılan alanın bir boyutlu (1-B) Ters Fourier Dönüşümü, frekans boyutunda uygulandığında, veriyi mekan-mekan düzlemine taşımak mümkündür:

$$E_s(x, z) = IFT \{ E_s(x, f) \} \quad (3.1)$$

Burada z -ekseni derinlik bilgisini vermekte olup; derinlik çözünürlüğü; Δz , frekans bantgenişliği ile ters orantılıdır. Ancak, elde edilen bu mekan-mekan verisi hedefin gerçek görüntüsünü göstermekten uzaktır. Çünkü, yapay olarak kayan radar anteninin x -ekseni boyunca hareket etmesinden dolayı, her bir noktasal saçıcı için tipi Şekil 3.13.'de verilen parabolik bir görüntü oluşmaktadır [27]. Şekil 3.13.(a)'da değişik derinlikte ve uzaysal noktalarda bulunan iki adet noktasal örnek olarak gösterilmiştir. Yukarıda (3.1)'de verilen dönüşüm uygulandığında; Şekil 3.13.(b)'de gösterilen parabolik eğriler oluşmaktadır. Bu noktadan sonra, asıl görüntüyü elde etmek için farklı göç ettirme algoritmaları kullanılabilir. Bu algoritmalar ayrıntılarıyla aşağıda verilmiştir.



(a)

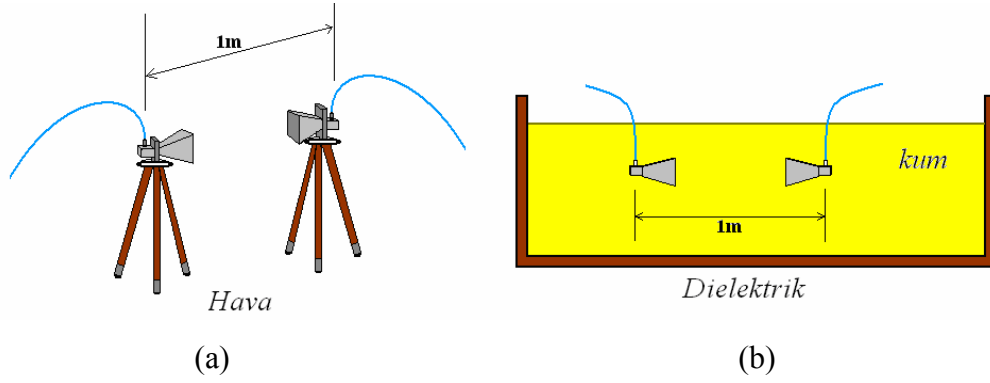


(b)

Şekil 3.13. (a) Yeraltında bulunan 2 adet noktasal hedef
(b) 1-B FT sonrası elde edilen YNR görüntüsü

3.2.2. Yer Ortamının Dielektrik Sabitinin Bulunması Deneyi

YNR görüntüleme algoritmalarının uygulanması esnasında, menzil (range) uzaklığının doğru olarak ölçülebilmesi için, yer ortamının elektriksel geçirgenlik katsayısının bilinmesi gereklidir. Bu amaçla, Şekil 3.14.'de geometrileri görülen deney düzenekleri oluşturuldu. İlk önce, Şekil 3.14.(a)'da görüldüğü gibi iki anten “broadside” pozisyonda birbirlerinden 100cm uzaklıkta yerleştirilerek, 5.8–8.5 GHz arası S_{21} verisi ölçüldü. Aynı ölçüm; Şekil 3.14.(b)'de görüldüğü üzere kum ortamında yine antenler birbirlerinden 100cm uzaklıkta yerleştirilerek tekrar edildi. Söz konusu geometrilerin, gerçek deney düzenekleri Şekil.3.15.'de görülmektedir.



Şekil 3.14. Dielektrik sabitinin ölçülmesi için yapılan deney düzeneklerinin geometrisi
(a) hava deneyi (b) kum deneyi



(a)



(b)

Şekil 3.15. Dielektrik sabitinin ölçülmesi için yapılan deney düzeneklerinin fotoğrafları
(a) hava deneyi (b) kum deneyi

Bilindiği üzere, dielektrik bir ortamdaki ilerleyen elektromanyetik (EM) dalganın hızı; v aşağıdaki gibidir:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.2)$$

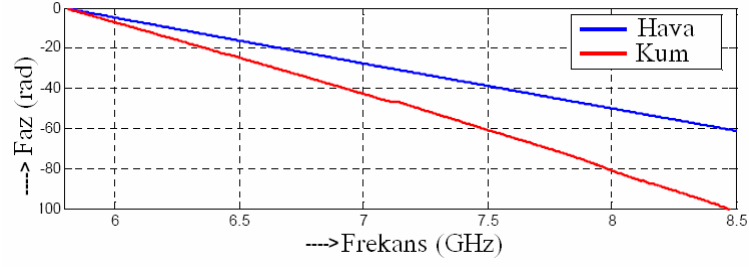
Burada, c ışığın boşluktaki hızını, ϵ_r ortamın dielektrik sabitini vermektedir. Aynı nedenden dolayı; dielektrik sabiti ϵ_r olan bir ortamdaki dalga numarası k_d ; aşağıdaki gibidir:

$$k_d = k_0 \sqrt{\epsilon_r} \quad (3.3)$$

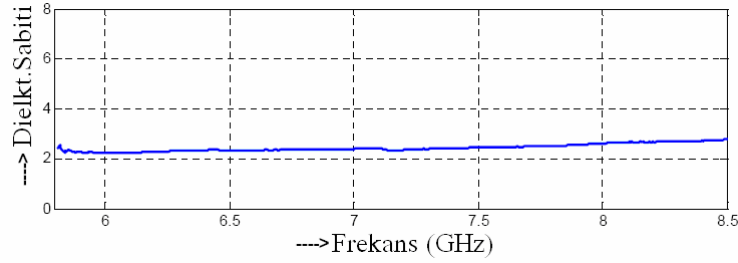
Burada k_0 boşluk ortamındaki dalga numarasıdır. Ayrıca; EM dalgalar buldukları ortamda yayılırken; $e^{-jk_d r}$ fonksiyonuyla ilerlemektedir. Dolayısıyla; dalga ilerlerken her $1m$ için k_d oranında faz kaybeder. Bu bilgiler ışığında; kum ortamında ölçülen S_{21} verisinin fazının, hava ortamında ölçülen S_{21} verisinin fazına oranının karesi alınarak; kum ortamının dielektrik sabitinin istenilen frekanslarda kabaca değeri hesaplanabilir:

$$\epsilon_r(f) = \left(\frac{faz \{S_{21}^{kum}(f)\}}{faz \{S_{21}^{hava}(f)\}} \right)^2 \quad (3.4)$$

Şekil 3.16. (a)'da; hava ve kum ortamındaki ölçülen S_{21} verisinin fazının, frekansa göre değişimi görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, kum ortamındaki faz kaybı, hava ortamından daha fazla olmaktadır. Şekil 3.16. (b)'de; denklem 3.4'ü kullanarak elde edilen dielektrik sabitinin 5.8-8.5 GHz arası grafiği verilmektedir. Söz konusu frekanslarda; kum ortamının dielektrik sabitinin hemen hemen sabit kaldığı gözlemlenmiş ve ortalama olarak **2.43** olarak bulunmuş ve deneylerde kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.16. (a) Hava ve kum ortamında ölçülen S_{21} verisinin fazlarının 5.8-8.5 GHz arası değişimi, (b) Kum ortamının hesaplanan dielektrik sabitinin 5.8-8.5 GHz arası değişimi

3.2.3. Hiperbolik Toplama (HT) Odaklama Metodu [19]

YNR görüntüleri elde edilirken noktasal bir saçıcı için elde edilen görüntülerin hiperbolik etki gösterdiği söylenmişti. Bu hiperbolun biçimi, gömülü nesnenin derinliğine, radar anteninin bant genişliğine ve ortamın dielektrik sabitine bağlıdır. Nesnenin gerçek konumu, aslında bu hiperbolun tepe noktasıdır. Bu yüzden, bu çalışmada amaçlanan; 2-B B-tarama görüntülerindeki hiperbolik şekilleri, odaklanmış görüntülere aşağıdaki yöntem ile dönüştürmektir:

- i) Toprak yüzeyinde düz bir yol boyunca, yüzey altı ortamından saçılan sinyaller toplandıktan sonra, klasik 2-B uzay-derinlik B-tarama görüntüsü oluşturulur. Radar, 1-B X yapay açıklık uzay vektörü boyunca hareket ederken, (x_0, z_0) noktasındaki bir noktasal saçıcı, YNR görüntüsünde, derinlik denklemi aşağıdaki gibi verilen bir hiperbol oluşturur :

$$Z = \sqrt{z_0^2 + (X - x_0)^2} \quad (3.5)$$

B-tarama YNR görüntüsünün, yüzey altındaki farklı noktasal saçıcılara karşılık gelen, belirli sayıdaki hiperbolların toplamı ile elde edildiğini göz önüne alarak, bu noktaları aşağıdaki adımlar ile ayırt etmek mümkündür.

- ii) Orijinal YNR görüntüsündeki her bir (x_i, z_i) piksel noktası için, X yapay açıklık vektörü ile $Z = \sqrt{z_i^2 + (X - x_i)^2}$ formülünü kullanarak hiperbolik eğri belirlenir.
- iii) Bu hiperbolik eğri altında kalan görüntü verileri alınır. Bu noktada; boyutu, X deki toplam örnekleme sayısı N ile aynı olan 1-B E_G saçılma elektrik alan verisi oluşturulur.
- iv) Daha sonra, bu 1-B kompleks verideki toplam enerjinin etkin (rms) değeri şu şekilde hesaplanır:

$$\{rms @ (x_0, z_0)\} = \sqrt{|E_G|^2 \cdot |E_G^*|^2 / N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N |E_G|^2 \quad (3.6)$$

- v) Sonra, hesaplanan rms değeri yeni 2-B YNR görüntüsünde (x_i, z_i) noktasına kaydedilir.

Böylece, orijinal görüntüdeki hiperbolik karakteristik, (x_i, z_i) noktasındaki tek bir noktasal görüntü pikseline aktarılır. Orijinal YNR görüntüsündeki bütün pikseller kapsanacak şekilde işlem tekrarlanır.

3.2.4. Şerit-Harita SAR bazlı YNR Odaklama Algoritması [36]

Monostatik konfigürasyondaki tipik bir YNR sisteminde, radar anteni x eksenindeki her bir yapay açıklık boyunca hareket ettirilirken, toprak altındaki farklı konumlardaki N adet noktasal saçıcıdan oluşan Elektromanyetik (EM) saçılmayı toplamaktadır. Vericiden gönderilen bir $X(t)$ darbesinin; (x_i, z_i) 'de konuşlandırılmış i .inci hedeften yansıyan EM saçılması; ρ_i ise; tüm saçıcılardan toplanan EM sinyali $e(x, t)$ aşağıdaki gibi verilebilir:

$$e(x,t) = \sum_{i=1}^N \rho_i X \left[t - \frac{2\sqrt{z_i^2 + (x_i - x)^2}}{c_m} \right] \quad (3.7)$$

Burada c_m ortamdaki ışık hızı, t ise zaman değişkenidir. Denklem (3.7)'in zaman bölgesi Fourier Transformu alındığında

$$e(x,w) = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} X(w) \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-j2k\sqrt{z_i^2 + (x_i - x)^2}} \quad (3.8)$$

elde edilecektir. Burada $k = w/c_m$ dalganın bulunduğu ortam için dalga sayısıdır. $X(w)$; darbe sinyalinin Fourier dönüşümüdür. Uygulamalarımızda gönderdiğimiz sinyal birim darbe sinyali olduğundan Fourier transformu 1 çıkmaktadır. Bu yüzden Algoritma uygulanırken $X(w)=1$ alınmıştır. Denklem (3.8)'nin uzay bölgesindeki (k_x) Fourier dönüşümü alındığında

$$E(k_x, w) = \left(\frac{1}{2\pi} \right) X(w) \frac{e^{-j(\frac{\pi}{4})}}{\sqrt{4k^2 - k_x^2}} \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-j\sqrt{4k^2 - k_x^2} \cdot z_i - jk_x \cdot x_i} \quad (3.9)$$

denklemini elde edilir. Hedeflerin konum bilgileri, frekans bölgesinde gönderilen sinyalin fazında gizlidir. $E(k_x, w)$ denkleminde $e^{-j(\frac{\pi}{4})} / \sqrt{4k^2 - k_x^2}$ genlik terimi, ifadenin fazını etkilemediğinden ihmal edilebilir [37]. Bu durumda yeni eşitlik

$$E(k_x, w) = \left(\frac{1}{2\pi} \right) X(w) \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-j\sqrt{4k^2 - k_x^2} \cdot z_i - jk_x \cdot x_i} \quad (3.10)$$

şeklinde olacaktır. 3.10 denkleminin uzamsal frekans denklemi denir ve taranan menzil boyunca bütün uzamsal konum bilgisini içermektedir. Fakat hedeflerin açık olarak elde edilebilmesi için ideal bir görüntü sinyali, 3.10 denklemininle bağdaştırılması gerekmektedir.

2-B bir uzayda, yatayda x_i ve düşeyde z_i noktasına yerleştirilen noktasal bir hedef için ideal bir görüntü denklemi

$$g_0(x_0, z_0) = \sum_{i=1}^N \rho_i \delta(x_0 - x_i, z_0 - z_i) \quad (3.11)$$

şeklindedir. Burada $\delta(x_0 - x_i, z_0 - z_i)$, 2-B birim-darbe fonksiyonudur. Böyle bir görüntünün x_0 - ve z_0 - yönlerinde 2-B uzamsal Fourier dönüşümü alındığında

$$G_0(k_{x_0}, k_{z_0}) = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-jk_{x_0}x_i - jk_{z_0}z_i} \quad (3.12)$$

elde edilir. Elde edilen ideal görüntü sinyalinin 3.10 sinyaliyle bağdaştırılması için karşılaştırıldığında ; $k_{x_0} = k_x$ ve $k_{z_0} = \sqrt{4k^2 - k_x^2}$ olduğu görülmektedir.

$$k_{z_0} = \sqrt{4k^2 - k_x^2} = \sqrt{\frac{4w^2}{c_m^2} - k_x^2} \quad (3.13)$$

3.13 deki uzamsal frekans aktarımıyla aşağıda verilen özdeşliğe ulaşılabilir.

$$G_0(k_{x_0}, k_{z_0}) = \frac{E(k_x, w)}{X(w)} \quad (3.14)$$

3.14 elde edilirken kullanılan frekans aktarımında yer alan $k_{x_0} = k_x$ eşitliği doğrusal iken , $k_{z_0} = \sqrt{4k^2 - k_x^2}$ eşitliği doğrusal değildir. $E(k_x, w)$ bölgesindeki veriler $E(k_x, k_z)$ bölgesine aktarılırken w bölgesinde eşit olarak ayrılmış (evenly spaced) noktalar k_z bölgesinde eşit olmayarak ayrılmış (unevenly spaced) noktalar şeklinde olacaktır. $G_0(k_{x_0}, k_{z_0})$ nin ters FFT alınabilmesi için k_z bölgesindeki noktaların eşit olarak ayrılmış olması gereklidir. Bu amaçla bir çeşit interpolasyon kullanılması gerekmektedir. Burada

k_{x_0} ve k_{z_0} gerçek uzamsal frekanslar olduğundan, (3.14)'nin 2-B ters Fourier dönüşümü (IFT) alındığında hedeflerin gerçek konumları odaklanmış olarak aşağıdaki denklem ile elde edilecektir.

$$YNR_{SAR}(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{E(k_x, k_z)}{X(w)} e^{j(k_x x + k_z z)} dk_x dk_z \quad (3.15)$$

Burada (3.15) denklemindeki $E(k_x, k_z)$ ifadesindeki k_z değeri, (3.13) eşitliğinden sonra elde edilen k_{z_0} ifadesidir. Algoritma uygulanırken, t bölgesinde eşit olarak ayrılmış noktalar kümesi, w bölgesinde eşit olarak ayrılmış noktalar kümesine birikirken, aynı zamanda sentetik aralık bölgemiz olan x bölgesindeki eşit olarak ayrılmış noktalar kümesindeki datalar $x=n.\Delta x$ için k_x in eşit olarak ayrılmış kesikli değerlerinin kümesinde birikmektedir. Fakat görüntüleme denklemi (3.15) i değerlendirmek için, datanın k_x ve k_z bölgesinde biriktirilmesi ve $E(k_x, k_z)$ datasının elde edilmesi gerekmektedir.

Bu amaçla datayı (k_x, w) bölgesinden (k_x, k_z) bölgesine aktarmak için, Uzamsal frekans aktarma denklemi (3.13) kullanılmalıdır. Ancak (3.13) denklemi kullanılarak, (k_x, w) bölgesinden (k_x, k_z) bölgesine 2B aktarımının doğasının doğrusal olmamasından dolayı, w bölgesindeki eşit olarak ayrılmış noktalar, k_z bölgesinde eşit olmayarak ayrılmış noktalar kümesi halini alacaktır. 2B FFT kullanan (3.15) in verimli değerlendirilmesinin şartı hem k_z hem de k_x bölgesindeki dataların eşit olarak ayrılmış olmasıdır. Bu sebepten dolayı k_z bölgesinde eşit olarak ayrılmış noktaları elde etmek için, sinc interpolasyon tekniği kullanılmıştır.[37]

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

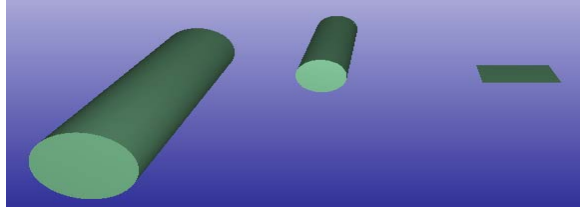
Bölüm 2 ve 3 de verilen görüntüleme ve odaklama teknikleri, öncelikle benzetim verilerine ve sonra da deneysel ortamda gerçekleştirilen deneysel verilere uygulandı. Son olarak ta gerçek toprak verilerine uygulanarak verimliliği ve uygulanabilirliği gözlemlendi.

4.1. BENZETİM SONUÇLARI

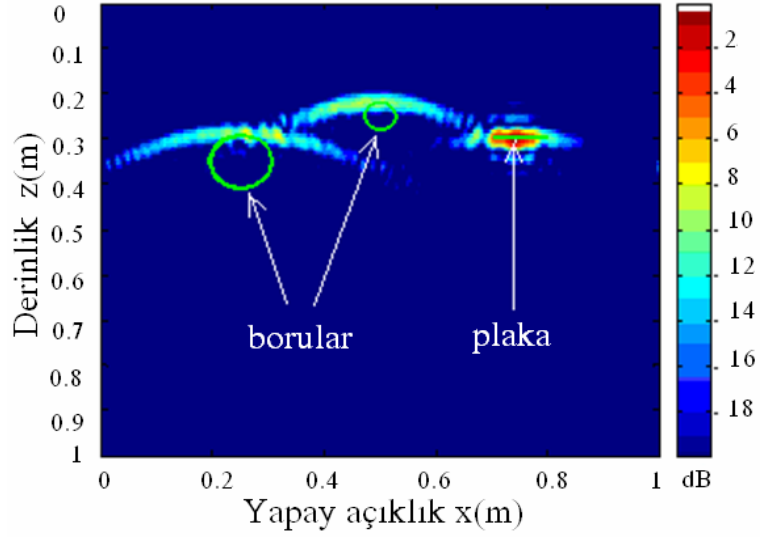
Ayrıntıları verilen YNR görüntüleme algoritmalarını gerçeğe yakın olarak benzetimini yapmak amacıyla, bir Fiziksel Optik (PO) bazlı Yüksek Frekans Saçılma Kodu kullanıldı. Söz konusu kod yardımıyla; geliştirilen algoritmalar test edildi. Bu amaçla dielektrik sabiti 4.0 olan dielektrik bir ortamda yer yüzeyinin altına 2 adet mükemmel elektrik iletken (Perfect Electric Conductor - PEC) boru ve bir adet levha konularak oluşturulan “.facet” formatındaki CAD dosyası benzetim koduna giriş olarak verildi. Şekil 4.1.(a) da görüldüğü şekilde 3 hedef farklı noktalara yerleştirilmiştir. Burada “1” nolu hedefin merkezi ($x=25\text{cm}$, $z=35\text{cm}$) olup 12 cm çapında ve 40 cm boyundadır. “2” nolu hedefin merkezi ($x=50\text{cm}$, $z=25\text{cm}$) noktası olup; 6 cm çapında ve 40 cm boyundadır. 3’ üncü hedef olan levhanın merkezi ($x=75\text{cm}$, $z=30\text{cm}$) olup, levhanın boyutları $x=10\text{cm}$, $y=30\text{cm}$ dir.

Söz konusu CAD dosyası PO-SBR bazlı kod yardımıyla simüle edildirmiştir. Kullanılan bu kod, sadece PEC cisimlerden saçılmayı tahmin edebildiğinden, benzetim sırasında hava-toprak sınırının etkisi ihmal edilmiştir. Benzetimde; x-ekseni boyunca; 0m ile 1m arasında eşit aralıklarda toplam 64 noktada geri-saçılma elektrik alan verisi toplandı. Her bir nokta için frekans da 6.82 GHz ile 9.14 GHz arasında değiştirilerek; eşit aralıklarda toplam 64 ayrı frekans noktası için veri çeşitlendirildi. Dolayısıyla toplam 64x64’lük iki boyutlu kompleks elektrik alan geri saçılma verisi; $E_s(x, f)$ bu şekilde elde edildi. Bu verinin frekans bölgesi fourier dönüşümü sonrası, $E_s(x, t)$ verisi elde edilir ki Şekil 4.1.(b) de gösterilmiştir. Umulduğu gibi, görüntüde hedef merkezli

hiperbollar oluşmuştur. Yaklaşık bir referans bilgisi içersin diye, objelerin etrafı yeşil olarak çizilmiştir. Önerilen hiperbolik odaklama algoritması sonrası, yeni odaklanmış YNR görüntüsü Şekil 4.1.(c) de görülmektedir. SAR algoritması sonrası odaklanmış YNR görüntüsü de Şekil 4.1.(d) de görülmektedir. İki algoritma sonrası odaklanan YNR görüntüleri kıyaslandığında, SAR algoritması sonrası elde edilen görüntünün diğerine nazaran oldukça iyi bir odaklama sağladığı görülmektedir. Hedefler gerçek noktalarında ve gerçek boyutlarında elde edilmiştir.

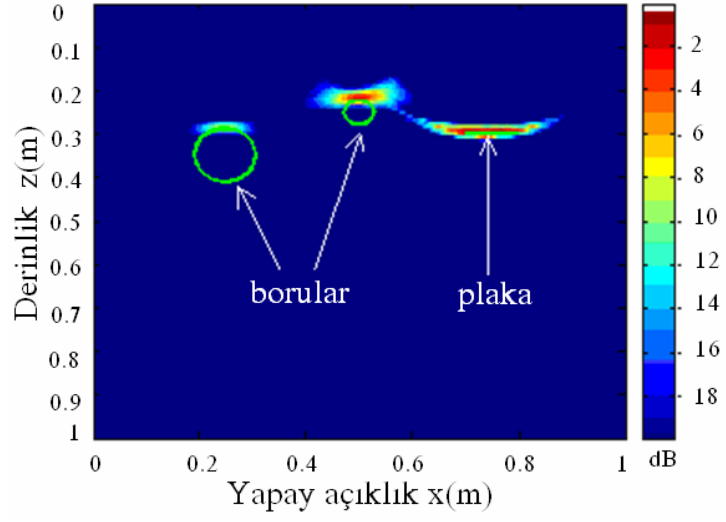


(a)

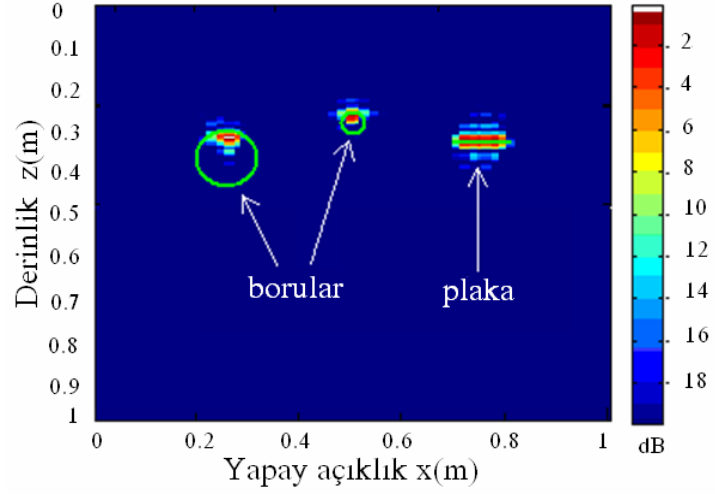


(b)

Şekil 4.1. (a) Gömülü hedeflerin simülasyonu (b) B-tarama $E_s(x,t)$ verisi



(c)



(d)

Şekil 4.1.(Devam) (c) HT sonrası odaklanmış görüntü (d) SAR algoritması sonrası odaklanmış görüntüsü.

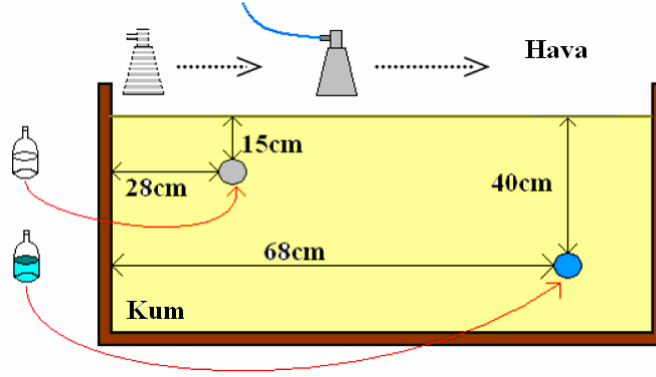
4.2. DENEYSEL BULGULAR

4.2.1. Monostatik B-tarama deneyleri ve elde edilen YNR görüntüleri

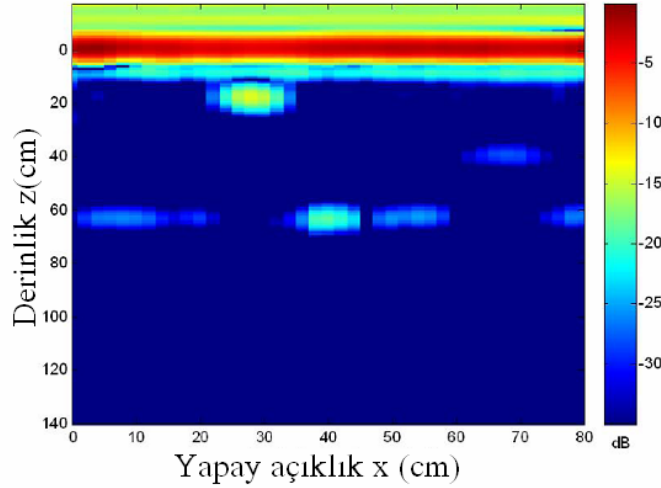
Yukarıda verilen görüntüleme ve odaklama algoritmalarının benzetim verilerine başarılı bir şekilde uygulanmasından sonra Bölüm 3.1. kısmında anlatılan deneysel düzenekte YNR görüntüleme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde asıl amaç, uyguladığımız YNR görüntüleme algoritmasının deneysel ortamda nasıl çalıştığını gözlemlemek ve farklı elektriksel özelliğe sahip maddelerden elde edilen geri saçılma sinyallerinin karakteristiklerini incelemektir.

Bilindiği üzere, EM dalgalar metal hedeflerden en güçlü saçılmaya maruz kalmaktadır. Ancak, EM dalgalar dielektrik hedeflerle karşılaştığında; gelen enerjinin bir kısmı saçılmakta, bir kısmı da nesnenin içine girişim yapmaktadır. Dolayısıyla dielektrik hedefler, metallere göre daha az saçılma sağlamakta ve dolayısıyla tespitleri daha zor olmaktadır. Dielektrik hedefle, EM dalganın yayıldığı ortamın dielektrik sabitleri arasındaki fark arttıkça, saçılmanın şiddeti de artmaktadır. Ancak, eğer hedefin dielektrik sabiti, ortamın dielektrik sabitine yakınsa, hedeften saçılan enerji çok düşük seviyede kalmakta ve bu hedeflerin tespiti de çok daha zor olmaktadır. Bu amaçla, Şekil 4.2.'de gösterildiği üzere, iki adet farklı dielektrik hedef kum altına gömüldü. İlk hedef olarak 6cm çapında, içi boş plastik pet şişe kum yüzeyinin 15cm altına yerleştirildi, ikinci hedef olarak aynı tip pet şişe içi tamamen su ile doldurulmuş halde kum yüzeyinin 40cm altına gömüldü. Network Analizör yardımıyla Monostatik konfigürasyonda, 80cm yapay açıklık boyunca 2cm'lik aralıklarla toplam 41 uzaysal noktada ve her bir uzaysal nokta için 4.8-8.5 GHz arası toplam 201 frekans noktası için geri saçılma verisi toplanarak, 2-B B-tarama verisi toplandı. Daha sonra, YNR görüntüleme algoritması uygulanarak Şekil 4.3.'deki B-tarama YNR görüntüsü elde edildi. Bu görüntüden de anlaşılacağı üzere her iki hedefte başarılı olarak görüntülenebilmektedir. Suyun dielektrik sabitinin 81, havanın dielektrik sabitinin 1.0 ve kum ortamının dielektrik sabitinin 2.43 olduğu düşünüldüğünde; su hedefin daha güçlü bir şekilde

görüntülenmesini bekleyebilirdik. Ancak, su hedefinin hava boşluğu hedefine göre çok daha derinde bulunması; bu hedeften yansıyan ve radar antenine tekrar ulaşan EM enerjinin daha düşük seviyede kalmasına yol açmıştır. Ayrıca Monostatik taramadan kaynaklanan şiddetli yüzey yansıması da dikkat çekmektedir. Bu şiddetli yüzey yansımasının görüntü verisinde yer almasından dolayı diğer hedeflerden elde edilen geri saçılım sinyalinin geri yansıma şiddetleri düşük çıkmaktadır. Bu problemin giderilmesi için gerekli olan Bistatik tarama deneyleri bir sonraki deneylerde aktarılmıştır. Bu deneydeki en önemli bulgulardan biride; hava boşluğu gibi dielektrik sabiti kum ortamının dielektrik sabitinden çok farklı olmayan nesnelere başarılı olarak görüntülenebilmesidir.

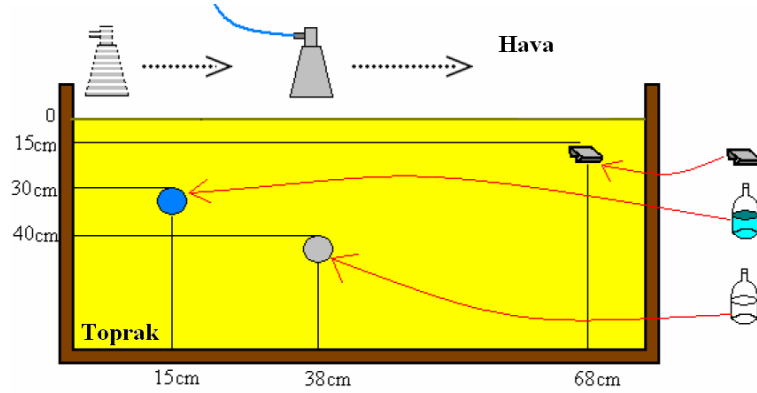


Şekil 4.2. Boş ve dolu pet şişelerin B-tarama YNR deneysel düzeneği

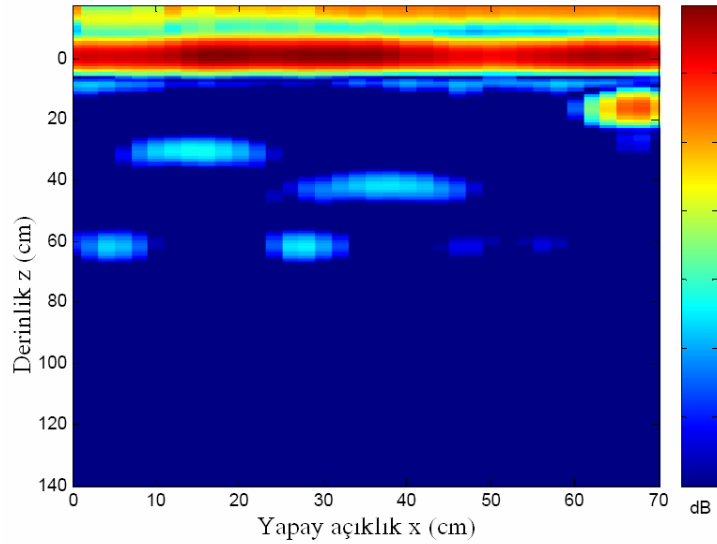


Şekil 4.3. Boş ve dolu pet şişelerin B-tarama görüntüsü

Diğer bir deney olarak dielektrik hedeflerle beraber, 1 adet metal hedefin tespit durumu araştırıldı. Bu amaçla, içi su ile dolu pet şişe ve içi boş bir pet şişeyle beraber 2cmx3cm boyutunda dikdörtgensel galvanizli saç teneke nesne kum havuzunun içine gömüldü. Gömülen nesnelerin yerleri Şekil 4.4.(a)'da gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.4. Boş ve dolu pet şişelerle beraber gömülen küçük metal nesnenin B-tarama YNR deneyi (a) deneysel düzenek (b) B-tarama Görüntüsü

Bu deneyde asıl araştırılmak istenen, dielektrik hedeflerin, bir metal hedefin yanında tespit edilebilme duyarlılığının araştırılmasıydı. Su gibi göreceli elektrik geçirgenliği yüksek olan nesnelere metallerin yanında kolaylıkla algılanabilir. Ancak; tahta, cam, seramik, taş gibi dielektrik sabitleri toprak ortamının dielektrik sabitine yakın

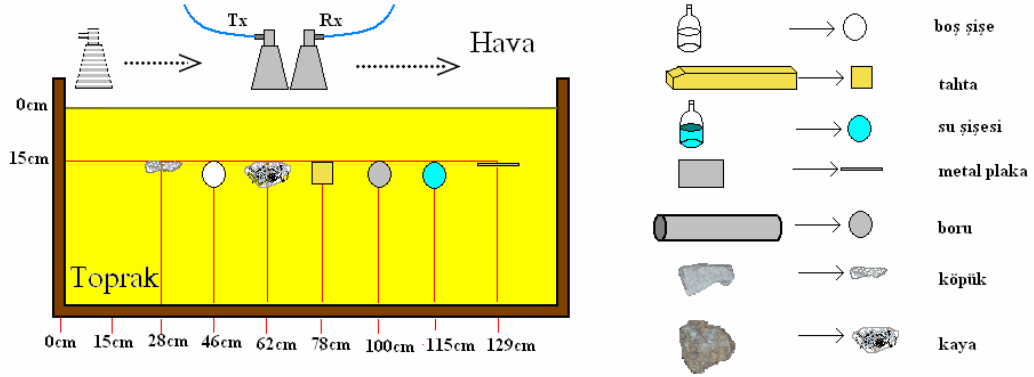
olan nesnelerin metal hedeflerin yanında tespiti zor olacaktır. Yere Nüfus eden radar araştırmalarının, önemli bir bölümü bu tip nesnelerin, özellikle plastik mayınların tespitine yoğunlaşmıştır [38–39]. Bu amaçla, dielektrik sabiti 1.0 olan hava boşluğu hedefi olarak boş pet şişe bu deneyde kullanıldı. Yine Monostatik konfigürasyonda, 70cm yapay açıklık boyunca eşit aralıklarla toplam 36 uzaysal noktada ve her uzaysal nokta için 4.8–8.5 GHz arası toplam 201 frekans noktası için geri saçılma verisi toplanarak, Şekil 4.4.(b)'de verilen 2-B B-tarama YNR görüntüsü elde edildi. Şekilde görüldüğü üzere, metal hedef küçük olmasına rağmen, çok güçlü bir saçılma sağlamaktadır. Ancak, uyguladığımız YNR algoritmasıyla hem su, hem de hava hedef; metal nesneden yaklaşık 15dB daha az bir enerji geri saçmalarına rağmen başarılı bir şekilde algılanabilmektedir.

4.2.2. Bistatik B-tarama deneyleri ve elde edilen YNR görüntüleri

Monostatik konfigürasyonda, alıcının ve vericinin aynı anten olarak kullanılması ve yer yüzeyine dik olarak tutulmasından dolayı EM dalganın yer yüzeyinden ayna yansması etkisiyle, gönderilen enerjinin büyük bir kısmının geri yansımaya yol açmaktadır. Bu durum, bir önceki bölümde sunduğumuz Monostatik YNR görüntülerinde açık bir şekilde bahsedilmektedir. Bu görüntülerin hepsinde en güçlü saçılmanın olduğu hava/kum sınırı, yapay açıklık boyunca uzanan düz bir çizgi olarak kendini YNR görüntüsünde göstermektedir. Bistatik konfigürasyonda ise; alıcı ve vericinin değişik antenler olarak kullanılması; bu olumsuz durumun azalmasına yardımcı olacaktır.

Bu amaçla, değişik elektriksel özellikteki ve değişik geometrideki nesnelerin EM saçılmaları test edildi. Böylece hem Bistatik taramanın etkisi gözlemlenebilecek hem de farklı hedeflerden elde edilen yansımalar incelenebilecektir. Bu amaçla; birbirinden değişik özellikte 7 farklı nesne aynı derinlikte gömülerek ve belirli aralıklarda yan yana dizilerek, her birinin EM yansıma özellikleri test edildi. Sırasıyla; karmaşık şekilli ambalaj köpüğü, silindirik kesitli boş pet şişe, rasgele şekilli bir taş parçası,

dikdörtgen kesikli tahta parçası, silindirik kesitli metal boru, silindirik kesitli su ile dolu pet şişe ve dikdörtgen metal plaka Şekil 4.5.'de gösterildiği üzere kum yüzeyinden 15cm derinlikte yan yana yerleştirilmiştir.



(a)

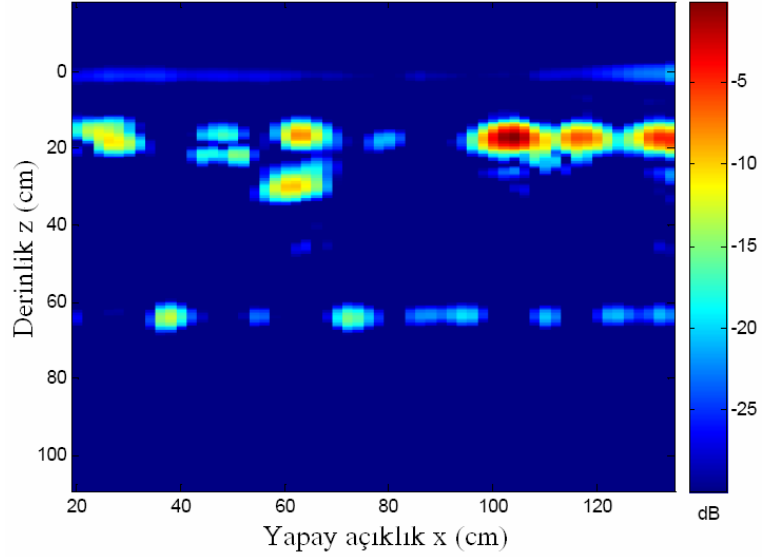


(b)

Şekil 4.5. (a) Aynı derinlikteki 7 farklı hedefin Bistatik B-tarama düzeneği (b) Deney esnasında gömülen deflerin üstleri kumla örtülmeden önceki görüntüleri

Daha sonra, C-bant boynuz antenler kullanılarak; 120cm'lik bir yapay açıklık boyunca toplam 61 uzaysal noktada, NA yardımı ile S_{21} verisi toplandı. Her bir uzaysal veri için frekans yine 4.8 GHz ile 8.5 GHz arasında toplam 201 nokta için değiştirildi. Dolayısıyla, deney sonunda 61x201 boyutunda, 2-B karmaşık B-tarama saçılma matrisi elde edildi. Bundan sonra, rutin 2-B YNR görüntüleme algoritmasını uygulayarak, Şekil

4.6.'da verilen 2-B Bistatik YNR görüntüsü elde edildi. Görüntünün dinamik aralığı 30dB olarak ayarlanmıştır. Şekilden de görüleceği gibi, 7 farklı hedefte başarılı bir şekilde tespit edilerek görüntülenebilmektedir. Bu deneyle radara aynı mesafe uzaklıkta bulunan nesnelerin EM saçılma duyarlılıklarını karşılaştırabilmekteyiz.



Şekil 4.6. Birbirinden farklı 7 hedef için B-tarama Bistatik YNR görüntüsü

Şekil 4.6.'deki görüntüye bakıldığında; metal plaka, metal boru ve yüksek dielektrik sabitli su hedefin en yüksek saçılma enerjisini vermekte olduğunu görmekteyiz. Dolayısıyla bu hedeflerin algılanması, diğerlerine göre daha rahat olmaktadır. Ancak orta ve düşük dielektrik sabitli diğer dielektrik nesnelerin daha az saçılma enerjisi sağladıklarını bu deneyle görmekteyiz. Burada taş hedef; köpük, boş şişe ve tahtaya göre daha iyi bir yansıma vermektedir. Bu sonuca göre taşın dielektrik sabitinin orta bir değerde olduğunu ($\sim 4-6$) tahmin ediyoruz. Boş şişe ve köpüğün dielektrik sabiti yaklaşık 1 civarında olduğundan ve kumun bu değeri ~ 2.43 olduğundan; bu hedeflerden saçılma düşük seviyede kalmaktadır. Ancak en düşük saçılma ise, üst yüzeyi düzlemsel olmasına rağmen tahta hedeften gerçekleşmektedir. Bu gözlem sonucunda da, tahtanın dielektrik sabitinin kumun dielektrik sabitine çok yakın olduğu sonucunu göstermektedir.

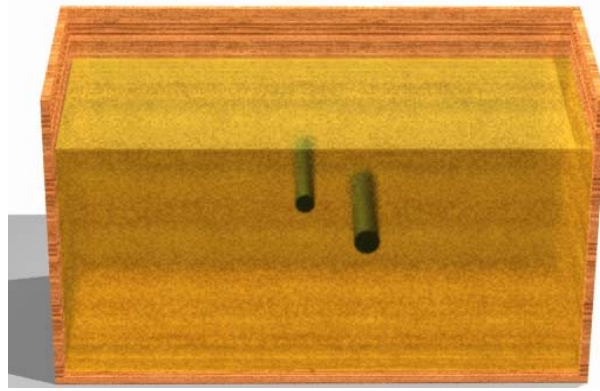
Literatürde de, tahtanın dielektrik sabiti 1.4–2.9 olarak verilmektedir [40]. Bu da bizim bulgularımızı doğrulamaktadır. Yine bu görüntüde de $z=0cm$ civarında hava/kum sınırını ve $z=63cm$ civarında havuz tabanı/yer sınırını da başarılı olarak görüntüleyebilmekteyiz.

Bu deneylerde ilginç bir fiziksel bulgu da gözlemlenmiş bulunuyoruz. İçi boş şişe ve taş hedeflerin görüntüsü incelendiğinde; saçılmanın sadece hedeflerin üst yüzeyindeki kum/hedef sınırında değil; aynı zamanda hedeflerin alt bölümündeki hedef/kum sınırında da gerçekleştiğini gözlemliyoruz. Aslında gerçekleşen fiziksel mekanizma basit olarak şu şekilde özetlenebilir. Kum ortamında ilerleyen EM dalga, dielektrik hedefle karşılaştığında; enerjinin bir kısmı saçılır, bir kısmı ise dielektrik hedefin içine girer. Dielektriğin içine giren dalga, hedefin içinde ilerler ve alt kısmında kum sınırıyla karşılaşınca; buradaki enerjinin bir kısmı geri saçılırken, bir kısmı da kum ortamına girer. Dolayısıyla; her iki sınırdaki da saçılma olgusu gerçekleştiğinden; bu saçılma mekanizmaları büyük ebatlı dielektrik nesnelere YNR görüntülerinde kendilerini göstermektedirler. Çünkü menzilin yönündeki imaj çözünürlüğü büyük ebatlı nesnelere alt ve üst yüzeylerinin farklı piksellerde oluşmasına imkân sağlamaktadır.

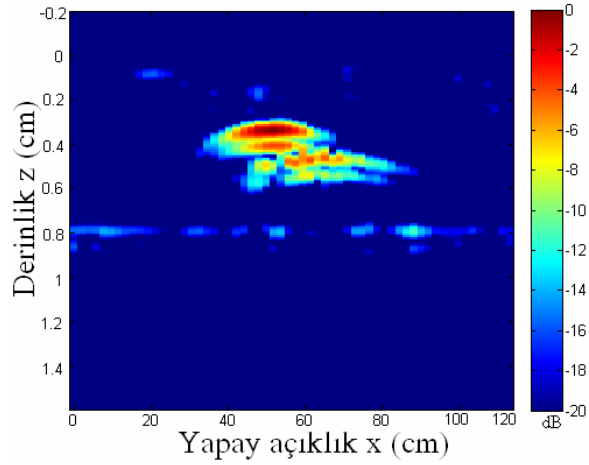
4.2.3. B-Tarama Deneyleri Ve Odaklama Algoritmaları

Yukarıda uygulanan farklı YNR deneylerinden sonra, teorisi verilen algoritmaları test etmek için, X-bant frekanslarında dielektrik sabiti 2.4 civarında olan kuru kum malzeme ile doldurulan havuzda deney gerçekleştirildi. Kum havuzun içine kesit çapı $4.5cm$ ve boyu $43cm$ olan ve yine çapı $6cm$ ve boyu $32cm$ olan metal borular değişik derinliklere yatay olarak gömüldü (Şekil 4.7.(a)). Daha sonra, Bistatik konfigürasyonda X-bant dikdörtgensel piramit boynuz antenler ve *Agilent ENA5071B* Network Analizörü yardımıyla, $120cm$ yapay açıklık boyunca, iletim saçılma verisi S_{21} toplanırken frekans da $4.0-7.1GHz$ arasında toplam 201 kesikli nokta için değiştirildi. Şek. 4.7(b)'de söz konusu nesnelere için B-tarama konfigürasyonu neticesinde oluşan YNR görüntüsü görülmektedir. Uyguladığımız SAR algoritmasının sonucunda elde ettiğimiz yeni görüntü Şek. 4.7(c)'de, HS algoritması sonrası elde edilen görüntü de

Şek.4.7(d) de verilmektedir. Uygulanan algoritmaların neticesinde ise 30cm derinlikteki metal boru ile 40cm derinlikteki metal boru'dan oluşan EM saçılması doğru yerlerinde ve çok iyi bir şekilde odaklanmış olarak elde edilmiştir. İki algoritma sonrası görüntüler kıyaslandığında ise, SAR algoritmasının HS algoritmasına nispeten çok daha iyi odaklama yaptığı görülmektedir. Bu odaklama çözünürlükleri arasındaki farkların nedenleri 5. bölümde ele alınmıştır.

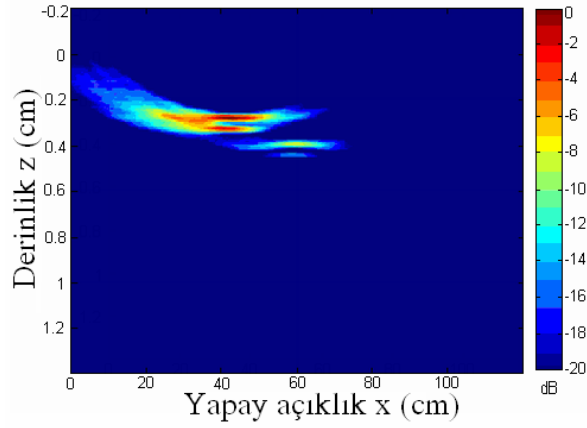


(a)

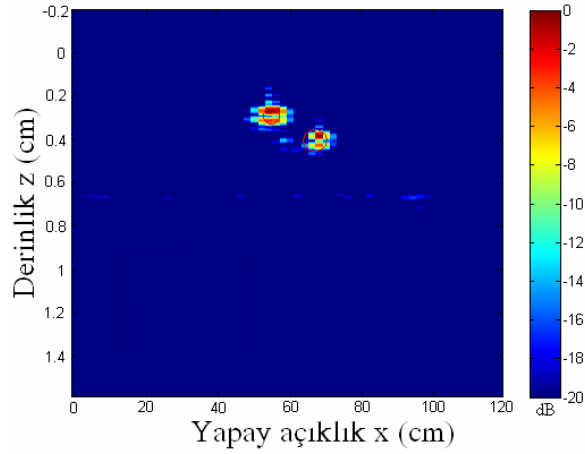


(b)

Şekil 4.7. (a) Kum havuzunda farklı noktalara gömülmüş boruların görünümü (b) B-tarama sonrası orijinal görüntü



(c)



(d)

Şekil 4.7.(Devam) (c) HS algoritması sonucu elde edilen odaklanmış görüntü. (d) SAR algoritması sonucu elde edilen odaklanmış görüntü.

4.3. GERÇEK TOPRAK YNR BULGULARI

Kum havuzu deney düzeneğinde, 2-B B-tarama deneylerini başarılı olarak tamamlanmasından sonra, gerçek YNR görüntülerinin elde edilmesi amacıyla, toprak deneylerine geçildi. Bu amaçla, Mersin Üniversitesi Çiftlikköy Yerleşkesi arazisinin değişik bölgelerinde değişik YNR toprak ölçümleri yapıldı. Şekil 4.8.'de Mühendislik Fakültesi civarındaki arazide yapılan deneyden bir fotoğraf görülmektedir. Üniversite yerleşkesinin bulunduğu arazideki toprak oldukça sert ve irili ufaklı taşlı (homojen olmayan) bir yapıdadır. Yumuşak toprak oranı bölgeden bölgeye değişse de azdır.

Dolayısıyla, ilk toprak deneylerinde, genellikle az taşlıklı ve daha yumuşak toprağa sahip olan bölgeler seçilmiştir.

4.3.1. Deney Düzenine Hazırlanması

Deney düzenine yapısı, Şekil 4.9.'da açıkça görülmektedir. Yer düzlemi üzerinde tarama işlemini gerçekleştirebilmek amacıyla, iki adet sabit cismin arasına, üzerinde iki adet metal silindirik ray olan kalın tahta geçirilmiştir. Bu rayın üzerinde, bilye sistemiyle hareket edebilecek bir anten yuvası yapılmıştır. Bu hareketli yuvaya bağlı olan adım motor (step motor) ünitesi, bir PIC devresi ve bir bilgisayar yazılımı ile kontrol edilmektedir. [41].



Şekil 4.8. Mersin Üniversitesi Çiftlikköy Yerleşkesi arazisinde gerçekleştirilen B-tarama YNR deneyi



Şekil 4.9. Bilgisayar kontrollü adım motorlu B-tarama düzeni

4.3.2. Monostatik Ve Bistatik Konfigürasyon İçin Bulgular

Yukarıda ayrıntıları verilen deney düzeneği ve boynuz antenler yardımıyla gerçek toprak ortamında değişik B-tarama YNR deneyleri yapıldı. Deneyler Mersin Üniversitesi Yerleşkesi'nin değişik bölgelerinde yapıldığından, toprak malzemesinin dielektrik sabiti ölçüm deneyleri yapılmasına gerek duyulmadı. Dolayısıyla, daha önceki raporlarımızdaki YNR görüntüleri “yapay açıklık-menzil” düzleminde verilirken, bu çalışmadaki YNR görüntüleri “yapay açıklık-zaman” düzleminde sunulmuştur. Yapılan deneylerde hem Monostatik hem de Bistatik konfigürasyonlar ele alındı.

4.3.2.1. Monostatik konfigürasyon

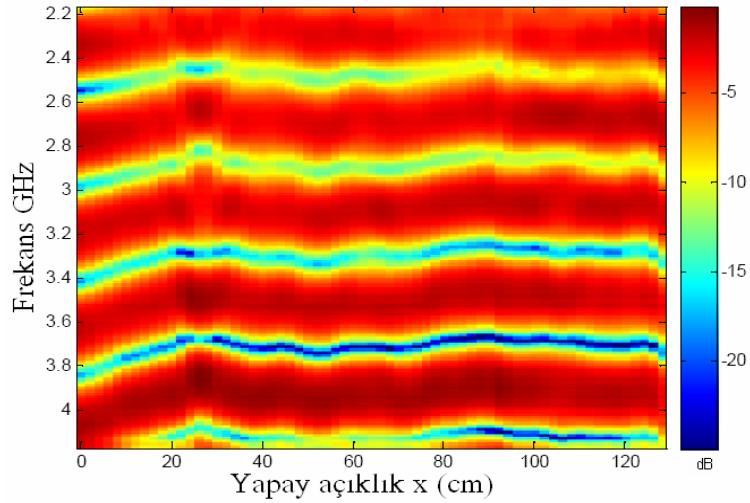
Bu deneyde, metal hedeflerin yanında dielektrik hedeflerin de tespit edilebilirliğinin denemesi amacıyla resimleri Şekil 4.10.'de verilen; 7cmx9cmx1mm boyutunda dikdörtgensel alüminyum plaka, 30cm uzunluğundaki ve 4cm çapındaki alüminyum boru ve 6cm çapında içi su dolu pet şişe yatay pozisyonda, sırasıyla yaklaşık 20cm, 25cm ve 20cm derinliklere gömüldü.



Şekil 4.10. Gerçek toprak deneyinde kullanılan küçük metal plaka, metal boru ve su dolu pet şişe

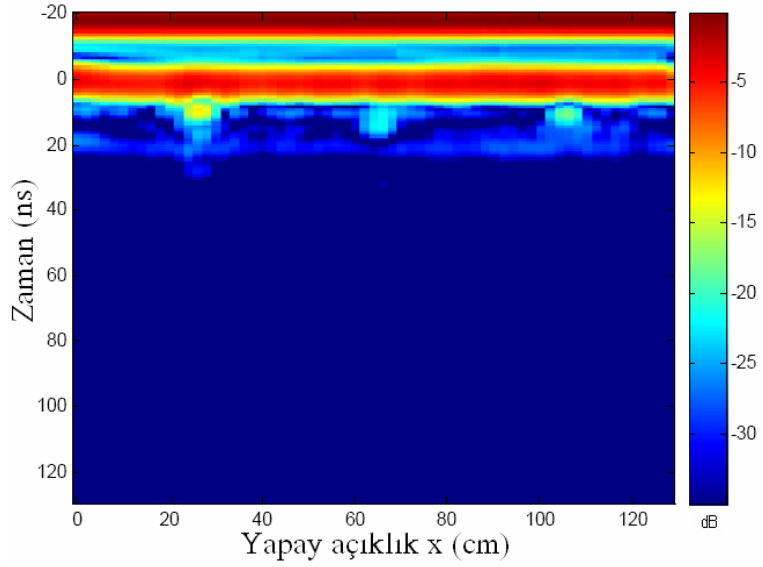
Monostatik konfigürasyonda S_{11} geri-saçılma verisi 4.0–7.1 GHz frekans aralığında toplam 201 noktada ve 64cm yapay açıklık boyunca her 1cm'lik aralıkla toplandı. Elde edilen 201x64 boyutundaki Monostatik uzay-frekans geri-saçılma verisi Şekil

4.11.(a)'da verilmektedir. Daha sonra, elde edilen 2-B B-tarama uzay-zaman YNR görüntüsü Şekil 4.11.(b)'de görülmektedir. Şekilden de hem metal hem de su bazlı nesnelere başarılı olarak yüksek çözünürlükte görüntülenmektedir. Ancak; deney düzeneğinin Monostatik olmasından dolayı, hava-toprak yüzeyinden ayna etkisiyle oluşan geri-saçılma oldukça güçlüdür. Bu saçılmanın şiddeti, toprak altına gömülü olan nesnelere oluşan saçılmalarından yaklaşık olarak 15-20 dB daha fazla olarak gerçekleşmiştir. Dolayısıyla, Şekil 4.11.(b)'deki 35dB'lik dinamik aralık içinde; gömülü nesnelere oluşan saçılmanın istenilen kontrasta sahip olamamaları durumu oluşmaktadır. Bu problemi çözmek amacıyla aynı nesnelere bir sonraki deneyde Bistatik konfigürasyonda ele alınmıştır. Şekil 4.11.(b)'ye bakıldığında, toprak içindeki homojenliği bozan etkiler (taşlar, kökler, böcekler vs) kendilerini YNR görüntüsünde istenmeyen yankılar olarak göstermektedir. Ancak, topraktan saçılmanın çok güçlü olması, bu tip istenmeyen yankıların enerjilerinin de söz konusu şekil üzerinde düşük kalmasına yol açmıştır.



(a)

Şekil 4.11. (a) Metal plaka, metal boru ve su nesnelere gömülü olduğu toprak ortamının uzay-frekans verisi



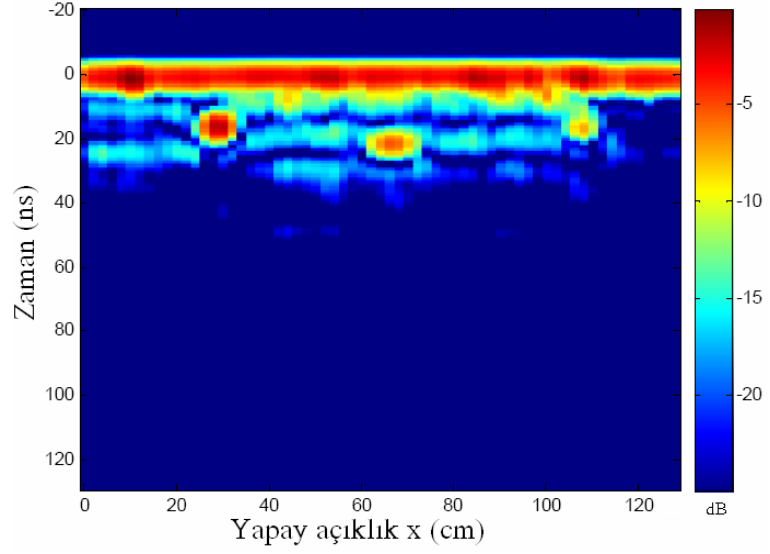
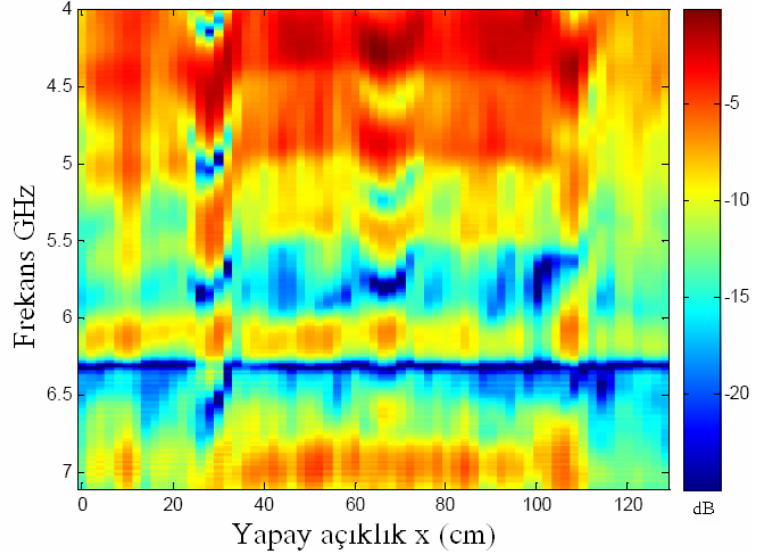
(b)

Şekil 4.11.(Devam) (b) Elde edilen B-tarama uzay-zaman YNR görüntüsü

4.3.2.2. Bistatik konfigürasyon

Bu deneyde bir önceki deneydeki aynı nesnelere aynı frekans aralığı ve yapay açıklık boyunca taranarak, bu sefer Bistatik konfigürasyon ele alınarak ve S_{21} iletim saçılma verisi toplanarak test edilmiştir. Şekil 4.12.(a)'da toplanan uzay-frekans saçılma verisi gösterilirken, Şekil 4.12.(b)'de elde edilen 2-B B-tarama uzay-zaman YNR görüntüsü verilmektedir. Şekil 4.12.(b)'den de açıkça görüleceği üzere, Bistatik konfigürasyon sayesinde toprak-hava kesişiminden oluşan saçılmanın şiddeti, toprak altına gömülen nesnelere yaklaşık aynı enerji düzeyine inmiştir. Dolayısıyla, Bistatik konfigürasyon sayesinde toprak yüzeyinden oluşan saçılma yaklaşık 15–20 dB oranında bastırılarak, daha düşük seviyelerde gerçekleşmektedir. Şekil 4.12.(b)'ye bakıldığında toprak altındaki homojen olmayan durumlardan dolayı oluşan istenmeyen yankılar, Monostatik deneyiyle karşılaştırıldığında daha net bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu yankıların şiddeti, metal ve su hedeflerden oluşan saçılma enerjisinin yine yaklaşık 15–20 dB altında kalmaktadır. Dolayısıyla söz konusu toprak ortamı güçlü yansıma sağlayan metal ve sıvı nesnelere algılanması için bir problem oluşturmamaktadır.

Ancak, göreceli elektriksel geçirgenliği daha düşük olan dielektrik nesnelere söz konusu olduğunda, bu tip istenmeyen yankılar, nesnelere algılanmasında problem oluşturabilir.



Şekil 4.12. (a)gömülü nesnelere elde edilen uzay-frekans verisi (b) elde edilen 2-B uzay-zaman YNR görüntüsü

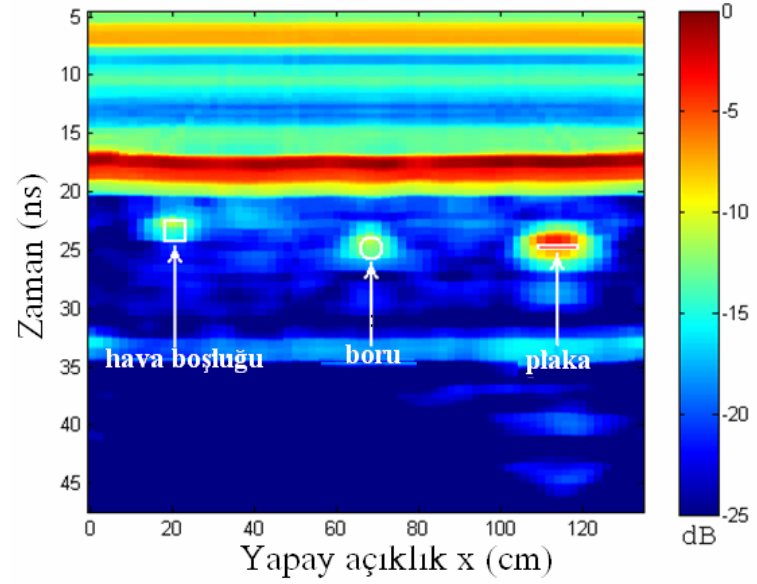
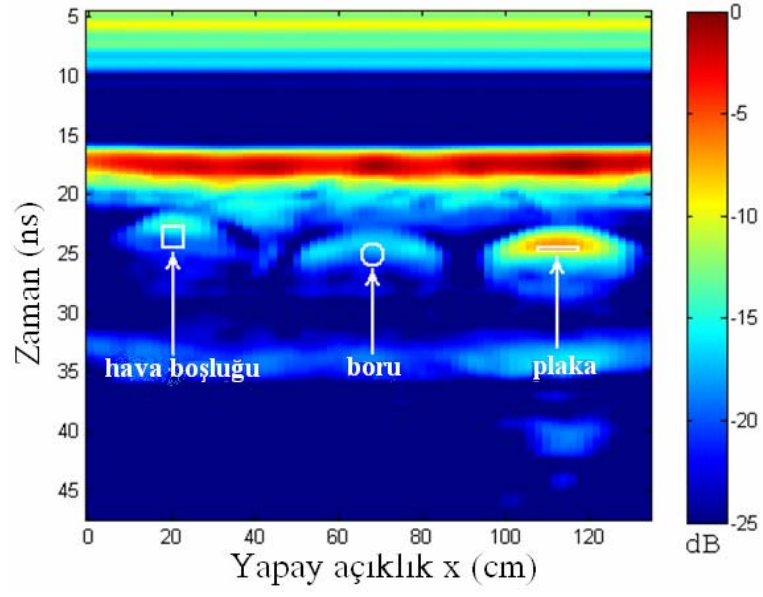
4.3.3. Gerçek Toprak Deneplerinde SAR Algoritması

Gerçek toprak deneyleri başarılı bir şekilde elde edildikten sonra, algoritması verilen SAR tekniğini uygulamak için yeni bir deney düzeneği kuruldu. Gerçek toprak düzeneğinde, Monostatik konfigürasyonda, C-Bant çift sırtlı (Double-ridge) boynuz antenle deney gerçekleştirildi. Üç farklı nesne farklı derinliklere gömüldü. Su ile doldurulmuş şişe ($x=20cm$, $z=15cm$), metal boru ($x=68cm$, $z=18cm$) ve metal plaka ($x=115cm$, $z=20cm$) koordinatlarına gömüldü. 134 santim boyunca her iki santimetrede bir ölçüm almak kaydıyla 68 kesikli noktada geri saçılım sinyali toplandı. Bu esnada Frekans 0.8 – 5 GHz arasında 8.4 MHz lik kesikli frekanslarla değiştirildi. Gerçek toprağın görelî iletkenliğı ölçülemediğinden dolayı, elde ettiğimiz imajlar uzay-zaman düzleminde sunulmuştur. Toplanan S_{11} verisinin IFT sonrası elde edilen YNR görüntüsü Şekil 4.13. (b)' de görülmektedir. $t=18$ ns civarında hava-toprak kesişimi olan yüksek saçılma etkisi görülmektedir. Şekil 4.13. (b)' ye bakıldığında, hedef etrafında yine odaklanmamış ve hiperbolik etkiye sahip şekiller görülmektedir. Uygulanan SAR algoritması sonrası, hedefler yaklaşık gerçek boyutlarında odaklanmış olarak Şekil 4.13. (c)' de görülmekte dolayısıyla hedefler gerçek yerlerinde çok rahat ayırt edilebilmektedir. Bu veriler ışığında SAR algoritmasının çok etkili bir odaklama algoritması olduğu söylenebilir.



(a)

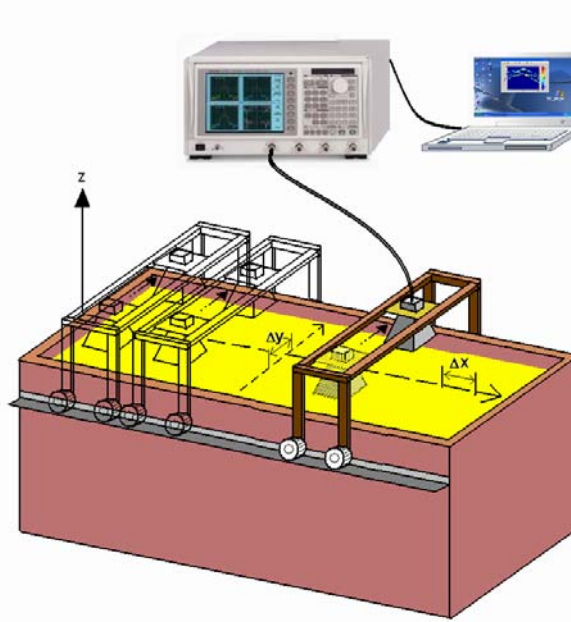
Şekil 4.13. (a) Deneyden bir görüntü



Şekil 4.13.(Devam) (b) Orijinal odaklanmamış görüntü
(c) SAR algoritması sonrası odaklanmış görüntü

4.4. C-TARAMA YNR DENEY BULGULARI

C-tarama (C-scan) YNR tekniği, üç boyutlu (3-B) YNR görüntülerinin elde edilmesinde kullanılan genel bir tekniktir [27,42]. C- taramada, yan yana birçok iki boyutlu (2-B) B-tarama işlevi gerçekleştirilerek sonuçta 3-B saçılma verisi toplanmaktadır. Uzaysal veri, 2-B bir ızgara yapay açıklığında toplanırken, her bir uzaysal nokta için frekans da değiştirilerek; 3-B “uzay-uzay-frekans” saçılma alanı toplanır. Daha sonra, elde edilen ham veriye sinyal işleme tekniklerinin uygulanmasından sonra, 3-B C-tarama YNR görüntüleri elde edilir [2]. İlk olarak, geometrisi Şekil 4.14’de görülen tipik bir C-tarama deney düzeneği hazırlanmıştır. C-tarama deneyleri; tek bir anten kullanılarak Monostatik konfigürasyon için yapılabileceği gibi, iki adet anten yardımıyla Bistatik konfigürasyon için de yapılabilmektedir. Her iki durumun birbirine göre üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Bu tezde her iki konfigürasyon da ele alınarak değişik elektriksel nesnelere için Monostatik ve Bistatik C-tarama deneyleri gerçekleştirilmiş ve gömülü nesnelere 3-B YNR görüntüleri aşağıda ayrıntıları verildiği üzere elde edilmiştir.

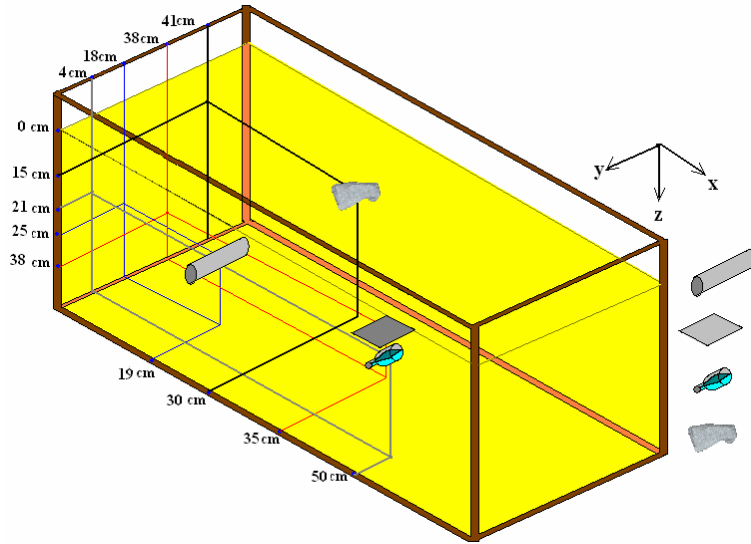


Şekil 4.14. C-tarama YNR deney düzeneği geometrisi

4.4.1. Monostatik C-Tarama YNR Deneyleri

Bu çalışmada, kurmuş olduğumuz deney düzeneği ile Monostatik C-tarama deneyleri gerçekleştirilerek, gömülü nesnelerin 3-B YNR görüntülerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. 3-B C-tarama YNR görüntülerinin elde edilmesi, aynı zamanda 2-B X-Z, X-Y ve Y-Z YNR görüntülerinin de kolaylıkla gösterilebilmesi olanağını sağlayarak, gömülü olan nesnelerin istenilen herhangi bir kesitte imajının görüntülenebilmesi imkânını da vermektedir.

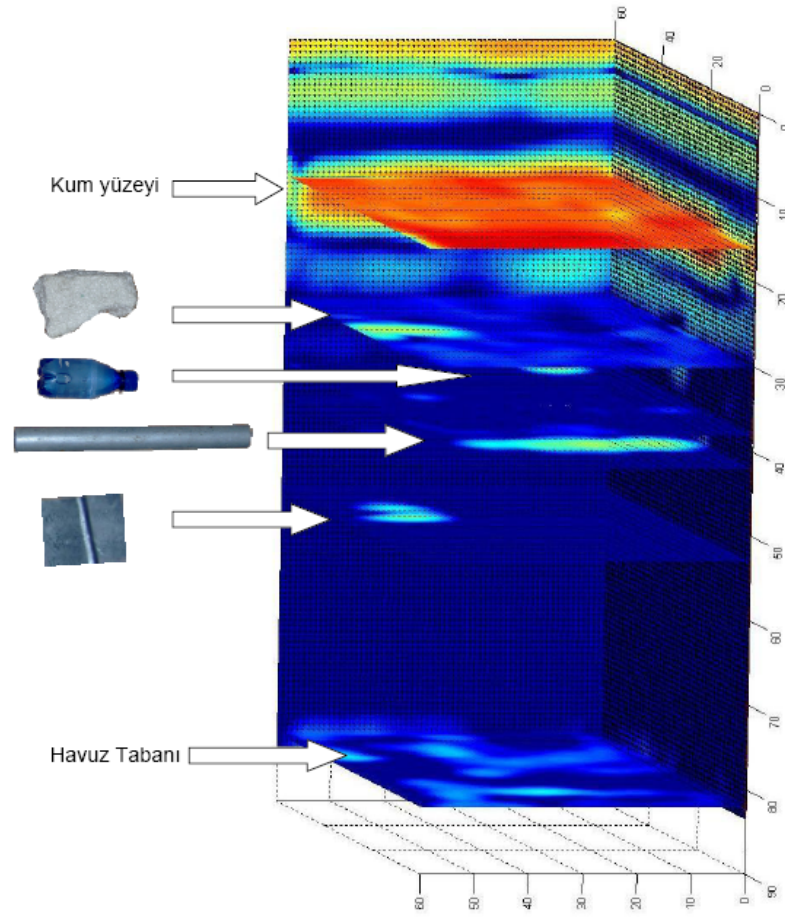
İlk olarak, geometrisi Şekil 4.15’de verilen C-tarama deneyi gerçekleştirildi. Bu deneyde değişik elektriksel özellikteki ve değişik şekildeki nesnelerin saçılma tepkilerini inceleyebilmek amacıyla; bir metal boru, içi su ile dolu bir plastik pet şişe, bir ambalaj köpüğü ve bir düz alüminyum plaka 3-B uzaydaki değişik lokasyonlarda kum altına gömüldü.



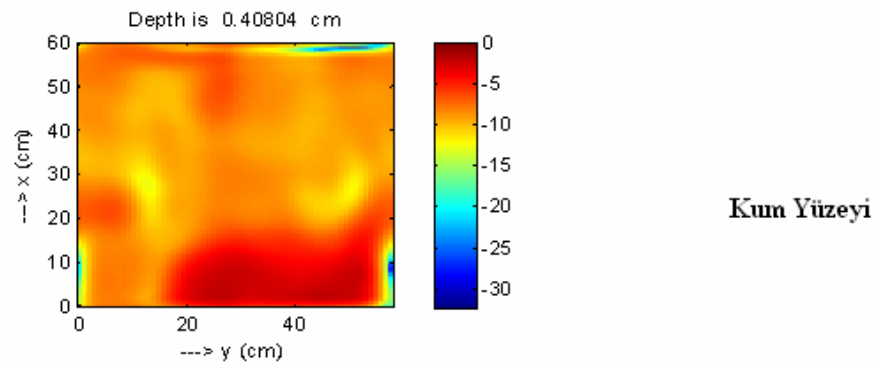
Şekil 4.15. Monostatik C-tarama deneyi hedeflerin konumları

Daha sonra piramit dikdörtgensel boynuz tipi anten (*AHS Systems SAS-584*) yardımıyla kum yüzeyinin 15cm üzerinde toplam 15 tane yan yana B-taraması yapılarak, C-tarama deneyi tamamlandı. Her bir B-taramasında; x-ekseni boyunca 60 cm yapay açıklıkta toplam 30 adet eşit aralıktaki uzaysal noktada geri saçılma verisi; S_{11} , 4.8 – 8.5 GHz

frekans bandında 201 frekans adımı için toplandı. C-taraması işlemini gerçekleştirebilmek amacıyla, anten 4cm aralıklarla y-ekseninde kaydırılarak toplam 15 ayrı noktada 3-B uzay-uzay-frekans geri-saçılma verisi toplandı. Deney sonunda 30x15x201 boyutunda 3-B ham YNR matrisi elde edildi. Söz konusu matrisin frekans ekseninde bir boyutlu (1-B) ters Fourier dönüşümü (IFT) alınarak, 3-B C-tarama YNR görüntüsünü elde edildi. Sinyal işlemesi sırasında, x- ve y-eksenlerinde 4 kere sıfır-ekleme (zero-padding) yapılarak çözünürlük artırıldı. Elde edilen YNR görüntüsü 3-B olduğundan, Şekil 4.16.'da değişik derinliklerdeki 2-B X-Y düzlemi YNR kesitleri sunulmuştur. Burada, $z=0\text{cm}$ 'deki 2-B X-Y YNR kesitinde, kum yüzeyinden yansıma gözlemlenebilmektedir. Uygulanan tarama monostatik konfigürasyonda yapıldığından, anten tarama boyunca kum yüzeyine dik tutulduğundan, ayna yansıması etkisiyle kum yüzeyinden antene geri dönen geri-saçılma oldukça güçlüdür. Daha derinlere inildiğinde, $z=15\text{cm}$ 'de ambalaj köpüğünden oluşan saçılma, $z=21\text{cm}$ 'de su dolu pet şişeden oluşan saçılma, $z=25\text{cm}$ 'de metal borudan oluşan saçılma, $z=35\text{cm}$ 'de metal plakadan ve $z=62\text{cm}$ 'deki havuz tabanından oluşan saçılmalar net bir şekilde görülebilmektedir. Bu saçılma mekanizmalarını daha iyi görebilmek için, sırasıyla $z=0\text{cm}$, 15cm, 21cm, 25cm, 35cm ve 62cm'deki 2-B X-Y düzlemi YNR görüntüleri Şekil 4.17.'de verilmiştir. Buradaki şekillerden de açıkça görülebileceği gibi, nesnelere oluşan geri-saçılmalar yüksek çözünürlükte doğru lokasyonlarda ve 3-B olarak iyi bir şekilde görüntülenebilmektedir.

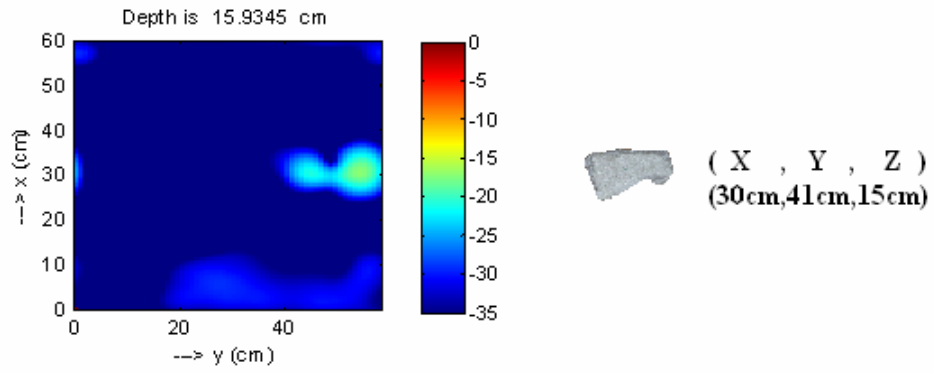


Şekil 4.16. Monostatik konfigürasyonda elde edilen 3-B C-tarama YNR görüntüsünün değişik Z değerli için elde edilen 2-B X-Y düzlemi kesitleri

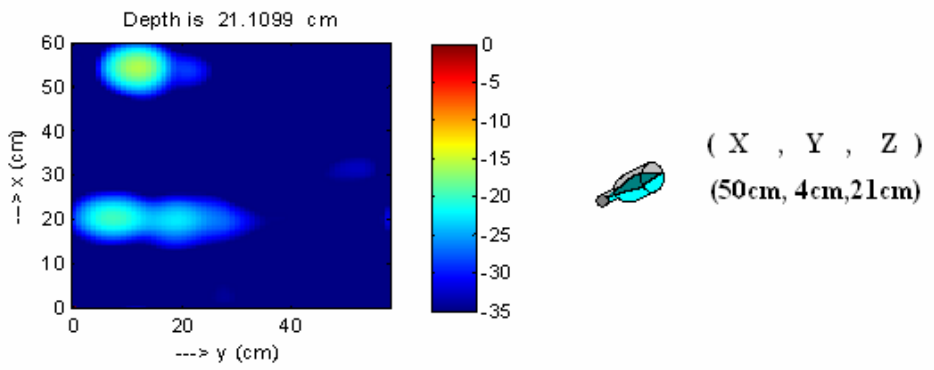


(a)

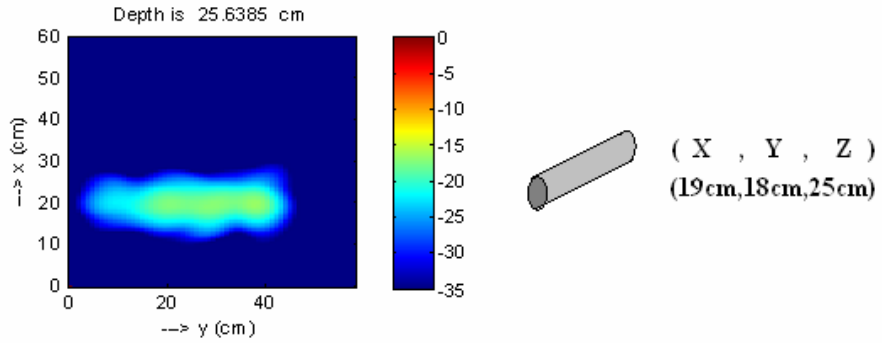
Şekil 4.17. Monostatik konfigürasyonda elde edilen 3-B C-tarama YNR görüntüsünün değişik Z değerleri için elde edilen 2-B X-Y düzlemi YNR kesitleri (a) $z=0$ cm



(b)

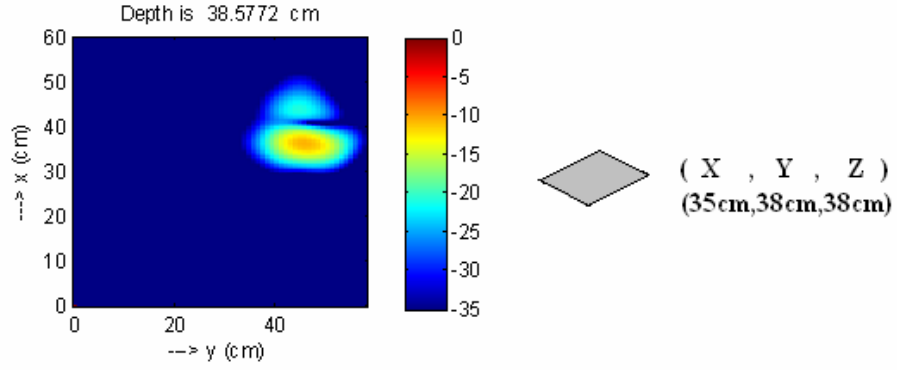


(c)

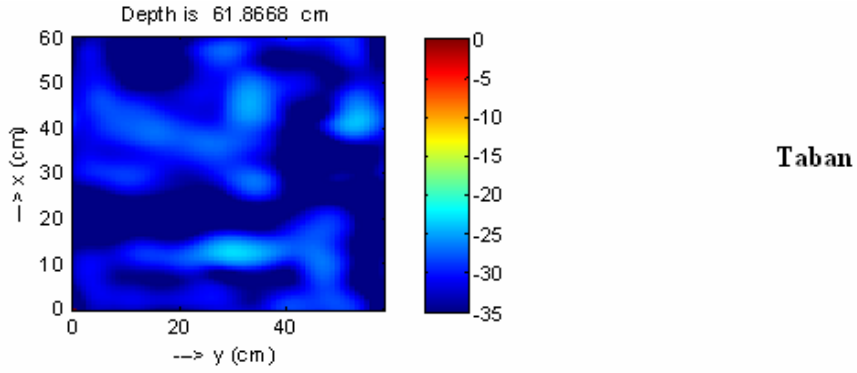


(d)

Şekil 4.17.(devam) Monostatik konfigürasyonda elde edilen 3-B C-tarama YNR görüntüsünün değişik Z değerleri için elde edilen 2-B X-Y düzlemi YNR kesitleri:
(b) z=15cm, (c) z=21cm, (d) z=25cm



(e)

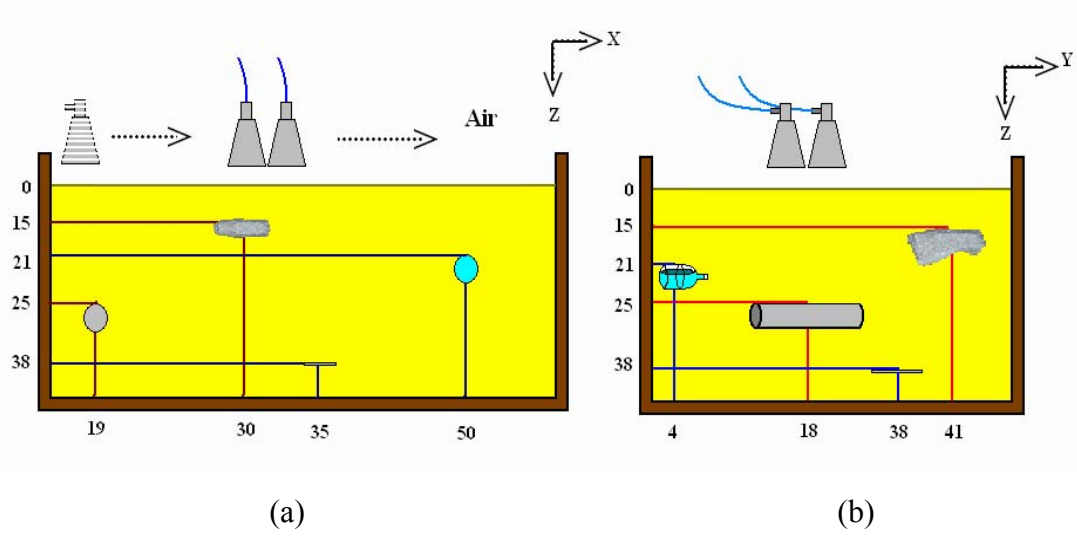


(f)

Şekil 4.17.(devam) Monostatik konfigürasyonda elde edilen 3-B C-tarama YNR görüntüsünün değişik Z değerleri için elde edilen 2-B X-Y düzlemi YNR kesitleri: (e) $z=35\text{cm}$ ve (f) $z=62\text{cm}$.

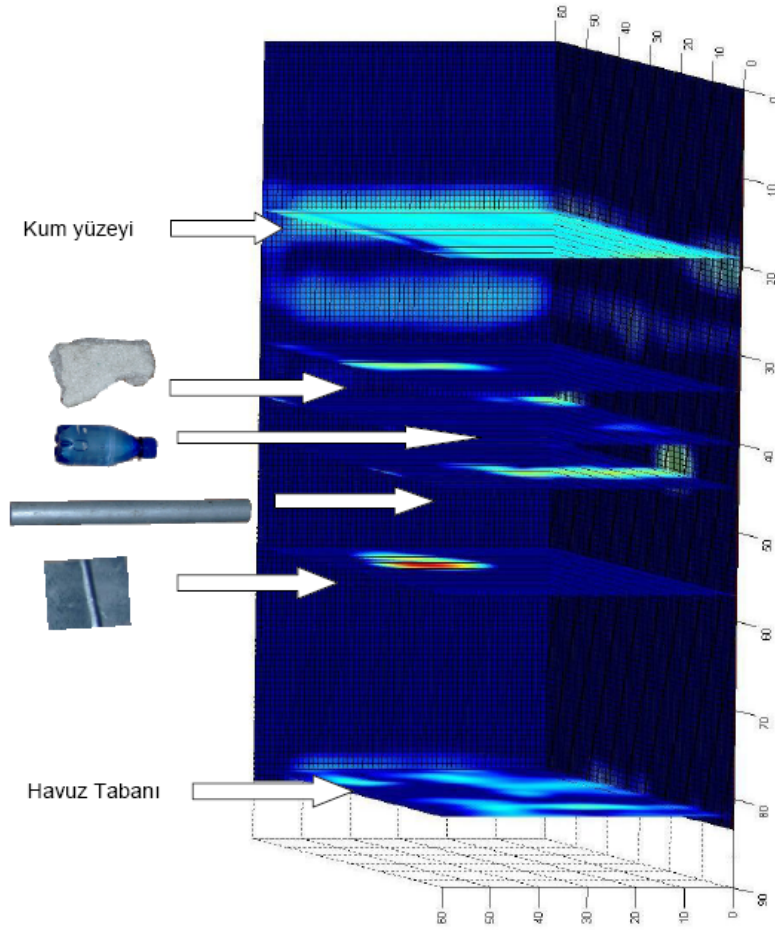
4.4.2. Bistatik C-Tarama YNR Deneyleri

Bistatik C-tarama deneyini gerçekleştirebilmek amacıyla, geometrisi Şekil 4.18.'de verilen C-tarama deneyi yapıldı. Bu deneyde bir önceki deneyde kullanılan nesnelere gömülü oldukları yerlerinde bırakılarak, iki adet piramit dikdörtgenel boynuz anten (*AHS Systems SAS-584*) yardımıyla bistatik konfigürasyonda C-tarama işlemi yapıldı. Deney geometrisinin X-Z düzlemindeki izdüşümü Şekil 4.18.(a)'da, Y-Z düzlemindeki izdüşümü ise Şekil 4.18.(b)'de görülmektedir. Antenler, şekilde görüldüğü üzere yan yana tutularak, bu defa iletişim saçılma verisi; S_{21} toplandı.

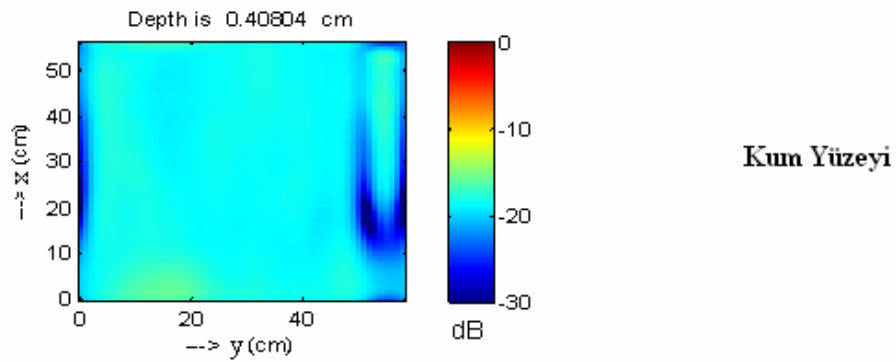


Şekil 4.18. Bistatik C-tarama deneyi (a) X-Z düzlemi izdüşümü (b) Y-Z düzlemi izdüşümü

Tarama işlemi bir önceki deneyle aynı adımlarla yapıldı. Kum yüzeyinin 15cm üzerinde toplam 15 tane yan yana B-taraması yapılarak, C-tarama deneyi tamamlandı. Her bir B-taramasında; x-ekseni boyunca 60 cm yapay açıklıkta toplam 30 adet eşit aralıktaki uzaysal noktada geri saçılma verisi; S_{21} , 4.8 – 8.5 GHz frekans bandında 201 frekans adımı için toplandı. C-taraması işlemi gerçekleştirilebilmek amacıyla, anten 4cm aralıklarla y-ekseninde kaydırılarak toplam 15 ayrı noktada 3-B uzay-uzay-frekans geri saçılma verisi toplandı. Deney sonunda yine aynı şekilde 30x15x201 boyutunda 3-B ham YNR matrisi elde edildi. Elde edilen 3-B verinin farklı Z eksenleri için 2-B dilimleri Şekil 4.19. da gösterilmiştir. Ayrıca her bir hedefe karşılık gelen Z derinliğinde 2-B X-Y imajları da Şekil 4.20. de verilmiştir. Monostatik ve bistatik konfigürasyonlar sonrası taramalar karşılaştırıldığında, yüzey yansımada dolayı monostatik konfigürasyonda hedeflerden elde edilen geri saçılım sinyal şiddetinin, bistatik konfigürasyona nispeten daha az olduğu görülmüştür. Şekil 4.17.(e) ile Şekil 4.20. (e) karşılaştırıldığında metal plakalardan elde edilen geri saçılım sinyalleri arasında yaklaşık 15 dB lik şiddet farkı olduğu açıkça görülmektedir. Diğer hedeflerdeki yansımalar da kıyaslanarak bistatik konfigürasyonun etkinliği anlaşılabilir.

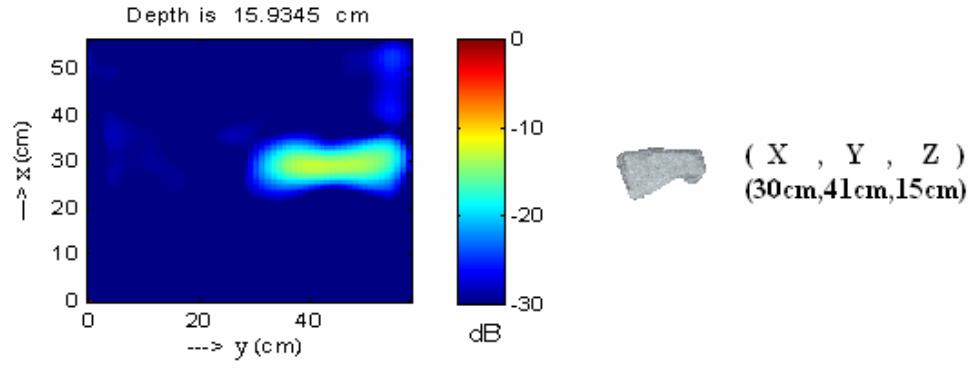


Şekil 4.19. Bistatik konfigürasyonda elde edilen 3-B C-tarama YNR görüntüsünün değişik Z değerleri için elde edilen 2-B X-Y düzlemi YNR kesitleri.

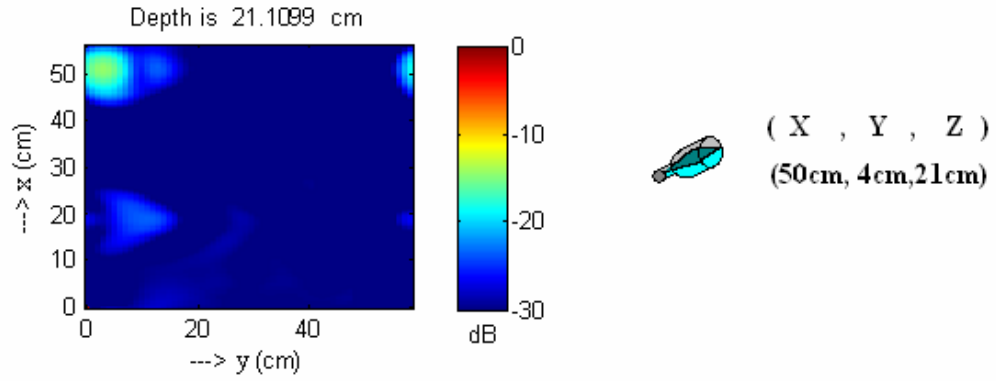


(a)

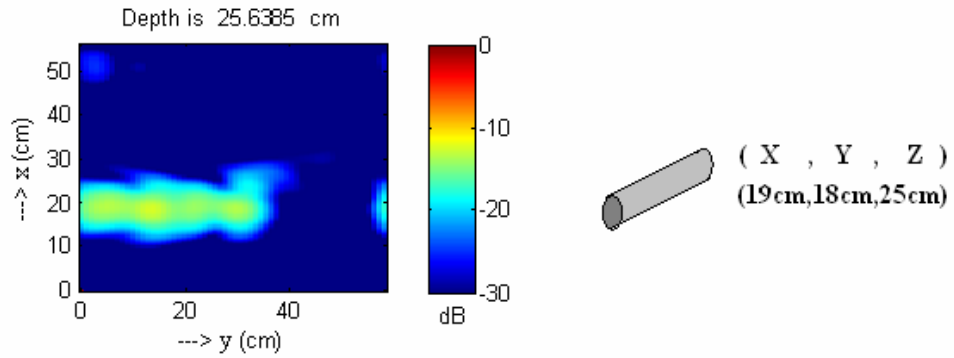
Şekil 4.20. Bistatik konfigürasyonda elde edilen 3-B C-tarama YNR görüntüsünün değişik Z değerleri için elde edilen 2-B X-Y düzlemi YNR kesitleri: (a) $z=0\text{cm}$,



(b)

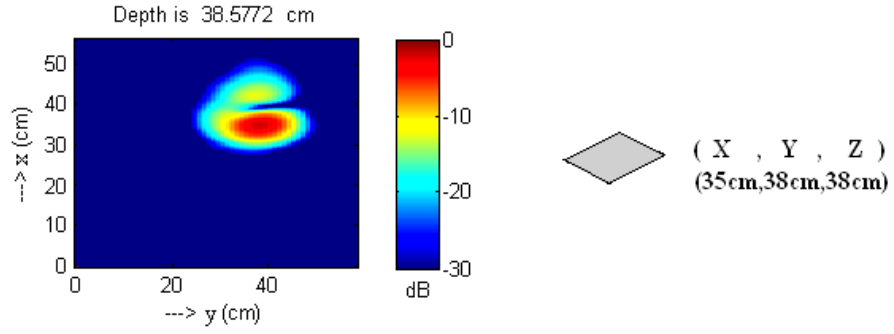


(c)

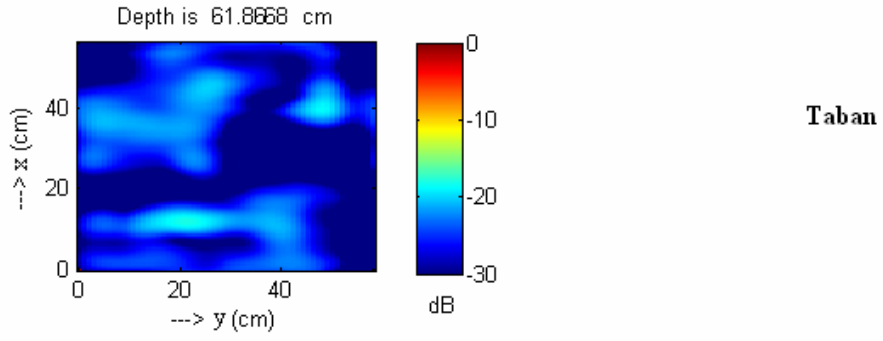


(d)

Şekil 4.20.(devam) Bistatik konfigürasyonda elde edilen 3-B C-tarama YNR görüntüsünün değişik Z değerleri için elde edilen 2-B X-Y düzlemi YNR kesitleri:
(b) z=15cm, (c) z=21cm, (d) z=25cm



(e)



(f)

Şekil 4.20.(devam) Bistatik konfigürasyonda elde edilen 3-B C-tarama YNR görüntüsünün değişik Z değerleri için elde edilen 2-B X-Y düzlemi YNR kesitleri: (e) $z=35\text{cm}$ ve (f) $z=62\text{cm}$.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yeraltı tabakalarının ve nesnelerinin görüntülenmesi için gerekli olan elektromanyetik teori verilerek, gerekli deneysel düzenek kurulmuş ve YNR görüntüleme algoritmaları başarılı bir şekilde sunulmuştur. YNR uygulamalarında karşılaşılan hiperbolik etkiyi gidermek için gerekli olan, odaklama algoritmalarından Hiperbolik Toplama (HT) ve Yapay açıklıklı radar (SAR) algoritmalarının teorisi ayrıntılı olarak verilmiştir.

Teorileri verilen görüntüleme ve odaklama algoritmalarının uygulanabilirliği test edilmek için ilk olarak, fiziksel tabanlı bir benzetim programı kullanılmış, daha sonra kurulan deneysel düzende sonuçlar incelenmiştir. Benzetim ve deneysel sonuçların başarılı bir şekilde elde edilmesinden sonra, görüntüleme ve odaklama algoritmaları gerçek saha uygulamalarında sınanmış ve çok başarılı bir şekilde YNR görüntüleri elde edilmiştir.

Deneysel uygulamalarda, imal edilen kum havuzunun homojen olması ve elektriksel geçirgenliğinin doğru olarak tespit edilmesinden dolayı hedefler çok net ve gerçek pozisyonlarında görüntülenmiştir. Ayrıca farklı dielektrik özellikli maddelerden elde edilen saçılmalarda incelenmiş metal plaka, metal boru veya yüksek dielektrik sabitli hedeflerden oldukça yüksek saçılma enerjisi elde edilirken düşük dielektrik sabitli diğer nesnelerin daha az saçılma enerjisi sağladıkları gözlemlenmiştir.

Gerçek saha uygulamalarında ise yüksek frekansta çalışmak mümkün olmamış ve yüksek frekanslı antenlerle yeterli görüntü netliğine ve derinliğe ulaşılamamıştır. Yüksek frekansta toprağa nüfuz etme derinliğinin sadece 30–35 cm civarında kaldığını gözlemlenmiş söz konusu olayın yüksek frekanslarda, metre başına sinyal zayıflaması oldukça fazla olduğu saptanmıştır. Bu yüzden düşük frekansların kullanılmasıyla nüfuz etme derinliği arttırılmıştır. Ve gerçek saha uygulamaları da başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

YNR uygulamalarında elde edilen en önemli sonuçlardan birisi de şiddetli yüzey yansımalarıdır. Elektromanyetik dalga şiddetli bir yüzey yansımasıyla karşılaşıncaya, EM dalganın büyük bir kısmı geri yansırken, kalan kısmı toprağa ancak nüfuz edebilmektedir, bunun sonucunda da oldukça zayıf şiddetli yüzey altı geri yansımalar elde edilmektedir. YNR görüntüleme de asıl problem, bu iki geri yansıma verisinin beraber görüntülenmesidir. Çünkü aynı imajda, yüzey yansıması baskın olduğundan, yüzey altı hedeflerinden alınan geri yansıma sinyallerinin şiddetleri çok düşük kalmaktadır. Fakat bistatik konfigürasyon da elde edilen data, S_{12} datası olup ikinci bir anten tarafından yüzey altından alınan yansımalar oluşmaktadır. Elde edilen bu veri yüzey geri yansımalarını içermemekte, sadece yüzey altı yansımalarını içermektedir. Bunun sonucunda da YNR görüntüsünün görece dinamik aralığında, yüzey altı hedeflerinin geri yansıma şiddetleri daha net görülmektedir. Monostatik konfigürasyonda, havuz tabanından oluşan saçılma Şekil 4.4. deki 30dB'lik dinamik aralıkta görülemezken, bistatik konfigürasyonda bu söz konusu saçılma Şekil 4.6. deki 20dB'lik dinamik aralıkta bile rahatlıkla seçilebilmektedir. Yine aynı neden dolayısıyla Bistatik konum için, hedeflerden oluşan EM saçılması görüntüde dominant olarak oluşmaktadır.

YNR uygulamalarında kullanılan odaklama algoritmalarından biri olan HT algoritmasının sonucuna bakıldığı zaman, imajlar nesnelere oluşan saçılmaların bulunduğu yerde daha konsantre olarak görülmektedir. Ayrıca, klasik görüntüdeki diğer saçılmalar bastırılmıştır ve görüntünün 20 dB'lik dinamik aralığında görülememektedir. Ancak bu görüntüde (Şekil 4.7 (c)), özellikle üstteki borudan çapraz olarak yukarıya doğru istenmeyen görüntü kuyruklarının da oluştuğu görülmüştür. Bu tip bir bulanıklık HT algoritmasının bir dezavantajıdır ve özellikle görüntülenene nesnelere birbirine yakın olduğu durumlarda etkili olarak oluşmaktadır. HT algoritmasının uygulanması sırasında, nesneye yakın üst bölgelerdeki pikseller için çizilen hiperbolik şablonun kuyruğunun altında birden fazla nesne bulunması durumunda, bu tip bir hayalet bulanıklık oluşmaktadır. Söz konusu durum Şekil 4.7 (c)'deki yukarıdaki borunun sol üst

bölgesindeki pikseller için geçerlidir ve dolayısıyla bu bölgelerde herhangi bir saçılma olmamasına rağmen bu bölgeler de saçılma enerjisi görüntüde oluşmaktadır.

Uygulanan diğer bir odaklama algoritması olan SAR tekniğinde ise, hedefler tam yerlerinde odaklanmış olarak ve yüksek çözünürlükte elde edilmiştir. SAR algoritması HT algoritmasına kıyaslandığında oldukça etkili ve verimli bir algoritma olduğu görülmektedir. Odaklanmış görüntüde hiçbir hayalet etkisi olmamakla beraber hedefler gerçek boyutlarına çok yakın olarak görüntülenmiştir. HT tekniğinde, görüntü verisindeki her bir piksel için tek tek hiperbolların oluşturulması ve toplanması uzun zaman aldığından, SAR tekniğine göre oldukça yavaş bir algoritmadır. Ayrıca SAR algoritması, literatürdeki bilinen odaklama algoritmalarına göre oldukça hızlı çalışmaktadır. Ancak (k_x, w) bölgesinde, doğrusal olmayan bir ızgara üzerinde bulunan veriyi (k_x, k_z) bölgesinde, eşit bölmeli 2-B dikdörtgensel ızgaraya taşıyabilmek için, kullanılan interpolasyon tekniği uzun matris işlemlerinde dolayı zaman almaktadır. Söz konusu durum için, farklı interpolasyon teknikleri geliştirilerek, algoritmanın işleyişi çok daha hızlı hale getirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Langman A., M.R. Inggs, “A 1-2 GHz SFCW Radar for Landmine Detection ”, IEEE, 453-454, (1998).
- [2] Ryan J., “Africa’s Deadly Legacy”, The Argus, 30, (1994).
- [3] Daniels D.J., “Surface-Penetrating Radar”, IEE Press, London, 360 s., (1996).
- [4] Montoya T. P. ve Smith G. S., “Land Mine Detection Using A Ground-Penetrating Radar Based on Resistively Loaded Vee Dipoles”, IEEE Trans Antennas Propagat, **47**: 1795–1806, (1999).
- [5] Nag S. ve Peters Jr L., “Radar Images of Penetrable Targets Generated from Ramp Profile Functions”, IEEE Trans Antennas Propagat, **49**: 32–40, (2001).
- [6] Carin L., Geng N., Mc Clure M., Sichina J. ve Nguyen L., “Ultra-Wide-Band Synthetic- Aperture Radar for Mine-Field Detection”, IEEE Trans Antennas Propagat, **41**: 18-33, (1999).
- [7] Halman J. I., Shubert K. A. ve Ruck G. T., “SAR Processing of Ground-Penetrating Radar Data for Buried UXO Detection: Results From A Surface-Based System”, IEEE Trans Antennas Propagat, **46**: 1023-1027, (1998).
- [8] Sullivan A., Damarla R., Geng N., Dong Y. ve Carin L., “Ultra Wide-Band Synthetic Aperture Radar for Detection of Unexploded Ordnance: Modeling And Measurements”, IEEE Trans Antennas Propagat, **48**: 1306–1315, (2000).
- [9] Vitebskiy S., Carin L., Ressler M. ve Le F., “Ultrawide-Band, Short-Pulse Ground- Penetrating Radar: Simulation and Measurement”, IEEE Trans Geosci Remote Sensing, **35**: 762-772, (1997).
- [10] Morrow I. L. ve Van Genderen P., “A 2-D Polarimetric Backpropagation Algorithm for Ground-Penetrating Radar Applications”, Microwave Opt. Tech. Lett., **28(1)**: 1-4, (2001).
- [11] Van Dongen K.W.A., Van Den Berg P.M. ve Fokkema J.T., “A Directional Borehole Radar for Three-Dimensional Imaging”, Proc. GPR 2002, Ninth Intern. Conf. on GPR, Santa Barbara, USA, 25-30, (2002).

- [12] Soumekh M. “Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms”, New York, Wiley, 648s., (1999).
- [13] Özdemir C., “Synthetic Aperture Radar”, Encyclop. of RF and Microw. Engin., New York, Wiley, 5716 s., (2005).
- [14] Özdemir C., Lim S., ve Ling H., “A Synthetic-Aperture Algorithm for Ground-Penetrating Radar Imaging”, Microw. Opt. Tech. Letters, **42**: 412-414, (2004).
- [15] Chen V. C., “Radar Imaging”, Encyclop. of RF and Microw. Engin, Washington, Wiley, 5716 s., (2005).
- [16] Vitebskiy S., Carin L., Ressler M. ve Le F., “Ultrawide-Band, Short-Pulse Ground- Penetrating Radar: Simulation and Measurement”, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, **35**: 762–772, (1997).
- [17] Fisher E., McMechan G. A., Annan A. P., ve Cosway S. W. “Examples Of Reverse-Time Migration of Single-Channel, Ground-Penetrating Radar Profiles”, Geophysics, **57**: 577-586, (1992).
- [18] Leuschen C. J., Plumb R.G., “A Matched-Filter-Based Reverse-Time Migration Algorithm for Ground-Penetrating Radar Data”, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, **39**: 929-936, (2001).
- [19] Özdemir C., Demirci S., Yiğit 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. Tech. Letters, **49(3)** : 671-676, (2007).
- [20] Harrington, Roger F., “Time-Harmonic Electromagnetic Fields”, IEEE Press, United States, 473 s., (2001).
- [21] Zhdanov M.S., “Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems”, Elseiver, United States, 628 s., (2002).
- [22] Stratton, J.A. “Electromagnetic Theory”, McGraw-Hill Book Company, United States, 216 s., (1941).
- [23] Morse ve Feshbach “Methods of Theoretical Physics”, McGraw-Hill, New York, 997 s., (1953).
- [24] Jones, D.S. “The Theory of Electromagnetism”, Pergamon Press, England, 807 s., (1964).

- [25] Adomain, G. “Stochastic Systems” Mathematics in Science and Engineering Vol 169, Academic Pres, New York, 352 s., (1983).
- [26] Kurt U., Akbulut S., Temel T.ve Arslan A., “C-Bant Boynuz Anten Tasarımı ve İmalatı”, Mersin Üniv., Elektrik-Elektronik Müh. Böl., Bitirme Ödevi, (2006).
- [27] Daniels D. J., “Surface-Penetrating Radar”, 2nd Edition, IEE Press, London, U.K., 899 s., (2004).
- [28] Davis J. L., ve Annan A. P., “Ground-Penetrating Radar For High-Resolution Mapping Of Soil And Rock Stratigraphy”, Geophysical Prospecting, **37**: 531-551, (1989).
- [29] Achrait-Furlan L., Lasri T.ve Mamouni A., “Microwave Technique for Detection, Location, and Sizing of Buried Objects”, Microwave Opt. Tech. Letters, **32(2)**: 145–149, (2002).
- [30] Huynen I., Steisel J. ve Stockbroeckx B., “A Simple Detection Method of Buried Cylindrical Targets Applicable to Landmines”, Microwave Opt. Tech. Letters, **38(1)**: 80–83, (2003).
- [31] Ling H., Cjou R. ve Lee S.W., “Shooting and Bouncing Rays: Calculation The RCS Of An Arbitrary Shaped Cavity”, IEEE Trans Antennas Propagat, **37**: 194-205, (1989).
- [32] User reference for MATLAB, ver.7.0.0 (R14), (May 2004).
- [33] Özdemir C., Lim S. ve Ling H., “An Algorithm for Ground Penetrating Imaging Using Synthetic Aperture Radar Concept”, Proc. 2004 URSI Intern. Symp. on Electromag. Theory II, 1098-1100, (2004).
- [34] Witten A. J., Molyneux J. E. ve Nyquist J. E., “Ground Penetrating Radar Tomography: Algorithms and Case Studies”, IEEE Trans Geosci Remote Sensing, **32**: 461-467, (1994).
- [35] Hansen T. B. ve Johansen P. M., “Inversion Scheme for Ground Penetrating Radar That Takes Into Account The Planar Air-Soil Interface”, IEEE Trans Geosci Remote Sensing, **38**: 496-506, (2000).

- [36] Yiğit E., Demirci S., Özdemir C., Kavak A., “A Synthetic Aperture Radar-Based Focusing Algorithm for B-Scan Ground Penetrating Radar Imagery ”, Microw. Opt. Tech. Letters, **49(10)**: 2534-2540, (2007).
- [37] Soumekh M., “Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms”, New York, Wiley, 750s., (1999).
- [38] Carin L., Geng N., McClure M., Sichina J. ve Nguyen L. “Ultra-Wide-Band Synthetic-Aperture Radar for Mine-Field Detection,” IEEE Trans. Anten. Propag. Mag., **41(1)**: 18-33, (1999).
- [39] Xu X., Miller E. L., Rappaport C. M. ve Sower G. D., “Statistical Method to Detect Subsurface Objects Using Array Ground-Penetrating Radar Data”, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, **40(4)**: 963- 976, (2002).
- [40] Trademark™ (04/24/2007). CSG, Computer Support Group, Inc. and CSGNetwork.Com, Erişim: <http://www.csgnetwork.com/dieconstantstable.html> [24 Nisan 2007]
- [41] Altunç B., Eraslan E. ve Kocaman Y., “Bilgisayar Yardımıyla Step Motor Kontrolü”, Mersin Üniv., Elektrik-Elektronik Müh. Böl., Bitirme Ödevi, (2006).
- [42] Peters L., Daniels J. J. ve Young J. D., “Ground Penetrating Radar As A Subsurface Environmental Sensing Tool”, Proc. IEEE, **82**: 1802–1822, (1994).

ÖZGEÇMİŞ

1. GENEL

DÜZENLEME TARİHİ : 13.09.2007		
SOYADI, ADI	: YİĞİT ENES	DOĞUM TARİHİ : 31.12.1981
İŞ ADRESİ	: Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh Bölümü, 33343 Çiftlikköy / MERSİN	
EV ADRESİ	: Eski mezitli yolu 1486 sok No:18 pk. 33210 Mezitli/Mersin	
Ev tel	: 0324 357 32 22	
TELEFON : 0 (324) 3610001 Dahili 7163 GSM : 0505 544 88 20	FAKS: 0(324) 3610032	E-MAIL: enesyigit81@mersin.edu.tr

2. EĞİTİM

ÖĞRENİM DÖNEMİ	DERECE (*)	ÜNİVERSİTE	ÖĞRENİM ALANI
2004-2007	Yüksek Lisans	Mersin Üniversitesi	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
2000-2004	Lisans	Mersin Üniversitesi	Elektrik-Elektronik Mühendisliği (Bölüm 3.'sü)

3. AKADEMİK DENEYİM

GÖREV DÖNEMİ	ÜNVAN	BÖLÜM	ÜNİVERSİTE
2004-2007	Arş. Gör.	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Mersin Üniversitesi
Sınavlar			
ALES	75.511		
ÜDS	63.750 (İngilizce)		

4. BİLGİSAYAR BİLGİSİ

İşletim Sistemleri	Windows Family
Programlama Dilleri	80x86 Assembly, Basic, C, Turbo Pascal
Diğer	MATLAB, SuperNec, Frontpage, Adobe Photoshop, Autocad, Solidworks, Cosmosworks,

5. UZMANLIK ALANLARI

UZMANLIK ALANI	ANAHTAR SÖZCÜKLER
Antenler	Dizayn, Saçılma,
Radar	Görüntüleme, sinyal işleme
Elektromanyetik	Nümerik metotlar

6. TEZ DÖNİMİNDE YAPILAN AKADEMİK ÇALIŞMALAR

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlananlar (SCI)
Özdemir, C., Demirci, Ş., Yiğit, E. , Kavak, A., “A Hyperbolic Summation Method to Focus B-Scan Ground Penetrating Radar Images: An Experimental Study with a Stepped Frequency System,” Microwave Opt. Tech. Letters, 49, No.3, 671-676, (2007).
Yiğit E. , Demirci S., Özdemir C., Kavak A., “A Synthetic Aperture Radar-Based Focusing Algorithm for B-Scan Ground Penetrating Radar Imagery”, Microw. Opt. Tech. Letters, vol. 49, pp. 2534-2540, (2007).
Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler.
Özdemir, C., Demirci, Ş., Yiğit, E. , “A Focusing Method for B-Scan GPR Image ,” 11th International Conference on Ground Penetrating Radar, Columbus, OH, ABD (2006) (sözlü)
Özdemir, C., Yiğit, E. , Demirci, Ş., “Ground Penetrating Radar Studies at Mersin University”, IV. International Workshop on Electromagnetic Wave Scattering, Gebze, 18-22 Eylül 2006 (sözlü)
Yiğit, E., Demirci, Ş., Özdemir, C., “Ground Penetrating Radar Image Focusing using Frequency-Wavenumber based Synthetic Aperture Radar Technique“ International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Torino, İTALYA, 17-21 Eylül 2007 (sözlü)
Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler.
Özdemir, C., Demirci, Ş., Yiğit, E. , “B-Tarama Yere Nüfuz Eden Radar Görüntüleri için bir Odaklama Algoritması,” URSI-TÜRKİYE’2006 Bilimsel Kongresi, s. 244-246, Ankara, 06-08 Eylül 2006 (sözlü)
Yiğit, E. , Özdemir, C., Demirci, Ş., “Bir Yapay Açıklıklı Radar Tekniği ile Odaklanmış Yere Nüfuz Eden Radar Görüntülerinin Ede Edilmesi,” URSI-TÜRKİYE’2006 Bilimsel Kongresi, s. 229-231, Ankara, 06-08 Eylül 2006 (sözlü)
Yiğit, E. , Özdemir, C., Demirci, Ş., “3-Boyutlu C-Tarama Görüntülerinin Elde Edilmesi,” Elektr., Elektron. ve Bilgisayar Müh. Semp., ELECO ‘2006, Bursa (2006) (sözlü)

5. Projeler:

Özdemir, C., Yeni Bir ‘Yere Nüfuz Eden Radar (YNR)’ Algoritması için Deney Düzenineğin Oluşturulması, Saha Uygulamaları ve 3 Boyutlu Gerçek YNR Görüntülerinin Elde Edilmesi, TÜBİTAK, Proje No: EEEAG-104E085, 2005 (Araştırmacı)
Cabolat, H., "Tahılların iç neminin ölçülmesini sağlayacak bir cihazın tasarlanması ve Türkiye'ye özgü bazı buğdayların öz dielektrik katsayılarının tespit edilmesi", Mersin Ü.BAP. 2007, (Araştırmacı)

6. Ödüller

URSI Türkiye 2006 konferansında, TUBİTAK tarafından verilen " Başarılı Öğrenci Bildirisi ", ödülü.

7. Aktif Görev Aldığı Sempozyum, Konferans Ve Kongreler

YEKSEM 2005 III. Ulusal Yenilebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 19 – 21 Ekim 2005, Me. Ü., Mersin, Türkiye. (Yürütme kurulu üyesi)
Nükleer Enerji Sempozyumu, 19-21 Ekim 2007, Mersin Üniv., Mersin, Türkiye. (Yürütme Kurulu üyesi)