

**DUVAR ARKASINDAKİ SABİT VE HAREKETLİ HEDEFLERİN
TESPİT EDİLMESİ İÇİN ULTRA GENİŞ BANTLI RADAR
TASARIMI, PROTOTİPİNİN GERÇEKLENMESİ VE RADAR
GÖRÜNTÜLERİNİN ELDE EDİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

BETÜL YILMAZ

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MERSİN
OCAK- 2017**

**DUVAR ARKASINDAKİ SABİT VE HAREKETLİ HEDEFLERİN
TESPİT EDİLMESİ İÇİN ULTRA GENİŞ BANTLI RADAR
TASARIMI, PROTOTİPİNİN GERÇEKLENMESİ VE RADAR
GÖRÜNTÜLERİNİN ELDE EDİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

BETÜL YILMAZ

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

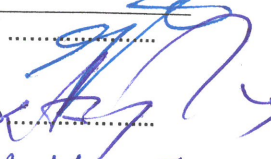

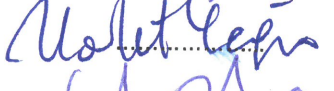
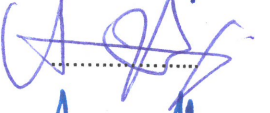
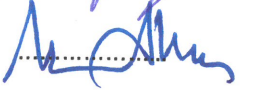
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**Danışman
Prof. Dr. Caner ÖZDEMİR**

**MERSİN
OCAK- 2017**

ONAY

Betül YILMAZ tarafından Prof. Dr. Caner ÖZDEMİR danışmanlığında hazırlanan “Duvar Arkasındaki Sabit ve Hareketli Hedeflerin Tespit Edilmesi İçin Ultra Geniş Bantlı Radar Tasarımı, Prototipinin Gerçeklenmesi ve Radar Görüntülerinin Elde Edilmesi” başlıklı bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Görevi	Ünvanı, Adı ve Soyadı	İmza
Başkan	Prof. Dr. Caner ÖZDEMİR	
Üye	Prof. Dr. Ali AKDAĞLI	
Üye	Prof. Dr. Korkut YEĞİN	
Üye	Yrd. Doç. Dr. Ali YILDIZ	
Üye	Yrd. Doç. Dr. Murat AKSOY	

Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03.02.2017 tarih ve 2017.06/249 sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Ayla ÇELİK
Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

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

ETİK BEYAN

Mersin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğinde belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Tezin içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak kullandığımı,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı
- Bu tezin herhangi bir bölümünü Mersin Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı
- Tezin tüm telif haklarını Mersin Üniversitesi'ne devrettiğimi

beyan ederim.

ETHICAL DECLARATION

This thesis is prepared in accordance with the rules specified in Mersin University Graduate Education Regulation and I declare to comply with the following conditions:

- I have obtained all the information and the documents of the thesis in accordance with the academic rules,
- I presented all the visual, auditory and the written informations and results in accordance with scientific ethics,
- I refer in accordance with the norms of scientific works about the case of exploitation of others' works,
- I used all of the referred works as the references,
- I did not to any tampering in the used data,
- I did not present any part of this thesis as an another thesis at Mersin University or another university,
- I transfer all copyrights of this thesis to the Mersin University.

23 Ocak 2017 / 23 January 2017


İmza / Signature


Öğrenci Adı Soyadı / Student Name and Surname

ÖZET

DUVAR ARKASINDAKİ SABİT VE HAREKETLİ HEDEFLERİN TESPİT EDİLMESİ İÇİN ULTRA GENİŞ BANTLI RADAR TASARIMI, PROTOTİPİNİN GERÇEKLENMESİ VE RADAR GÖRÜNTÜLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Bu tez çalışmasında, duvar arkasındaki sabit ve hareketli hedeflerin yerini tespit etmeye ve radar görüntülerini elde etmeye yönelik 3 adet algoritma sunulmuştur. Algoritmalar, problem geometrisi ile birlikte formülasyon detayları ile birlikte verilmiştir. Yöntemlerin doğruluğu ilk olarak varsayımsal bir hedefin simüle edilmesi ile incelenmiştir. Sonrasında algoritmalar, Ultra Geniş Bant (UWB) alıcı-verici sistemi ile tuğla duvarın arkasında gerçekleştirilen bir ölçümle elde edilen gerçek veriler ile test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, algoritmaların duvarın arkasındaki hareketli ve sabit bir hedefin doğru konumlarını ve radar görüntülerini başarıyla tespit ettiğini göstermektedir. Tez çalışmasının bir başka çalışması duvar arkasındaki hedefleri algılayan ve görüntüleyen özgün bir radar sensörü tasarımı ve prototipinin gerçekleştirilmesidir. Radar sensörü, Vivaldi anten elemanlarının doğrusal bir dizisinden, bir radyo frekansı (RF) anahtarından, bir mikro denetleyici biriminden ve bir RF alıcı vericisinden oluşmuştur. Yalnızca uzayındaki çözünürlüğü iyileştirmek için bu uzayda yapay açıklıklı radar (YAR) konfigürasyonunda sensörler olarak toplam sekiz anten elemanı kullanılmıştır. Vivaldi anten elemanlarının tasarım aşamaları ve 8'li doğrusal anten dizisi yapısı ayrıntıları ile sunulmuştur. Tasarımdan sonra, radar sensörünün prototipi için tüm aşamalar ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Duvar arkası radar (DAR) görüntüleme deneyleri, hareketsiz ve hareketli hedefler için geliştirilen radar sensörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Radar görüntüleri elde edilirken, ham görüntülerin sinyal / gürültü oranını (SGO) artırmak için geriye izdüşüm algoritması (GİA) emplemente edilmiştir. Oluşturulan radar görüntüleri, radar sensörünün duvarın arkasındaki hareketsiz ve hareketli hedefleri başarıyla tespit edebildiğini ve görüntüleyebildiğini göstermiştir. Ayrıca, göçük altında hareketsiz duran bir hedefin yaşamsal verilerinin tespit edilmesi amacıyla yönelik deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, duvar arkasında hareketsiz duran bir kişinin solunum ve kalp atışlarının tespit edilmesine yönelik deneysel çalışmalar yapılarak başarılı sonuçlar elde edilerek sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Duvar Arkası Radar Görüntüleme, Geriye İzdüşüm Algoritması, Vivaldi Dizi Anten, Radar Sensör, Multistatik Görüntüleme Algoritması

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

ABSTRACT

DESIGN OF ULTRA WIDE BAND RADAR FOR DETECTING STATIONARY AND MOVING TARGETS THROUGH THE WALL, IMPLEMENTATION OF PROTOTYPE AND OBTAINING RADAR IMAGES

In this thesis, three new and effective algorithms to localize and obtain radar images of a stationary and moving target behind the wall are introduced. The problem geometry together with the formulation details of the algorithms are given. Accuracies of the methods are first surveyed by simulating hypothetical targets. Then, the algorithms are tested with real data gathered from a measurement that are accomplished behind the brick wall with an ultra wide band (UWB) transceiver system. Through the wall radar (TWR) imaging results show that algorithms successfully detect the exact locations of moving and stationary targets behind the wall and corresponding radar images are constructed. After, a novel radar sensor that is designed and prototyped to detect and image stationary or moving objects/targets through the wall is presented. This radar sensor is composed of a linear array of Vivaldi antenna elements, a radio frequency (RF) switch, a microcontroller unit, and an RF transceiver. For the linear array, a total of eight antenna elements are used as sensors in synthetic aperture radar (SAR) configuration in the cross-range direction to improve the resolution along this dimension. Design steps of Vivaldi antenna elements and the entire linear array are presented. The prototyping procedure and the details of the radar sensor are given. TWR imaging experiments are performed for stationary and moving targets using the assembled sensor. During the image formation, a back-projection focusing algorithm is implemented and applied to increase the signal-to-noise ratio of the raw images. The constructed radar images demonstrated that our radar sensor could successfully detect and image both stationary and moving targets behind the wall. In addition, some experiments are performed for detecting life symptoms of a stationary target under the collapsed structure. For this goal, the heartbeat and breathing behaviours of a stationary human behind the wall are gathered and presented with good fidelity.

Key Words: Through the Wall Radar Imaging, Back-Projection Algorithm, Vivaldi Array Antenna, Radar Sensor, Multistatic Imaging Algorithm

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

TEŞEKKÜR

Tez alıőmam sűresince, deneyimleri ile her tűrlű desteęini eksik etmeyerek alıőmalarımın tamamlanmasında emeęi geen deęerli hocam Sayın Prof. Dr. Caner ŐZDEMİR'e bűtűn minnettarlıęımda teőekkűrlerimi sunarım. Tűm eęitim hayatım boyunca beni her zaman destekleyen aileme, sevgili eőim Savaő YILMAZ'a ve hayatıma yeniden anlam katan canım ikiz evlatlarım Zeynep YILMAZ ve Yusuf Burak YILMAZ'a gűsterdikleri sabır ve ilgiden dolayı çok teőekkűr ediyorum. Ayrıca, bu tezin farklı aőamalarında katkılar saęlayan deęerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Ali AKDAęLI, Prof. Dr. Korkut YEęİN, Prof. Dr. Adnan KAVAK, Yrd. Doç. Dr. Ali YILDIZ, Yrd. Doç Dr. Murat AKSOY'a ve yine arkadaőlarım Mustafa Berkan BİÇER, Hakan IŐIKER ve Volkan YAMAÇLI'ya desteklerinden űtűrű teőekkűrlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	ii
ONAY	iii
ETİK BEYAN	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR ve SİMGELER	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	4
2.1. Radar Görüntüleme Teknolojisi	4
2.2. Duvar Arkası Radar Görüntüleme	6
2.2.1. Amaç ve Uygulamalar	7
2.2.2. Güncel Çalışmalar	8
2.3. Radar Görüntüleme Algoritmaları	10
2.3.1. Odaklama Algoritmaları	10
2.3.2. Ters Problem	12
3. MATERYAL ve YÖNTEM	14
3.1. Özgün Görüntüleme Algoritmalarının Geliştirilmesi	15
3.1.1. Elipsler Kesişimi Algoritması	15
3.1.2. Multistatik Konum Belirleme Algoritması	18
3.1.3. Duvar Arkası Geriye İzdüşüm Algoritması (GİA) İmplementasyonu	23
3.2. Duvar Arkası Radar Ölçüm Sistemlerinin Oluşturulması	26
3.2.1. Zaman Uzayında DARG Ölçüm Sisteminin Oluşturulması	27
3.2.2. Frekans Uzayında DARG Ölçüm Sisteminin Oluşturulması	38
3.2.3. Doğrusal Dizi DAGR Ölçüm Sisteminin Tasarlanması Ve Üretiminin Gerçekleştirilmesi	42
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	64
4.1. Benzetim Çalışmaları	64
4.1.1. Elipsler Kesişimi Algoritması Benzetimi	64
4.1.2. Multistatik Konfigürasyona Dayalı Konum Tespiti Algoritması Sonuçları	68
4.1.3. Duvar Arkası Geriye İzdüşüm Algoritması Benzetimi	75
4.2. Deneysel Çalışmalar	77
4.2.1. Duvar Arkası Solunum Ve Kalp Atışı Tespitine Yönelik Deneysel Çalışmalar	78
4.2.2. Elipsler Kesişimi Algoritması Deneyleri	83
4.2.3. Multistatik Konfigürasyona Dayalı Duvar Arkası Konum Tespiti Algoritması Deneyleri	91
4.2.4. Duvar Arkası Geriye İzdüşüm Algoritması Deneyleri	98
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	112
KAYNAKLAR	115
ÖZGEÇMİŞ	125

TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. GZ1118GN-01EV [32] darbe üretici spesifikasyonları.	28
Tablo 3.2. Zaman uzayı radar sistemi GZ6E [32] spesifikasyonları.	31
Tablo 3.3. AUDXL-A ve AUDXL [32] anten spesifikasyonları.	34
Tablo 3.4. Tasarlanan Vivaldi anten elemanının ölçüleri.	44
Tablo 3.5. RF anahtarlama elemanının spesifikasyonları [122].	58
Tablo 3.6. RF anahtarlama elemanının Kontrol Tablosu [122].	59
Tablo 4.1. Frekans uzayı 8'li monostatik anten konfigürasyonu statik noktasal hedef için Gİ algoritması benzetim parametreleri.	75



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Duvar arkası radar görüntüleme uygulama örnekleri: (a) Bina içi gözetim (b) Rehine kurtarma operasyonu (c) Göçük altı yaşamsal bulguların tespiti (d) Yangın anında kurtarma operasyonu [68,69].	8
Şekil 2.2. Noktasal hedef odaklama uzayları.	11
Şekil 3.1. Elipslerin kesişimine dayanan algoritmanın multistatik konfigürasyonda konumlandırma geometrisi.	2B 16
Şekil 3.2. Duvar arkası multistatik konfigürasyon için önerilen algoritma geometrisi.	19
Şekil 3.3. r_1 ve r_2 için açıklayıcı geometrik yaklaşım.	23
Şekil 3.4. GİA için DARG geometrisi.	25
Şekil 3.5. Zaman uzayında duvar arkası radar görüntüleme sistemi.	27
Şekil 3.6. GZ1118GN-01EV [32] darbe üreticisi.	29
Şekil 3.7. (a) GZ1118GN-01EV [32] üretilen çıkış sinyali (b) spektrumu.	29
Şekil 3.8. GZ6E [32] dijital örnekleme dönüştürücüsü.	30
Şekil 3.9. GZ6E dijital dönüştürücü tarafından alınan geri yansıyan sinyal örneği.	32
Şekil 3.10. (a) Geozondas GZ0126 DRH [32] Çift sırtlı boynuz anten (b) Geozondas AUDXL-A (aktif anten) ve AUDXL (pasif antenler) [32] (c) 3-5 GHz frekans bandında çalışan tasarım boynuz anten (d) 2-8 GHz frekans bandında çalışan tasarım çift sırtlı boynuz anten.	35
Şekil 3.11. S11 ölçüm sonuçları (a) Geozondas GZ0126 DRH [32] Çift sırtlı boynuz anten (b) Geozondas AUDXL-A (aktif anten) ve AUDXL (pasif antenler) [32] (c) 3-5 GHz frekans bandında çalışan tasarım boynuz anten (d) 2-8 GHz frekans bandında çalışan tasarım.	38
Şekil 3.12. Frekans uzayında DARG deneysel ölçüm düzeneği.	39
Şekil 3.13. Zaman frekans düzleminde AFSD sinyali.	40
Şekil 3.14. Agilent ENA5071B VNA [113].	41
Şekil 3.15. Vivaldi anten elemanı geometrisi (a) üst katman (b) alt katman.	44
Şekil 3.16. CST® [112] programında tasarlanan Vivaldi anten elemanının (a) üst katman (b) alt katman görüntüsü.	46
Şekil 3.17. (a) Vivaldi anten elemanının LPKF [121] cihazı ile üretim aşaması (b) Üretilen antenin ön ve arka yüzeyleri.	47
Şekil 3.18. (a) Üretilen Vivaldi anten elemanının Agilent VNA ile S11 parametresinin ölçümü, (b) S11 parametresinin benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.	48
Şekil 3.19. Tasarlanan Vivaldi antenin (a) kutupsal gösterimde E-düzlem radyasyon paterni @ $\theta=0^\circ$ (b) kutupsal gösterimde H-düzlem radyasyon paterni @ $\theta=90^\circ$ (c) 6 GHz de E-düzlem 3B ışımaya paterni.	49
Şekil 3.20. DARG sensör blok diagramı.	51
Şekil 3.21. 8'li Vivaldi anten dizisi tasarımı.	52
Şekil 3.22. Alüminyum kutu içerisine yerleştirilmiş 8'li doğrusal Vivaldi anten dizisi.	53
Şekil 3.23. Alüminyum kutu içerisine yerleştirilmiş olan doğrusal anten dizisinin (a) 8 anten elemanı için frekansa karşın S11 sonuçları (b) 4. Anten elemanının diğer anten elemanlar ile arasındaki kuplaj etkisi; S14 sonuçları (c) karşılaştırma CST&Ölçüm.	55
Şekil 3.24. Tasarlanan 8'li doğrusal Vivaldi anten dizisinin soldan 4. Anten elemanı için (a) kutupsal gösterimde E-düzlem radyasyon paterni @ $\theta=0^\circ$ (b) kutupsal gösterimde H-düzlem radyasyon paterni @ $\theta=90^\circ$ (c) 6 GHz de E-düzlem 3B ışımaya paterni.	56
Şekil 3.25. A-INFO Reflective SP8T [122] RF anahtarlama elemanı.	57
Şekil 3.26. Kalibrasyon işlemi : Kırmızı düz çizgi; kalibrasyonsuz S11 ölçüm sonucunu, mavi düz çizgi kalibrasyon kiti ile alınan cevabı ve eflatun rengi kalibrasyonsuz dataya denklem (3.28) uygulanmış sonucu.	60
Şekil 3.27. Arduino Mega 2560 ile sıralı LED yakma işlemi.	61

Şekil 3.28. (a) RF anahtarlama ve Arduino için gerekli olan $\pm 5V$ çalışma voltajı devresi (b) DARG için hazırlanan güç kaynağı, Arduino ve RF anahtarlama elemanı.	62
Şekil 3.29. DARG de kullanılan yüksek frekanslı SMA kabloları.	62
Şekil 3.30. Prototip DARG sensör fotoğrafı.	63
Şekil 4.1. Elipsler kesişimi algoritması benzetim senaryosunun geometrisi.	65
Şekil 4.2. (a) Alıcı anten $Rx1$ tarafından toplanılan bistatik 2B menzil-zaman grafiği ve (b) alıcı anten $Rx2$ tarafından toplanılan bistatik 2B menzil-zaman grafiği.	66
Şekil 4.3. Farklı zaman anlarında noktasal saçıcının farklı konumlarda iken $Tx - Rx1$ ve $Tx - Rx2$ odak noktalarının oluşturmuş olduğu elips eğrileri: kırmızı kesik çizgi $Tx - Rx1$, mavi kesik çizgi $Tx - Rx2$ den kaynaklı ve bu eğrilerin kesişim noktaları.	67
Şekil 4.4. Noktasal saçıcı hedefi için $t=0$ sn ve $t=10$ sn aralığında 18 farklı konum için konumsal bilgileri: siyah boş daireler benzetim gerçek konum değerlerini ve pembe artı simgesi uygulanan algoritma sonucu elde edilen konumsal bilgiyi vermektedir.	68
Şekil 4.5. Multistatik görüntüleme algoritması için DARG geometrisi.	69
Şekil 4.6. Bistatik menzil profilleri; farklı zaman aralıklarındaki t_1 den t_{20} (a) alıcı 1 için (b) alıcı 2 için.	70
Şekil 4.7. Farklı anlık zaman görüntülerine karşın, (a) r_0 (b) \emptyset değerleri.	71
Şekil 4.8. (a) Algoritma sonrası elde edilen silindirik koordinatlarda ki konumlarını (b) hedefin gerçek konumlarını ve algoritma sonrası elde edilen konumlarını göstermektedir.	72
Şekil 4.9. Algoritma sonrasında hedefin çeşitli konumları: kırmızı daireler gerçek konumları, siyah artı simgesi tahmini konumları temsil etmektedir.	73
Şekil 4.10. (a) Radyal yüzde hata haritası (b) radyal mesafe ve bakış açısına göre açısız yüzde hata haritası.	74
Şekil 4.11. (a) Menzil profili (b) GİA algoritması ile elde edilen odaklanmış görüntü.	77
Şekil 4.12. Kalp atışı ve solunum hareketini tespit etmeye yönelik (a) Deney çalışmasının geometrisi (b) Deney anından bir fotoğraf karesi.	79
Şekil 4.13. Duvar arkası nefes alan kişinin radar görüntüleri (a) 2B menzil-zaman ekseninde hedefin farksal nefes alıp verme grafiği, (b) 45 cm mesafeye tekabül eden hedefin soluk alıp verme şiddetlerini gösteren 1B menzil profilinden kesit.	80
Şekil 4.14. Duvar arkası kalp atışı radar görüntüleri (a) 2B menzil-zaman ekseninde hedefin farksal kalp atış grafiği, (b) 45 cm mesafeye tekabül eden hedefin kalp atış hareketinin 1B menzil profilinden kesit.	82
Şekil 4.15. (a) Deney çalışması geometrisi: Anten konfigürasyonları ve adam hedefinin duvardan uzaklaşarak ve duvara doğru olan yürüme hareketi (b) deney de kullanılan DARG ölçüm düzeneği.	85
Şekil 4.16. Deney çalışmasından farklı zaman anlıklarındaki fotoğraf kareleri.	86
Şekil 4.17. (a) Alıcı anten 1, $Rx1$ tarafından toplanılan ham 2B menzil-zaman verisi (b) Alıcı anten 2, $Rx2$ tarafından toplanılan ham 2B menzil-zaman verisi.	87
Şekil 4.18. (a) Alıcı anten 1, $Rx1$ tarafından toplanılan farksal 2B menzil-zaman verisi (b) Alıcı anten 2, $Rx2$ tarafından toplanılan farksal 2B menzil-zaman verisi.	88
Şekil 4.19. Hedefin, elipslerin kesişimi yöntemi ile elde edilen farklı zaman anlardaki konum bilgisi	89
Şekil 4.20. Algoritma sonrası adamın yürüme hareketinin $t=5.8$ sn ve $t=17.05$ sn arasındaki 2B menzil - yanca uzaylarındaki konum bilgisi.	90
Şekil 4.21. (a) Hareketli hedef için deneysel ölçüm düzeneği geometrisi, (b) Deney düzeneği fotoğrafı.	92
Şekil 4.22. (a) Ölçüm geometrisi: Hedef kişinin duvara doğru ve duvardan uzaklaşan geometrisi (b) Deney sürecinden anlık bir fotoğraf.	93
Şekil 4.23. (a) Alıcı 1 ve Alıcı 2 tarafından toplanan veri setlerinin menzil-zaman ham data görüntüleri (b) ham data verilerinin işlenmiş menzil-zaman görüntüleri.	95
Şekil 4.24. Algoritma sonrası yürüyen adamın farklı zaman aralıklarındaki elde edilen konumları.	97

Şekil 4.25. (a) Sabit hedef deneyi için deney geometrisi, (b) hedef olarak kullanılan 3 metal boru ve (c) deney anından bir fotoğraf karesi.	99
Şekil 4.26. Arkaplan çıkarımı sonrası filtrelenmiş menzil profili.	100
Şekil 4.27. GİA uygulaması sonrası elde edilen boru hedeflerinin odaklanmış radar görüntüsü.	101
Şekil 4.28. (a) Ham 2B menzil-zaman grafiği (b) İşlenmiş 2B menzil-zaman grafiği.	103
Şekil 4.29. (a) Duvar arkası yürüyen adamın ilk turu için GİA uygulaması sonrası ilk turunun radar görüntüleri (b) ikinci turunun radar görüntüleri.	105
Şekil 4.30. (a) Hareketli hedef deneyinin geometrisi (b) deney ortamından bir fotoğraf kesiti.	107
Şekil 4.31. Doğrusal anten dizisi yapısındaki herbir anten için ham 2B menzil-zaman grafiği.	109
Şekil 4.32. Doğrusal anten dizisi yapısındaki herbir anten için farksal 2B menzil-zaman grafiği.	110
Şekil 4.33. Geriye izdüşüm algoritması uygulanması sonrası duvar arkası hareket eden kişinin duvara doğru ve duvardan uzaklaşan hareketinin odaklanmış radar görüntüleri.	111



KISALTMALAR ve SİMGELER

Kısaltma/Simge	Tanım
ϵ_r	Dielektrik geçirgenlik
d_{kayma}	Kayma miktarı
Tx	Gönderici anten
Rx_1	Alıcı anten 1
Rx_2	Alıcı anten 2
$D/2$	Gönderici ve alıcı anten arasındaki mesafe
r_0	Tx den hedefe olan uzaklık ; elipsler kesişim yöntemi alg.
r_1	Rx_1 den hedefe olan uzaklık ; elipsler kesişim yöntemi alg.
r_2	Rx_2 den hedefe olan uzaklık ; elipsler kesişim yöntemi alg.
$2a$	Yatay-asal eksen
a_1	$Tx - Rx_1$ elipsi için yarı-asal eksen uzunluğu
a_2	$Tx - Rx_2$ elipsi için yarı-asal eksen uzunluğu
b_1	$Tx - Rx_1$ elipsi için yarı-küçük eksen uzunluğu
b_2	$Tx - Rx_2$ elipsi için yarı-küçük eksen uzunluğu
$P(x_0, y_0)$	Noktasal saçıcı hedef konumu
\circ	Hadamard çarpım operatörü; Matrislerin eleman-eleman çarpımı işlemi
\emptyset_0	$P(x_0, y_0)$ noktasının x eksenine göre silindirik koordinatdaki açı bilgisi
h	Duvar kalınlığı
k	Dalga numarası
f	Frekans
v	EM dalganın yayılım ortamındaki hızı
$E_{S_1}(k)$	Rx_1 tarafından toplanan geri saçılım elektrik alan datası
$E_{S_2}(k)$	Rx_2 tarafından toplanan geri saçılım elektrik alan datası
$IP(k)$	Eş-faz terimi
$CP(k)$	Eşlenik-faz terimi
$E_s(t, y)$	Zaman uzayı geri saçılım elektrik alan verisi
M	Zamandaki örnekleme sayısı
dt	Örnekleme aralığı
BG	Bant-genişliği
$E_s(k, y)$	Frekans uzayı geri saçılım elektrik alan verisi
$E_s(r, y)$	Geri saçılım elektrik alan verisi menzil profili
ϑ	Bakış açısı

$S_{\vartheta}(k_r)$	Toplanmış olan uzaysal frekans datası
$s_{\vartheta_m}(r)$	Farklı bakış açılarında $S_{\vartheta}(k_r)$ TFD alınması
r_m	Görüntü penceresindeki pikseller için uzaklık bilgisi
$\rho_{\vartheta_m}(r_m)$	Her piksel için r_m mesafesine göre yansıtırlık değerleri
$e(x, y)$	Tüm yansıtırlık değerlerinin oluşturduğu matris verisi
S_{11}	Yansıma katsayısı
B	Bant genişliği; AFSD sinyali için
Δf	Frekans çözünürlüğü
τ	Darbe süresi
T	Darbe periyodu
R_0	Radardan hedefe olan uzaklık, AFSD sinyali için
E_s	Saçılan elektrik alanı; AFSD sinyali için
A	Saçılan alan genliği
Δ_r	Menzil çözünürlüğü
BW_k	Dalga numarası bant genişliği
BW_f	Frekans uzayı bant genişliği
R_{max}	Maksimum menzil mesafesi
σ_1	EM yansıma katsayısı; alıcı anten 1 için
σ_2	EM yansıma katsayısı; alıcı anten 2 için
$E_{S_1}(k, \zeta)$	Geri saçılan elektrik alan ifadesi; Elips yöntemi benzetimi
$E_1^S(k, \tau)$	Geri saçılan elektrik alan ifadesi; Multistatik alg. yöntemi benzetimi
δr	Menzil çözünürlüğü; GİA algoritması deneysel ölçüm sonucu
EAR	Engel arkası radar
DAR	Duvar arkası radar
UGB	Ultra geniş bant
GİA	Geriye izdüşüm algoritması
YAR	Yapay açıklıklı radar
PPG	Plan pozisyon göstergesi
EM	Elektromanyetik
2B	İki boyutlu
1B	Bir boyutlu
TYAR	Ters yapay açıklıklı radar
ENYAR	Enterferometrik YAR
POLYAR	Polarimetrik YAR

YNR	Yere nüfuz eden radar
DARG	Duvar arkası radar görüntüleme
AFSD	Adım frekanslı sürekli dalga
ÇGÇÇ	Çoklu giriş çoklu çıkış
ÇSSA	Çoklu sinyal sınıflandırma algoritması
SA	Sıkıştırılmış algılama
DA	Değişim algılama
SGO	Sinyal gürültü oranı
FD	Fourier dönüşümü
FFT	Hızlı Fourier dönüşümü
TFD	Ters Fourier dönüşümü
DTF	Darbe tekrarlama frekansı
VSWR	Voltaj duran dalga oranı
HPBW	Yarı güç bant genişliği
VNA	Vektör network analizör
KYVA	Konik yuvalı vivaldi anten
YLS	Yan lob seviyesi
MEİTAM	Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim, Araştırma ve Uygulama Merkezi

1. GİRİŞ

Son yıllarda dünyada güvenlik sorunlarının artması ve genel olarak yurttaş güvenliğini tehdit eden eylemlerin artması, bu konuda yeni teknolojilerin kullanılması gerekliliğini de beraberinde getirmiştir. Özellikle güvenlik kontrol noktaları, havaalanı, tren garı, alışveriş merkezleri gibi yoğun insan hareketinin bulunduğu bölgelerde kötü niyetli insanlara belli etmeden onların hareketliliğinin tespit edilmesi ve bu insanların izlenmesi güvenli bir dünya için önem arz etmektedir. Bu probleme etkin bir çözüm getirebilecek en önemli uygulamalardan biri de radar görüntüleme teknolojileridir [1-4]. Radar görüntüleme teknikleri, dünya yüzeyinin elektromanyetik haritalarının çıkarılmasından (sentetik açıklıklı radar, enterferometrik radar vb.), indan vücudundaki tümörlerin tespit (manyetik görüntüleme, mikrodalga görüntüleme vb.) edilmesine kadar sayısız yararlı uygulamada yoğun olarak kullanılmaktadır [5-16].

Özellikle son 10-15 yılda, arka bölgesinin gözle görülmesi mümkün olmayan opak ortamların ötesindeki sabit ve hareketli nesne ve canlıların gözlemlenmesi amacıyla radar teknolojileri ve radar görüntüleme algoritmaları kullanılmaya başlanmış ve her geçen gün bu teknikleri kullanan uygulamaların sayısı artmaktadır [17-23]. Bu teknolojiler sadece rehine kurtarma ve/veya terörist eylemleri bertaraf etme gibi güvenlik uygulamalarında kullanılmamakta; aynı zamanda değişik afet olaylarında da insan ve canlı tespitinin ve görüntülenmesinin sağlanması gibi arama-kurtarma faaliyetlerinde oldukça faydalı uygulamalar olarak kullanılabilir. Bu uygulamalara örnek vermek gerekirse; deprem, toprak kayması, çığ düşmesi vb. gibi durumlarda göçük/toprak/kar altında kalan insan/canlıların tespit edilerek kurtarılması önemli uygulamalardan biridir. Diğer bir afet durumu olan yangın vakalarında, duman/alev/sis/pus arkasındaki insan/canlıların tespit edilmesi de yine önemli bir engel arkası radar (EAR) uygulamalarından bir tanesi olarak gösterilebilir [24-30]

Bu tez çalışmasında özellikle duvar arkasındaki sabit ve hareketli hedeflerin geliştirilecek olan özgün radar görüntüleme algoritmalarıyla tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaca uygun olarak aşağıdaki çalışmalar bu tez çalışmasının kapsamını oluşturmaktadır. Bir sonraki bölümde; yapılan kaynak araştırması ile duvar arkası radar (DAR) uygulamalarına yönelik yapılan önemli çalışmaların özeti verilmiş, söz konusu çalışmaların bu tez çalışmasına nasıl ışık tuttuğu, benzerlikleri ve farkları özetlenmiştir. Üçüncü bölümde sunulan materyal ve metod kısmında ise; bu tez çalışmasının başarıya ulaşabilmesi için kullanılan materyaller ve uygulanan metodlar listelenmiştir. Tez çalışmasında benzetim ortamı olarak MATLAB® [31] yazılım platformu kullanılmış, deney ortamı olarak Mersin Üniversitesi Yerleşkesinin farklı mekanları seçilmiştir. Donanım olarak ise frekans uzayı radar donanımı (Vektör Network Analizör ve ilgili ekipmanları), zaman-uzayı radar donanımı (Geozondas GZ6E alıcı/verici ünitesi ve diğer ekipmanları [32]),

değişik Ultra-Geniş Bant (UGB) araştırma antenleri, RF ekipmanlar, RF kablolar vb. malzemeler kullanılmıştır. Tezin başarıya ulaşabilmesi için aşağıda sırasıyla verilen metodoloji uygulanmıştır:

1. DAR uygulamaları için özgün radar odaklama algoritmalarının geliştirilmesi amacına hizmet etmek üzere bu tez çalışmasında toplam 3 adet özgün DAR odaklama/görüntüleme algoritması geliştirilmiştir. İlk olarak; tek verici anten – ikili alıcı anten geometrisinin geometrik pozisyonu baz alınarak geliştirilen ve iki farklı elipsin kesişimi sonucunda elde edilen hedef tespit algoritması sunulmuştur. Buradaki her bir elips, verici anten ve alıcı antenin bir tanesinin odak noktalarına oturduğu elipsi temsil etmektedir. İkinci olarak; yine tek anten – ikili alıcı anten radar geometrisi baz alınarak yeni bir hedef yerinin tespit edilmesi algoritması bu tez çalışması ile literatüre kazandırılmıştır. Bu algoritmada ise; her iki alıcı antenin toplamış olduğu sinyallerin faz bilgilerinin kullanılmasıyla; duvar arkasındaki hareketli hedefin hassas olarak tespit edilmesi incelenmiştir. Üçüncü olarak ise literatürde de yoğun olarak kullanılan ve performansı başarılı olarak kabul edilen geriye izdüşüm algoritması (GİA) [Back-projection Algorithm - BPA] [34-40], bu tez çalışmasında, yanca uzayında yaklaşık 1m açıklık oluşturacak şekilde ve aralarında eşit uzaklık bulunan monostatik düzende sekizli dizi anten konfigürasyonunda elde edilen frekans verilerine ve zaman uzayı radar sinyalleri kullanılarak tek verici anten – ikili alıcı anten geometrisine göre emplemente edilmiştir. Bu algoritmalar tezin üçüncü bölümünde ayrıntılı olarak paylaşılmıştır.
2. Bir sonraki aşamada geliştirilen odaklama/görüntüleme algoritmaları mükemmel ortam ve durumların simüle edildiği benzetim çalışmalarıyla test edilmiştir. Bu amaçla her bir algoritma, MATLAB® [31] programlama platformunda kurgulanan farklı DAR senaryolarına göre benzetimlere tabii tutulmuştur. Bu benzetimlerle her bir algoritmanın hedef tespit ve görüntüleme başarımı izlenmiş ve nesnel hata analiz hesapları ile algoritmaların performansları raporlanmıştır. Bu aşamanın başarılı bir şekilde sonuçlandırılması, gerçek DAR görüntüleme deneylerine geçilebilmesi için önem arz etmektedir. Algoritmaların benzetim senaryolarındaki oluşturulan hedefleri başarılı bir şekilde tespit etmesi ve görüntüleyebilmesi neticesinde bir sonraki adıma geçilmiştir.
3. Üçüncü aşamada, gerçekleştirilecek deneyler öncesinde gerekli donanımlar temin edilmiş ve sonrasında ölçüm düzenekleri kurulmuştur. İlk olarak frekans-uzayı radar donanımı, zaman-uzayı radar donanımı, hedef nesnelere, alıcı ve verici olarak kullanacak antenler ve

diğer RF donanımları hazırlanmıştır. Bu tez çalışmasında, gerçekleştirilecek DAR deneylerinde kullanılmak üzere UGB-Vivaldi anten birimi tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu anten elemanı, yanca yönündeki çözünürlüğü arttırmak amacıyla sekizli doğrusal anten birimi tasarımı ve üretiminde kullanılmıştır. Bu doğrusal anten birimi, yine bu tez çalışmasında özgün olarak geliştirilen ve sonrasında da prototip imalatı gerçekleştirilen doğrusal dizili DAR duyargasının tasarımı ve üretiminde kullanılmıştır. Tüm deney ekipmanlarının hazırlanması, ölçüm deney düzeneklerinin gerçekleştirilmesi ve deney ortamlarının seçilmesinden sonra DAR gerçek deneylerine geçilmiştir.

4. Tezdeki araştırmanın dördüncü aşaması olarak; geliştirilen DAR tespit, odaklama ve görüntüleme algoritmaları gerçekleştirilen DAR deneyleriyle gerçek ortamlarda test edilmiştir. Bu amaçla, deneylerde Mersin Üniversitesi yerleşkesindeki duvar ortamları kullanılmıştır. GİA'nın uygulandığı deneylerde hem sabit hem de hareketli hedeflerin tespit edilmesi araştırılmıştır. Her üç algoritma için de duvar arkasında yürüyen insan hedefinin gerçek zamanlı olarak görüntülerinin çıkartılması için farklı deneyler gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerin problem geometrieleri paylaşılmış, fotoğrafları çekilmiş, deney parametreleri, deney kısıtları, deney sonucunda elde edilen verilerle elde edilen DAR görüntüleri raporlanmış, deney sonuçlarının olgusal yorumları yapılmıştır. Ayrıca, göçük altında hareketsiz duran bir hedefin yaşamsal verilerinin tespit edilmesine yönelik olarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler için sabit duran bir insan hedefinin nefes alıp vermesinin tespiti ve kalp atışlarının tespiti sağlanmıştır.

Yukarıda tezin ilerleme aşamalarında özetleri listelenen benzetim ve deneysel çalışmalarının ayrıntıları tezin dördüncü ve beşinci bölümünde verilmektedir. Tezin son bölümünde; yapılan çalışmalar özetlenmiş, bu tez çalışmasının literatüre sağlamış olduğu katkılar paylaşılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

2.1. Radar Görüntüleme Teknolojisi

Radar görüntüleme teknolojisi hem askeri hem de sivil alanda sayısız uygulamalarda kullanılan ve önemli avantajlar sunan en güncel teknolojilerden bir tanesidir. Askeri alanda İkinci dünya savaşı yıllarında ilk kez olarak kullanılmaya başlanılan plan pozisyon göstergesi (PPG, plan position indicator-PPI) radar görüntüleme ekranından, günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlanılan yapay açıklıklı radar (YAR, Synthetic Aperture Radar-SAR) görüntüleme uygulamalarına kadar yüzlerce radar görüntüleme tekniği yaygınlaşmış ve gün geçtikçe de bu tekniklerin farklı formları uygulamaya girmektedir [41-43]. Askeri alanda en önemli ve üst teknolojik radar görüntüleme tekniği şüphesiz YAR'dır. YAR, bir hava ya da uzay aracına faydalı yük olarak konulan YAR sensörü ve YAR anteninin, belirli bir sentetik açıklık boyunca yeryüzünün belirli bir bölgesinden elektromanyetik (EM) geri-saçılma verisinin toplanması ve bu verinin YAR sinyal/görüntü işleme algoritmalarıyla kıymetlendirilerek söz konusu yeryüzü topolojisinin EM görüntüsünün oluşturulmasıdır [44]. YAR radar görüntüsü genel olarak, yeryüzünün iki boyutlu (2B) EM yansıtırlık haritasını verir.

YAR teknolojisi, ilk olarak 1951 yılında Carl Wiley tarafından keşfedilmiş olup [45], takip eden yıllarda birçok alt uygulaması da farklı bilim insanları sayesinde oluşturulmuştur. Yine bu teknolojilerden en önemlilerinden biri olan ters yapay açıklıklı radar (TYAR, Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR) ise YAR geometrisinin bir ters problemi olarak ortaya çıkmıştır [46]. YAR geometrisinde, radar anteni havada ve hedef ise yeryüzü ya da yeryüzü üzerindeki nesnelere. ISAR geometrisinde ise, geometri tamamen tersine dönmüştür. TYAR geometrisinde, TYAR anteni yeryüzüne konuşturularak, havadaki hedeflerin (uçak, helikopter vb.) görüntülenmesi amaçlanmıştır.

YAR geometrisinden türeyen diğer önemli radar görüntüleme algoritmaları ise enterferometrik YAR (ENYAR, Interferometric SAR, INSAR) ve polarimetrik YAR (POLYAR, polarimetric SAR, POLSAR)'dır. Enterferometrik YAR görüntüleme tekniği, aynı yeryüzü bölgesinin, YAR sensörü konuşturulmuş olan hava/uzay platformunun tarafından farklı yükseklikteki farklı geçişlerinden sonra elde edilen çoklu geçiş geri-saçılma EM yansıtırlık verisinin kullanılmasıyla, üçüncü boyut olan yükseklik bilgisinin de elde edilmesi ve sonucunda da üç boyutlu (3B) YAR görüntülerinin elde edilmesini sağlamaktadır [47]. Bu sayede volkanlar, dağlar, buz dağları vb. yeryüzü şekillerinin 3B olarak radar görüntülerinin çıkarılması mümkün olabilmektedir [48, 49].

POLYAR görüntüleme yöntemi ise, yeryüzü EM saçılrlığının değişik polarizasyon durumlarına göre tepkisini almak ve bu tepkileri değerlendirerek, söz konusu bölgenin polarimetrik radar görüntülerini alma mantığına dayanmaktadır [50, 51]. Bu yöntemde, YAR anteninin göndermeç modunda iken radar sinyalinin dikey (D) ve yatay (Y) polarizasyonlarında iletmesi, alma modunda da yine D ve Y polarizasyonlarında sinyali toplaması sayesinde; görüntülenecek bölgenin tam polarizasyon tepkisi (DD, DY, YD ve YY) elde edilebilmektedir. Bu sayede, polarizasyona duyarlı hedeflerin görüntü bölgesinde nitelendirilebilmesi de mümkün olabilmektedir. POLYAR'ın en önemli uygulama alanlarından bir tanesi ziraattır. POLYAR sayesinde; hangi bölgelerde hangi tarım ürünlerinin ekildiği ile ilgili bilgi elde edilebilmektedir.

Radar görüntüleme algoritmalarının askeri alanda kullanılan en önemli uygulamalarından biri de DAR'dır [39, 52-55]. Bu tezin de konusu olan DAR teknolojisi, askeri alanda özellikle bina içerisindeki muhtemel terörist ya da düşman unsurlarının algılanması ve tespiti ve rehine kurtarma operasyonlarından, göçük altında kalan canlıların tespit ve görüntülenmesine kadar birçok uygulama alanında kullanılabilir. DAR ile ilgili daha ayrıntılı bilgi bu tezin ilerleyen kısımlarında paylaşılacaktır.

Radar görüntüleme teknikleri sivil alanda da kendisine birçok uygulama alanı bulmuştur. Bu tekniklerden en önemlileri YAR, DAR, yere nüfuz eden radar (YNR) sayılabilir. Sivil alanda YAR görüntüleme özellikle jeolojik uygulamalarda; yeryüzü topolojisinin belirlenmesi, volkan patlamaları, buzulların hareketlerinin gözlemlenmesi gibi problemlerde kullanılırken; ziraat alanında ekili ürünlerin tanımlanması, sınıflandırılması ve takibinde de kullanılmaktadır.

DAR ise, özellikle güvenlik amaçlı uygulamalarda kendini göstermektedir. Kolluk kuvvetlerinin rehine kurtarma operasyonları, havaalanı gibi güvenlik noktaları içeren bölgelerde insan hareketliliğinin gözlemlenmesi DAR için en önemli uygulamalardan birkaç tanesidir. DAR aynı zamanda, arama-kurtarma operasyonlarında da yoğun olarak kullanılabilir. Deprem, heyelan vb. durumlarda göçük altında kalan canlıların tespiti ve görüntülenmesi, yangın durumlarında sis, duman arkasındaki canlı hareketliliğinin tespiti ve izlenmesi; çığ düşmesi gibi felaketlerde kar altında mahsur kalan insanların tespit edilerek kurtarılması DAR'ın uygulandığı önemli uygulamalar olarak bilinmektedir.

Radar görüntüleme uygulamalarından en önemlilerinden biri de YNR'dir. YNR tekniği başlangıçta askeri amaçlarda kullanılmaya başlanmıştır [33, 56-60]. İlk olarak yere gömülü olan askeri mayınların tespit edilmesi ve yine yeraltındaki patlamamış mühimmatların algılanması amaçlarıyla yoğun olarak 30-40 seneyi aşkın süredir YNR ile ilgili araştırmalar devam etmekte her geçen gün yeni bir sistem/ürün dünyada kullanıma sunulmaktadır. YNR'in sivil uygulamalarında ise; toprak altında kalmış arkeolojik eserlerin tespit edilmesi ve görüntülenmesi, yer altındaki sığınak ve boşlukların tespit edilmesi, yeraltı su tesisat ve

borularında oluşan sıvı kaçaklarının tespit edilmesi sayılabilir [61]. YNR'in uygulama bulduğu diğer önemli bir problem de okyanus ve denizlerde oluşan benzin/mazot sızıntılarının tespitidir. Bu sorun özellikle Alaska gibi buz ve karın yoğun olduğu bölgelerde sızan petrol ürününün deniz suyu/buzu ile kar arasında kalması ve tespitinin görsel olarak mümkün olmadığı durumda YNR teknolojisinin bir hava taşıtı yardımıyla uygulanmasını içermektedir.

Yukarıda da kısa bir özet olarak verilen radar görüntüleme uygulamaları sayısız uygulama ile hayatımıza girmiş durumdadır. Önümüzdeki yıllarda da gelişen teknolojik imkanlar sayesinde; radar görüntüleme tekniklerin daha birçok alanda ve problemde uygulanacağı şüphe götürmeyen bir gerçek olacaktır.

2.2. Duvar Arkası Radar Görüntüleme

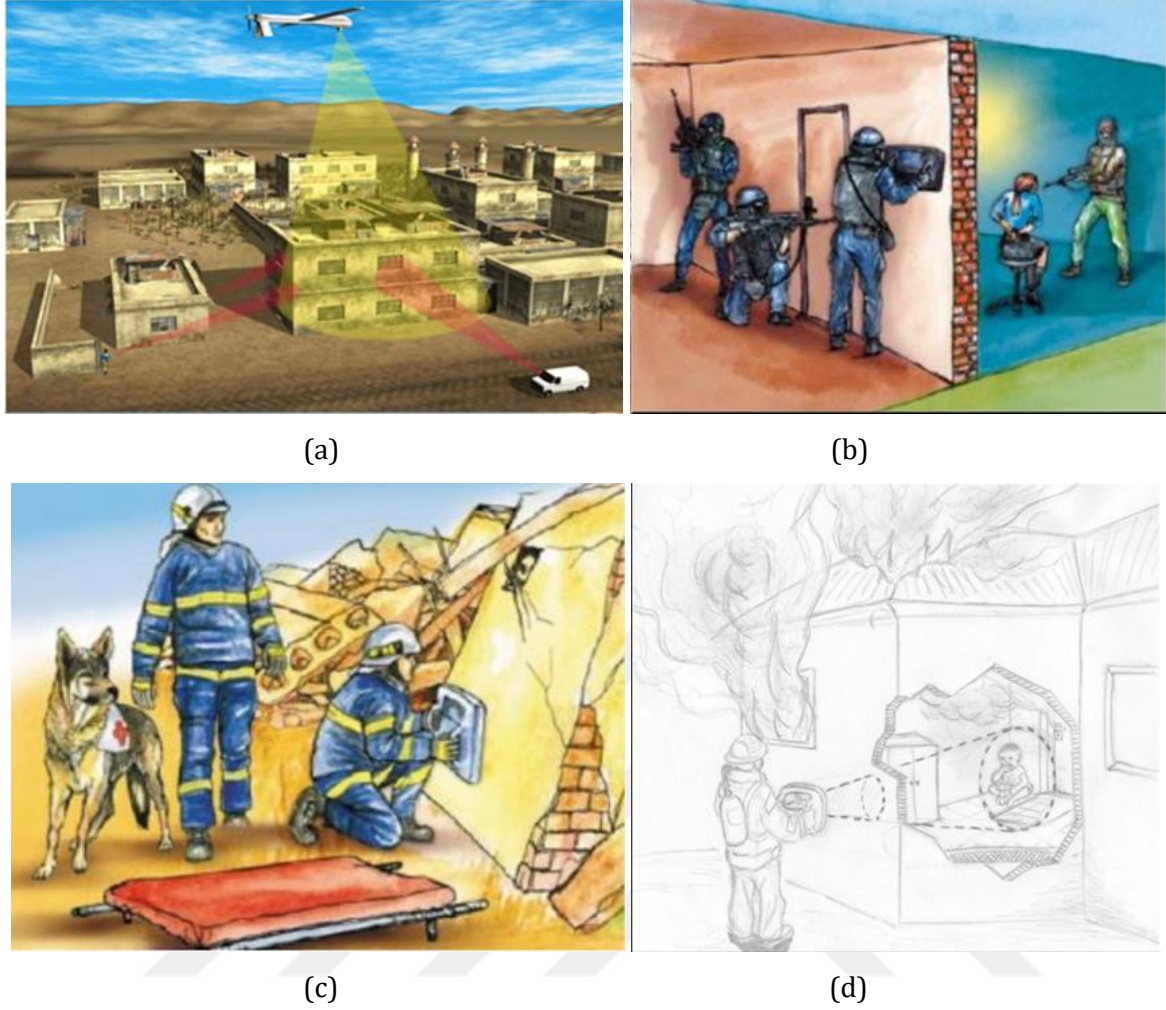
Duvar Arkası Radar Görüntüleme (DARG), duvar veya opak engellerin arkasında bulunan nesnelere veya insan hareketlerinin tespitinde ve görüntülenmesinde kullanılan ve gelişmekte olan bir teknolojidir. Bilindiği üzere UGB elektromanyetik dalgalar, duvar, toprak gibi opak malzemelere rahatlıkla nüfuz edebilmektedir [62]. Genel radar uygulamasında, verici antenden gönderilecek UGB elektromanyetik dalga engel arkasına nüfuz eder ve hedeften saçılma yapar. Saçılan elektromanyetik dalga tekrar engelden geçerek engelin önünde bulunan alıcı anten tarafından toplanır. Radar görüntüsü için gerekli olan menzile çözünürlüğü UGB sinyalin bant genişliğiyle sağlanır [63]. Zira, çözünürlük bant genişliği ile ters orantılıdır. Yüksek menzile çözünürlüğü radar görüntüleme için gerekli bir durumdur ve UGB sinyallerinin yüksek bant genişliği iyi bir menzile çözünürlüğü sağlayacaktır. DARG, birçok uygulama için olağan bir teknoloji olmasına rağmen, hala aşılması gereken birtakım zorlu problemler mevcuttur. EM dalganın duvardan geçerken ki zayıflama ve kırınımı DARG operasyonları için zorluklar oluşturan önemli olgulardır. Duvar kalınlığı ve malzeme yapısı, duvar malzemesinin fiziksel, elektriksel ve manyetiksel özellikleri de algılama ve/veya görüntülemenin başarısını etkileyen ve radar operatörü için bilinmeyen parametrelerdir. Ayrıca EM dalga radar alıcısına geri ulaşmak için duvardan iki kez geçmek zorundadır böylece alınan sinyalin enerjisi azalmış olmaktadır. Diğer önemli problem DARG'ın yanca uzayındaki çözünürlüğünün, bu yöndeki alıcı sayısının yetersiz olmasından dolayı düşük olmasıdır. Bu bölümde sırası ile bu tez çalışmasının asıl konusu olan duvar arkası radar görüntüleme amacı, uygulamaları ve literatür araştırmaları anlatılmıştır.

2.2.1. Amaç ve Uygulamalar

Bu çalışmada asıl hedeflenen; mikrodalga duvar/engel arkasındaki hareketli ve sabit hedeflerin radar teknolojileri kullanılarak tespit edilmesi ve radar görüntülerinin oluşturulmasıdır. Bu amaçla bu tez çalışmasında; çeşitli radar sinyalleri, Adım Frekanslı Sürekli Dalga (AFSD, Stepped Frequency Continuous Wave) ve Darbe (Impuls) [46] gibi dalga şekillerini kullanan radar sistemleri ile duvar arkası sabit ve hareketli hedeflerin 2B radar görüntüleri hedeflenerek elde etmektir.

Hedeften geri saçılan ve alıcı kısımda alınan elektromanyetik sinyal en uygun radar görüntüsünü elde edecek sinyal işleme algoritmaları kullanılarak söz konusu hedeflerin radar görüntüleri oluşturulacaktır. Önerilen ve geliştirilecek olan algoritmalar yazılımsal hale dönüştürülerek bu algoritmaların doğruluğu ve güvenilirliği, ilk olarak sentetik benzetimler ile ve yapılan hata analizi ile sağlanacaktır. Belirtilen dalga şekillerini gönderen-alan radar sistemleri değişik konfigürasyonlar (monostatik, bistatik ve multistatik düzenek) için oluşturularak duvar arkası görüntüleme yapılacak deneysenaryolarının benzetim verileri ile doğrulanması ve sonrasında saha testleri deneyleri yapılarak gerçek duvar arkası 2B radar görüntülerinin elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Ayrıca, bahsi edilen yanca çözünürlüğünü arttırmak için duvar arkası yüksek yanca çözünürlüğüne sahip tümüyle bir radar sensör prototipi gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Belirtilen prototip ile kapalı ve bina içerisi gibi dışarıdan görünmeyen yapılar içerisindeki kişilerin konumları, hareketleri dışarıdan gözlemlenebilecektir. Bu teknolojinin askeri ve sivil alanda birçok uygulaması mevcuttur. Örneğin doğal afet, yangın yada deprem sonrası belirli bir alan ya da binada mahsur kalmış insan ve canlıların arama kurtarma operasyonlarında, bir bina yada odanın içerisine girmenin tehlikeli yada imkansız olduğu durumlarda; terör ve rehine operasyonları vb. gibi bir çok alanda bu teknolojiye faydalanılmaktadır [64-67].



Şekil 2.1. Duvar arkası radar görüntüleme uygulama örnekleri: (a) Bina içi gözetim (b) Rehine kurtarma operasyonu (c) Göçük altı yaşamsal bulguların tespiti (d) Yangın anında kurtarma operasyonu [68,69].

2.2.2. Güncel Çalışmalar

Radar görüntüleme YAR ve TYAR uygulamalarında 50 yıla yakın süredir kullanılan iyi bilinen bir alandır [44, 46]. Bununla birlikte, duvar arkası radar görüntüleme son zamanlarda bu teknolojinin aktif bir şekilde çalışılan bir araştırma konusu olmuştur [16]. Yayınlanan yöntemlerin birçoğu yalnızca simüle edilen veriler üzerinde test edilirken pratik ölçümlerden elde edilen çoğu gerçek sonuçlar için düşük performans göstermektedir. Bu nedenle, duvar arkası görüntüleme henüz gerçek ortamlar için tam olarak çözülmüş bir problem değildir. Radar donanımsal alanında olduğu kadar sinyal işleme alanlarında da çok araştırma yapılması gerekmektedir. Son yıllarda opak duvarın arkasındaki durumlar hakkında bilgi ve çözüm sağlayan yeni yöntem ve çalışmalar literatürde yer almaktadır

Yang. ve arkadaşları, DAR anteninin radyasyon paterni karakteristiklerini iyileştirmek için faz dizi yapılandırmasını kullanmıştır [70]. Farklı bir tasarım olarak, Ren ve arkadaşlarının [71], frekansların UHF bandında faz sırası ve çok girişli çoklu çıkış (ÇGÇÇ, Multiple input multiple output-MIMO) yapısında kullanılabilen değişken bir konfigürasyon kullanmıştır. [72] 'de, DAR uygulamaları için kullanılabilen bir UGB anteni için etkili bir tasarım sunulmuştur. Rovnakove ve Kocur varış zamanı (time of arrival) tahminine dayanan, bir gönderici ve iki alıcılı bir DAR sistemi ile konum tespitine yönelik çalışmalar yapmıştır [73]. Teknikleri, ardışık radar geri dönüşlerini takip etmeyi ve aynı zamanda Kalman Filtresi ile çoklu hedef takibi sistemini uygulamayı gerektirir. Yakındaki hedefler için memnun edici başarıya sahipken uzaklaştıkça hata oranı artmaktadır. Wang ve Amin geniş bant hüzmleme tekniğine dayanan hedeflerin yerdeğiştirme eğrilerini oluşturmayı önermişlerdir [74]. Yöntemleri yalnızca benzetim verisi ile test edilmiş ve duvarın varlığı ile ilgili hata değerlendirilmesi yapılmamıştır.

Mori ve arkadaşları, lineer anten dizisi konfigürasyonunda ve frekans uzayında çalışan bir radar sensörü geliştirmişlerdir [75]. Çalışmalarında kullanılan lineer anten dizisi multistatik düzendedir. Ayrıca, uygulamalarında 10 GHz ve 20 GHz frekans aralığında ve özellikle alçıpan ile kaplı duvarları olan Japon ahşap evleri kullanmayı tercih etmişlerdir.

Birçok araştırmacı, duvar arkasındaki nesnelere veya insanların hareketini görüntülemek için duvar arkası zaman ve frekans uzaylarında algılama/konum tespiti ve odaklama gibi teknikler geliştirerek kullanmışlardır [73, 76-79]. Bahsi edilen yöntemlerden bir tanesi GİA'dır. GİA algoritması, YAR uygulamalarında sıklıkla kullanılmasına karşın DAR uygulamalarında da başarılı sonuçlar vermektedir [37,61]. Kumar ve arkadaşları [80], multistatik konfigürasyona sahip DARG sistemi ile YAR uygulamasında GİA kullanmışlardır. GİA algoritması gibi başka odaklama algoritmaları da mevcuttur. Kirchoff Göçü [81] ve F-K Göçü algoritmaları [82] dalga denkleminin dayanan YAR ve DARG da kullanılan odaklama algoritmalarıdır. Bu popüler bilinen güçlü odaklama algoritmaların yanısıra, bazı araştırmacılar tarafından birtakım yüksek çözünürlüklü teknikler uygulanmıştır [83-85]. Bu algoritmalar arasından Işın Uzayına dayanan Çoklu Sinyal Sınıflandırma Algoritması (IU-ÇSSA, Beam space-Multiple Signal Characterization, BS-MUSIC) yüksek çözünürlük sağlamada başarılı bir algoritmadır [83]. Öte yandan, bu tip algoritmalar için görüntülenecek olan sahne hakkında bazı ön parametrelerinin; duvar kalınlığı, duvarın dielektrik sabiti gibi bilinmesi gerekmektedir. Ayrıca, hesaplama açısından bu algoritmalar oldukça yavaştır. Zhang ve Hoorfar ÇSSA'sını zaman-tersine görüntüleme (time-reversal imaging) çerçevesinde değiştirerek yalnızca benzetim verilerine uygulamışlardır [86].

Yüksek dereceden istatistiksel metoda dayanan [85] aralıklı tomografik ters saçılım yaklaşımı ve otomatik odaklama tekniği yüksek çözünürlük ölçümü ile algılama konusunda iyi bir

performans için kullanılmaktadır. Ancak çoğu DARG uygulamalarında; pratik olmayan toplanan data kümelerinin tutarlı şekilde işlenmesini gerektirir.

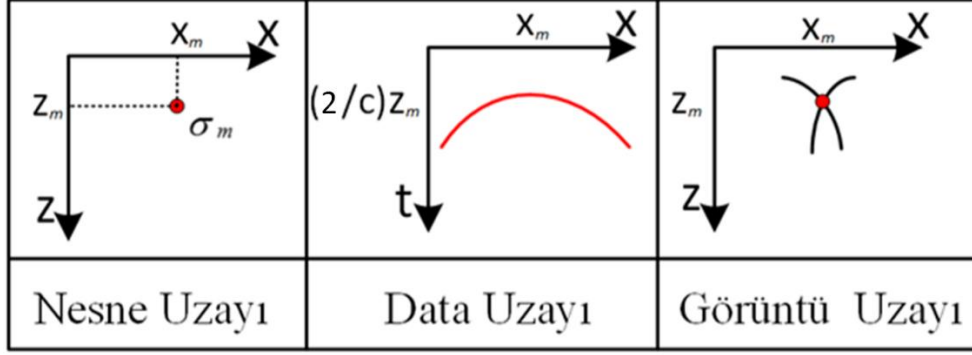
Ayrıca, Yoon ve Amin etkin bir şekilde veri toplama ve görüntüyü yeniden yapılandırmayı sağlamak için bir kaç frekans ve uzaysal bakış açısı verisi ile sıkıştırılmış algılama (SA, Compressed Sensing-CS) metodunu kullanmışlardır [83]. SA metodu, seyrek veya seyrek olarak ifade edilen sahneler için DARG de kullanılan bir algoritma şeklindedir [83,87,88]. Yine Amin ve F. Ahmad, seyrekliğe dayalı ve değişim algılama (DA, change detection-CD) yöntemini birleştiren bir yaklaşımla duvar arkasındaki hareketli hedefin konumunu tespit eden çalışmaları mevcuttur [89]. DA yöntemi ile sabit arkaplan ve istenmeyen diğer nesnelere kaldırılarak sinyal gürültü oranı (SGO, signal to noise ratio-SNR) artırılması sağlanmıştır. Sonrasında, SA çerçevesinde yeniden yapılandırılmasına izin verilen duvar arkasında çeşitli olası insan hareketleri için, kolların, başların ve/veya gövdenin kısa hareketlerine kadar uygun DA modelleri oluşturulmuştur. Önerdikleri algoritma ile laboratuvar deneylerine dayanan sonuçlarla, sistem performansında bir bozulma olmaksızın veri hacminde azalmanın sağlandığı ifade edilmektedir [89]. Amin ve Ahmad'ın diğer çalışmaları; trilaterasyon tekniğine dayanan geniş bant bir evreyuysuz radar sistemidir [54,90]. Önerilen radar sistemi monostatik düzende 3 anten elamanını içermektedir. Belirtilen sistem ile benzetim çalışmaları ve duvar arkasında yerleştirilmiş bir köşe yansıtıcısının deneysel ölçümü yapılarak hedef konum tespitine yönelik çalışmalar yapmışlardır [54].

2.3. Radar Görüntüleme Algoritmaları

2.3.1. Odaklama Algoritmaları

“Göç- odaklama” terimi, data uzayında elde edilen verilerin gerçek uzaysal konumlarına taşınmasını ifade etmektedir [91]. Bu da geri yansıyan sinyalleri, ya geriye-yayma (back-propagation) ya da geriye-izdüşüm (back-projection) yöntemleri kullanarak mümkün olmaktadır. Odaklama algoritmalarının amacı elde edilen bu geri yansıma verilerini gerçek konumlarına yeniden odaklamak ve mümkünse onların fiziksel şekilleri hakkında bilgi edinmektir. Odaklama yöntemlerinin çoğu, patlayan kaynak modeli (ESM; exploding source model) kavramına dayanmaktadır [92].

Şekil 2.2 de nesne uzayındaki bir nokta, yapılan B-tarama YAR uygulaması sonrası data uzayında bir hiperbol oluşturur. Odaklama algoritmalarının görevi bu zaman uzayındaki hiperbollerini derinlik uzayına geri döndürerek yeniden odaklamaktır. Burada derinlik, hedeften antene olan uzaklığı ifade etmektedir.



Şekil 2.2. Noktasal hedef odaklama uzayları.

Odaklama algoritmaları bunu 2 farklı şekilde gerçekleştirir [93].

1. Dalga teorisi kullanmadan geometrik yaklaşımlar kullanarak yeniden odaklar. Bu yöntemler alınan sinyalin fazını hesaba katmaz. Bunun yerine darbe cevabından görüntü oluşturmak için, gecikmenin genlik bilgisini kullanır.
2. İkinci olarak skaler dalga denklemi kullanarak ve alınan sinyalin faz ve genlik bilgilerini kullanarak gerçekleştirilir.

Dahası bu yöntemlerin kullandığı veriler ya frekans uzayında transfer fonksiyonu veya zaman uzayında darbe cevabı olabilir. Bu yöntemler esas olarak YAR ve TYAR uygulamalarında ve özellikle YNR, hava radar sistemlerinde, sismoloji ve tomografi de sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca bu yöntemlerin çoğu UGB radar uygulamalarında çoğunlukla kullanılmaktadır.

Duvar arkası görüntüleme kullanılan çeşitli odaklama algoritmaları vardır. Bunlardan bir tanesi skaler dalga denkleminin çözümüne dayanan Kirchhoff göçü odaklama algoritmasıdır. Bu skaler dalga denklemini [94] çözmek için Green teoremine dayanan değişkenlerin ayrılması olarak adlandırılan kısmi diferansiyel denklemler kullanılır. Kirchhoff odaklama teorisi dalga cephesi boyunca genlik ve faz bilgisini hesaplamak için ayrıntılı bir yönerge sağlar. Bu teori, hiperbolu boyunca toplamın belirli ağırlıklarla yapılması gerektiğini gösterir. Bu durumda, hiperbol daha genel bir şekil ile değiştirilir. Ters zaman dalgası denklem göçü olarak da bilinen Kirchhoff göçü, çözümde bazı düzeltici faktörler ile hiperbolik toplam yöntemine matematiksel olarak eşdeğerdir [95]. Bu algoritma, matematiksel olarak çok karmaşık ifade edilir ve özellikle karamayınlarının tespiti ve sismik data işleme uygulamalarında [94, 96, 97] kullanılmaktadır. Gauss ve Green teoremleri Kirchhoff odaklama algoritmasını açıklamak için kullanılan teoremlerdir. Dalga denklemine dayanan göç (odaklama) işlemini frekans uzayında da yapmak

mümkündür. Stolt; odaklama probleminin Fourier Dönüşümü (FD) ile çözülebileceğini göstermiştir [98]. Bu işleme f-k göç; odaklama algoritması da denilmektedir. Bu yöntemin hesaplanması çok karmaşık olmadığından hızlı bir algoritmadır ancak ilave iyileştirmeler için değiştirilmesi o kadar da kolay değildir. Faz kaydırma odaklama (Phase-shift migration, PSM) algoritması ilk olarak Gazdag tarafından tanıtılarak uygulanmıştır [99]. Kirchhoff göçü algoritmasına benzer şekilde bu yöntem de ESM kavramını kullanmaktadır [100]. Algoritma dalga alanını, $t = 0$ patlama zamanına götürmek için tekrarlayan faz kaydırma işlemi yapmaktadır. Böylece tüm saçılan dalgalar, odaklanmış bir görüntü elde etmek için nesne bölgesine çekilir. PSM algoritmasının asıl amacı, $\exp(jk_z z)$ faz faktörü ile derinlik (z-yönü; menzil) yönündeki EM dalganın bilgisiyle $t = 0$ da dalga alanını hesaplamaktır. Algoritma FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) avantajını kullanır; Dolayısıyla, yukarıda bahsedilen algoritmalara kıyasla çok daha hızlıdır [33]. PSA'nın performansı hesaplama süresi, odaklama ve görüntü kalitesi ve ortam içerisinde değişen hızları telafi etme açısından yukarıda bahsedilen diğer geriye-yayma algoritmalarına oranla daha iyidir.

Öte yandan; bir başka odaklama algoritması olan GİA dalga denkleminde dayanmayan, geometrik tekniğe dayanan geleneksel YAR görüntüleme algoritmasıdır [101]. GİA algoritması temel olarak, her bir açıklık noktasından toplanan veriyi gidiş-dönüş gecikme süresinin bir fonksiyonu olarak ilişkilendirmektedir. Geri izdüşüm; görüntü haritasının her bir dizi ögesi (piksel) için elde edilen radar cevaplarını tutarlı bir biçimde toplar. Tutarlı toplam biçiminden kasıt; her anten açıklık konumunda elde edilen sinyalin, görüntü haritasındaki belirli bir piksel ögesine uyması veya hizalanması için zaman kayması olduğu anlamına gelmektedir. Bu işlem tüm açıklık konumları için birleştirilir. GİA, nesnelere gerçek yerlerine odaklamada oldukça başarılı, hızlı ve güvenilir bir algoritmadır.

Bu tez çalışmasında hem zaman hem de frekans uzaylarında yapılan uygulamalarda duvar arkası sabit ve hareketli hedeflerin radar görüntülerini oluşturmak için kullanılan bir yöntemde yukarıda karşılaştırmalı olarak bahsedilen algoritmalar arasında GİA'dır. GİA her iki radar sisteminde de oldukça başarılı sonuçlar vermektedir.

2.3.2. Ters Problem

Ters problem, hedef konum bilgisinin yanı sıra elektriksel geçirgenlik ve iletkenlik gibi fiziksel parametreleri de hesaplayabilen bir methodur. Bu problemde asıl amaç, başlangıç noktalarını tahmin eden bazı temel görüntüleme yöntemlerini kullanarak hedeflerin fiziksel parametrelerini ve konumunu hesaplamaya yol açan ters problemi çözmektir. Ters problemlerin çözümü konusunda matematiksel olarak karmaşık veya daha az karmaşık olarak çok çeşitli

yöntemler mevcuttur [102-104]. Ters problemin pratik bir uygulaması kara mayınlarının tespitinde kullanılmıştır [103]. İlk adım olarak nesnelerin konumu ve genel şekilleri hızlı bir biçimde hesaplanır. Bu amaçla ÇSSA (MUSIC) algoritması kullanılmaktadır. Bu ilk adımdan sonra, lineerleştirilmiş problemi çözmek için seçilen yöntem, yaygın olarak kabul edilen hızlı doğrusal çözüm metodu olan Cebirsel İyileştirme Tekniği (CİT, algebraic reconstruction technique: ART) [105] 'dir. ART, nesnelerin parametrelerini belirlemek için kullanılır. Ters problemle elde edilen sonuçların geleneksel Kirchhoff göçünden daha iyi olduğu görülebilir. Son zamanlarda duvar arkası radar görüntüleme de ters problem yöntemlerini kullanan çalışmalar mevcuttur [52, 106, 107]. Bu teknik, hassas konum, şekil ve malzeme karakterizasyonu tahmininin yanısıra duvar dahil olmak üzere hedef nesneler arasında ki çoklu yansıma etkilerini azaltmayı vaat eder. Bununla birlikte, ters problem algoritmaları yüksek hesaplama gereksinimleri gerektirmektedir. Ölçülen senaryonun karmaşıklığı ile hesaplama gereksinimleri önemli ölçüde yükselir. Basit bir senaryo da dahil belirtilen yöntemler ile hesaplama için oldukça uzun zaman gerekmektedir. Bu da ters problemi gerçek zamanlı kurtarma ve güvenlik uygulamaları için kullanmayı imkansız hale getirmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasının asıl amacı, geliştirelecek olan özgün radar görüntüleme algoritmaları marifetiyle duvar arkasındaki sabit ve hareketli hedeflerin tespitinin yapılması, yerlerinin bulunması ve radar görüntülerinin elde edilmesidir. Bu amaçla, bu tezde DARG konusu hem zaman hem de frekans uzaylı sistemler için ele alınarak sistemlerin bu konudaki başarıları ayrı ayrı incelenme imkânı bulunmuştur. Bu amaçlar doğrultusunda aşağıda verilen metodoloji bu tez çalışmasında uygulanmıştır:

1. Özgün DARG algoritmalarının geliştirilmesi,
2. Geliştirilen algoritmaların farklı benzetim senaryolarında uygulanarak, benzetim DARG verilerinin elde edilmesi ve bu verilere geliştirilen algoritmaların uygulanmasıyla söz konusu algoritmaların başarımları, uygulama limitleri, avantajları ve dezavantajının anlaşılması
3. Gerçek-zamanlı DARG deneylerinin yapılabilmesi için, gerekli deneysel düzeneklerin hazırlanması, mevcut altyapıda olmayan anten, radar sensörü vb. ekipmanın imalatı ve/veya temin edilmesinin sağlanması,
4. Geliştirilen DARG algoritmalarının gerçek deneyler kullanarak testinin ve geçerliliğinin yapılması. Bu kapsamda Mersin Üniversitesi Yerleşkesindeki farklı mekân ve laboratuvarlarda gerçek DARG deneyleri yapılarak, deneysel verilerin elde edilerek, algoritmalarda kullanılması. Ayrıca, geliştirilen algoritmaların benzer engel arkası radar görüntüleme uygulamalarında kullanılması, bu kapsamda duvar arkasındaki insanların nefes alma, kalp atışı vb. hayati fonksiyonlarının tespit edilmesi çalışmaları yapılmıştır.

Bu amaçla, probleme, geometriye ve sisteme uygun olarak çeşitli görüntüleme algoritmaları geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmaların performansı ilk olarak sentetik verilerin benzetimi ile sağlanmıştır. Başarılı bulguların elde edildiği algoritmalar ile duvar arkası gerçek ölçüm deneyleri yapılarak sonuçları değerlendirilmiştir. Ayrıca bu tez çalışmasında, doğrusal dizi DARG radar sensörünün tasarımı ve sonrasında da sistemin üretimi yapılarak, duvar arkası görüntülemeye yönelik özgün bir radar sensörü donanımsal ve yazılımsal olarak sunulmuştur. Geliştirilen radar sensörünün DARG konusundaki performansı benzetim ve ölçümsel deneyler ile ispatlanmıştır.

3.1. Özgün Görüntüleme Algoritmalarının Geliştirilmesi

Tez çalışmasının bu bölümünde, tezin amacına yönelik özgün olarak geliştirilen ve uygulanan başarıları benzetim ve ölçüm sonuçları ile Bölüm 4. de sunulan algoritmalar yer almaktadır.

3.1.1. Elipsler Kesişimi Algoritması

Bu bölümde; multistatik 1 verici- 2 alıcı anten konfigürasyonuna sahip, duvar arkasında sabit veya hareketli nesne/canlı'nın menzil ve yanca uzayındaki konumsal durumunu tespit etmeye yönelik uygulanan algoritma elipslerin kesişimine dayanan konum tespiti algoritmasıdır.

Algılama ve konum belirleme algoritmamız bazı varsayımlara dayanmaktadır. İlk varsayım; duvar kalınlığının hedefin menzildeki mesafesi ile karşılaştırıldığında çok daha küçük olduğu ve ikinci varsayım duvarın dielektrik geçirgenliğinin; (ϵ_r) yüksek olmadığı varsayımlarıdır. Aslında bu varsayımlar pratikte genellikle duvar kalınlığının 15 cm ile 30 cm arasında değiştiği ve ϵ_r ' nin 1.5 ile 6 arasında değişmesi şartıyla özellikle ahşap, tuğla veya beton gibi yapılarda geçerlidir [108]. Bu kurgu Şekil 3.1.' de gösterildiği gibi hedefin gerçek konumu ile görüntülenen konumu arasındaki kayma miktarı (d_{kayma}) önemsiz ve ihmal edilebilecek kadardır. Bu durum [109] ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Yapılan bu varsayımlardan sonra algoritma aşağıda anlatıldığı şekilde oluşturulmuştur. Elips tanımsal olarak; bir düzlemde verilen iki noktaya uzaklıkları toplamı sâbit olan noktaların geometrik yeridir; sözü edilen bu iki noktaya elipsin odakları denir. Şekil 3.1.' de benzetim ve deneysel çalışmalar ile doğruluğu kanıtlanan duvar arkası sabit/ hareketli hedeflerin konumsal bilgisini elde etmek için geliştirilen algoritmanın multistatik düzenekte 2B geometrisini göstermektedir.

$$\begin{aligned}\frac{\left(y+\frac{D}{4}\right)^2}{a_1^2} + \frac{x^2}{b^2} &= 1 \\ \frac{\left(y-\frac{D}{4}\right)^2}{a_2^2} + \frac{x^2}{b^2} &= 1\end{aligned}\quad (3.1)$$

Burada elips denklemleri, x ve y 'ye bağlı ikinci dereceden polinom olarak ifade edilir. Elips eğrilerinin yarı-asal eksen uzunlukları (a_1, a_2) ve yarı-küçük eksen uzunlukları (b_1, b_2) verilen geometrimize göre aşağıdaki verilen denklem (3.2) ve denklem (3.3)'e göre hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned}a_1 &= r_0 + r_1 \\ a_2 &= r_0 + r_2\end{aligned}\quad (3.2)$$

$$\begin{aligned}b_1 &= \sqrt{a_1^2 - \left(\frac{D}{4}\right)^2} \\ b_2 &= \sqrt{a_2^2 - \left(\frac{D}{4}\right)^2}\end{aligned}\quad (3.3)$$

Şekil 3.1.' de duvar arkasında $P(x_0, y_0)$ noktasında noktasal bir saçıcı hedef mevcuttur. Hedefin menzil (x) ve yanca (y) eksenlerindeki konumları bu iki elipsin kesişim noktası olacaktır. EM dalga, duvar nesnesinde ilerlerken ortam değişikliğinden (hava-duvar, duvar-hava) dalganın kırınımı söz konusu olacaktır ve dalga duvardan sonra yine boşlukta yayılarak noktasal hedefe ulaşacaktır. Belirtilen algoritmada duvar karakteristiği ele alınmadan dalganın boşlukta yayıldığı varsayımı ile elips eğrileri oluşturulmuştur. Bununla ilgili yaklaşımlar daha önce de bahsedildiği üzere duvarın düşük kalınlık ve dielektrik sabitine sahip olmasından dolayı kayma miktarının önemsiz olduğudur. Şekil üzerinde yeşil dolu daire, hedefin duvar etkisi var iken elde edilecek olan gerçek konumunu gösterecek iken boş daire simgesi de duvarın etkisinin ihmal edildiği durumda ki görüntülenen elipslerin kesişim bölgesini ve konumunu göstermektedir. Buna göre, hedefin görüntülenen konumu bu iki elips eğrisinin kesişim noktası olup, bu konum aşağıda belirtilen adımların uygulanması ile başarılı bir şekilde elde edilir. Kesişim formülasyonunun adımları kısaca şu şekildedir;

$$\begin{aligned}A &= a_2^2 \circ b_1^2 - a_1^2 \circ b_2^2 \\ B &= D/2 (a_2^2 \circ b_1^2 + a_1^2 \circ b_2^2) \\ C &= \left(\frac{D}{4}\right)^2 \circ A + a_1^2 \circ a_2^2 \circ (b_2^2 - b_1^2)\end{aligned}\quad (3.4)$$

$$x_{1,2} = -\frac{B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

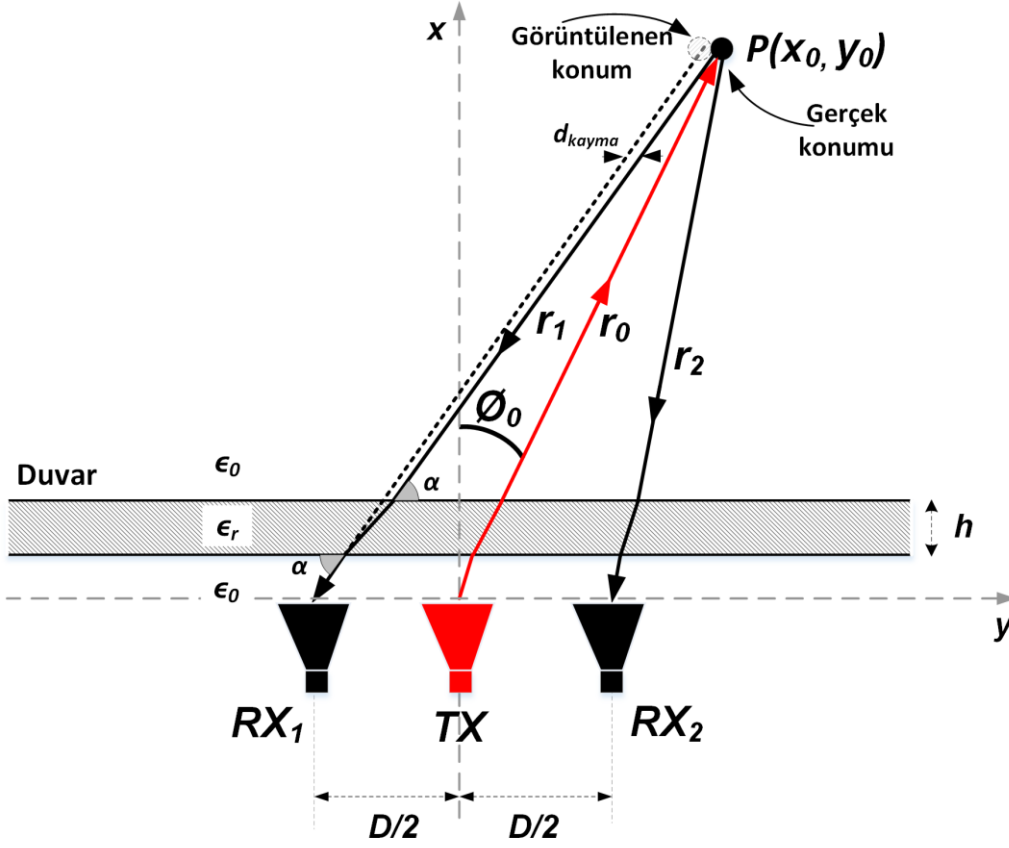
$$y = \sqrt{b_2^2 \circ \left(1 - \frac{(x_{1,2} - D/4)^2}{a_2^2}\right)} \quad (3.5)$$

Burada A, B, C terimleri denklem (3.4)'de verilen elips eğrileri için ikinci dereceden polinomun katsayılarıdır. Hedefin menzil (x) ve yanca (y) eksenlerindeki konumları denklem (3.5) çözülerek elde edilmektedir. Burada hedefin menzil eksenindeki konumunun, elde edilen 2. Dereceden polinomun katsayıları kullanılarak köklerinin elde edilmesi ve sonrasında yancada ki konumunun hesaplanmasıdır. Böylelikle hedefin duvar arkası tespiti ve konumsal yeri elde edilmektedir.

3.1.2. Multistatik Konum Belirleme Algoritması

Bu bölümde duvar arkasındaki hareketli hedeflerin konum tespitini belirlemek için geliştirilen basit fakat etkili bir algoritma geliştirilerek sunulmuştur. Ayrıca, algoritma için belirlenen varsayımlar, formülasyonu ve geometrisi tümüyle sunulmaktadır. Geliştirilen algoritmanın başarısı Bölüm 4 'de ilk olarak sentetik benzetim çalışmaları ile sonrasında da gerçek duvar arkası deneysel ölçümler ile değerlendirilmiştir. Elde edilen benzetim ve ölçüm sonuçları; geliştirilen bu algoritmanın benzer engeller arkası radar görüntüleme uygulamalarında da kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, algoritmanın geçerliliği ve başarısı için hata analizi çalışmaları yapılarak, algoritmanın uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Tüm bu bahsedilen çalışmalar ve sonuçları Bölüm. 4'de ayrıntılı olarak yer almaktadır.

Algoritma Şekil 3.2.'de gösterildiği üzere bir hat boyunca yerleştirilmiş multistatik; tek gönderici 2 alıcılı bir radar sistemi konfigürasyonu için geliştirilmiştir.



Şekil 3.2. Duvar arkası multistatik konfigürasyon için önerilen algoritma geometrisi.

Şekil 3.2.'den de görüleceği üzere; gönderici anten yanca uzayında (y), alıcı antenlerden $D/2$ kadar eşit uzaklıklarda olacak şekilde merkeze yerleştirilmiştir. Mükemmel bir noktasal saçıcı hedefi $P(x_0, y_0)$ noktasında konumlandırılmış olsun. Buna göre; r_0 hedef ve gönderici anten arasındaki uzaklığı r_1 ve r_2 ise sırasıyla birinci (Rx_1) ve ikinci alıcı (Rx_2) antenden hedefe olan uzaklıkları ifade etmektedir. Algoritmadaki ilk varsayımımız; hedefin radyal mesafesi r_0 'ın gönderici (Tx) ve alıcı antenler (Rx_1/Rx_2) arasındaki $D/2$ uzaklığından önemli ölçüde büyük olduğudur. ϕ_0 ; P noktası için silindirik koordinatlarda bir açı ifadesi olduğundan, r_1 ve r_2 uzaklıklarını ϕ_0 açısına bağlı yaklaşık olarak ifade edebiliriz.

$$\begin{aligned} r_1 &\cong r_0 + \frac{D}{2} \sin \phi_0 \\ r_2 &\cong r_0 - \frac{D}{2} \sin \phi_0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Bu yaklaşım ile ilgili hata; algoritmanın hata analizi bölümünde değerlendirilmiştir. Algoritma ile ilgili ikinci varsayım duvar kalınlığı ile ilgilidir. Buna göre duvar kalınlığı h 'ın, antenlerden hedefe olan uzaklıklara; r_1 ve r_2 , göre nispeten daha küçük olduğudur. Bu nedenle

antenlerden hedefe ulaşan/alınan EM dalganın kayma miktarı, L- ve S-band frekansları için ve tuğla duvarın tipik dielektrik sabitinin “5” civarında olması gerçeğine dayanarak ihmal edilebilir [108].

Bu durum Şekil 3.2.’de de gösterildiği üzere; yanca eksenindeki hedefin konumundaki kayma miktarı d_{kayma} gözardı edilebilir. Bu olgu belirtilen referansta [109] iyi bir çalışma örneği olmuştur ve algoritmamızda ki yapılan varsayım için bizlere fikir sağlamıştır. Gönderici anten sonlu bant genişliği B' ye sahip frekans uzayı sinyal iletmesi şartıyla; P noktasındaki hedeften saçılan ve iki alıcı anten Rx_1/Rx_2 tarafından toplanan EM dalga aşağıda verilen denklem (3.7) ile ifade edilir. Buna göre;

$$\begin{aligned} E_{S_1}(\mathbf{k}) &\cong A_1 e^{-j\mathbf{k}(r_0+r_1)} \\ E_{S_2}(\mathbf{k}) &\cong A_2 e^{-j\mathbf{k}(r_0+r_2)} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Burada A_1 ve A_2 sırası ile multistatik gönderici-alıcı konfigürasyonunda birinci alıcı anten Rx_1 ve ikinci alıcı anten Rx_2 için saçılma genlikleridir. Ayrıca, $\mathbf{k} = 2\pi\mathbf{f}/v$ dalga numarası, \mathbf{f} frekans $\mathbf{f} = [f_1, f_2, f_3, \dots, f_n]$, v , EM dalganın yayılım ortamındaki (hava veya duvar) hızını ifade etmektedir.

Denklem (3.6) deki ifade denklem (3.7) de yerine konulursa; toplanan elektrik alan datasını aşağıda verilen denklem (3.8) ve denklem (3.9)’da olduğu üzere yeniden yazabiliriz.

$$\begin{aligned} E_{S_1}(\mathbf{k}) &\cong A_1 e^{-j\mathbf{k}(r_0+r_0+\frac{D}{2}\sin\theta_0)} \\ &= A_1 e^{-j2kr_0} e^{-jk\frac{D}{2}\sin\theta_0} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} E_{S_2}(\mathbf{k}) &\cong A_2 e^{-j\mathbf{k}(r_0+r_0-\frac{D}{2}\sin\theta_0)} \\ &= A_2 e^{-j2kr_0} e^{+jk\frac{D}{2}\sin\theta_0} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Elde edilen $E_{S_1}(\mathbf{k})$ ve $E_{S_2}(\mathbf{k})$ ifadelerini kullanarak yeni iki data kümesi elde edebiliriz. İlk olarak; bu 2 vektörün eleman bazlı çarpım işlemi yapılarak aşağıdaki denklem (3.10)’ da belirtilen “eş-faz” (in-phase) terimi elde edilir.

$$\begin{aligned} IP(\mathbf{k}) &\triangleq E_{S_1}(\mathbf{k}) \circ E_{S_2}(\mathbf{k}) \\ &= A_1 A_2 e^{-j4kr_0} \\ &= A_1 A_2 e^{-j2\pi\left(\frac{f}{v}\right)r_0} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Denklem (3.10) da dikkat çeken önemli bir husus; $IP(\mathbf{k})$ ifadesinin r_1 ve r_2 uzaklıklarından veya D ve \emptyset terimlerinden bağımsız olmasıdır. Böylece $P(r_0, \emptyset_0)$ noktasının radyal uzaklığı r_0 in tam olarak hesabı, denklem (3.10)'ün $(4f/v)$ ye göre 1B TFD alınması ile elde edilebilir.

İkinci olarak; $E_{S_1}(\mathbf{k})$ terimi ile $E_{S_2}(\mathbf{k})$ 'nin eşleniğinin eleman bazlı çarpım işlemi “eşlenik-faz” (conjugate-phase) olarak ifade ettiğimiz bir başka yeni data kümesini oluşturur. Bu yeni ifade aşağıda belirtilen denklem (3.11)'deki şekilde hesaplanır.

$$\begin{aligned} CP(\mathbf{k}) &= E_{S_1}(\mathbf{k}) \circ [E_{S_2}(\mathbf{k})]^* \\ &= A_1 A_2^* e^{-jkD \sin \emptyset_0} \\ &= A_1 A_2^* e^{-j2\pi \left(\frac{fD}{v}\right) \sin \emptyset_0} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Denklem (3.11), menzil parametreleri r_0 , r_1 ve r_2 den bağımsızdır, yalnızca açı değişkeni \emptyset_0 'a bağlıdır. Aynı zamanda denklemden, frekans; f ve $\sin \emptyset_0$ terimleri arasındaki Fourier ilişkisi rahatlıkla fark edilebilir. Dolayısıyla, belirtilen $P(r_0, \emptyset_0)$ noktası için silindirik koordinat açısı \emptyset_0 'ın sinüs ifadesi; Denklem (3.11)' in (Df/v) 'ye göre TFD alınması ile elde edilir. Noktasal saçıcının $P(r_0, \emptyset_0)$ silindirik koordinatlardaki konumu yukarıda anlatıldığı üzere elde edildikten sonra, kartezyen koordinatlardaki gerçek konumu, aşağıda belirtilen silindirik- kartezyen koordinat dönüşümü denklem (3.12) aracılığı ile kolaylıkla elde edilir.

$$\begin{aligned} x_0 &= r_0 \cos \emptyset_0 \\ y_0 &= r_0 \sin \emptyset_0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Yukarıda bahsedilen formülasyonlara dayanarak, DARG için geliştirilen algoritma aşağıda belirtildiği şekilde özetlenebilir.

1. İlk olarak $E_{S_1}(\mathbf{k})$ and $E_{S_2}(\mathbf{k})$, geri saçılan elektrik alan datası toplanır. Eğer veriler zaman uzayında toplanmış ise FD operasyonu ile rahatlıkla frekans uzayına aktarılır.
2. Daha sonra “eş-faz”; $IP(\mathbf{k})$ ve “eşlenik-faz”; $CP(\mathbf{k})$ terimleri yukarıda ifadesi verilen denklem (3.10) ve denklem (3.11) ile oluşturulur.
3. Menzil uzayında; “eş-faz” lı toplanan elektrik alan vektörü $IP(\mathbf{r})$ 'yi elde etmek için $IP(\mathbf{k})$ 'nın $(4f/v)$ ' ye göre TFD alınır ve $\sin \emptyset$ uzayında; “eşlenik-faz” lı toplanan elektrik

alan vektörü $CP(\sin\emptyset)$ 'yi elde etmek için $CP(\mathbf{k})$ 'nın (Df/v) 'ye göre TFD işlemi aşağıda verildiği üzere yapılır:

$$\begin{aligned} IP(\mathbf{r}) &= IFT_{(4f/v)}\{IP(\mathbf{k})\} \\ ICP(\sin\emptyset) &= IFT_{(Df/v)}\{CP(\mathbf{k})\} \end{aligned} \quad (3.13)$$

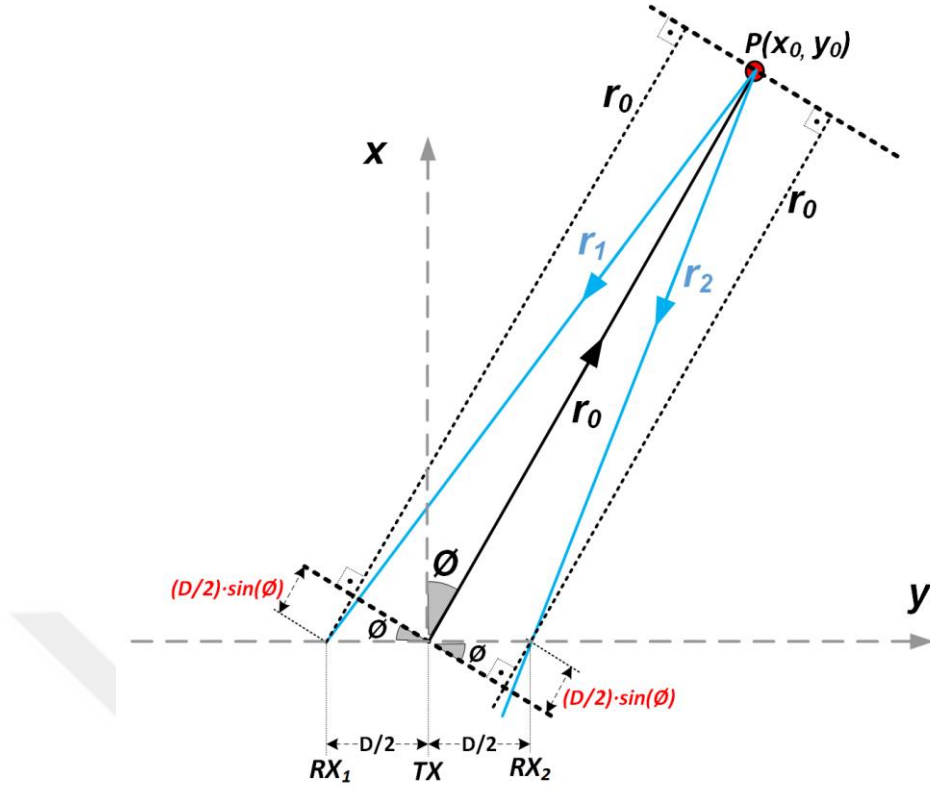
Burada menzil çözünürlüğü; dr aşağıda verilen temel menzil çözünürlüğü formülü ile kolaylıkla hesaplanabilir [46]:

$$dr = \frac{v}{2B} \quad (3.14)$$

- Denklem (3.13) de tanımlanan $P(r_0, \sin\emptyset_0)$ noktası; ilk olarak, ikinci eksenin ters sinüs dönüşümü alınarak $P(r_0, \emptyset_0)$ noktasına silindirik koordinatlara taşınır sonrasında (3.12) da ki denklem kümeleri ile kartezyen koordinatlara dönüştürülerek noktanın gerçek konumu elde edilir.

Algoritmanın Geometrik Varsayımlarından Kaynaklanan Hata Değerlendirmesi

Yukarıdaki bölümde; geliştirilen algoritmanın bazı geometrik varsayımlara dayandığından bahsedilmiştir. Şekil. 3.3.'de r_1 ve r_2 uzaklıklarının \emptyset_0 açısına bağlı olarak ifade eden varsayıma dayalı geometri yer almaktadır.



Şekil 3.3. r_1 ve r_2 için açıklayıcı geometrik yaklaşım.

EM dalganın duvardan kaynaklanan yerdeğiştirme durumunun ihmal ile, geliştirilen algoritmanın geometrik kaynaklı varsayımlarının sebep olduğu yüzde menzil ve açı hatası aşağıda denklem (3.15) ve (3.16) da verilen basit bir hata yüzdesi formülü ile hesaplanır:

$$\% \text{ menzil hatası} = \left(\frac{r_{alg} - r_0}{r_0} \right) \times 100 \quad (3.15)$$

$$\% \text{ açı hatası} = \left(\frac{\phi_{alg} - \phi_0}{\phi_0} \right) \times 100 \quad (3.16)$$

Burada; r_0 , göndericiden hedefe olan gerçek radyal uzaklık ve r_{alg} , göndericiden hedefe olan algoritma ile elde edilen uzaklıktır. Hata analizi konusu Bölüm 4. de multistatik hareketli hedef konum tespiti algoritmasının benzetim ve deneysel ölçüm sonuçlarında ayrıntılı olarak sunulmuştur.

3.1.3. Duvar Arkası Geriye İzdüşüm Algoritması (GIA) İmplementasyonu

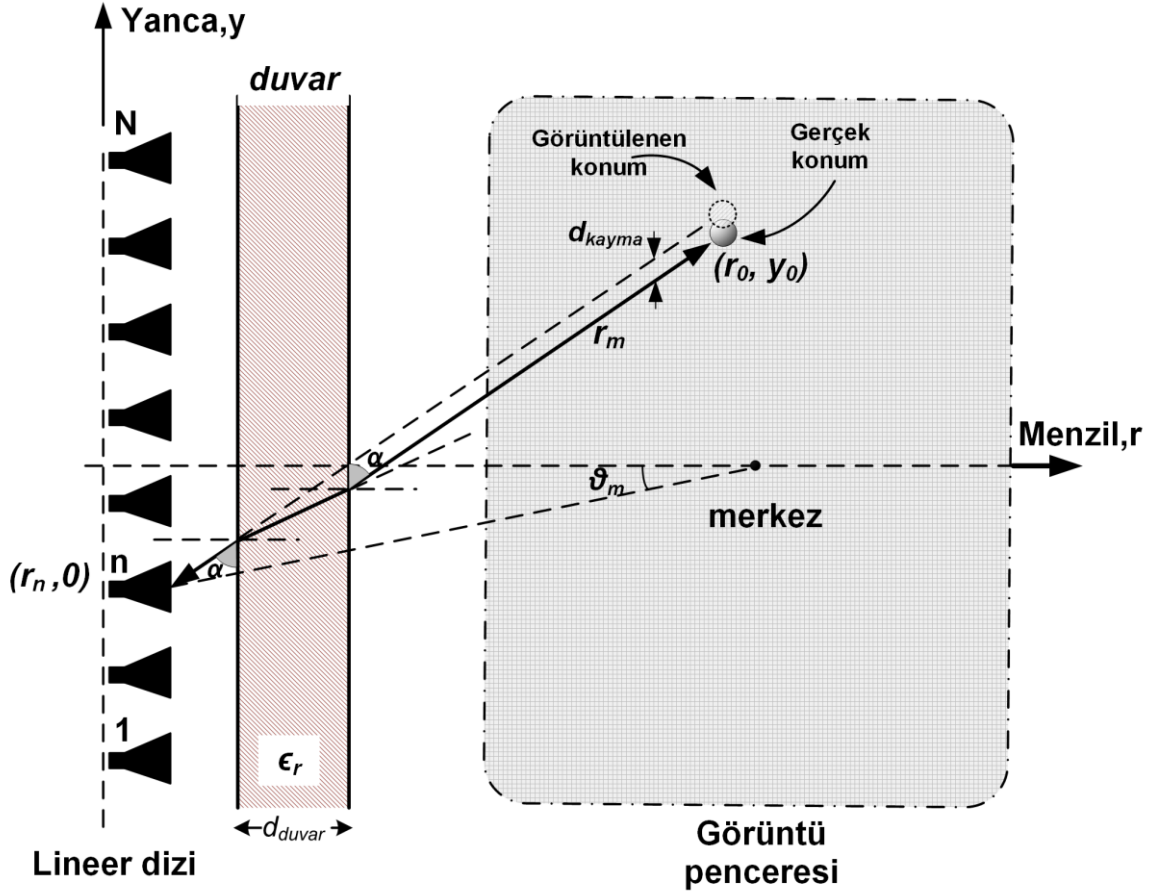
Tez çalışmasının bu bölümünde, duvar arkasındaki sabit ve hareketli hedeflerden radar alıcısı yönünde geri yansıyan ve data uzayında toplanan ham saçılan elektrik alan verilerine

başarılı bir odaklama algoritması olan GİA uygulanarak hedeflerin görüntü uzayında gerçek konumlarına odaklanma işlemleri ayrıntıları ile anlatılmıştır. Ayrıca, GİA'nın hem frekans hemde zaman uzayında toplanan ön işlemlerden geçmiş ham datalara ayrı ayrı emplementasyonu yapılmıştır. Algoritmanın doğruluğu ve başarı performansını değerlendirmek üzere Bölüm 4' de detayları ile verilen benzetim çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen başarılı benzetim sonuçları sonrası GİA algoritması gerçek deneysel ölçüm verilerine uygulanarak, algoritmanın gerçek senaryodaki performansı yine Bölüm 4'de sonuçlandırılmıştır. Aşağıda GİA'nın zaman ve frekans uzayında ve monostatik düzenekte elde edilen geri saçılım verilerine uygulanması şekillendirerek ve ayrıntılı matematiksel ifadelerle açıklanmıştır.

Gİ Algoritmasının Zaman ve Frekans Uzayında Monostatik Konfigürasyon İçin Uygulanması

Monostatik konfigürasyona sahip bir radar düzeneği ile DARG geometrisi Şekil. 3.4.'de verildiği gibidir. Belirtilen sistem geometrisine uyarlanan GİA'nın işlem basamakları şu şekildedir. İlk olarak, zaman uzayında geri saçılan elektrik alan verisi $E_s(t, y)$ yanca ekseninde (y) toplansın. Zaman uzayında toplanan verinin zamandaki örnekleme sayısı M olsun; örnekleme aralığı $dt = t/M$ olacaktır. Buradan bant genişliği $BG = 1/t$ şeklinde hesaplanır ve M kadar ayrık frekans f vektörü; BG ve M bilgilerinden elde edilir. GİA algoritması, hem zaman hem de frekans uzayı verileri için emplemente edilmiştir. Bu amaçla, zaman uzayı parametreleri yukarıda bahsedilen basit formüller ile frekans uzayı parametrelerine dönüştürülebilir. Zaman uzayında toplanan verinin bu yönde FFT'sinin alınması ile kolaylıkla frekans uzayına geçilebilmektedir ve böylelikle frekans uzayında $E_s(k, y)$ verisi elde edilmiş olur. Zamandan frekans uzayına geçtikten sonra; GİA algoritması için uygulanan adımlar aşağıdaki şekildedir.

Burada $k = 2\pi f/v$ olarak dalga numarasını, f frekansı, v de duvar içerisindeki ve dışındaki EM dalganın hızını temsil etmektedir. 2B menzil-yanca düzlemine dönüştürmek için, toplanan elektrik alan verisi kümesine 1B Ters Fourier Dönüşümü (TFD) uygulanır.



Şekil 3.4. GİA için DARG geometrisi.

$$E_s(r, y) = IFT\{E_s(\mathbf{k}, y)\} = \int_{-\infty}^{\infty} E_s(\mathbf{k}, y) \exp(j2kr) \cdot dk \quad (3.17)$$

Sonrasında ölçüm verileri $S_{\vartheta}(\mathbf{k}_r)$ ile $E_s(r, y)$ ilişkilendirmek için kesit-izdüşümü (projection-slice) teoremi [110] uygulanır. 2B uzay için kesit-izdüşümü teoremi, ϑ bakış açısında izdüşümün 1B FD aynı açıda geometrinin 2B FD'nün kesitini temsil ettiğini ifade eder. Örneğin;

$$S_{\vartheta}(\mathbf{k}_r) \equiv E_s(\mathbf{k}_r, \vartheta) \quad (3.18)$$

Bundan dolayı, $E_s(k_x, k_y)$ örneklenmiş gösterimi farklı bakış açılarında ölçülen $S_{\vartheta}(\mathbf{k}_r)$ izdüşümlerinin FD den elde edilebilir. Bu prensiple denklem (3.17) aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilir.

$$E_s(r, y) = \int_{-\pi}^{\pi} \left[\int_{-\infty}^{\infty} S_{\vartheta_m}(\mathbf{k}_r) \exp(j2k_r r_m) k_r dk_r \right] d\vartheta_m \quad (3.19)$$

Denklem (3.19)'da parantez içerisindeki integral r_m de ölçülen $\Gamma(\vartheta_m) \triangleq S_{\vartheta_m}(\mathbf{k}_r) \circ \mathbf{k}_r$ yansıtma fonksiyonunun 1B TFD olarak kabul edilebilir. Eğer $\rho_{\vartheta_m}(r_m)$ bu fonksiyonun TFD ise, denklem (3.19) aşağıda belirtildiği şekilde yeniden yazılabilir.

$$e(x, y) = \int_{-\pi}^{\pi} \rho_{\vartheta_m}(r_m) d\vartheta_m \quad (3.20)$$

Denklem (3.20) 2B filtrelenmiş GİA uygulandıktan sonra uzaysal domeynde elde edilen odaklanmış görüntüyü vermektedir. Şekil. 3.4.'deki geometri için, yukarıda bahsedilen algoritmanın uygulanması aşağıda kısaca özetlenmiştir.

- i. Geometride verilen hedef/hedeflerin yansıtırlık değerlerini saklamak için sıfırlardan oluşan bir $e(x, y)$ matrisi önceden tanımlanır.
- ii. Toplanmış olan uzaysal frekans datası; $S_{\vartheta}(\mathbf{k}_r)$, \mathbf{k}_r ile çarpılır.
- iii. Sonrasında $s_{\vartheta_m}(r)$ menzil profilinin filtrelenmiş halini temsil eden $\rho_{\vartheta_m}(r_m)$ 'yi elde etmek için denklem (3.18)'in 1B TFD işlemi yapılır.
- iv. Seçilen görüntü penceresindeki her bir piksel için r_m ve $\rho_{\vartheta_m}(r_m)$ değerini MATLAB® da bulunan en yakın-komşu interpolasyonu yaparak elde edilir.
- v. İnterpolasyon ile elde edilen değerler $e(x, y)$ 'ye eklenir.
- vi. Tüm bakış açısı ϑ_m için adım ii-v arası işlemler tekrarlanır.

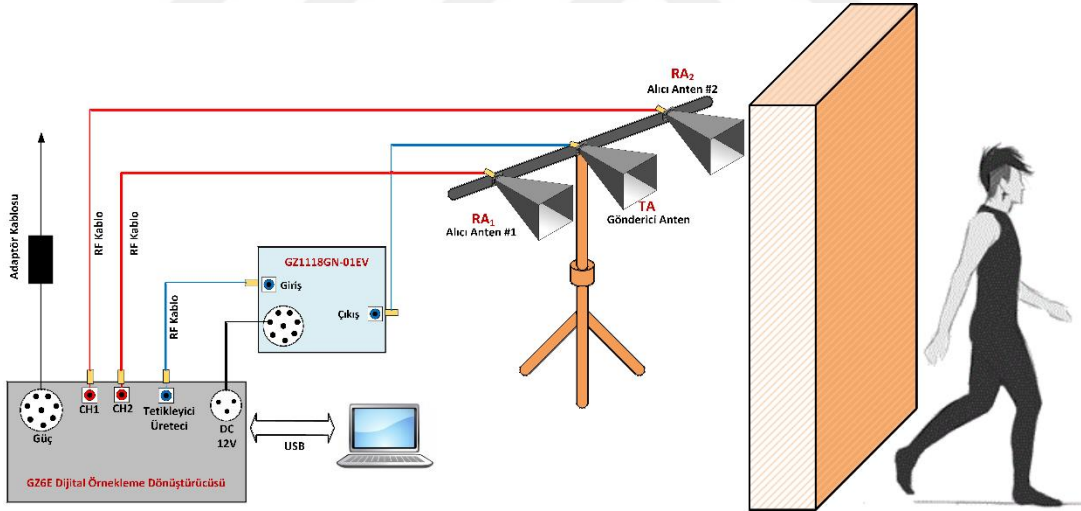
3.2. Duvar Arkası Radar Ölçüm Sistemlerinin Oluşturulması

Bu tez çalışmasında geliştirilen özgün DARG algortimaları ve emplementasyonu yapılan diğer görüntüleme algortimaları ile ilk olarak MATLAB® [31] programında mükemmel ortamlar için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Sonrasında başarıları bu benzetim çalışmaları ile değerlendirilen algortimaların gerçek deney verilerine uygulanması için DARG düzenekleri hazırlanmıştır. Bu amaçla mevcut altyapımızdaki ekipmanlara ilaveten bazı sistem elemanlarının ticari firmalardan temin edilmesi, bazılarının ise tasarımları ve üretimleri tarafımdan yapılmıştır. Sahip olunan DARG elemanları ile hem frekans hem de zaman uzayında deneysel ölçümlerin

alınabileceği radar sistemleri oluşturulmuştur. Bu bölümde hem zaman hemde frekans uzayında DARG'de kullanılan sistem elemanlarından temin edilen elemanların teknik spesifikasyonlarından ve tasarımı ve üretimi yapılan diğer elemanların hazırlanış süreçleri ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu amaçla ilk olarak zaman uzayı DARG ölçüm düzeneği ve sistem ekipmanları anlatılmıştır. Sonrasında frekans uzayında çalışan bir doğrusal anten dizisi yapısına sahip DARG sensörü tasarımı ve prototipi hazırlanmış ve gerçek DARG deneysel çalışmalarında kullanılmıştır. Prototipi hazırlanan DARG sensörünün sistem ekipmanlarından doğrusal anten yapısının tasarımı, üretimi ve diğer elemanlar ile birleştirilmesi aşamasından bahsedilmiştir. Belirtilen tüm DARG ölçüm sistemleri ile benzetim ve gerçek deneysel ölçüm çalışmaları yapılarak, başarılı bulgular elde edilmiş ve sonuçları Bölüm 4. de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

3.2.1. Zaman Uzayında DARG Ölçüm Sisteminin Oluşturulması

Bu tez çalışmasında duvar arkası hareketli hedeflerin konumsal bilgisini hesaplamak ve 2B radar görüntülerini elde etmek için oluşturulan DARG deney ölçüm düzeneği Şekil 3.5.'de sunulmaktadır. DARG sistemi ekipmanları aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.



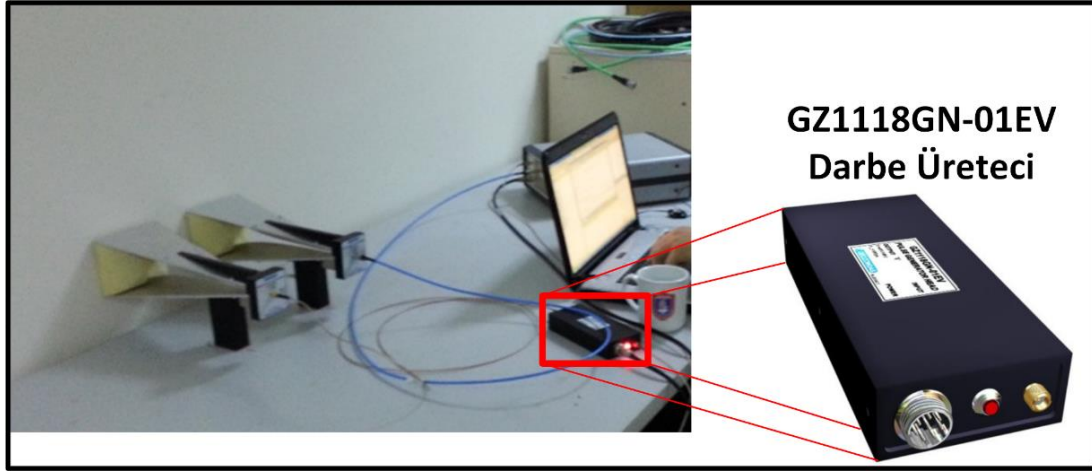
Şekil 3.5. Zaman uzayında duvar arkası radar görüntüleme sistemi.

Radar sistemi elemanlarından biri; Tablo 3.1.'de spesifikasyonları ayrıntıları ile verilen Geozondas [32] firmasından temin edilen GZ1118GN-01EV sinyal jeneratörüdür. Üretilen ve gönderilen radar sinyali negatif polarizasyonlu Gaussian Dalga şekline sahip, 50Ω bir darbe sinyalidir. Darbe genişliği 100 ps ve maksimum darbe tekrarlama frekansı (DTF, Pulse repetition frequency-PRF) 1 MHz dir. 10 KHz ve 1 MHz arasında ki çeşitli frekans değerlerindeki ölçüm

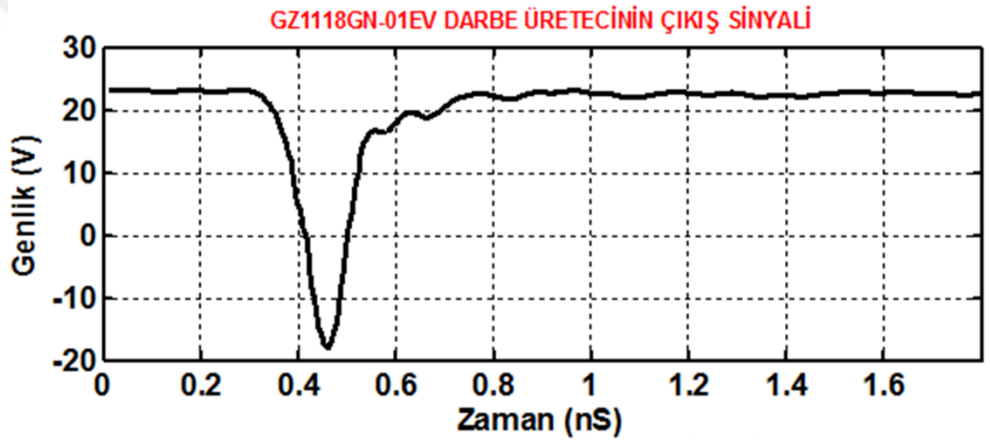
sonucuna göre yaklaşık 43 V genlik değerine sahiptir. Analog/dijital dönüştürücünün tetikleyici jeneratör çıkışından bir SMA konnektörlü RF kablo bağlantısı ile darbe üreticinin giriş kısmına verilir. Darbe üretici tarafından oluşturulan radar sinyali yine RF kablo yardımı ile alıcı anten (TA)'ya ulaşır. Şekil 3.6.'da belirtilen darbe jeneratörünün deney düzeneği içerisinde kullanımından bir görüntüyü sunmaktadır. Ayrıca Şekil 3.7. (a), darbe üreticisi tarafından üretilen negatif Gaussian çıkış sinyalini ve (b) bu sinyalin spektrumunu göstermektedir. Şekil (b) den anlaşılacağı üzere yaklaşık 500 MHz de genlik değerimiz 10 dBV iken yaklaşık 7 GHz de genliğimiz 10 kat azalarak -10 dBV olmuştur. Frekans arttıkça sinyalimizin zayıfladığı rahatlıkla görülmektedir. Bu tez çalışmasında Şekil 3.5.'deki deney düzeneği ile 6 GHz kadar olan frekans bölgesinde çalışılmıştır.

Tablo 3.1. GZ1118GN-01EV [32] darbe üretici spesifikasyonları.

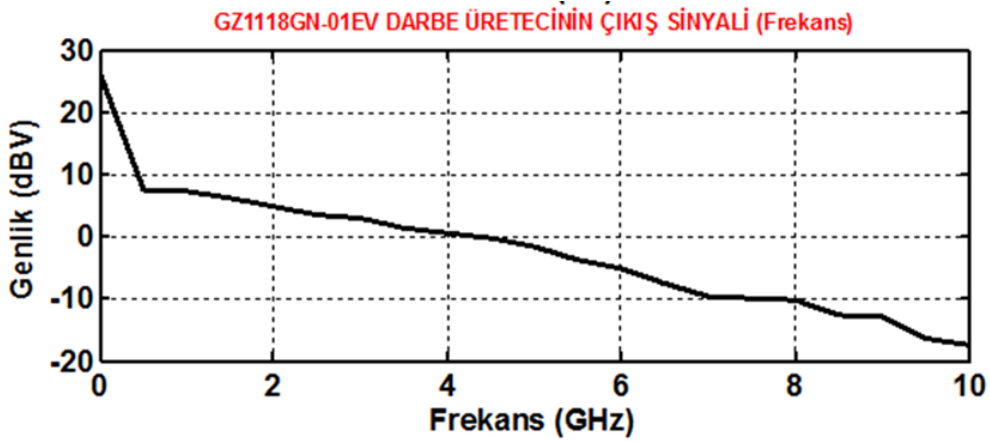
Parametre	Değeri
Dalga Şekli	Yaklaşık Gaussian
Giriş ve Çıkış Empedansı	50 Ω
HF Konnektör Tipi	SMA
Genlik	42.7 V @ 1 MHz 42.7 V @ 500 KHz 42.8 V @ 250 KHz 42.9 V @ 100 KHz 42.8 V @ 10 KHz
Polarizasyon	Negatif
Darbe Genişliği (PW, 0.5 level)	(100 \pm 10) ps
Maksimum Darbe Tekrarlama Frekansı (PRF)	1 MHz
Gecikme (trigger in to pulse out)	8 ns
Güç Kaynağı	+(12.5 \pm 1.5) V
Tüketim Akımı	300 mA @ 12V
Boyutları	(65x28x150) mm
Ağırlık	0.370 Kg.



Şekil 3.6. GZ1118GN-01EV [32] darbe üreticisi.



(a)



(b)

Şekil 3.7. (a) GZ1118GN-01EV [32] üretilen çıkış sinyali (b) spektrumu.

Şekil 3.5.' de DARG zaman uzayı sistem düzeneğinde kullanılan bir diğer ekipman, iki kanallı Geozondas firması tarafından üretilen 6 GHz e kadar periyodik sinyallerin işlenmesinde ve veri alımı için amaçlanan GZ6E Dijital Dönüştürücüsüdür [32]. Cihazın işleyiş kontrolü ve ölçümlerin gerçekleştirilmesi *Marcha 2008EVK* programı ile sağlanabilir olmasına rağmen; bu tez çalışmasında DARG deneylerinde ve uygulamalarında dijital dönüştürücünün kontrolü, senkronizasyonu, data alımı ve sonrasında radar görüntülerini oluşturma işlemleri geliştirilen MATLAB® [31] kontrol ve görüntüleme programı ile sağlanmıştır. GZ6EVK (UWB Evaluation Radar Kit) [32] kullanım alanları özetçe aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- i. Enkaz altı gibi yaşamsal bulguların tespit edilmesi, canlı nesne algılama uygulamalarında, duvar arkası hedef konum tespiti... vb. gibi radar uygulamalarında
 1. Solunum ve kalp atışı
 2. Hareket algılama ve takip etme ...vb.
- ii. Yere nüfuz eden radar uygulamalarında,
- iii. Farklı nesne ve ortamların radar tahkikatlarında, kompleks elektriksel geçirgenlik ölçümlerinde kullanılır.

Şekil 3.8.'de bahsi edilen GZ6E [32] analog/dijital dönüştürücüsü yer almaktadır.



Şekil 3.8. GZ6E [32] dijital örnekleme dönüştürücüsü.

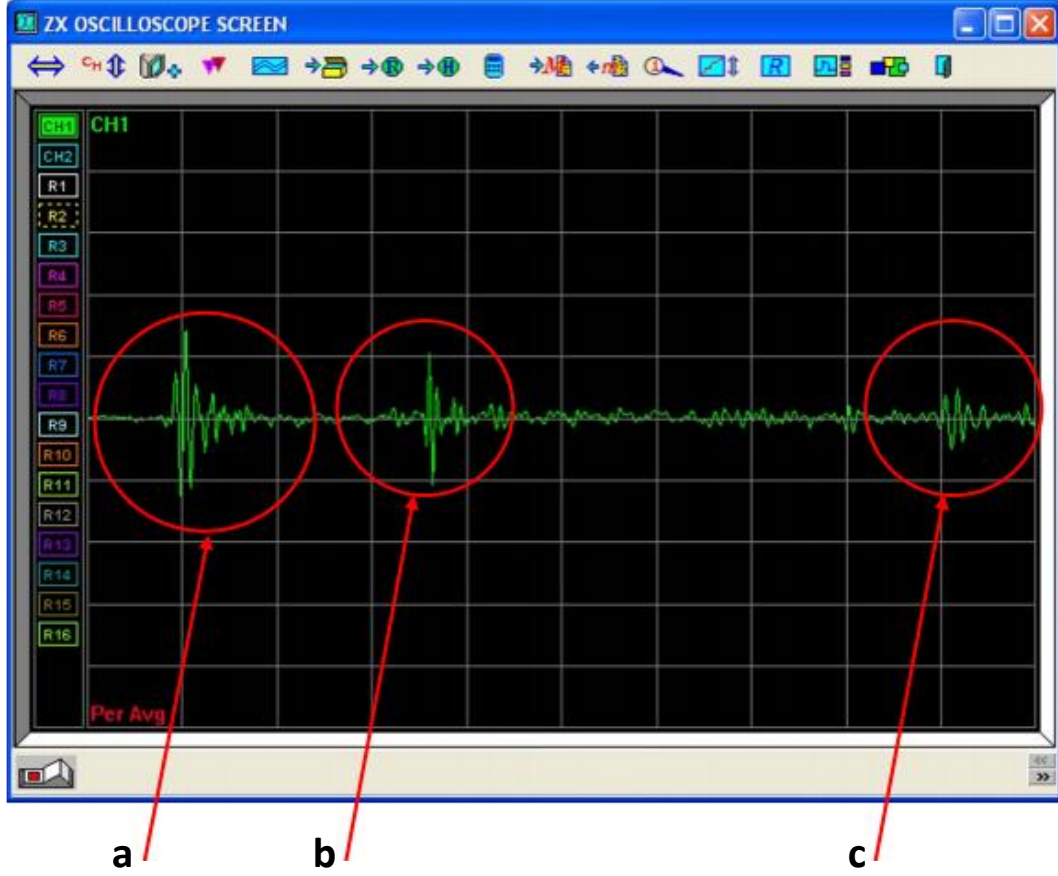
Tablo 3.2.'de bu tez çalışması içerisinde zaman uzayı DARG sistem düzeneğinde kullanılan GZ6E [32] dijital örnekleme dönüştürücüsünün ayrıntılı olarak spesifikasyonları sunulmaktadır.

Tablo 3.2. Zaman uzayı radar sistemi GZ6E [32] spesifikasyonları.

Parametre	Değeri
Dikey Bölge Parametreleri	
Kanal Sayısı	2
Bantgenişliği	
Ch1	(DC-6.8) GHz
Ch2	(DC-6.1) GHz
Dinamik Aralık	
Ch1	(-1000+900) mV
Ch2	(-1000+900) mV
Hassasiyet Aralığı	10-2000 mV/ekran
Maks. RMS Gürültü	
Ch1	0.65 mV
Ch2	0.62 mV
Kanal Girişlerinin Giriş Empedansı	
Ch1	51.8 Ω
Ch2	52.2 Ω
Yatay Bölge Parametreleri	
Zaman Penceresi	100 ns/ekran 15 m @ $\epsilon=1,0$
Zaman Aralığı Çözünürlüğü	12.5 ps/nokta
Zaman Penceresi Noktalarının Maks. Sayısı	4K
Gecikme Ayar Aralığı	(0-100 ns) (0-15 m) @ $\epsilon=1,0$
PRF (Aynı anda 2 kanal için)	250 kHz
Genel Bilgi	
Ortalama Sayı (Maks.)	4K
Operasyon Modu	Gerçek zamanlı tarama (Ekranında yaşam sinyalleri)

Dönüştürücü 2 kanala (CH1) ve (CH2) sahip olduğundan özellikle bir gönderici iki alıcılı radar konfigürasyonlu deney çalışmaları yapılmıştır. Sinyallerin senkronizasyonu için tüm sinyal kaynakları cihazın ön panelindeki "TRIG OUT" çıkışından tetiklenir. Dijital dönüştürücünün kendi kontrol yazılımı olmasına rağmen, bu tez çalışmasında tüm sistem kontrolü geliştirilen

MATLAB® yazılımı ile sağlanmıştır. Deneysel ölçümde, hedeften geri yansıyan ve dönüştürücü tarafından alınan zaman uzaylı sinyal yaklaşık olarak Şekil 3.9.'daki gibidir [32].



Şekil 3.9. GZ6E dijital dönüştürücü tarafından alınan geri yansıyan sinyal örneği.

Şekil 3.9.' da alınan geri yansıyan sinyal ile ilgili olarak;

- a) Gönderici (TA) ve alıcı ($RA_{1,2}$) antenler arasındaki kanal etkileşimi (crosstalk) sinyalini göstermektedir. Genliği, antenler arasındaki mesafeye bağlıdır.
- b) Test nesnesinden yansıyan sinyali
- c) Gönderici anten girişinden ve darbe jeneratöründen yansıyan sinyali göstermektedir.

DARG sisteminin bir diğer önemli elemanı EM dalgayı gönderecek ve alacak olan RF anten birimidir. Bu tez çalışmasında çeşitli anten elemanları kullanılmıştır. Bunlardan bir kısmı yine

ticari firmalardan temin edilerek bir kısmı da radar sistemi için istenilen ve gerekli olan parametrelere uygun tasarımların yapıp imal edilmesi ile sağlanmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan bazı anten çeşitleri tasarımı ve imalatı tarafımızdan yapılan ve bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak yer verilen konik oluk Vivaldi anten (Tapered Slot Vivaldi Antenna) elemanı [111], yine tasarımı ve imalatı yapılan TEM dalga boynuz anten (TEM Wave Horn Antenna), tasarım ve imalatı gerçekleştirilen 2 – 8 GHz frekans bandında çalışan çift sırtlı boynuz anten, Geozondas firmasına ait 1 – 26 GHz frekans bandında çalışan GZ0126 DRH çift sırtlı boynuz anten [32] (Double Ridged Horn Antenna) ve yine Geozondas firmasının entegre üretece sahip çift üstsel konik oluklu direnç yüklü korumalı aktif ve pasif antenleri (Double Exponentially Tapered Slot Resistively Loaded Shielded Antenna (TDE TSA) with integrated generator (AUDXL-A, transmitting) with balun (AUDXL)) [32] olarak verilmektedir.

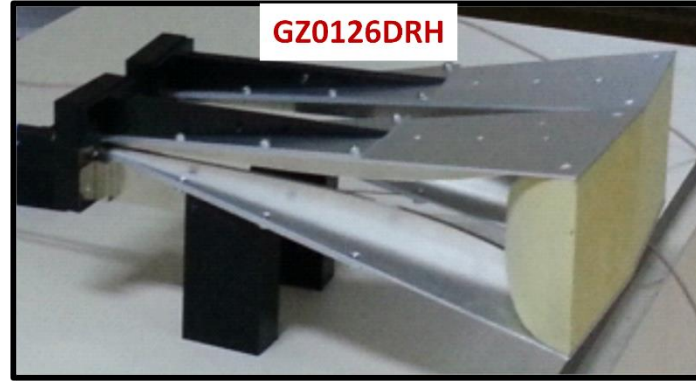
DARG uygulamalarında kullandığımız bu antenlerden bazıları Şekil 3.2.1.6 da sunulmaktadır. Şekil 3.10. (a)'da 1 GHz – 26 GHz frekans aralığında çalışan, kazancı 1 GHz, 16 GHz ve 26 GHz için sırasıyla -1.2 dBi, 17.9 dBi ve 20 dBi olan, yaklaşık 24 GHz için max 1.92 voltaj duran dalga oranına (VSWR) sahip, dikey polarizasyonlu ve H-düzleminde: $77.7 - 10.8$ derece ve E-düzleminde: $37.7 - 12.3$ derece 3 dB ışın genişliği (HPBW) 'ne sahip GZ0126DRH UGB Çift Boynuzlu Horn Anten [32] lens ile birlikte görülmektedir.

Bunun dışında; Şekil 3.10. (b) de görülen, darbe üretici kendi içerisinde mevcut olan 0.3 GHz ile 2 GHz frekans bandında çalışan ve spesifikasyonları ayrıntılı olarak Tablo 3.3'de sunulan yukarıda ismi geçen AUDXL-A ve üreteçsiz hali olan pasif AUDXL antenleri [32] tez çalışması esnasında kullanılmıştır.

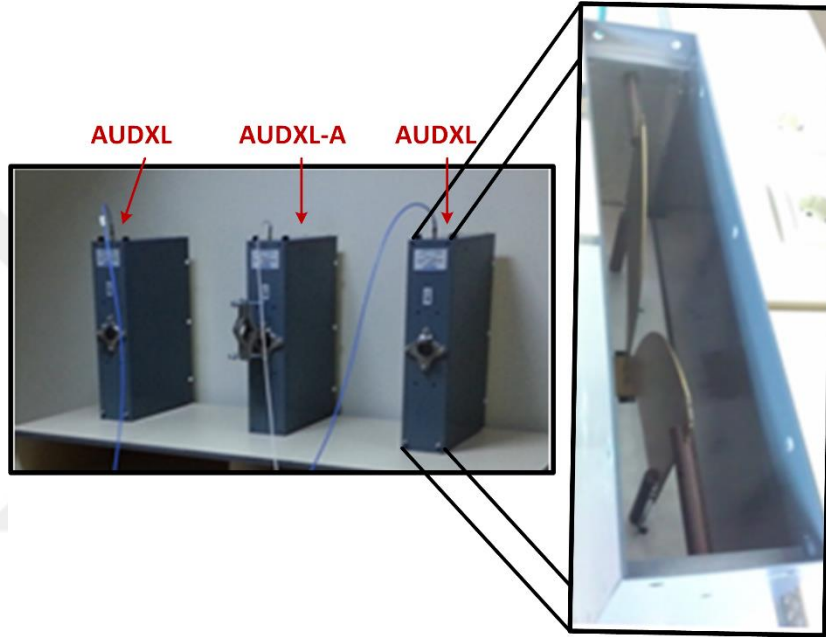
Ayrıca 3 GHz ve 5 GHz C-bantta çalışan ve merkez frekansında yaklaşık 30° yarı demet güç genişliğine sahip olan Şekil 3.10. (c)'de verilen tasarımı ve imalatı tarafımızdan yapılmış olan TEM dalga boynuz anten de yine bu tez çalışması için kullanılmış olan anten elemanlarından. Bunların dışında yine tasarımının CST® [112] programında yapıldığı ve sonrasında imal edilerek DARG uygulamalarında kullandığımız 2 GHz – 8 GHz frekans bandında çalışan Şekil 3.10. (d)'de tasarım ve üretim fotoğrafı sunulan çift boynuzlu horn anten elemanı yine birçok DARG uygulamalarında kullanılmıştır.

Tablo 3.3. AUDXL-A ve AUDXL [32] anten spesifikasyonları.

Parametre	Değeri		
Anten tipi	Çift Üstsel Konik Oluklu Direnç Yüklü Korumalı Aktif ve Pasif antenleri (Double Exponentially Tapered Slot Resistively Loaded Shielded Antenna (TDETSAs) with integrated generator (AUDXL-A, transmitting) with balun (AUDXL))		
Frekans sahası	0.3 - 2 GHz		
3 dB Demet genişliği	AUDXL-A	AUDXL #1	AUDXL #2
@ freq	0.3 1 2 GHz	0.3 1 2 GHz	0.3 1 2 GHz
H-düzlemi	178 119 53 deg	197 124 54 deg	201 126 53 deg
E-düzlemi	123 41 38 deg	181 40 36 deg	180 40 37 deg
VSWR, max	Max. 3 @ 0.3 - 2 GHz		
Anten kazancı			
@ 0.3 GHz		-4.7 dBi	-5.0 dBi
@ 1 GHz		+5.0 dBi	+5.2 dBi
@ 2 GHz		+3.9 dBi	+4.0 dBi
Polarizasyon	Lineer Dikey		
Boyutlar			
Açıklık	105x490 mm		
WxHxL	105x490x340 mm		
Konnektör	SMA, Dişi		
Ağırlık	3.5 kg.	4.2 kg.	
Spektral yoğunluk farkı			
@ alıcı DETSA (0.4 - 2 GHz)	Max. -35 dB		
Sinyal genliği @ 1 m aralık alıcı ve gönderici DETSA arasında	5V dan fazla		



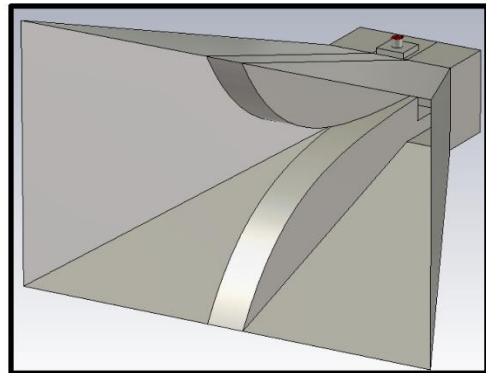
(a)



(b)



(c)

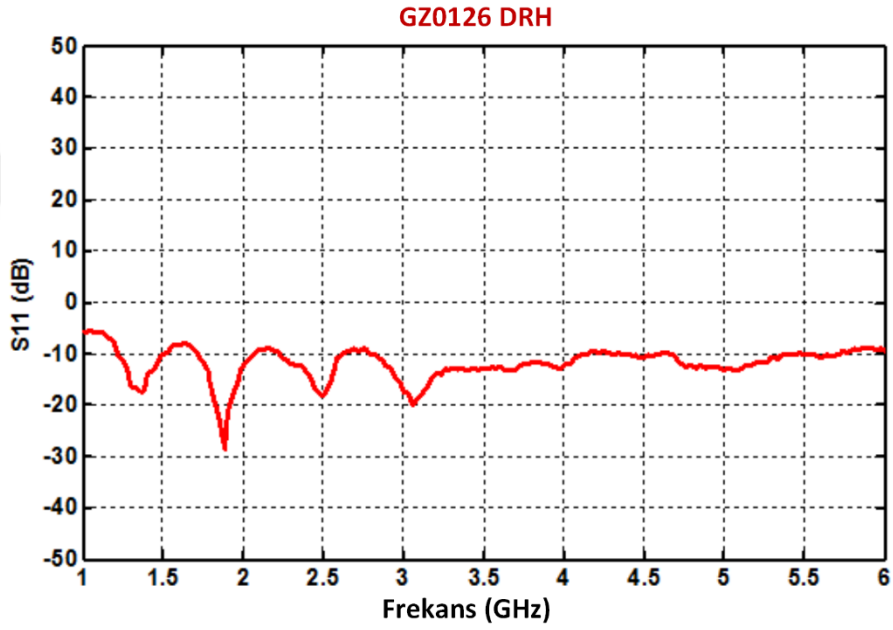


(d)

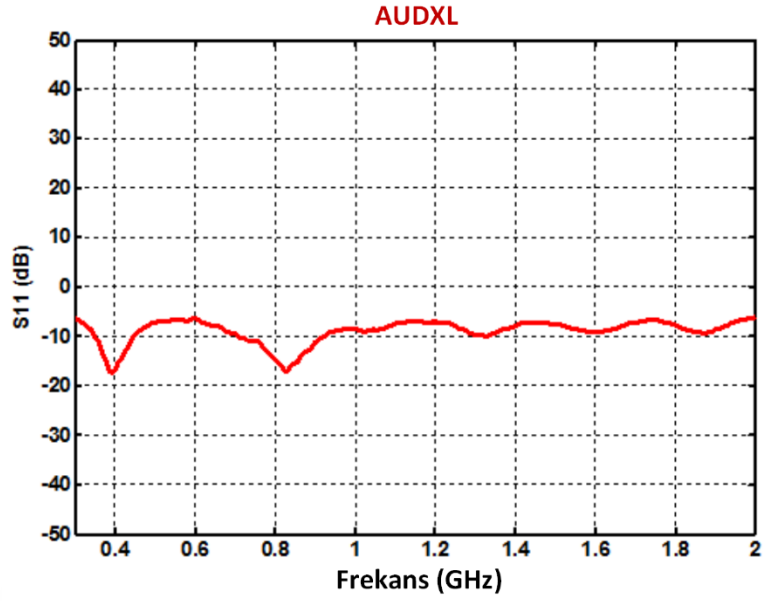
Şekil 3.10. (a) Geozondas GZ0126 DRH [32] Çift sırtlı boynuz anten (b) Geozondas AUDXL-A (aktif anten) ve AUDXL (pasif antenler) [32] (c) 3-5 GHz frekans bandında çalışan tasarım boynuz anten (d) 2-8 GHz frekans bandında çalışan tasarım çift sırtlı boynuz anten.

Ayrıca bir sonraki bölümde anlatılacak olan yanca uzayında yüksek çözünürlük sağlayan sekizli doğrusal anten dizisi yapısına sahip DARG prototipinde Vivaldi anten elemanı kullanılmıştır. Bu anten yapısı, tasarımı, spesifikasyonları ve üretimi aşaması Bölüm 3.2.3'de ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

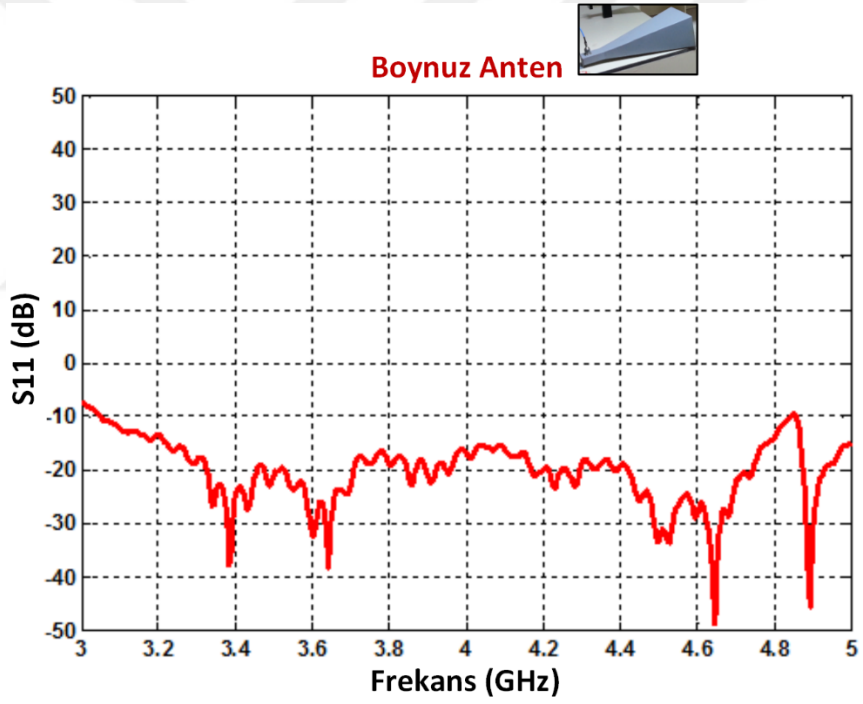
Yukarıda bahsi edilen anten çeşitlerinin performanslarının bir parametresi olan S_{11} yansımaya katsayısı ölçümleri Şekil 3.11.' de yukarıda Şekil 3.10.' da verilen antenlerin sırasına göre sunulmaktadır. Antenlerin belirtilen frekanslarında yansımaya katsayıları ölçüm sonuçlarının -10 dB nin altında olduğu rahatlıkla görülmektedir.



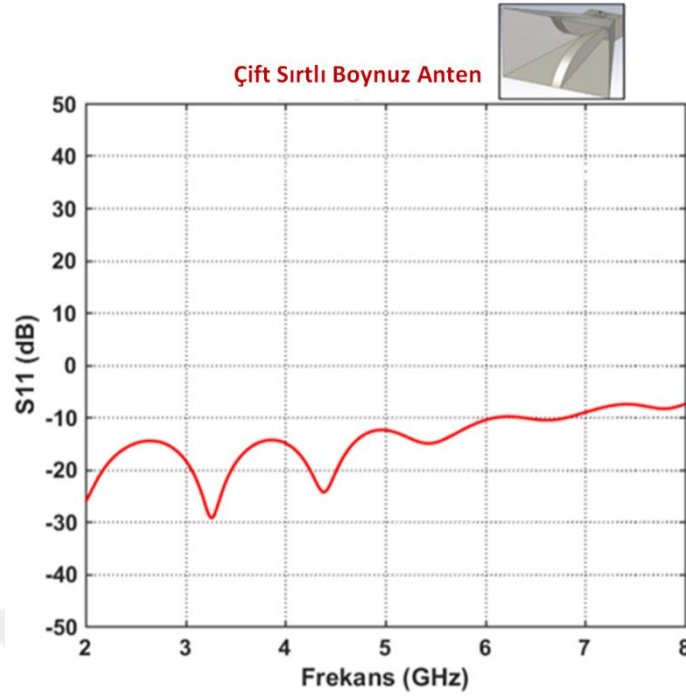
(a)



(b)



(c)

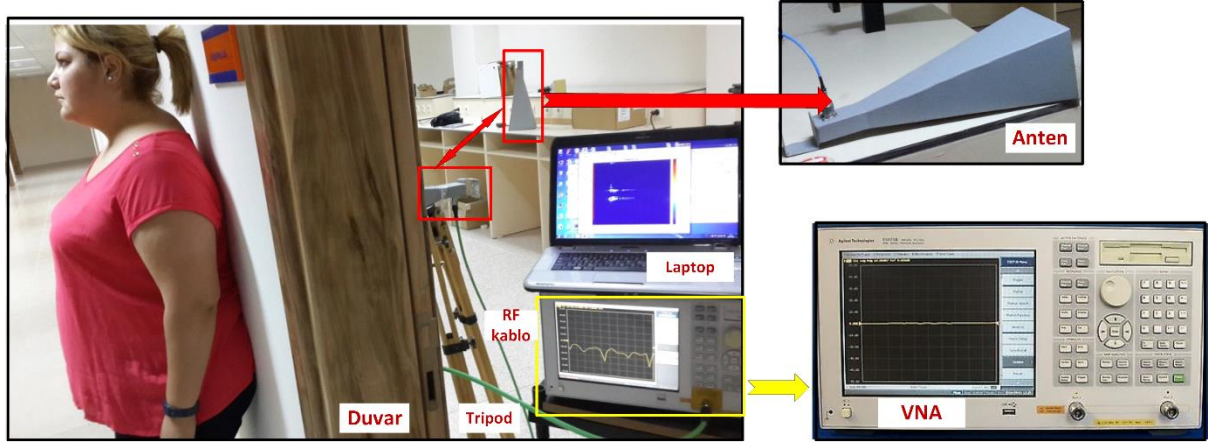


(d)

Şekil 3.11. S_{11} ölçüm sonuçları (a) Geozondas GZ0126 DRH [32] Çift sırtlı boynuz anten (b) Geozondas AUDXL-A (aktif anten) ve AUDXL (pasif antenler) [32] (c) 3-5 GHz frekans bandında çalışan tasarım boynuz anten (d) 2-8 GHz frekans bandında çalışan tasarım.

3.2.2. Frekans Uzayında DARG Ölçüm Sisteminin Oluşturulması

Duvar arkasındaki sabit ve hareketli hedeflerin deneysel ölçümlerinde kullanılan bir diğer düzeneğimiz frekans uzayında DARG sistemidir. Bu amaçla frekans uzayındaki ilk ölçüm düzeneğimiz Şekil 3.12.'de verildiği düzenektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere duvar arkasında sabit nesne/insan veya hareketli insan hedef olarak kullanılmıştır. Frekans uzayında DARG de ilk olarak verilen şekildeki düzenekte olduğu gibi, duvar arkasında sabit duran bir insanın nefes alıp-verme ve kalp atış grafikleri gibi yaşamsal bulguların tespitine yönelik deneysel çalışmalar yapılmıştır. Frekans uzayı DARG düzeneği, aşağıdaki şekilde de belirtildiği üzere AFSD radar sinyallerini üreten [46], gönderen ve alan Agilent ENA5071B model Vektör Network Analizör (VNA) [113], üretilen EM radar sinyallerinin ortama gönderilmesinde ve alınmasında kullanılan anten elemanı (bir önceki bölümde ayrıntılı olarak anlatılan anten çeşitlerinden), EM dalganın iletimi için kullanılan RF kablolar, anten elemanını sabitleyen tripod, duvar materyali ve sistemin senkronizasyonu, kontrolü ve hedeften alınan geri yansıma verilerinin toplanması ve işlenmesi için kullanılan bir adet kişisel bilgisayardır.

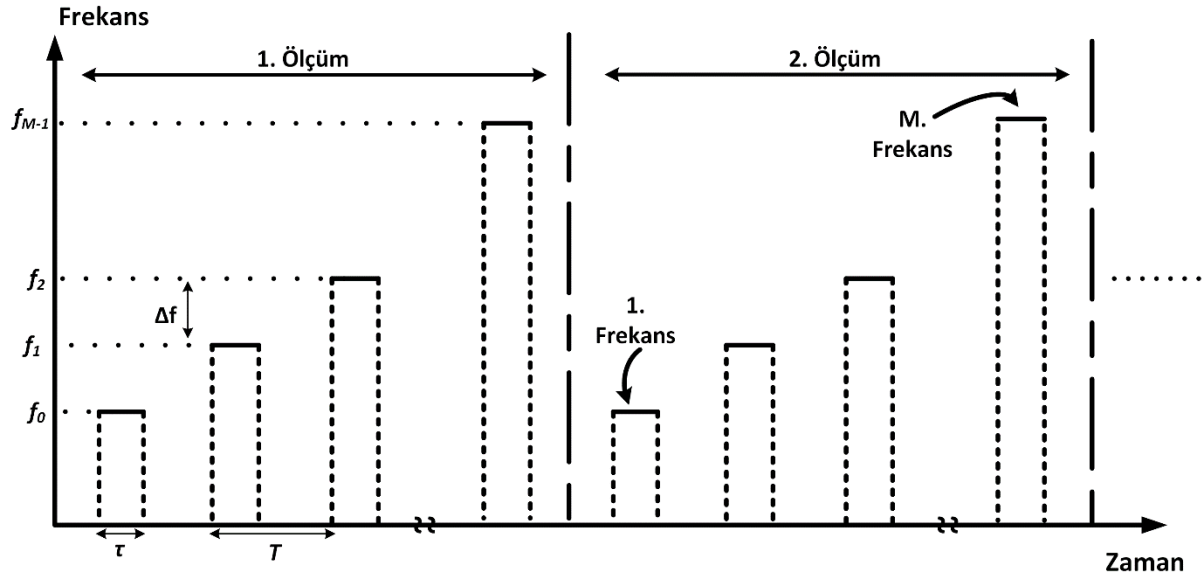


Şekil 3.12. Frekans uzayında DARG deneysel ölçüm düzeneği.

Şekil 3.12.'de belirtilen radar düzeneği ile duvar arkası deneysel çalışmalar Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü Anten Laboratuvarında ve yine aynı bölüm içerisinde farklı mekanlarda ayrıca yine Mersin Üniversitesi İleri Teknoloji Eğitim, Araştırma ve Uygulama Merkezi (MEİTAM)'da bulunan "Elektromanyetik Yansımaz Oda" laboratuvarının dış bölümünde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Aşağıda Şekil 3.12.'de yer alan VNA elemanından ve AFSD radar dalga şeklinden kısaca bahsedilmiştir.

Adım Frekanslı Sürekli Dalga (AFSD)

AFSD sinyali üretilirken Şekil 3.13.'de olduğu gibi komşu alt dalgalar arasındaki frekansı Δf frekansı kadar artırılır. AFSD sinyalinin bir atışı için, her biri farklı $f_n = f_0 + (m - 1) \cdot \Delta f$ frekansına sahip olan toplam M adet sürekli dalga (CW) sinyali gönderilir. Herbir alt dalga τ kadar bir darbe süresine sahiptir ve komşu alt dalga dan T kadar uzaklıktadır [46].



Şekil 3.13. Zaman frekans düzleminde AFSD sinyali.

Toplam frekans bant genişliği BG ve frekans çözünürlüğü Δf aşağıda verilen denklem 3.21 ve 3.22 de verilmektedir.

$$\begin{aligned} BG &= (f_{M-1} - f_0) + \Delta f \\ &= M \cdot \Delta f \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} \Delta f &= \frac{BG}{M} \\ &= \frac{(f_{M-1} - f_0) + \Delta f}{M} \end{aligned} \quad (3.22)$$

AFSD radar sinyali, hedefin menzile ulaşmak için kolaylıkla kullanılabilir. Radardan R_0 kadar uzaklıkta bir hedef olduğu varsayalım. Monostatik AFSD radarının tek bir ölçümünde geri saçılan dalga fazı, Denklem (3.23)'de verilen menzile orantılıdır.

$$E_s[\mathbf{f}] = A \cdot e^{-jk2R_0} \quad (3.23)$$

Burada E_s , saçılan elektrik alanı, A saçılan alan genliğini ve \mathbf{k} ise $\mathbf{f} = [f_0 f_1 f_2 \dots f_{M-1}]$ frekans vektörüne karşılık gelen dalga vektörünü temsil eder. Fazdaki 2 sayısı radardan- hedefe ve hedeften - radara olan 2 yönlü yayılımı simgeler. Denklem (3.23)'den açıkça görüleceği üzere; $(2\mathbf{k})$ ve (R) arasında bir FD ilişkisi mevcuttur. Böylelikle AFSD radar cevabının; geri saçılan sinyalin TFD alınarak R_0 menzile değerini çözmek mümkündür. Elde edilen sonuç hedefin menzile

profilini vermektedir. Menzil çözünürlüğü *Fourier* teorisi tarafından aşağıdaki şekilde ki gibi belirlenir.

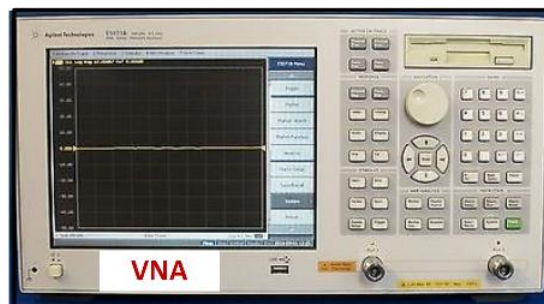
$$\begin{aligned}\Delta_r &= \frac{2\pi}{2BW_k} \\ &= \frac{\pi c}{2\pi BW_f} \\ &= \frac{c}{2BG}\end{aligned}\quad (3.24)$$

Burada BW_k ve BW_f sırasıyla dalga numarası ve frekans uzaylarındaki bant genişliklerini temsil etmektedir. Maksimum menzil mesafesi; menzil çözünürlüğü ve AFSD sinyalindeki darbe sayısının çarpımı ile elde edilir ve aşağıdaki şekilde hesaplanır [46].

$$\begin{aligned}R_{max} &= M \cdot \Delta_r \\ &= M \cdot \frac{c}{2BG}\end{aligned}\quad (3.25)$$

Vektör Network Analizör (VNA)

Frekans uzayında DARG düzeneğinde kullanılan anten elemanı ve çeşitlerinden bir önceki bölümde ayrıntılı olarak bahsedilmişti. Bu tez çalışmasında, Şekil 3.12.'de sunulan DARG düzeneğinde radar alıcısı-vericisi olarak kullanılan ve yukarıda bahsedilen AFSD radar sinyallerini üretip, gönderen ve frekansın bir fonksiyonu olarak S_{11} geri yansıyan kompleks verilerini toplayan Agilent ENA5071B model VNA [113] kullanılmıştır. Mevcut VNA 2 kanala, 300 KHz – 8 GHz frekans bandında çalışma özelliğine, maksimum 125 dB dinamik aralığa ve maksimum 1601 ayırık frekans örnekleme noktasına sahiptir. Bu tez çalışmasında DARG uygulamalarında kullanılan Agilent ENA5071B model VNA [113] Şekil 3.14.'de verilmektedir. Ayrıca mevcut VNA bir sonraki bölümde bahsi edilen doğrusal dizi DARG ölçüm sisteminde de kullanılmıştır.



Şekil 3.14. Agilent ENA5071B VNA [113].

3.2.3. Doğrusal Dizi DAGR Ölçüm Sisteminin Tasarlanması Ve Üretimine Gerçekleştirilmesi

Duvar arkası görüntüleme menzile çözünürlüğü iletilen sinyallerin geniş bant-genişliği ile sağlanırken, yanca uzayındaki çözünürlük bu yönde yeterli açıklığın sağlanması ile mümkün olmaktadır. Asıl problem, yanca uzayında bulunan radar alıcıların sınırlı olması nedeniyle, bu uzaydaki çözünürlüğün düşük olmasıdır. Gerçek duvar arkası radar görüntüleme uygulamalarında bu problem YAR görüntüleme ile mümkün olabilmektedir ancak bunun için de bu açıklıkta yeterli kadar anten alıcısının olması gerekmektedir. Ayrıca literatürde sınırlı sayıda bulunan ticari ya da askeri amaçlı kullanılan ürünler de 2 ya da 4 alıcılı anten konfigürasyonuna sahiptir ve yeterli yanca çözünürlüğü oluşamamaktadır [114, 115]. Bu amaçla, DARG'de yüksek yanca çözünürlüğü elde edecek doğrusal anten dizisine sahip bir duvar arkası radar sensörü tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, prototipi üretilen sensörün tasarım ve üretim aşamaları ayrıntılı ve görsel biçimde sunulmaktadır. Prototip radar sensörü ile gerçek duvar arkası deneysel ölçümler yapılmıştır. Sonrasında, bu tez çalışmasında bahsedilecek olan geliştirilen ve başarısı benzetim çalışmaları ile doğrulanan sinyal işleme algoritmalarıyla toplanan ölçüm verileri tutarlı biçimde işlenip alınan sinyalin SGO'su artırılmıştır. Böylelikle hedefin güvenilir şekilde görüntülenmesi için algılama olasılığı artmış bulunmaktadır. Bölüm 3.2.3.1.'de duvar arkası üretilen prototip sensörde kullanılan anten yapısı, tasarımı ve üretiminden bahsedilmiştir.

3.2.3.1. Tekli Vivaldi Anten Tasarımı Ve Üretimi

Bu bölümde geliştirilen ve üretilen; duvar arkası görüntüleme veya benzeri uygulamalarda kullanılacak radar sensörünün anten elemanının seçimi ve tasarım süreci açıklanmıştır. Bir önceki bölümde DARG' de kullanılan materyallerden bahsedilirken bu uygulamalarda başarılı sonuçlar veren boynuz/çift boynuz yapıları antenlerden ve teknik özelliklerinden bahsedilmiştir. Bu yapıdaki antenler kazanç, yönlülük, düşük duran dalga oranı, geniş bant-genişliği, basit yapıda olma gibi avantajlara sahiptirler [116]. Ancak; ağır, büyük, hantal bir yapıda olması ve montajının nispeten daha zor olması nedeniyle yanca çözünürlüğünde yüksek çözünürlük sağlayacak dizi anten elemanı olarak kullanımı tercih edilmez. Duvar arkası uygulamalarda taşınabilirlik için, gönderici ve alıcı antenlerin kompakt ve hafif olması gerekmektedir. Ayrıca, fiziksel boyutlara ilişkin gerekliliklerin, antenlerin UGB sinyallerini en az bozulma ile göndermesi istenilir. İlave olarak, anten radyasyon paterni de hesaba katılması gereken bir durumdur. Çünkü genellikle görüntüde ki önemli bozulmalar radyasyon paternine bağlı

olabilmektedir. Bütün bu sebeplerden ötürü bu tez çalışmasında, boynuz anten gibi benzer avantajlara ve anten dizisi için uygun yapısal özelliklere sahip olan Vivaldi anten yapısı [117] doğrusal anten dizi elemanı olarak tercih edilmiştir.

Vivaldi anten elemanı, basit bir yapıya, hafifliğe, küçük yanal boyutlara, geniş-banta, yüksek verimliliğe, yüksek kazançla sahip olmasına ve ayrıca özellikle dizi yapısı için mükemmel bir eleman olarak kullanılabilirdiğinden dolayı tercih edilmiştir. Ayrıca bu tez çalışmasında Konik Yuvalı Vivaldi Anten çeşidi (KYVA: Tapered Slot Vivaldi Antenna) elemanının tez çalışmamıza uygun boyut ve istenilen anten parametrelerine sahip olacak şekilde tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu amaçla, çapraz menzil yönünde HPBW yaklaşık olarak 60° ve 4-8 GHz frekans bandı gereksinimlerine sahip vivaldi anten elemanının CST Studio Suite Electromagnetic Simulator Code® [112] simülatörü yardımıyla tasarımı gerçekleştirilmiştir.

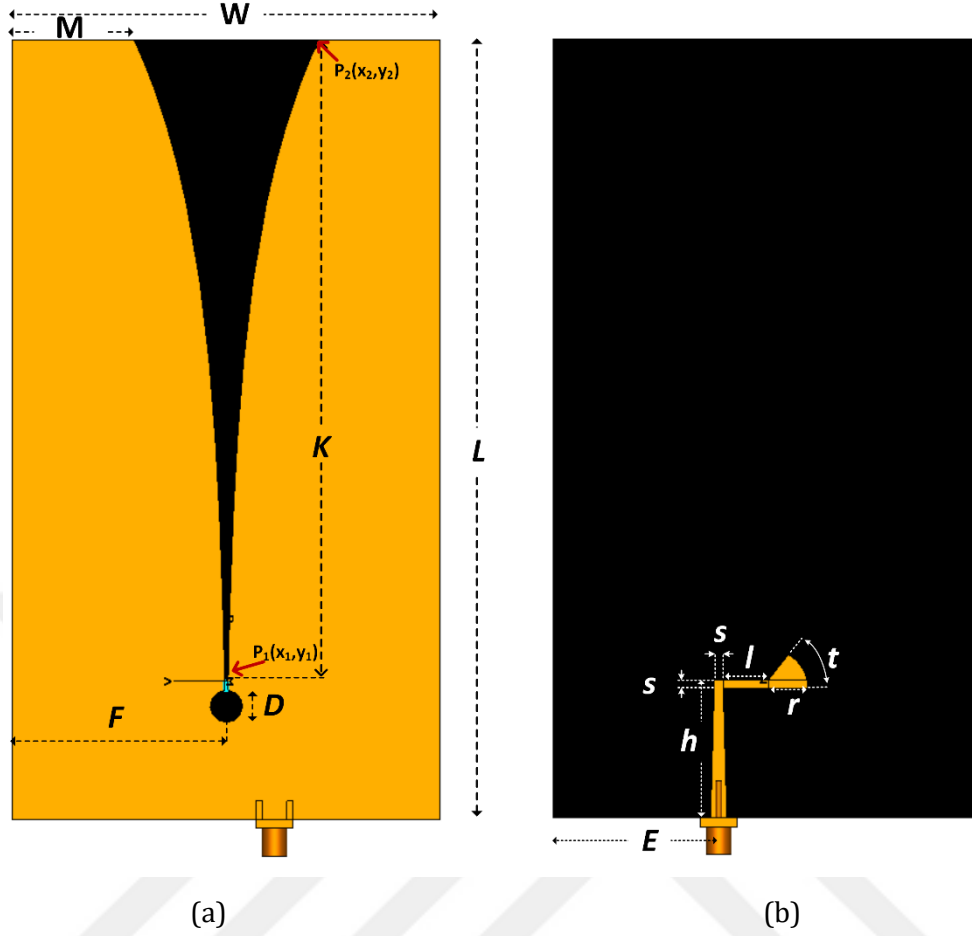
Önerilen ve imal edilen KYVA elemanının geometrisi ve boyutları Şekil 3.15. ve Tablo 3.3.'de sunulmaktadır. Şekil (a) antenin üstel konik profilini (exponential taper profile) ve (b) KYVA'nin beslemesi için kullanılan mikroşerit hattı ve radyal saplamasını (stub) göstermektedir. Üstel konik profilin başlama noktası (kısa açıklık tarafı); $P_1(x_1, y_1)$ noktası olsun, açıklığın bitiş noktası (uzun açıklık tarafı); $P_2(x_2, y_2)$ noktası olarak adlandırılınsın. Buna göre, üstel konik profili aşağıda belirtilen denklem ile elde edilir;

$$y = Ae^{Bx} + C \quad (3.26)$$

$$A = \frac{y_2 - y_1}{e^{Bx_2} - e^{Bx_1}} \quad (3.27)$$

$$C = \frac{y_1 e^{Bx_2} - y_2 e^{Bx_1}}{e^{Bx_2} - e^{Bx_1}}$$

Burada; B açıklık oranını temsil etmektedir [118]. Küçük konik açıklık (flare) açısı, çalışma frekansının alt limitini azaltacaktır. Böylelikle antenin bant-genişliği artmış olacaktır [119]. Benzer durum üstel açıklık oranı B içinde geçerlidir. Daha büyük açıklık oranları için, konik açısı başlangıç noktasında küçük olur ve alt frekans benzer şekilde düşecektir. 4-8 GHz frekans bandında çalışması beklenen antenin tasarım parametreleri yapılan optimizasyon işlemlerinden sonra Tablo 3.3.'de sunulmuştur.

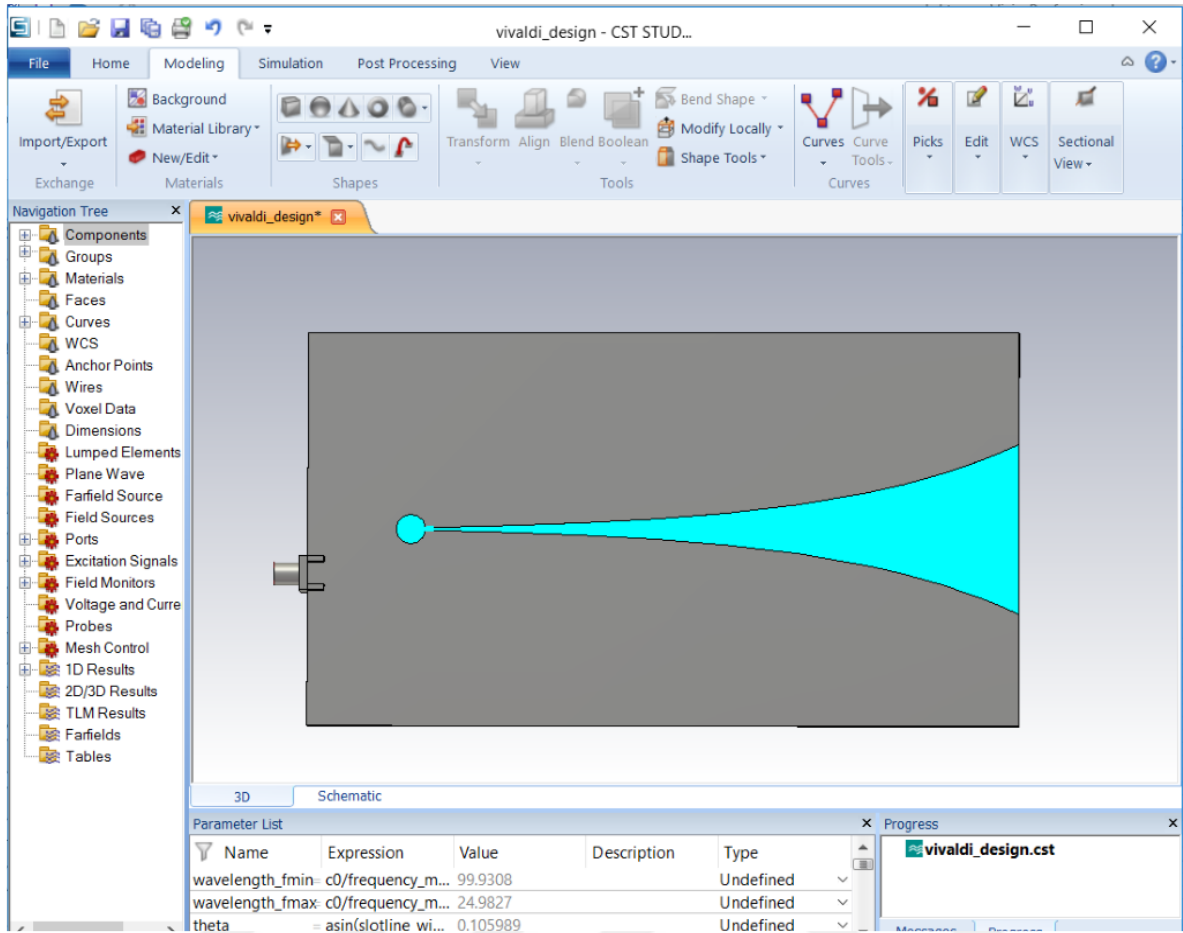


Şekil 3.15. Vivaldi anten elemanı geometrisi (a) üst katman (b) alt katman.

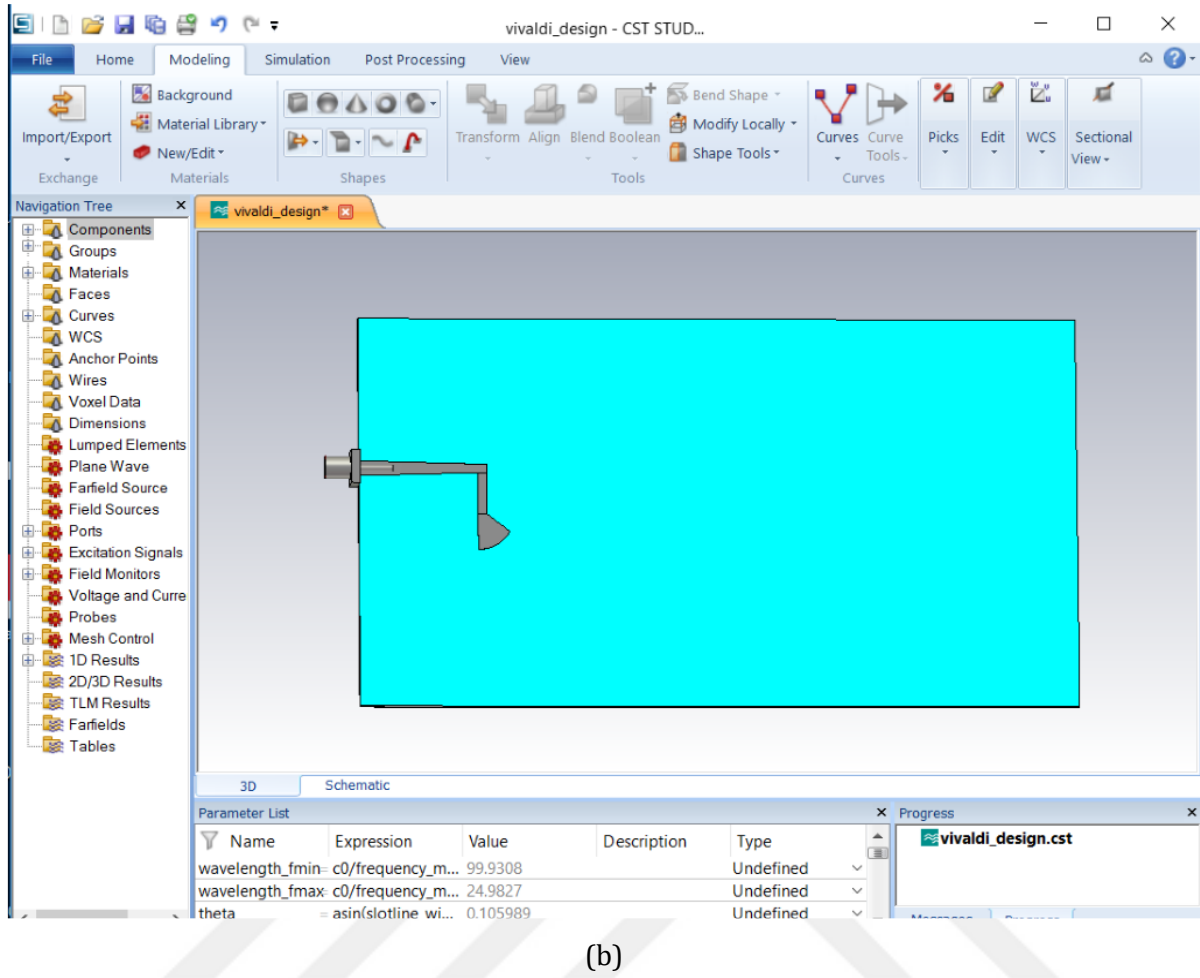
Tablo 3.4. Tasarlanan Vivaldi anten elemanının ölçüleri.

Vivaldi Anten Ölçüleri (mm)												
F	D	M	W	L	E	K	h	s	l	r	t	
35	2.6	19.9	70	127.5	27.1	107	22.6	1.5	7.4	6.5	6.8	

Anten elemanı, CST® benzetim yazılımının özellikle yüksek frekans elemanlarının 3B elektromanyetik benzetimi için kullanılan CST MICROWAVE STUDIO® (CST® MWS®) [112] yazılımı ile tasarlanmıştır. Bu simülâtör; uygulama için en iyi çözüm oluşturacak çeşitli farklı benzetim teknikleri (“transient, frequency domain, time domain, integral equation, eigenmode, asymptotic solver” gibi) içermektedir. Bu çalışmada, Zaman Uzayı Çözüm (Time Domain Solver) işlemi ile anten elemanının 1B ve 2B sonuçları elde edilmiştir.



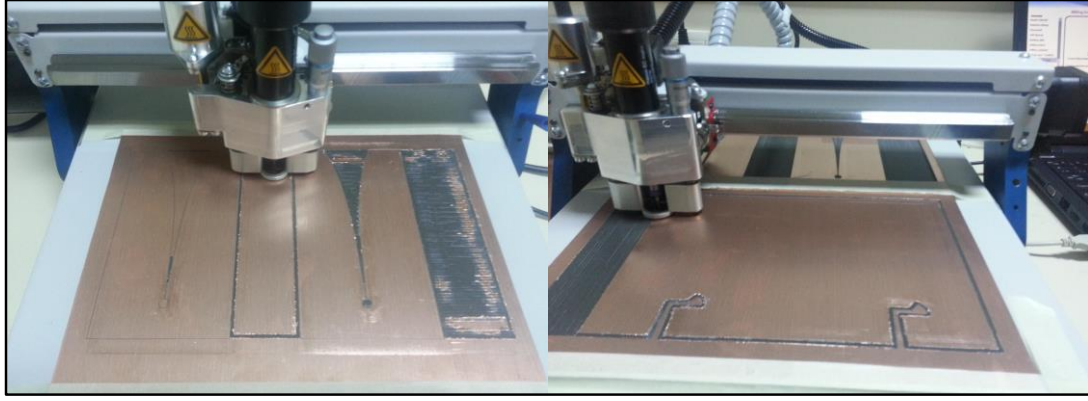
(a)



(b)

Şekil 3.16. CST® [112] programında tasarlanan Vivaldi anten eleman'ının (a) üst katman (b) alt katman görüntüsü.

Şekil 3.16.'de boyutları Tablo 3.4.'de sunulan ve 4 – 8 GHz frekans bandında çalışan Vivaldi anten elemanının CST® programındaki üst ve alt katmanının ekran görüntüsünü göstermektedir. CST® programında anten tasarımında dielektrik katsayısı 2.33, kalınlığı 1.575 mm ve kayıp tanjant değeri 0.0125 olan Rogers RT5870 [120] alttaş malzemesi kullanılmıştır. Anten elementi tasarım sonrası aynı alttaş malzemesi kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Anten üretim aşamasında LPKF ProtoMat E33 [121] modelinde elektronik baskı devre kartı; BDK prototipleme makinası kullanılmıştır. Şekil 3.17. (a) ve (b) sırasıyla, tasarlanan Vivaldi antenin BDK'sının LPKF makinasıyla üretim aşamasından bir kesitini (b) üretilen Vivaldi anten elemanının ön ve arka yüzeylerini göstermektedir.



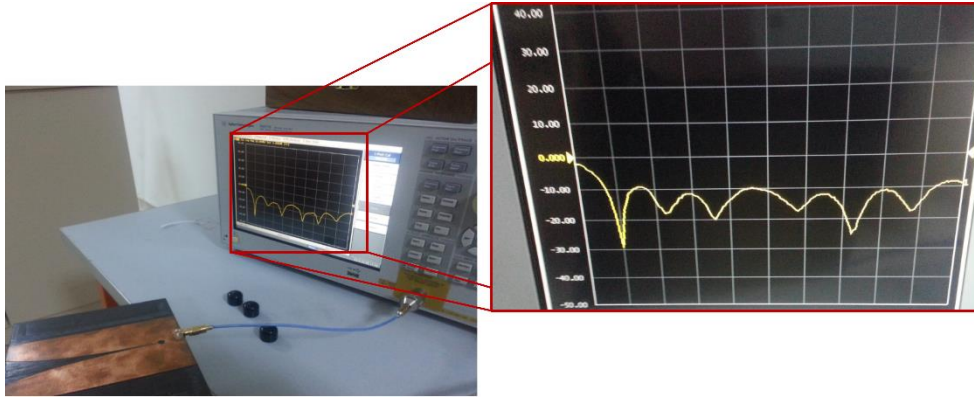
(a)



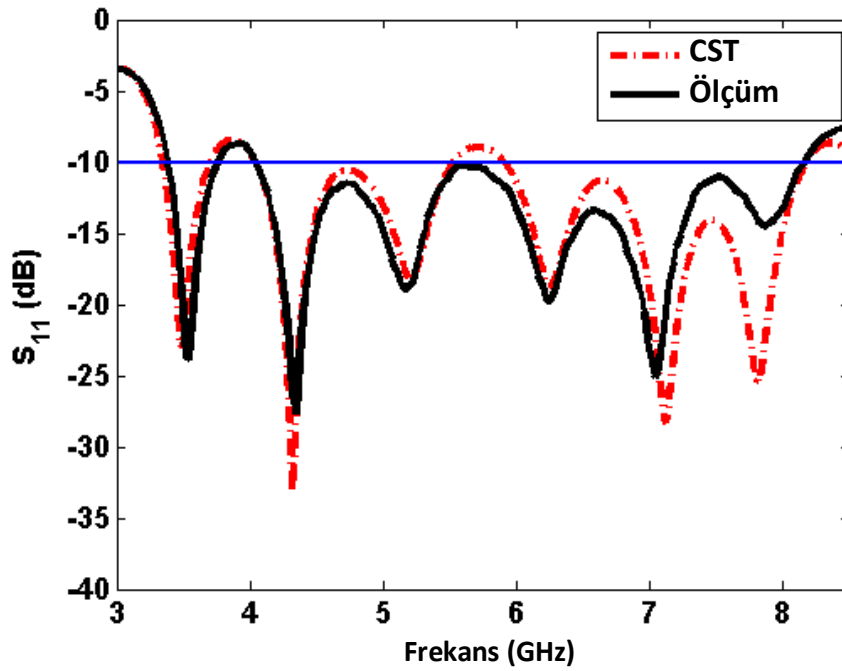
(b)

Şekil 3.17. (a) Vivaldi anten elemanının LPKF [121] cihazı ile üretim aşaması (b) Üretilen antenin ön ve arka yüzeyleri.

Anten elemanının beslemesi benzetimda da kullanılan 50Ω SMA konnektör kullanılarak sağlanmıştır. Şekil 3.17. (b)'de SMA konnektör rahatlıkla görülmektedir. Üretilen anten elemanlarının performansı geri saçılım katsayısının (S_{11}) elde edilmesi ile ölçülmüştür. Bu amaçla, Agilent E5071B ENA vektör network analizörü kullanılmıştır. Şekil 3.18. (a) üretilen Vivaldi anten elemanının VNA yardımı ile ölçülen S_{11} parametresini göstermektedir. Şekil (b) Vivaldi antenin S_{11} parametresinin benzetim ve gerçek ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Şekilde; mavi düz hat referans -10 dB S_{11} ölçüm değerini; siyah düz çizgi ölçüm sonucunu, kırmızı kesik çizgi ise benzetim sonucunu göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere; ölçülen ve benzetim sonucu verilen S_{11} değerlerinin $4 - 8 \text{ GHz}$ frekans bandında -10 dB 'nin altında olduğu görülmektedir. Ayrıca ölçüm ve benzetim sonuçları mükemmel biçimde örtüşmektedir. Dolayısı ile Vivaldi anten için istenilen frekans bant-genişliği böylelikle sağlanmış olmuştur.



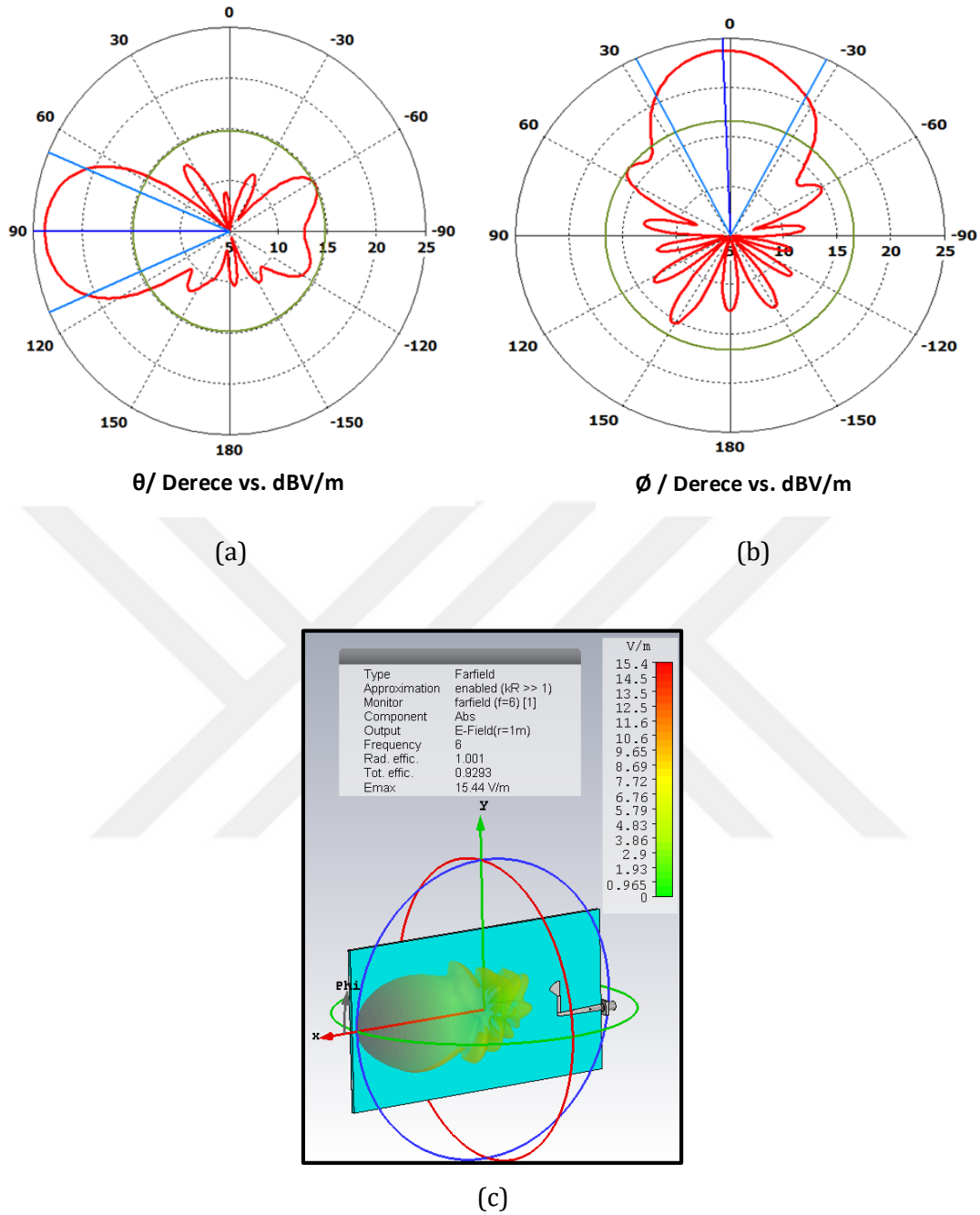
(a)



(b)

Şekil 3.18. (a) Üretilen Vivaldi anten elemanının Agilent VNA ile S_{11} parametresinin ölçümü, (b) S_{11} parametresinin benzetim ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.

6 GHz merkez frekansı için tasarlanan antenin Elektrik alanı E-düzlemi ve H-düzlemi radyasyon ışınım paternleri kutupsal gösterimde ve dB ölçeğinde Şekil 3.19. (a) ve (b)'de sırasıyla sunulmaktadır. Şekil (a)'dan rahatlıkla görülebileceği üzere; antenin E-düzlemi yönünde 46.1° 'lik HPBW sahip olduğu ve maksimum yan lob seviyesinin (YLS) -8.9 dB civarında olduğu söylenebilir. Belirtilen bu sonuçlar gerçek DARG uygulamaları için kabul edilebilir değerlerdir. Tasarlanan anten elemanının kazancı 9.32 dB olarak hesaplanmıştır ki bu sonuç 46.1° 'lik radyasyon ışınım genişliği için yeterli makul bir sonuçtur.



Şekil 3.19. Tasarlanan Vivaldi antenin (a)kutupsal gösterimde E-düzlem radyasyon paterni @ $\phi=0^\circ$ (b) kutupsal gösterimde H-düzlem radyasyon paterni @ $\theta=90^\circ$ (c) 6 GHz de E-düzlem 3B ışınma paterni.

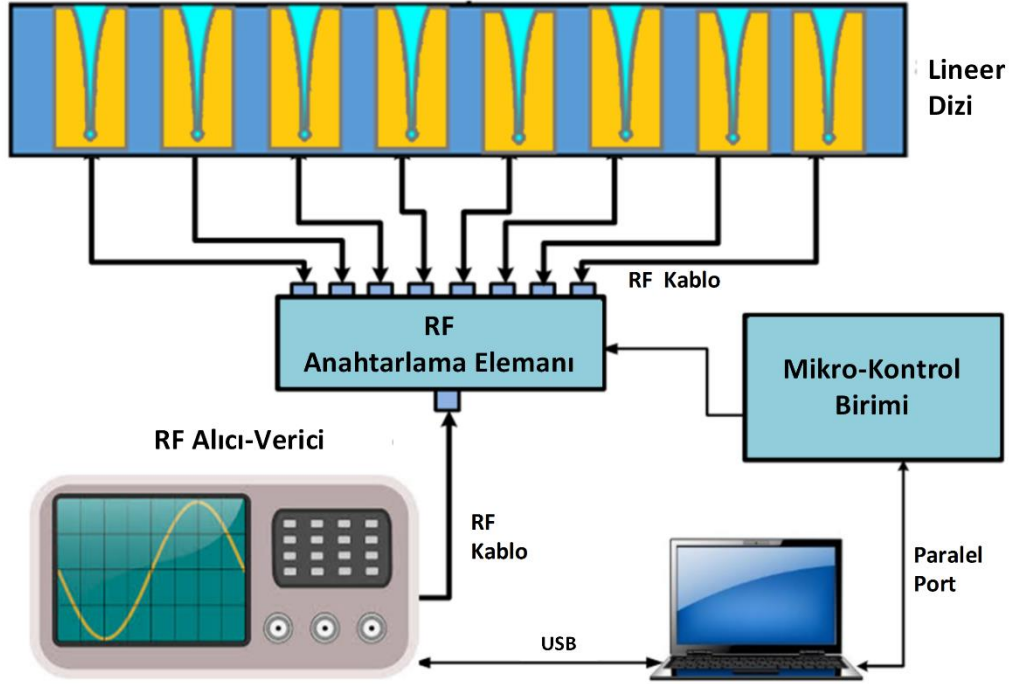
Şekil 3.19. (b) antenin $\theta = 90^\circ$ 'de antenin kutupsal gösterimde H-düzlem radyasyon ışınma paterni'ni göstermektedir. $\phi = 0^\circ$ bakış açısı yönünde, tasarlanan anten -26.1° ile 26.1° arasındaki bölgeyi aydınlatma özelliğine sahip olduğu kolaylıkla görülmektedir ki bu açı değeri DARG için uygun çalışma parametresidir. Ayrıca azami YLS -7.1 dB ve arka-lob seviyesi -12

dB'dir. Şekil (c), 3B'lu E-düzlemi lineer ölçekte ışımaya paternini anten elemanı ile birlikte göstermektedir. Buna göre maksimum 15.44 V/m genlik değerine sahiptir.

İstenilen frekans ve radyasyon ışımaya paterni parametreleri ile tek bir Vivaldi anten elemanının CST® benzetim yazılımı ile başarılı bir şekilde tasarımı yapılmıştır. Sonrasında, bu anten elemanı ile yanca ekseninde yüksek çözünürlük sağlayacak doğrusal dizi anten konfigürasyonu oluşturulmuştur. Bu amaçla, 8 adet anten elemanının yanca ekseninde doğrusal dizilmesi ile CST® benzetimi yenilenmiştir. Prototipi hazırlanan radar sensörü için 8 adet anten elemanının kullanımı istenilen çözünürlüğü sağlaması için yeterli sayıdadır. Çünkü, daha fazla anten elemanının kullanımı radar sensörünü hantallaştıracığından pratik bir kullanıma imkân sağlayamayacaktır. Aşağıdaki bölümde radar sensörünü oluşturan diğer radar ekipmanları, 8'li doğrusal anten yapısının tasarım sonuçları ve nihai radar prototipi yer almaktadır.

3.2.3.2. 8'li Vivaldi Dizi Tasarımı Ve Üretimi

Bu bölümde prototipi gerçekleştirilen radar sensörünü oluşturan birimler ve hazırlık sürecinden bahsedilmiştir. Şekil 3.20.'de blok diagramı verilen radar sensörü yapısı yer almaktadır. Buna göre radar sensörü; sekizli doğrusal anten dizisi yapısından, bu anten elemanlarının seçiminde kullanılan bir RF anahtarlama elemanından, mikro-kontrol birimi bölümünden, radar sinyallerini üreten ve alan bir RF alıcı-verici biriminden ve tabiki veri alımında ve sistem kontrolünün uzaktan geliştirilen bir program yardımıyla sağlanmasında kullanılan kişisel bir laptop dan oluşmaktadır.



Şekil 3.20. DARG sensör blok diagramı.

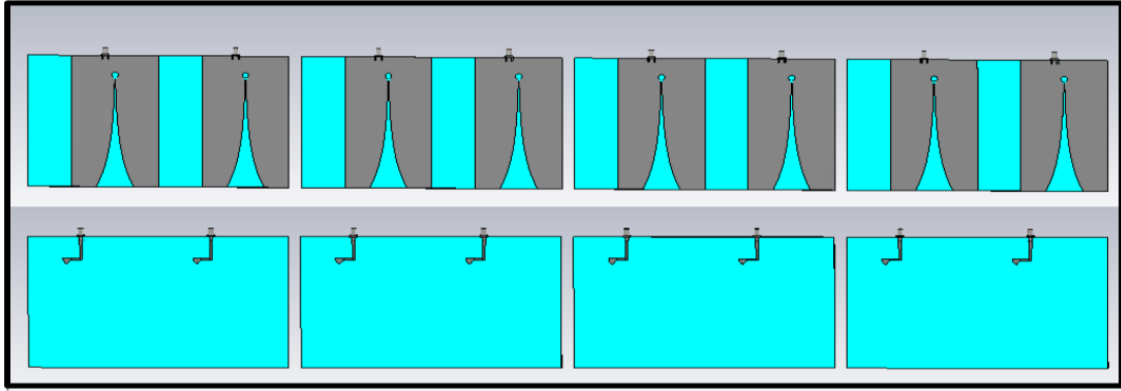
3.2.3.3. 8'li Vivaldi Dizi Antenli DARG Sensörünün Tasarımı Ve Üretimi

Bu bölümde, yanca uzayında yüksek çözünürlük sağlaması amacıyla tasarlanan özgün DARG sensörü prototipinin tüm tasarım aşamalarından bahsedilmiştir. Bunun için ilk olarak, bir önceki bölümde DARG sensöründe kullanılacak olan anten elemanının yanca uzayında doğrusal düzenekte yerleştirilmesi ile bir dizi anten yapısından bahsedilecektir. Sonrasında bu anten elemanları için kullanılan RF anahtarlama biriminden, mikrodenetleyici biriminden bahsedilerek tasarlanan prototipin gerçekleşmiş olan imalatı sunulmuştur.

Vivaldi 8'li Doğrusal Anten Dizisi Tasarımı

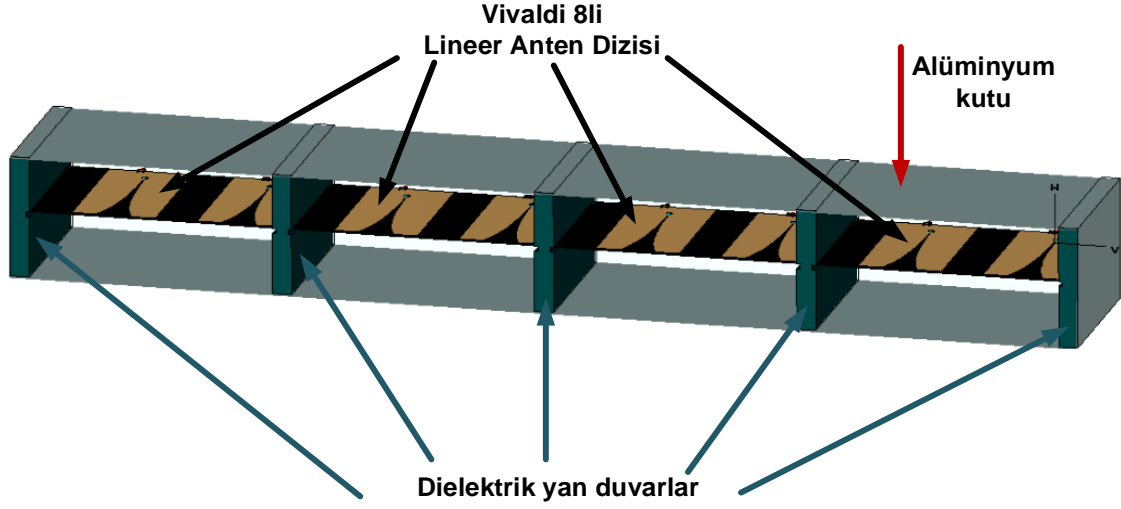
Bu tez çalışmasında, DARG sensörü için monostatik konfigürasyonda dizi anten yapısı düşünülerek tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu düşüncenin 2 temel nedeni vardır. Birincisi; eğer yarı-monostatik (quasi-monostatic) veya bistatik konfigürasyon seçilmiş olsaydı, aynı menzil çözünürlüğünü elde etmek için iki kat daha fazla anten elemanı kullanılması gerekirdi. Böylelikle sensör çok ağır, hantal ve pratik olmayan bir kullanıma sahip olacaktı. İkincisi, maksimum dinamik aralık ve güç hassasiyeti elde edebilmek için VNA'nın dalga biçimi olan adım frekanslı

sürekli dalga radar sinyallerini düşündük. Çünkü sensörde kullanılan VNA 120 dB ye kadar dinamik aralık sağlamaktadır ki bunu darbe sinyallerini kullanan bir zaman uzayı sistemle veya frekans modülasyonlu sürekli dalga (FMSD, Frequency Modulated Continuous Wave-FMCW) radar sinyalleri ile sağlamak mümkün değildir. Bahsedilen bu amaçlardan dolayı 8’li Vivaldi anten elemanı doğrusal olarak dizi yapısı oluşturmuştur ve monostatik konfigürasyonda çalışması sağlanmıştır. Bir önceki bölümde tekli Vivaldi anten elemanının CST® yardımıyla tasarımı ve sonuçları yer almıştır. Anten dizisinin uzunluğu yanca ekseninde yeteri açıklığı sağlayacak boyutta ve antenler arası boşluğun karşılıklı kuplaj seviyesinin minimum düzeyde olacağı bir 8’li doğrusal anten dizisi yapısı CST® yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Antenlerin beslemesi 50Ω SMA konnektörler ile sağlanmıştır. Şekil 3.21. tasarlanan 8’li Vivaldi anten dizisini göstermektedir.



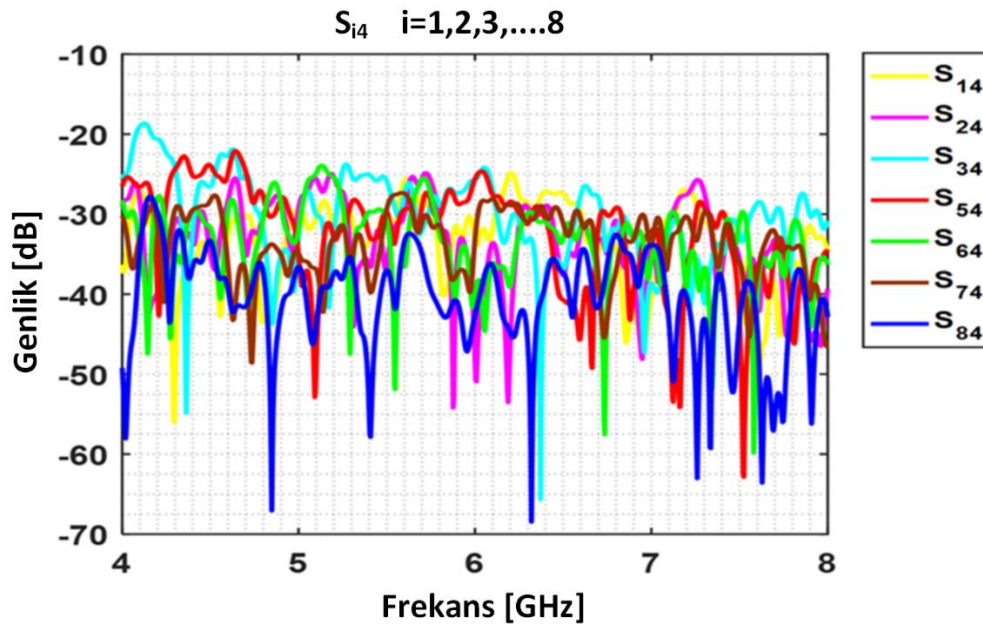
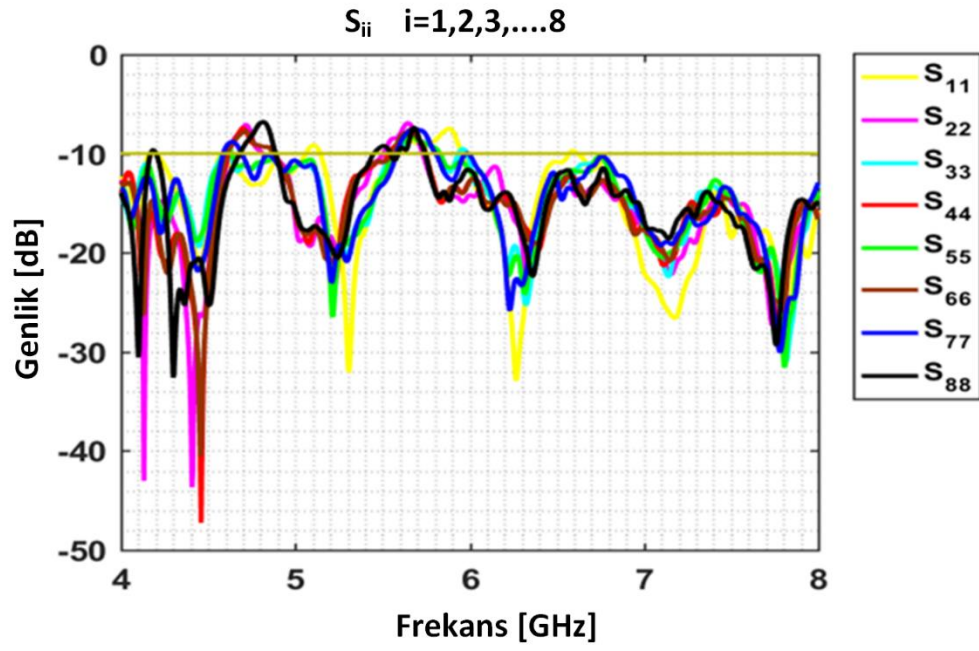
Şekil 3.21. 8’li Vivaldi anten dizisi tasarımı.

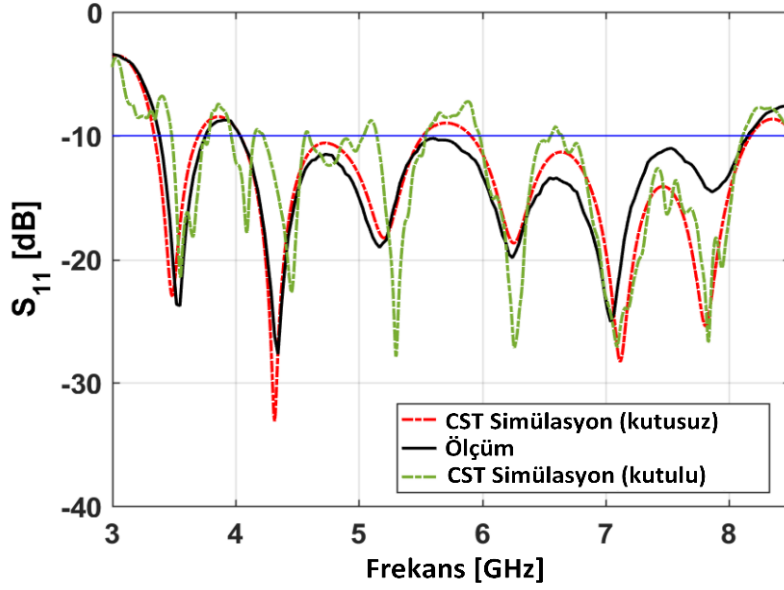
Arka lob ışınım seviyesini azaltmak ve anten elemanlarının kazancını arttırmak için, 8’li doğrusal anten dizisi bir alüminyum malzemedeki kalınlığı yaklaşık 2 mm olan metal bir kutunun içerisine yerleştirilmiştir. Anten dizisi herbirinde 2 Vivaldi anten elemanı olacak şekilde 4’lü anten tablasından oluşmaktadır. Bu 4 lü anten grubu elemanlarını metal kutu içerisinde aynı düzlemde tutması için herbir anten grubu arasına akrilik malzemedeki (plexiglass) dielektrik yan duvarlar eklenmiştir. CST® optimizasyonundan sonra anten elemanları arasında ki asgari aralık 11 cm dir ve DARG sensörünün metal kutulu hali yaklaşık 90 cm olarak tamamlanmıştır. Şekil 3.22. dielektrik yan duvarlar ile Alüminyum kutu içerisine yerleştirilen 8’li Vivaldi doğrusal anten dizisini göstermektedir.



Şekil 3.22. Alüminyum kutu içerisine yerleştirilmiş 8'li doğrusal Vivaldi anten dizisi.

Tasarlanmış olan metal kutu içerisindeki anten dizisinin geri saçılım ve radyasyon ışıma parametrelerini elde etmek için CST® yazılımında benzetim tekli anten tasarımında olduğu gibi 4 GHz – 8 GHz frekans bandında yinelenmiştir. 8 anten için elde edilen S_{11} sonuçları Şekil 3.23. (a)'da yer almaktadır. Şekilden de anlaşılacağı üzere; S_{11} karakteristiklerinin istenilen 4 GHz – 8 GHz frekans bandının tüm bant-genişliği için geçerli olduğunun yalnız 4.7 GHz ve 5.7 GHz frekans aralığında küçük bir değişimle -8 db civarında olduğu gözükmektedir. Yapılan S-parametresi optimizasyon işlemi sonucunda, antenler arası karşılıklı etkileşimi en aza indirecek minimum aralık mesafesi 11 cm olarak belirlenmiştir. 4 – 8 GHz Arasındaki tüm frekans bandı için $S_{ij} < -20$ dB, ($i \neq j$) olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.23. (b) ortadaki 4. anten elemanının 4 GHz – 8 GHz arasındaki tüm frekans bandı için diğer anten elemanları ile arasındaki S_{i4} parametresini göstermektedir. Şekilden bu parametrenin tüm anten elemanları için -20 dB'nin altında olduğu rahatlıkla görülmektedir.

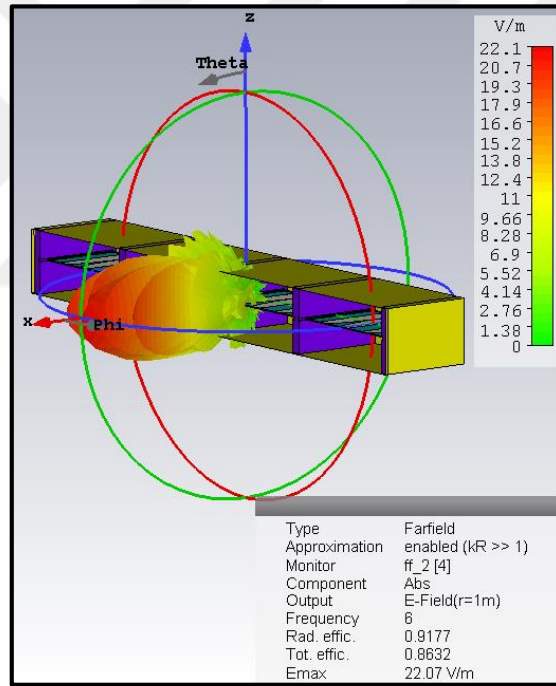
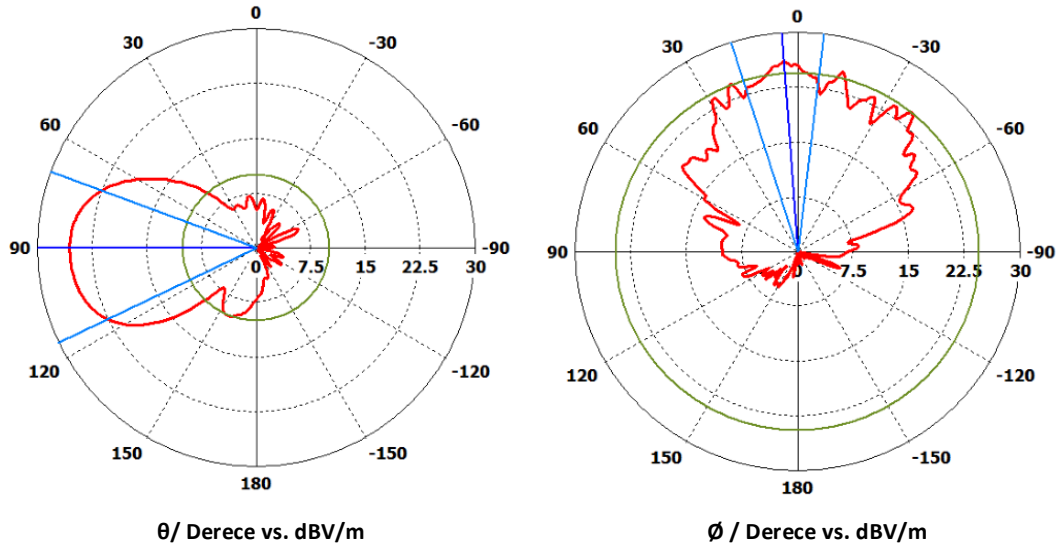




(c)

Şekil 3.23. Alüminyum kutu içerisine yerleştirilmiş olan doğrusal anten dizisinin (a) 8 anten elemanı için frekansa karşın S_{11} sonuçları (b) 4. Anten elemanının diğer anten elemanları arasındaki kuplaj etkisi; S_{14} sonuçları (c) karşılaştırma CST&Ölçüm.

Şekil 3.23. (c)' de kırmızı kesik çizgi kutusuz tekli vivaldi anten için benzetim sonucunu, siyah düz çizgi yine tekli anten için ölçüm sonucunu ve yeşil kesikli çizgi kutulu anten içerisindeki soldan 4. anten için S_{11} sonucunu göstermektedir. Soldan 4. Anten için E-düzlemi ve H-düzlemi anten radyasyon paterni Şekil 3.24. (a) ve (b)'de sırasıyla sunulmaktadır. 4. Anten radyasyon paterninin benzetimi boyunca, tüm diğer portlar 50Ω hat empedansı ile sonlandırılmıştır. Anten dizisinin yerleştirildiği alüminyum kutunun etkisi sebebiyle, 6 GHz orta bant frekansında herbir anten elemanının kazancı 11.4 dB olacak şekilde artmıştır. Ayrıca tez çalışmasında şekil olarak sunulmayan diğer anten elemanlarının radyasyon paternleri 4. anten elemanın radyasyon paternine çok benzerdir ve önemli şekil farklılıklarına sahip değildir. Ayrıca, radyasyon paterninin düşük frekanslarda çok fazla değişmediğini söyleyebiliriz. Fakat, yan lob seviyesi (YLS) arttıkça yüksek frekanslarda bazı bozulmalar belirginleşecektir. Duvardaki penetrasyonun yüksek frekanslarda alçak frekanslara kıyasla daha düşük olduğunu göz önüne alırsak; yüksek frekanslarda antenlerin radyasyon paternlerinde ki değişikliğin DARG kullanımı için sensör performansında çok önemli bir etkisi olmayacaktır.

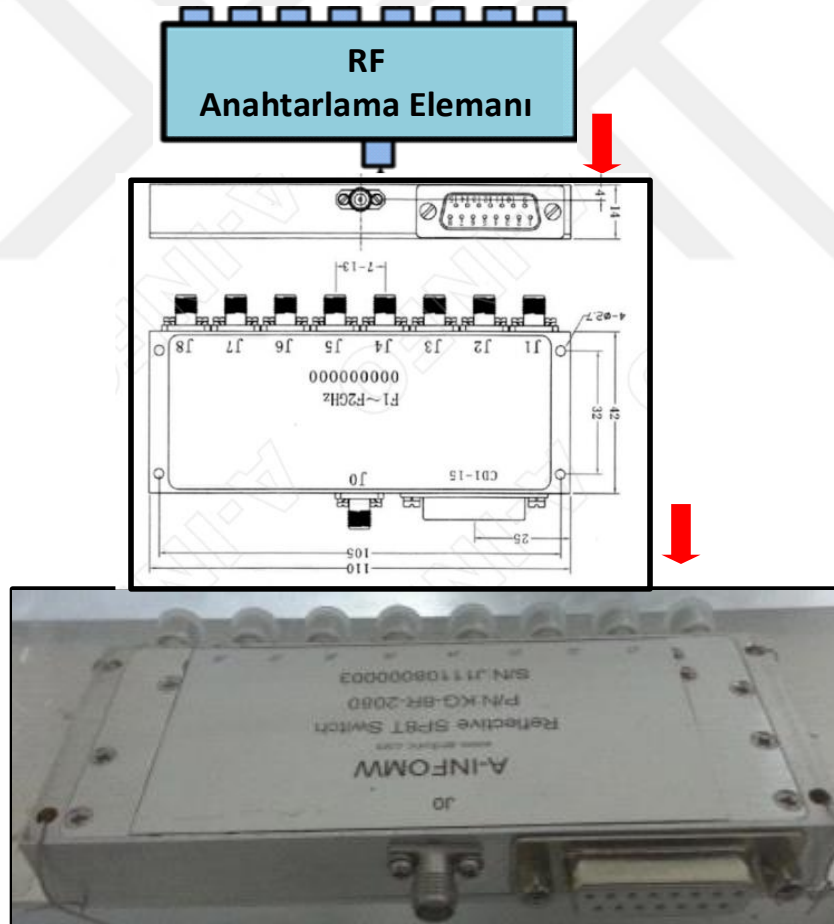


(c)

Şekil 3.24. Tasarlanan 8'li doğrusal Vivaldi anten dizisinin soldan 4. Anten elemanı için (a) kutupsal gösterimde E-düzlem radyasyon paterni @ $\phi=0^\circ$ (b) kutupsal gösterimde H-düzlem radyasyon paterni @ $\theta=90^\circ$ (c) 6 GHz de E-düzlem 3B ışınma paterni.

RF Anahtarlama Elemanı

Şekil 3.21.' de blok diagramı verilen DARG sensöründe kullanılan bir diğer sistem elemanı RF anahtarlama elemanıdır. DARG sensöründe RF sinyallerini gönderen ve alan adım frekanslı sürekli dalga radar sinyallerini kullanan ve daha önce bahsedilen 2-port Agilent E5071B ENA VNA radar alıcı-vericisi kullanılmıştır. 8'li doğrusal anten dizisi için monostatik konfigürasyonda EM dalgayı ilgili anten elemanına yönlendirme RF anahtarlama elemanı ile sağlanmaktadır. RF ve mikrodalga anahtarlar; test altındaki aletler (device under test, DUT) ile diğer ekipmanlar arasında sinyali yönlendirme için mikrodalga test sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında; RF anahtarlama elemanı olarak 2 – 8 GHz frekans bandında çalışan model olarak A-INFO Reflective SP8T Switch [122] RF anahtarlama elemanı kullanılmıştır. Kullanılan RF anahtarlama elemanının çizgisel şekli ve gerçek modeli Şekil 3.25.'de sunulmaktadır.



Yansıtıcı RF anahtarlama elemanında (reflective RF switch); kapalı olan portun empedansı 50Ω olmayacaktır ve çok yüksek bir voltaj duran dalga oranına, VSWR sahip olacaktır. Öte yandan; emici RF anahtarlama elemanı (absorptive RF switch) anahtar durumuna bakılmaksızın, her bir port iyi bir VSWR'ye sahip olacaktır. Aşağıda, DARG sensöründe kullanılan RF anahtarlama elemanının spesifikasyonları tablo halinde sunulmaktadır. Anahtarlama elemanının anahtarlama periyodu oldukça kısa (100 ns) olmasına rağmen, VNA'nın örnekleme periyodu çok daha uzun olmasından dolayı (yaklaşık 300 ms) veri alım hızımız değişmektedir. Şöyle ki; geri saçılım verisi alınacak sahnenin bir anlık durumunun 8 terminal için toplam örnekleme zamanı yaklaşık 1.05 sn 'yi bulmaktadır. Bu süre radar sensörünün tüm elemanlarından kaynaklı toplam örnekleme süresidir. Anahtarlama elemanı için önemli bir parametre olan araya girme kaybı; anahtarlama elemanının bir devre içerisinde kullanıldığında, anahtar kontrol gerilimi çıkış terminalinin "açık" durumuna karşılık geldiğinde anahtarın giriş ve çıkış portları arasındaki zayıflamadır. Kullanılan RF anahtarlama elemanında bu değer 3 dB kadardır. Anahtarlama elemanını beslemesinde $\pm 5\text{ V}$ güç kaynağı kullanılmıştır. 8'li doğrusal Vivaldi dizi anten yapısı SMA konnektörler aracılığı ile RF anahtarlama elemanına yarı-sert yüksek frekans kablosu ile bağlanmıştır. RF anahtarlama elemanının terminal durumu TTL lojik girişi seviyesine göre ayarlama yapılarak sağlanır. Bu amaçla Arduino Mega 2560 [123] mikro denetleyici elemanı kullanılmıştır.

Tablo 3.5. RF anahtarlama elemanının spesifikasyonları [122].

Parametre	Değeri
Model	Reflektif SP8T Switch
Frekans sahası	2 - 8 GHz
Araya girme kaybı (Insertion Loss)	3.0 dB
VSWR, max	1.6 max.
Yalıtım (Isolation)	60 dB min.
Güç kontrolü (Power handling)	0.2 W
Anahtarlama hızı	100 ns
Güç kaynağı	+5 V/200 mA ; -5 V/50 mA
TTL voltaj	"0"= 0 - 0.7 V "1"= 2.5 - 5 V
Konnektör	SMA- dişi

Anahtarlama elemanında bulunan 15 pinin tanımı ve 8 terminal için kontrol tablosu Tablo 3.6.'da ayrıntılı olarak yer almaktadır. Buna göre bulunan 15 pinden 11 tanesi kullanılmaktadır.

Tablo 3.6. RF anahtarlama elemanının Kontrol Tablosu [122].

DB-15P PİN TANIMI

PİN	1	2	3	4	5	6	7	8	9
PORT	+5V	-5V	GND	T1	T2	T3	T4	T5	T6
	10	11	12	13	14	15			
	T7	T8	NC	NC	NC	NC			

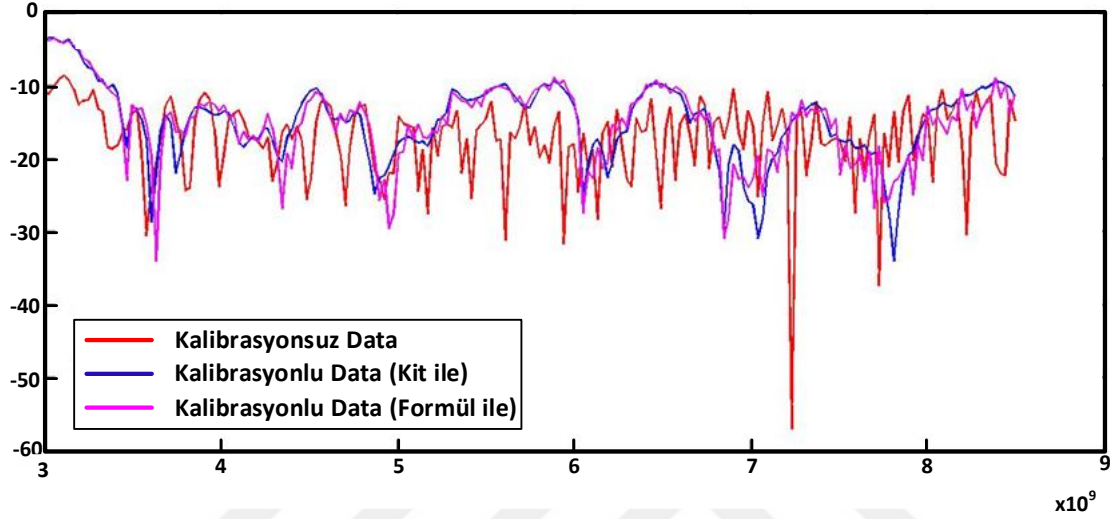
KONTROL TABLOSU

T1~T8	J0-J1	J0-J2	J0-J3	J0-J4	J0-J5	J0-J6	J0-J7	J0-J8
10000000	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
01000000	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
00100000	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
00010000	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
00001000	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
00000100	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
00000010	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF
00000001	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON

RF anahtarlama elemanı kullanılırken karşılaşılan bir problem kalibrasyon sorunudur. Kalibrasyon işlemi; gönderim ve alım işlemlerinde yönlülük hatasını (directivity error), portlar arası etkileşim (crosstalk), kaynak eşleşme hatası (source match error) vb. durumları etkili biçimde ortadan kaldırmaktadır. VNA ile anten dizisi arasında RF anahtarlama elemanı kullanıldığından tam 2-portlu kalibrasyon; "Açık", "Kısa", "Yük" standartlarını bağlayarak ölçme işlemi ile sağlanamayacaktır. Bunun için; kalibrasyon işlemi; veri alınımı sonrasında; gerekli olan ve katsayılarının kullanımı ile elde edilen denklem ile sağlanmıştır. Eğer uyarıcı port ile cevap port'u aynı ise kalibrasyon katsayılarından E_S : kaynak eşleşmesi (source match), E_R : yansıma takip (reflection tracking) ve E_D : yönlülük parametreleri kullanılır [113]. E_S , E_R , E_D parametreleri anahtarlama elemanının her bir terminali için oluşturulmuştur. Bu parametreler alınırken yalnızca belirlenen port açık diğerleri kapalı durumdadır. Geri saçılan kalibrasyonlu ölçüm

parametresi S_{11A} , kalibrasyonsuz geri saçılım parametresi S_{11M} ve yukarıda tanımlanan 3 kalibrasyon katsayıları kullanılarak aşağıda verilen denklem (3.28) ile sonradan da elde edilmiştir [124].

$$S_{11A} = \frac{S_{11M} - E_D}{E_S(S_{11M} - E_D) + E_R} \quad (3.28)$$



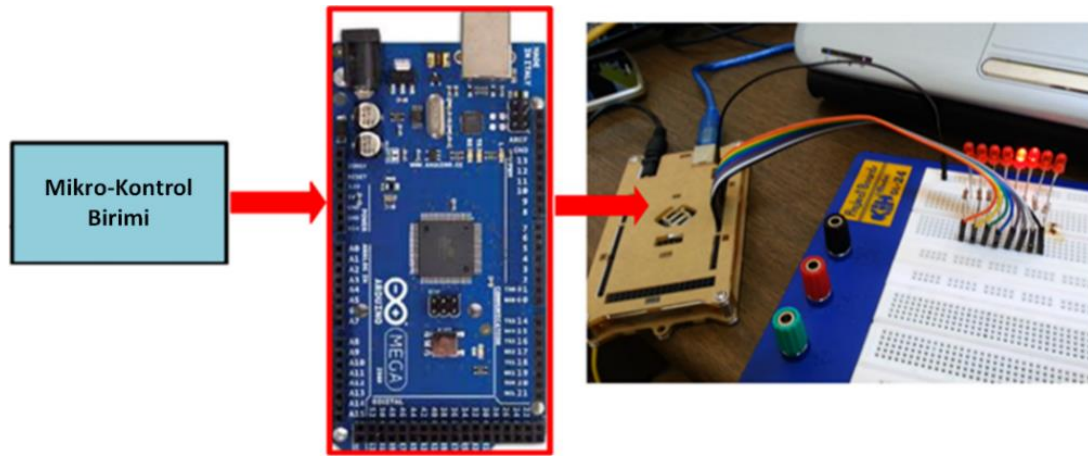
Şekil 3.26. Kalibrasyon işlemi: Kırmızı düz çizgi; kalibrasyonsuz S_{11} ölçüm sonucunu, mavi düz çizgi kalibrasyon kiti ile alınan cevabı ve eflatun rengi kalibrasyonsuz dataya denklem (3.28) uygulanmış sonucu.

Yukarıdaki Şekil 3.26.'da kırmızı düz çizgi ile gösterilen şekil kalibrasyon işlemi yapılmadan alınan S_{11} ölçüm sonucunu göstermektedir. Mavi düz çizgi ise, veri alınımından önce kalibrasyon kiti kullanılarak elde edilen S_{11} ölçüm sonucunu ve eflatun rengi ise; kalibrasyonsuz elde edilen veriye denklem (3.28) uygulanarak kalibrasyonlu hale gelen sonucu göstermektedir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere; kit ile ve veri alındıktan sonra formül ile elde edilen sonuçların birbirleriyle mükemmel yakın örtüştükleri gözükmemektedir. Ayrıca kalibrasyon yapılmadan alınan ölçüm verisinin güvenilir bir sonuç olmadığı verilen şekilden rahatlıkla anlaşılmaktadır.

Mikro-Kontrol Birimi & Arduino Mega 2560

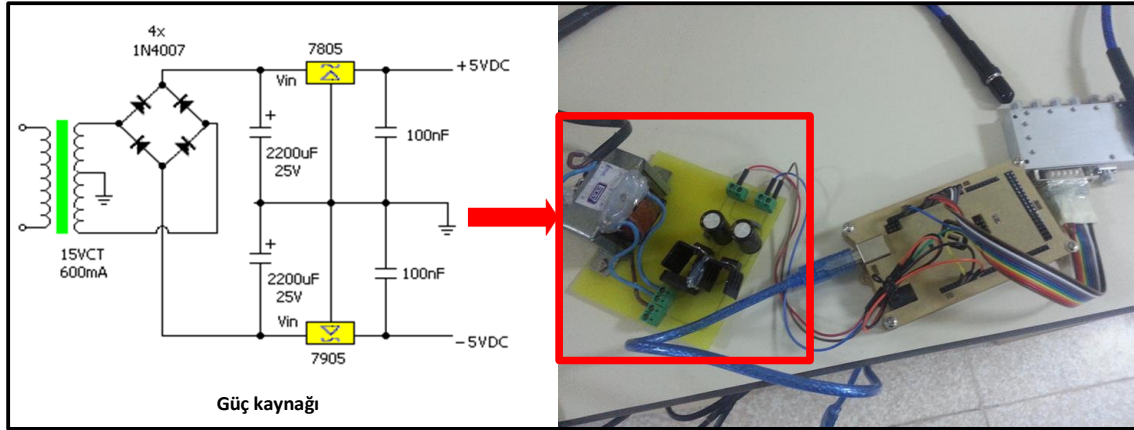
DARG sensöründe; hem alıcı-verici biriminin hemde RF anahtarlama elemanının senkronizasyonu ve kontrolü bir mikro-denetleyici kartla (Arduino Mega 2560) [123] ve bir laptop ile sağlanmıştır. Geliştirilen MATLAB® kontrol yazılımı VNA'yı ve RF anahtarlama

elemanını kontrol ederken anahtarlama elemanının yalnızca bir çıkış portu her S_{11} ölçümünün bir periyodu boyunca açık kalmaktadır. Bu nedenle; her 8 ardışık S_{11} ölçümleri, deneysel sahnenin bir anlık görüntüsünü oluşturmak için yanca ekseninde geri saçılım ölçümlerinde uzaysal çeşitlilik sağlamaktadır. S_{11} ölçümleri zaman serisi biçiminde devam ettikçe, ölçüm sahnesinin çoklu anlık görüntülerinden sorumlu veriler toplanmaktadır. Mikro denetleyici ile anahtarlama elemanının kontrolü öncesi, test amaçlı 8 adet led'i sıralı biçimde yakma işlemi gerçekleştirilmiştir. 8 adet pin dijital çıkışlar olarak tanımlanmıştır ve 2'den 9'a değişen bir dizi olarak kaydedilmiştir. "For" döngüsü oluşturularak her bir for döngüsünde bir sonraki led'e rahatlıkla geçilir. Döngü içinde yakmak istenilen led'e "digitalWrite" komutuyla "High; voltaj ver" veya "Low, voltajı kes" yazdırılarak ledi yakmak ve söndürmek mümkün olmaktadır.



Şekil 3.27. Arduino Mega 2560 ile sıralı LED yakma işlemi.

Bunun gibi RF anahtarlama elemanının her bir portunu sırası ile açacak Arduino kontrol yazılımı MATLAB® da programlanmıştır. Anahtarlama elemanının portları 2'den 9'a değişen bir vektör olarak tanımlanır. Bir "For" döngüsü içerisinde ilgili porta Tablo 3.6. da verilen 8 bitlik binary verisi yazdırılarak ilgili olan port çıkışı aktif hale gelir. Buna göre, sırası ile anahtarlama elemanının portları aktif olur ve EM dalga yalnızca aktif olan ilgili portdaki anten elemanın tarafından gönderilir ve alınır.

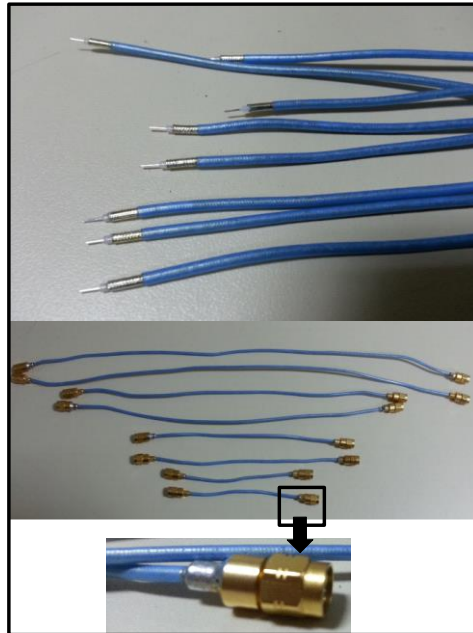


(a)

(b)

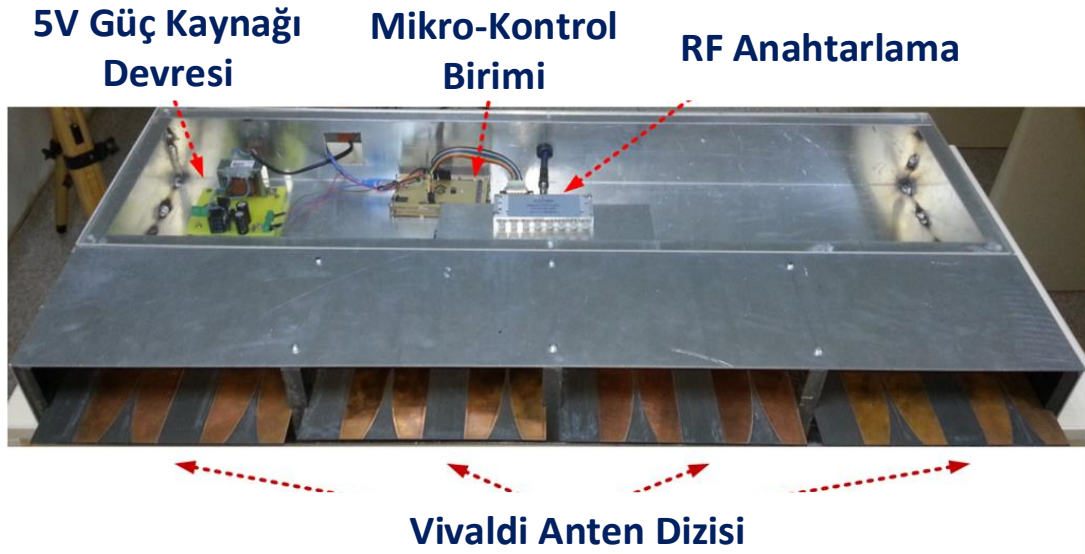
Şekil 3.28. (a) RF anahtarlama ve Arduino için gerekli olan $\pm 5V$ çalışma voltajı devresi (b) DARG için hazırlanan güç kaynağı, Arduino ve RF anahtarlama elemanı.

DARG sensörünün doğrusal anten dizisi yapısı, RF anahtarlama elemanı, Kontrol birimi ve yazılımı gibi ekipmanları tamamlandıktan sonra RF anahtarlama elemanı ve doğrusal dizi anten arasındaki EM dalganın iletimi yüksek frekans yarı-sert koaksiyel kablolar ile sağlanmıştır. Bu amaçla, 0 - 12.4 GHz frekans aralığında 50Ω nominal empedansa sahip kablo ve 50Ω Pasternack PE4115 SMA [125] dişi soket lehim ek parçası kullanılmıştır. Kablo ile SMA socketin lehim işlemi tarafımızdan yapılarak, DARG için gereken kablo bağlantıları Şekil 3.29.'da gösterilen şekilde imal edilmiştir.



Şekil 3.29. DARG de kullanılan yüksek frekanslı SMA kabloları.

Tasarımı yapılan ve prototipi hazırlanan DARG sensörü Şekil 3.30.'da gösterilmektedir. Buna göre tüm anten elemanları yarı- sabit RF kabloların yardımıyla RF anahtarının 8 terminaline SMA konnektörleri vasıtasıyla bağlanmıştır. VNA ve RF anahtarlama elemanının kontrolü ve senkronizasyonu mikro kontrol birimi ve bir laptop ile sağlanmıştır. Ayrıca tüm sistemin kontrolü ve veri alım işlemleri geliştirilen bir MATLAB® yazılımı ile sağlanmıştır. Elde edilen DARG sensörü ile duvar arkası sabit ve hareketli hedeflerin deneysel çalışmaları yapılarak Bölüm 4. de sunulan radar görüntüleri başarılı şekilde elde edilmiştir.



Şekil 3.30. Prototip DARG sensör fotoğrafı.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bölüm 1’de bahsedilen tez çalışmasının asıl amacı, duvar arkasındaki sabit ve hareketli hedeflerin tespit edilmesi ve radar görüntülerinin elde edilmesi problemidir. Bu amaçla, Bölüm 3.’de bahsedilen materyal ve yöntemler geliştirilerek kullanılmıştır. Bu Bölümde ise probleme yönelik geliştirilen algoritmaların ilk olarak başarı performanslarını değerlendirmek üzere benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, DARG problemine yönelik gerçek deney çalışmaları yapılmış ve benzetim çalışmaları ile doğrulanan algoritmalar kullanılarak gerçek ölçüm çalışmaları başarı ile değerlendirilmiştir. İlk olarak Bölüm 3’de anlatılan DARG algoritmaların sabit ve hareketli hedefler için benzetim çalışmaları sunulmaktadır. Sonrasında, bahsi edilen algoritmalar deneysel veriler üzerinde uygulanarak değerlendirilmiştir.

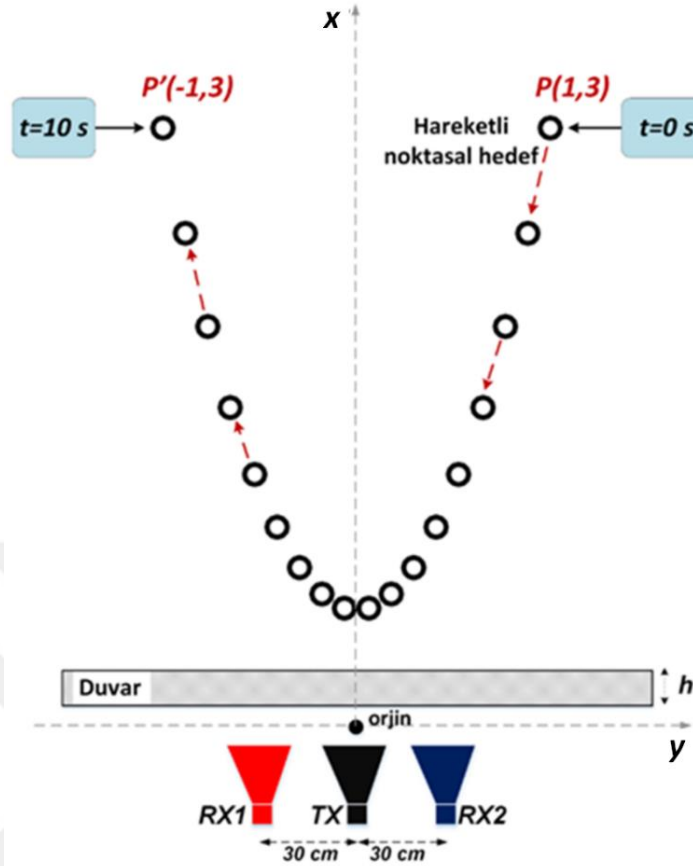
4.1. Benzetim Çalışmaları

Aşağıda DARG problemine yönelik geliştirilen ve mükemmel noktasal saçıcı/saçıcılar hedefine uygulanan benzetim algoritmaları sunulmaktadır. Geliştirilen algoritmalar arasından yüksek başarı performansına sahip olanlar gerçek deneysel çalışmalara uygulanmıştır.

4.1.1. Elipsler Kesişimi Algoritması Benzetimi

Hareketli Hedef Uygulaması

Yukarıda ayrıntıları ile ele alınan elipslerin kesişimine dayalı konum tespitine yönelik algoritmanın başarısını ve gerçek deney verilerine uygulanabilirliğini değerlendirmek için bu bölümde MATLAB® programlama dilinde yazılmış hareketli bir deney senaryosunun benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Şekil 4.1.’de açıkça şekillendirilen senaryonun benzetimi yapılmıştır. Buna göre; duvarın arkasında hareketli bir noktasal hedef ele alınmıştır ve bu hedef $t = 0$ sn sinde $P(1,3)$ noktasındadır. Hedef, yürüme hareketinin ilk yarısında $t = 5$ sn civarında duvara en yakın uzaklıkta; menzilde 0.5 m ve yancada orjinde yer almaktadır. Hedef, $t = 10$ sn de $P'(-1,3)$ noktasına ulaşmış olarak toplamda 18 farklı konumda eğik bir yürüme hareketi sergilemiştir. Gönderici anten Tx ve alıcı antenler Rx_1 ve Rx_2 yanca düzleminde, Tx merkezlerinde olacak şekilde orjine yerleştirilmiştir. Alıcı antenler arası uzaklık gerçek deneysel çalışmalarımıza uygun olarak 60 cm olarak belirlenmiştir. Radar sisteminin frekansı, adım-frekanslı konfigürasyonda toplamda 200 ayırık frekans için 1 GHz ile 6 GHz arasında değiştirilmiştir.



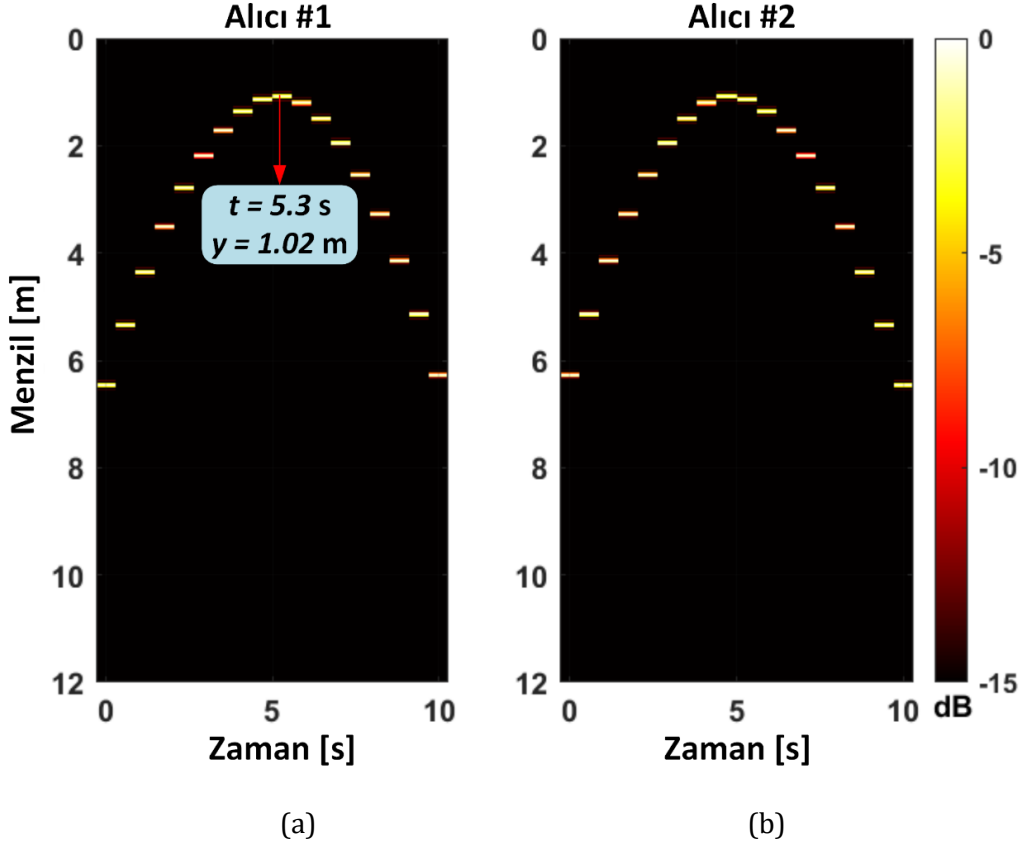
Şekil 4.1. Elipsler kesişimi algoritması benzetim senaryosunun geometrisi.

Farklı zaman anlarında τ_i , alıcı antenler; Rx_1 ve Rx_2 tarafından toplanılan bu 2B geri saçılım verileri $E_1^S(k, \tau)$ ve $E_2^S(k, \tau)$ aşağıda belirtilen denklem (4.1) ile elde edilir.

$$\begin{aligned} E_1^S(k, \tau_i) &= \sigma_1 \cdot e^{-jk(r_{0i} + r_{1i})} \\ E_2^S(k, \tau_i) &= \sigma_2 \cdot e^{-jk(r_{0i} + r_{2i})} \end{aligned} \quad i = 1, 2, \dots, 18 \quad (4.1)$$

Burada, σ_1 ve σ_2 sırasıyla birinci ve ikinci alıcı anten; Rx_1 ve Rx_2 için EM yansıma katsayılarıdır. Bu benzetimde belirtilen katsayılar, frekans ve bakış açısından bağımsız olarak değerleri "1" olarak varsayılmıştır. Sonrasında, toplanan geri saçılan elektrik alan verilerinin; $E_1^S(k, \tau)$ ve $E_2^S(k, \tau)$, k' ya göre 1B TFD alınarak bistatik menzil profilleri elde edilir. Böylelikle 2B menzil-zaman saçılan alan vektörleri $E_1^S(r, \tau)$ ve $E_2^S(r, \tau)$ Şekil 4.1.1.2'de görüldüğü şekilde oluşturulmuş olunur. Şekil 4.2. (a), alıcı anten Rx_1 tarafından toplanılan bistatik menzil profili ve (b) alıcı anten Rx_2 tarafından toplanılan bistatik menzil profilini vermektedir. Bu menzil profillerinden de anlaşılacağı gibi, noktasal saçıcının toplam $t = 10$ sn boyunca hareketi kolayca

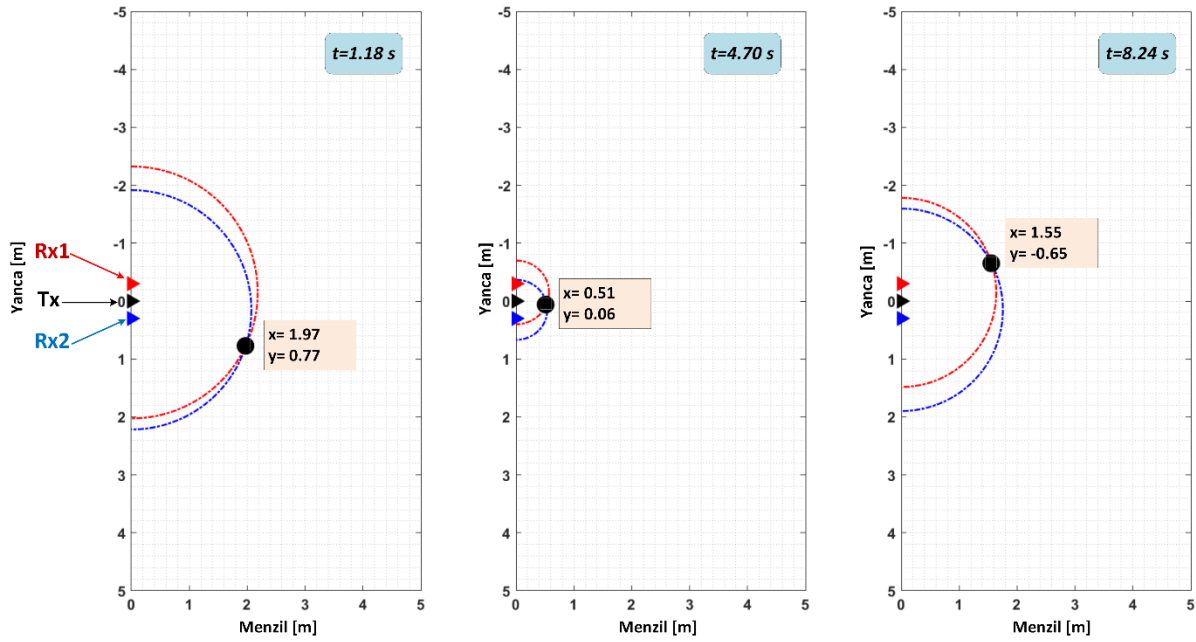
gözlemlenmektedir. Şekil (a) dan anlaşılacağı üzere $t = 5.3$ sn de hedef bistatik konfigürasyonda radardan 1.02 m uzaklıktadır. Hedefin gerçek konumu yukarıda daha önceden bahsedildiği üzere yancada orjinde ve menzilde 0.5 m uzaklıktadır ve bistatik menzil profili bunu doğrulamaktadır.



Şekil 4.2. (a) Alıcı anten Rx_1 tarafından toplanılan bistatik 2B menzil-zaman grafiği ve (b) alıcı anten Rx_2 tarafından toplanılan bistatik 2B menzil-zaman grafiği.

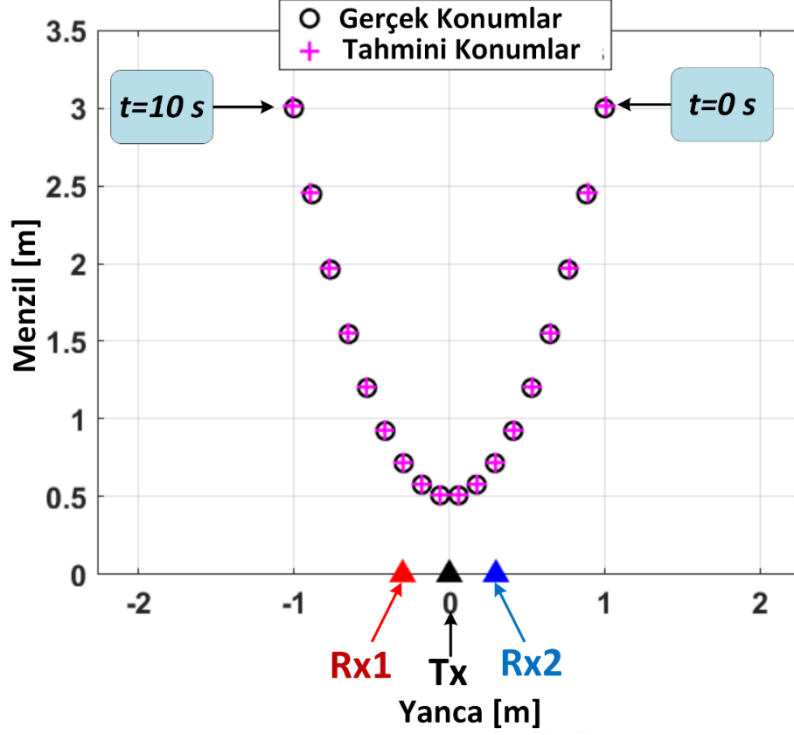
Bistatik menzil profilleri elde edildikten sonra, Bölüm 3.1.1 de bahsedilen algoritmanın adımları sırası ile uygulamıştır. Buna göre; iki elips için yarı-asal eksen (a_1 , a_2) terimleri ve yarı-küçük eksen (b_1 , b_2) terimleri belirtilen denklemler ile hesaplanmıştır. Yarı-asal eksen ve yarı-küçük eksen terimleri elde edildikten sonra, noktasal saçıcının bulunduğu farklı 18 konum için $Tx - Rx_1$ ve $Tx - Rx_2$ odak noktaları ayrı 2 elips eğrisi oluşturmuştur. Şekil 4.3 noktasal saçıcının farklı konumları için alıcı antenlerin oluşturmuş olduğu bu elips eğrilerini ve bu elipslerin kesişme noktalarını göstermektedir. Elipslerin bu kesişme noktaları, hedefimizin menzil ve yanca uzaylarındaki görüntülenen konum bilgilerini vermektedir. Benzetimde, gerçek ölçümlerde olacak olan duvar parametresi dahil edilmemiştir. Çünkü, EM dalganın duvardan kaynaklı gecikmesi ve konumsal hatası ihmal edilebilecek oranda olduğu bilgisi önceki Bölüm 3.1.1. de

anlatılmıştır. Bununla birlikte; benzetim sonucuna bakıldığında algoritmamızın hedefin gerçek konumunu bulmadaki başarısının çok büyük olduğu Şekil 4.3.'den anlaşılmaktadır.



Şekil 4.3. Farklı zaman anlarında noktasal saçıcının farklı konumlarda iken $Tx - Rx_1$ ve $Tx - Rx_2$ odak noktalarının oluşturmuş olduğu elips eğrileri: kırmızı kesik çizgi $Tx - Rx_1$, mavi kesik çizgi $Tx - Rx_2$ den kaynaklı ve bu eğrilerin kesişim noktaları.

Buna göre; yukarıdaki soldaki şekilde hedef 2. kez yer değiştirmiştir ve bulunduğu 8. konumdadır, bu sırada 10 sn lik yer değiştirmesinin $t = 1.18$ sn içindedir. Ortadaki şekilde ise $t = 4.70$ sn de ve menzilde en yakın noktaya ulaşmıştır ve hedef 9. konumdadır. Sağdaki şekilde ise; hedef bulunduğu 18 ayrı noktanın 15. sindedir ve $t = 8.24$ sn dedir. Elipslerin 18 farklı kesişme noktasında görüntülenen konum değerleri ise, benzetimde başta belirtilen konumlara neredeyse mükemmel yakın sonuçlarla elde edilmiştir. Bu olguyu Şekil 4.4.'de rahatlıkla gözlemlemekteyiz. Aşağıda verilen şekilde, siyah boş yuvarlakla gösterilen yerler menzil ve yanca ekseninde tespit edilmesi istenilen hedefin asıl gerçek konumlarını ve pembe artı simgesi ile gösterilen yerler de hedefin uygulamış olduğumuz elipslerin kesişimlerine dayanan konum belirleme algoritması sonucu elde edilen tahmini konumlarını göstermektedir. Algoritmanın başarısı sentetik verilerle değerlendirildikten sonra, algoritma gerçek ortamda deneysel ölçüm verilerine uygulanmıştır.

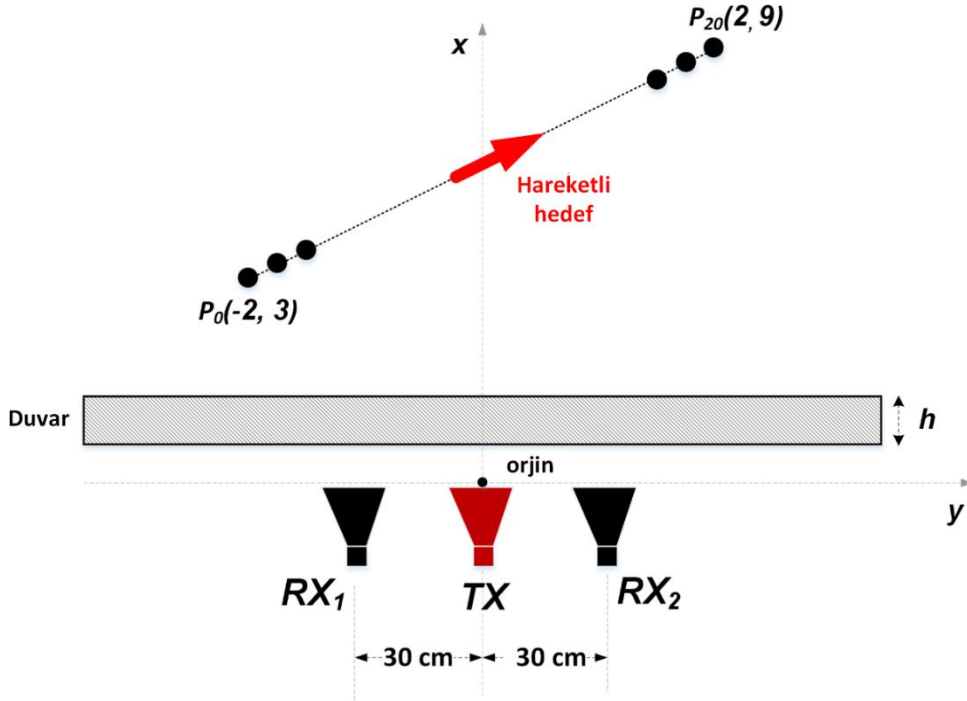


Şekil 4.4. Noktasal saçıcı hedefi için $t=0$ sn ve $t=10$ sn aralığında 18 farklı konum için konumsal bilgileri: siyah boş daireler benzetim gerçek konum değerlerini ve pembe artı simgesi uygulanan algoritma sonucu elde edilen konumsal bilgiyi vermektedir.

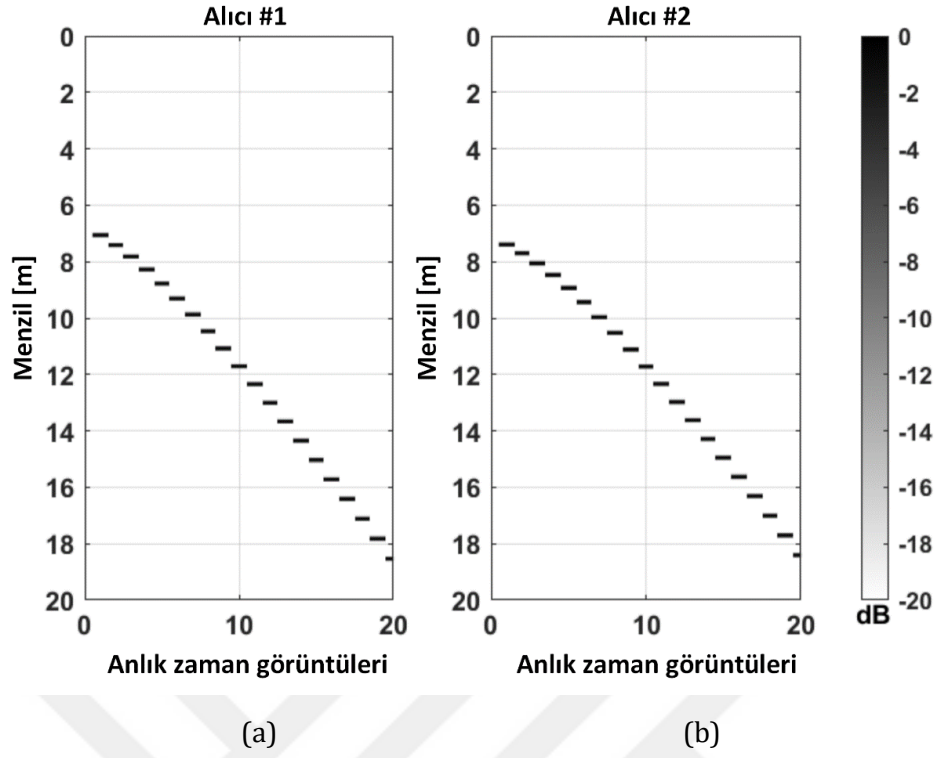
4.1.2. Multistatik Konfigürasyona Dayalı Konum Tespiti Algoritması Sonuçları

Bölüm 3.1.2'deki geliştirmiş olduğumuz algoritmanın performansını değerlendirmek için MATLAB® programlama dilinde formüle edilmiş bir program oluşturduk. Bu amaçla ilk olarak hareketli bir hedefin sentetik senaryosu oluşturuldu. Benzetimi gerçekleştirilen deney senaryosu Şekil 4.5.'de gösterilmektedir. Benzetimimizde birbirinden 60 cm uzaklıkta konumlandırılan iki çok yönlü alıcı anten ve 2 alıcı antenin ortasına bir gönderici anten yerleştirilmiştir. Radar sistemin frekansı gerçek deney senaryosuna uygun olarak $1\text{ GHz} - 6\text{ GHz}$ olarak ele alınmıştır. Belirtilen 5 GHz frekans bandının tamamı 620 ayrıık frekans adımı olarak örneklendirilmiştir. Hareketli hedef, frekans ve yönlerden bağımsız "1" sabit yansıtma özelliğine sahip mükemmel noktasal bir saçıcı olarak belirlenmiştir. Hedef Şekil 4.5.'de gösterildiği gibi, radarın toplam entegrasyon süresinde, menzil ve yanca uzayında toplam 20 farklı hedef konumu için $(-2,3)$ ve $(2,9)$ koordinatları arasında doğrusal hareket sergilemiştir. Sonrasında, ayrıık frekanslı 2-B geri saçılım elektrik alan verisi $E_{S_1}(k, \zeta)$ ve $E_{S_2}(k, \zeta)$ olarak her iki alıcı anten tarafından ζ_i farklı zaman noktaları için elde edilmiştir ve formülasyon olarak Bölüm 3.1.3 de denklem (3.7) de yer almaktadır. Burada i ifadesi 1 den 20 'ye değişmektedir.

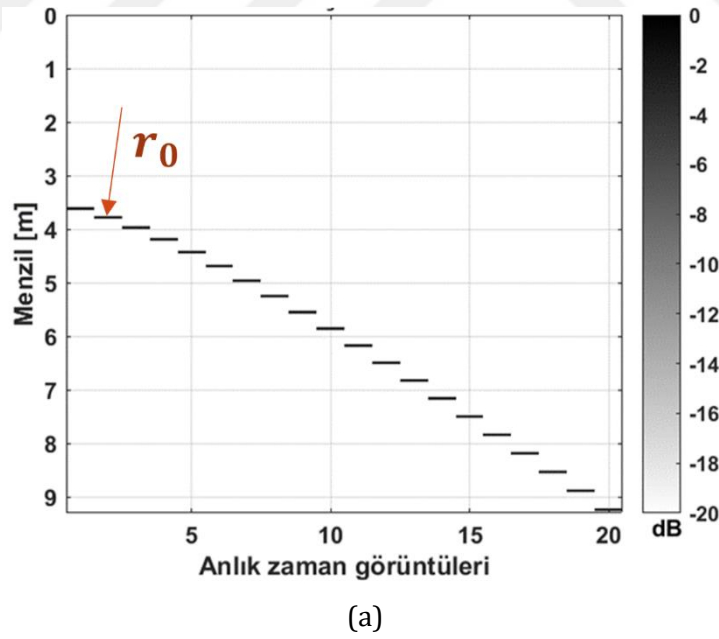
Geri saçılan elektrik alan verilerinin bstatik menzilleri ($r_0 + r_1$ ve $r_0 + r_2$), dalga numarası k ' ya göre $E_{S_1}(k, \zeta)$ ve $E_{S_2}(k, \zeta)$ 'nin 1B'lu TFD'mü alınarak elde edilebilir. Böylelikle Şekil.4.1.2.2. (a) ve (b) de gösterilen 2B' lu menzil-zaman saçılan elektrik alan verileri kümesi $E_{S_1}(r, \zeta)$ ve $E_{S_2}(r, \zeta)$ elde edilir. Şekil 4.6. (a) ve (b)' den de anlaşılacağı üzere; noktasal saçıcının hareketi; zamana bağlı olarak menzil bölgesinde kolaylıkla görüntülenebilmektedir. Sonrasında Bölüm 3.1.2 de anlatılan görüntüleme algoritması adımları sırasıyla uygulanmıştır. Algoritma, 20 farklı anlık zaman örneği için hedefin elde edilen menzil (x) ve yanca (y) koordinatlarını vermektedir. Şekil 4.7. (a) ve (b) farklı anlık zaman örneğine karşı, menzil uzayında ve $\{\sin\theta\}$ uzayında toplanan elektrik alanın eş-fazlı ve eşlenik-fazlı terimlerinden elde edilen silindirik koordinatlardaki r_0 ve θ ifadelerini sırası ile göstermektedir. Şekil 4.8. (a), algoritma sonrası elde edilen silindirik koordinatlarda ki $P(r_i, \theta_i)$ konumlarını ve (b)'de ise kırmızı ile gösterilen hedefin gerçek konumları, siyah ile gösterilen algoritma sonucu elde edilen kartezyen koordinat sistemindeki konumlarını göstermektedir. Şekil 4.8.'b den de anlaşılacağı üzere; algoritma sonucu ile hedefin gerçek konumu arasındaki doğruluk mükemmel yakın bir sonuç vermektedir. Bu da; geliştirmiş olduğumuz algoritmanın hareketli bir hedefin konum tespitindeki başarısını açıkça ortaya koymaktadır.

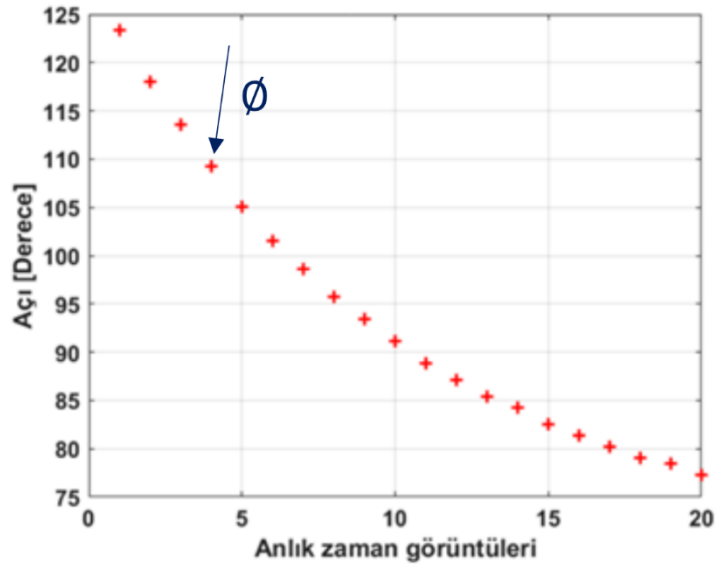


Şekil 4.5. Multistatik görüntüleme algoritması için DARG geometrisi.



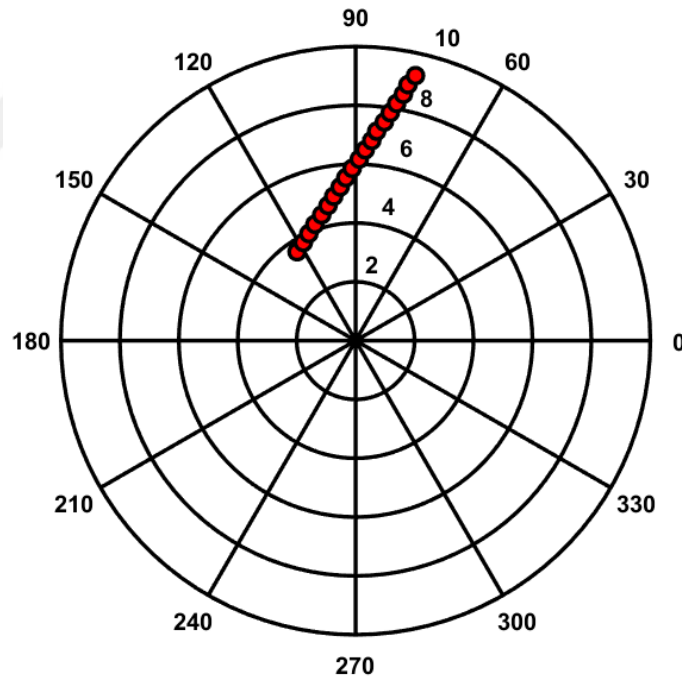
Şekil 4.6. Bistatik menzil profilleri; farklı zaman aralıklarındaki t_1 den t_{20} (a) alıcı 1 için (b) alıcı 2 için.



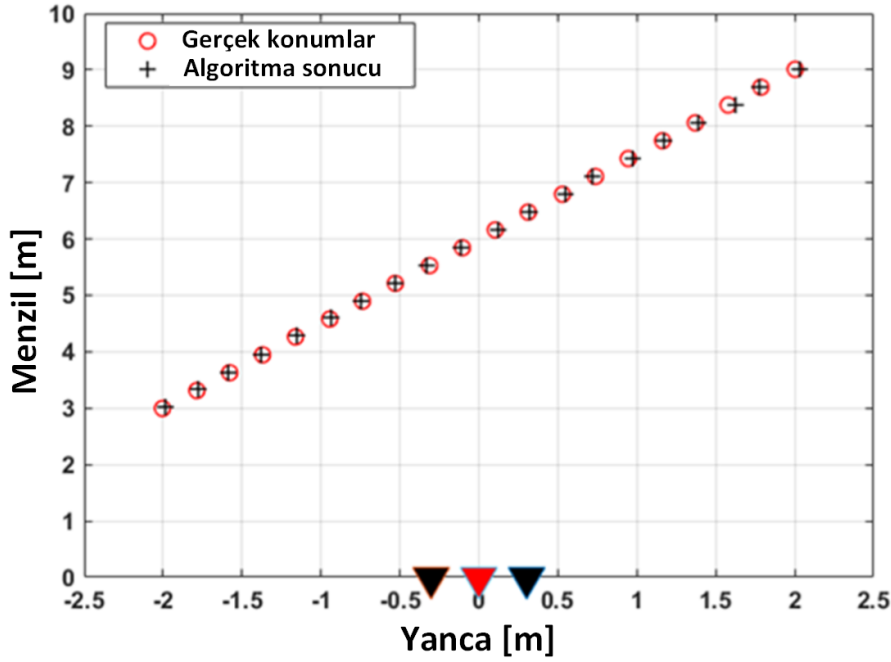


(b)

Şekil 4.7. Farklı anlık zaman görüntülerine karşın, (a) r_0 (b) ϕ değerleri.



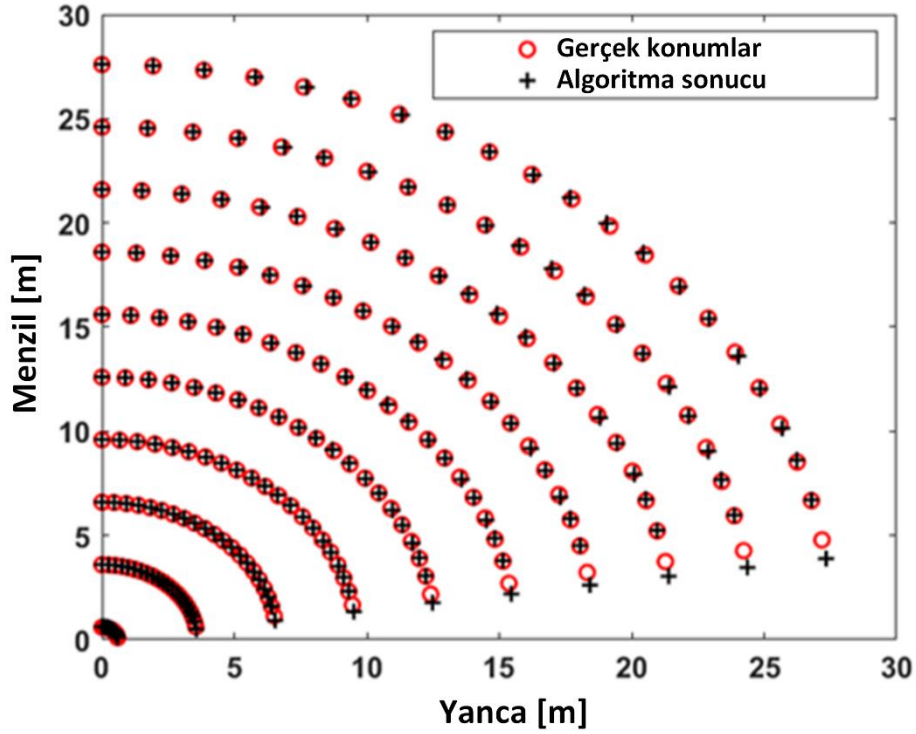
(a)



(b)

Şekil 4.8. (a) Algoritma sonrası elde edilen silindirik koordinatlarda ki konumlarını (b) hedefin gerçek konumlarını ve algoritma sonrası elde edilen konumlarını göstermektedir.

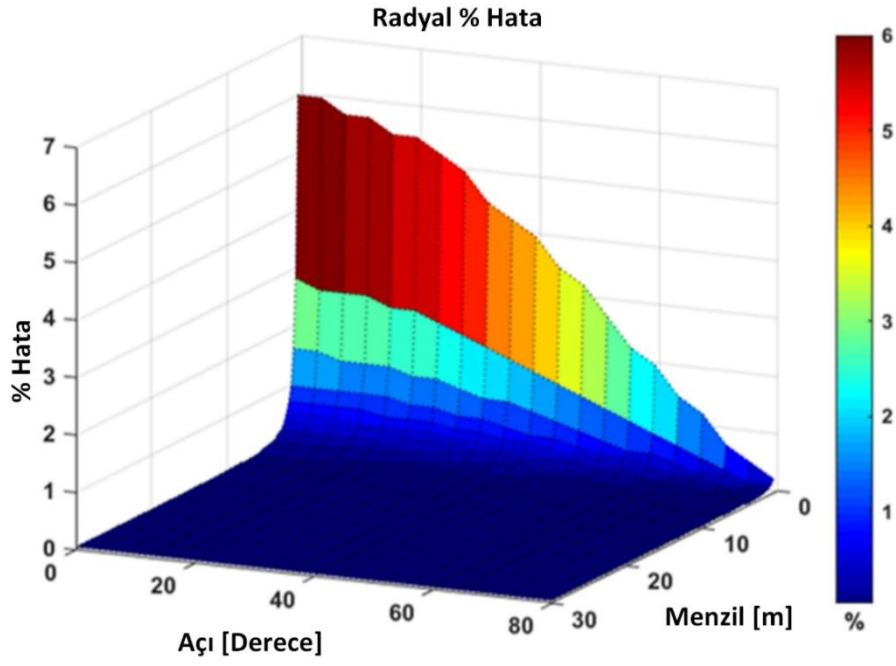
Şekil 4.5.'de gösterilen senaryoya dayalı algoritmamızda geometrik yaklaşımın neden olduğu hata ile ilgili formülasyonlar Bölüm 3.1.2'de bahsedilmiştir. Bu amaçla, hata analizi yapmak için benzetim şu şekilde yenilenmiştir. Vericiler ve alıcılar arasındaki uzaklık; $D/2$, pratik bir değer olarak düşünülerek 30 cm de sabit tutulur. Hedef uzaklığı; r_0 ve hedefin bakış açısı ϕ değiştirilir. EM dalganın duvardaki bozunumunun önemli olmadığı varsayımı ile; önerilen algoritma ile geometrik yaklaşımdan kaynaklanan yüzde hatası bölüm 3.1.2'deki denklem (3.15) ve (3.16) ile hesaplanmaktadır. Hedefin radyal mesafesi ($1xD$) = 0.6 m den ($50xD$) = 30 m ye eşit aralıklı 99 ayrı nokta olarak oluşturulmuştur. D 'ye göre menzil mesafesi değiştirilirken, bakış açısı değişkeni ϕ ; 21 farklı bakış açısının toplamı için, 0° (burun-açılı durumda) ile 80° (eğik-açılı durumda) arasında doğrusal olarak değiştirilmiştir. Şekil 4.9., yukarıda bahsedilen r_0 ve ϕ ' ye göre oluşturulan konumların; gerçek ve algoritma ile elde edilen sonuçlarını göstermektedir. Şekilde konumlar, her bir bakış açısına karşılık 99 ayrı noktadan 10'ar örnekler alınarak sunulmuştur. Kırmızı daireler seçilen noktaların kartezyen koordinatlardaki gerçek yerlerini ve siyah artı işaretleri de tahmini konumları temsil etmektedir. Şekil 4.9.'da radyal mesafe ve açı değerleri değiştikçe; her iki sonucun birbirleri ile uyum içinde oldukları açıktır. Hatanın en yakın menzil değeri için ve 0° yakınlarında en yüksek olduğunu gözlemliyoruz.



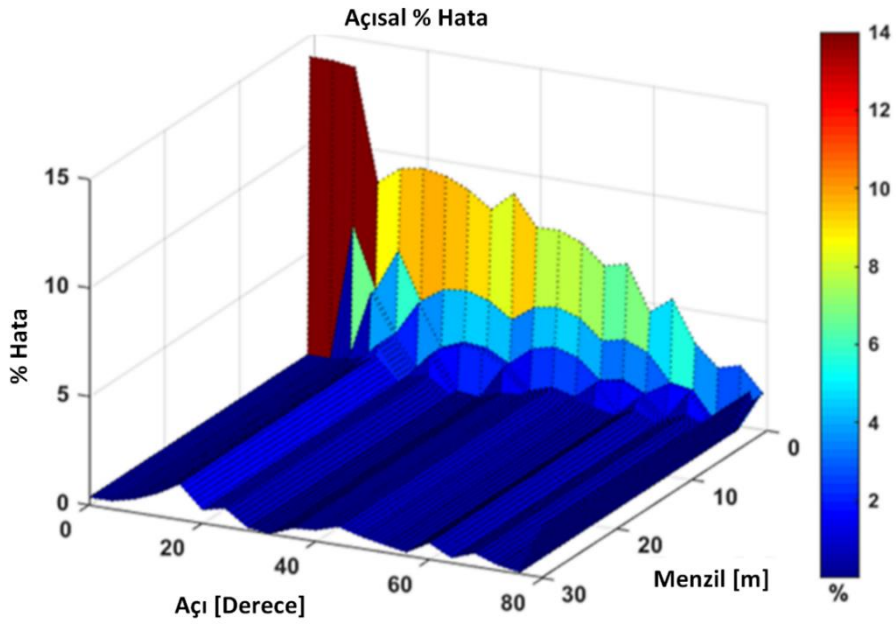
Şekil 4.9. Algoritma sonrasında hedefin çeşitli konumları: kırmızı daireler gerçek konumları, siyah artı simgesi tahmini konumları temsil etmektedir.

Menzildeki yüzde hata; Bölüm 3.1.2’de anlatılan denklem (3.15) kullanılarak hesaplanır ve Şekil 4.10. (a) herbir menzil ve açı değişimine karşın 2B hata haritası olarak çizilmiştir. Buna göre; maksimum menzil hatası $r = D$ mesafesi yakınlarında ve $\phi = 0^\circ$ civarında % 6 hata oranı ile verilmektedir. Geliştirilen algoritmanın menzildeki yüzde hatasının maksimum değeri; $r = 2D$ için % 1.62 ve $r = 3D$ için % 0.75 olarak hesaplanmaktadır.

Şekil 4.10. (b) de açısal değişken ϕ ye göre yüzde hata hesabı Bölüm 3.1.2’de açıklanan denklem (3.16) kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.10. (b)’den de anlaşılacağı üzere; açısal yüzde hatanın $r = D$ mesafesi yakınlarında ve $\phi = 0^\circ$ civarında % 14 ile maksimum olduğu görülmektedir. Yine, Şekil 4.10. (a) ve (b)’den; belirtilen menzil ve açı değeri ($r = D$ ve $\phi = 0^\circ$) dışındaki uzak menzil mesafelerinde ve diğer açı değerlerinde belirtilen yüzde hataların değerlerinin çok hızlı bir şekilde azaldığı görülmektedir. Öyleki; hesaplanan yüzde hata değeri $(r, \phi) = (2D, 0)$ konumunda % 3.85 civarı ve $(r, \phi) = (3D, 0)$ için bu değerin % 2.36 ya düştüğü gözlemlenmektedir. Genel olarak; Şekil 4.10. (a) ve (b)’den geometrik yaklaşımla ilgili hatanın, hedefin radardan uzaklaştıkça çok hızlı düştüğü şeklinde olduğudur. Bu değerlendirme ile; belirtilen algoritmanın hareketli hedefin tespiti için güvenilir olarak uygulanmasını sağladığını ifade etmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.10. (a) Radyal yüzde hata haritası (b) radyal mesafe ve bakış açısına göre açısal yüzde hata haritası.

4.1.3. Duvar Arkası Geriye İzdüşüm Algoritması Benzetimi

Bu aşamada, frekans uzayı odaklama algoritması GİA'nın mükemmel ortam ve durumların simüle edildiği benzetim çalışması ile testi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, MATLAB® programlama platformunda kurgulanan DARG senaryosuna tabii tutulmuştur. Elde edilen benzetim sonuçları ile GİA algoritmasının hedefin gerçek konumuna odaklanmasında ki ve görüntülenmesindeki başarısı gözlenmiştir. Bu aşamanın başarılı bir şekilde sonuçlanması gerçek DARG deneysel ölçüm çalışmaları için büyük önem arz etmektedir.

Benzetim Uygulaması

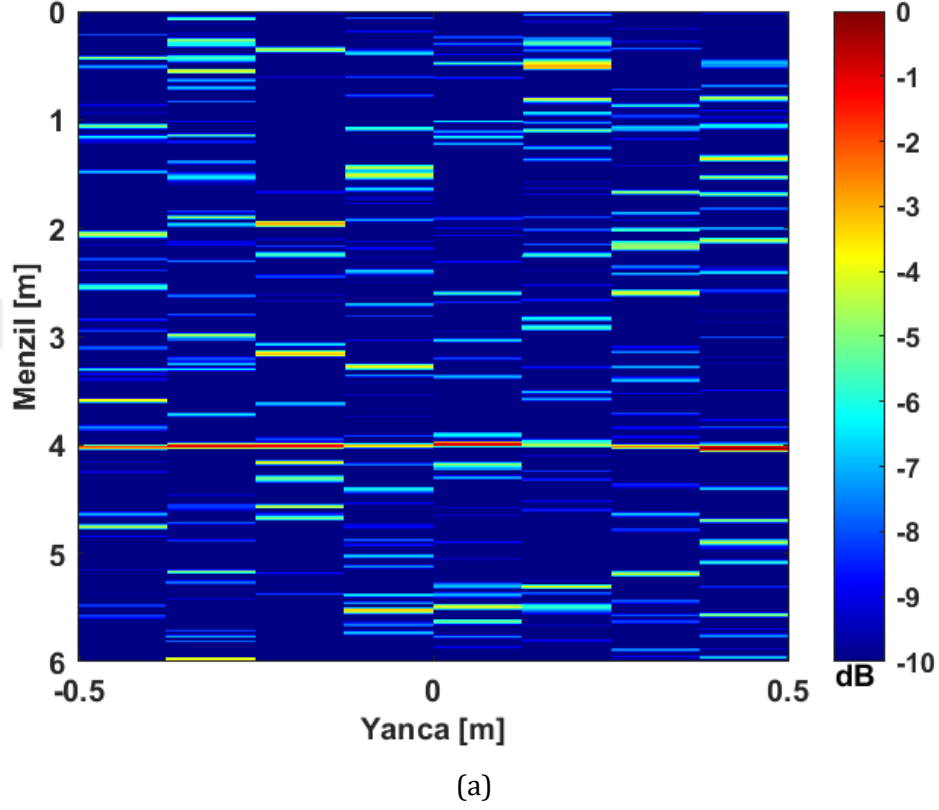
Tez çalışmasının bu bölümünde daha önce Bölüm 3'de anlatılan GİA algoritmasının sentetik verilere uygulanması sağlanmıştır. Bu amaçla gerçek DARG deney çalışma senaryolarına uygun parametrelerde MATLAB® ortamında benzetim gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki tabloda, benzetim parametreleri yer almaktadır.

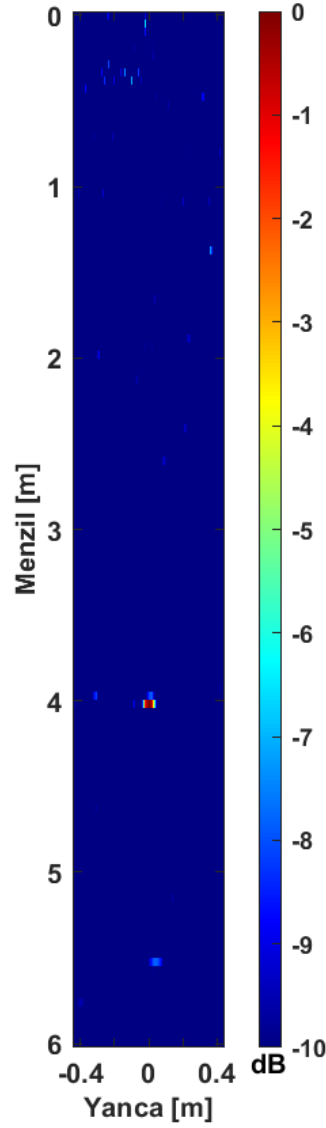
Tablo 4.1. Frekans uzayı 8'li monostatik anten konfigürasyonu statik noktasal hedef için Gİ algoritması benzetim parametreleri.

Benzetim Parametreleri	
Noktasal Saçıcı Konumu:	
Menzil, x_m :	4
Yanca, y_m :	0
Frekans:	4-8 GHz
	248 ayrık nokta
Monostatik anten konumları	-0.44 m ile 0.44 m arası eşit aralıklı 8 anten konumu
Görüntüleme penceresi	
Y:	88 cm, 128 nokta
X:	6 m, 128 nokta

Verilenlere göre; $P(4,0)$ noktasında mükemmel bir noktasal saçıcı bulunmaktadır. Monostatik düzende 88 cm lik bir yapay açıklıkta 8 anten, yanca ekseninde aralarında eşit uzaklık olacak şekilde (12,5 cm aralıklarla) doğrusal bir hat boyunca yerleştirilmiştir. 4 GHz'lik bir bant genişliği ile 248 ayrık frekans noktasında 4 – 8 GHz frekans aralığında menzil-yanca uzayında toplam 248×8 , $E_s(k, y)$ geri saçılım elektrik alan matris verisi elde edilmiştir. Bu çalışmada gerçek deney ölçüm senaryolarına daha yakın olması için elde edilen frekans uzayındaki ham veriye ilave

bir gürültü sinyali eklenmiştir. Bu amaçla, gürültünün tüm frekanslarda aynı güce eşit olarak sahip olduğu ve normal bir Gauss dağılımına sahip toplanır beyaz gauss gürültü (Additive White Gaussian Noise) sinyali eklenmiştir. Elde edilen gürültü ilaveli frekans verisinin TFD alınarak $E_s(r, y)$ menzil profili elde edilir. Elde edilen menzil profili -10 dB dinamik aralık içerisinde Şekil 4.11. (a)'da sunulduğu gibidir.





(b)

Şekil 4.11. (a) Menzil profili (b) GİA algoritması ile elde edilen odaklanmış görüntü.

Şekil 4.11. (a)'dan da görülebileceği üzere; -10 dB dinamik aralık içerisinde eklenen gürültü seviyesinden kaynaklı hedefin menzil profilindeki davranışı rahatlıkla seçilememektedir. Hedefin gerçek konumu olan $P(4,0)$ noktasına odaklanması için GİA'nın adımları sırası ile uygulanır. Bu amaçla GİA için görüntüleme penceresi yancada 88 cm ve menzilde 6 m olarak belirlenmiştir. Görüntüleme penceresi her 2 ekseninde de eşit 128 noktadan oluşmaktadır. Buna göre toplam 128×128 lik bir görüntüleme matrisi $e(x,y)$ oluşmuş olacaktır. Sonrasında; toplanmış olan gürültü ilaveli (248×8 veri) uzaysal frekans datası $S_{\vartheta}(k_r)$, k_r ile çarpılır. Sonrasında k_r ile çarpılan verinin TFD alınarak filtrelenmiş bir menzil profili elde edilir. Penceredeki herbir pikselin anten konumlarına olan uzaklıkları hesaplanır, bu uzaklıklara göre menzil profilinin

görüntüleme penceresindeki izdüşümü en yakın komşu interpolasyonu ile GİA algoritmasındaki adım 4 de bahsedildiği üzere yapılır. İnterpolasyonla elde edilen veriler görüntüleme matrisi $e(x, y)$ ' ye eklenir. Ve bu adımlar tüm anten konumları için tekrarlanır. Elde edilen 128×128 görüntüleme matrisinde hedef gerçek konumuna odaklanmış olmuştur. Şekil 4.11. (b)'de hedefin GİA algoritması ile odaklanması sonucu elde edilen menzil-yanca verisini göstermektedir. Buna göre hedef gerçek konumu olan (4,0) noktasında kendini göstermektedir. Buda 8'li monostatik anten düzeneği geometrisinde GİA algoritmasının performansını göstermiş bulunmaktadır. Ayrıca, GİA algoritmasının SGO'yu arttırmadaki başarısı odaklanmış görüntüden de rahatlıkla anlaşılmaktadır.

4.2. Deneysel Çalışmalar

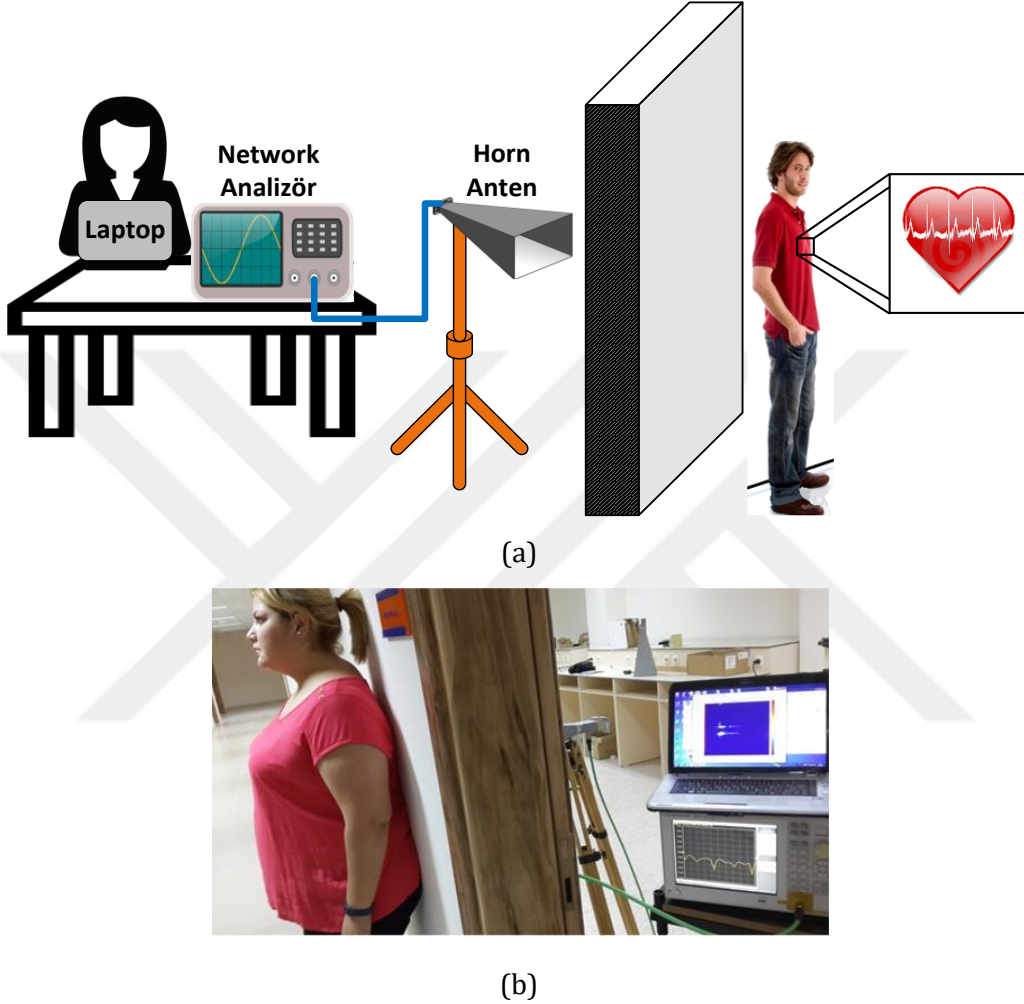
Bölüm 3'de tez çalışmasında geliştirilen ve uygulanan yöntemler ve deneysel çalışmalar için hazırlanan donanımsal deneysel düzenekler ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bölüm 4.1'de geliştirilen bu algoritmaların benzetim çalışmaları sonuçları ile başarıları ispatlanmıştır. Bahsi geçen yöntemlerin, gerçek ortamda deneysel ölçüm verileri alınarak bu verilere uygulanması ve deneysel bulguların paylaşılarak yorumlanması bu bölümün asıl konusudur. Bu amaçla zaman uzayı ve frekans uzayı radar sistem konfigürasyonlu ölçüm sistemi ile duvar arkası görüntüleme ve konum tespiti çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

4.2.1. Duvar Arkası Solunum Ve Kalp Atışı Tespitine Yönelik Deneysel Çalışmalar

Duvar arkası radar teknolojisinin uygulama alanlarından biri olan yaşamsal işaretlerin algılanması çok kritik ve hayati önem arz eden bir konudur [27]. Bu amaçla kalp atışlarının ve nefes alma solunum hareketi gibi olguların uzaktan algılanması radar kullanımı ile mümkün olmaktadır [25-28]. Ayrıca hem kalp atışı hem de solunum hareketleri, yaşayan bir insandan gelen sinyalin frekans, faz, genlik ve varış zamanındaki değişikliklere neden olmaktadır. Ancak bu tepkiler, duvar yapısının kalınlığından ve duvarın elektriksel özellikleri gibi karakteristik özelliklerinden dolayı oldukça zayıf işaretler olarak gözükmemektedir [27]. Dolayısıyla kalp atışı ve solunum hareketlerini algılamak ve başarmak çözümlenmesi gereken zor bir konudur. Tez çalışmasının bu bölümünde; bu işaretlerin tespiti için yüksek bant-genişliğine sahip AFSD radarı kullanılmıştır.

Deney çalışmasında yaklaşık 30 cm kalınlığa sahip bir duvarın önünde monostatik konfigürasyonda radar düzeneği oluşturulmuştur. Deney senaryosu geometrisi Şekil 4.12. (a)'da

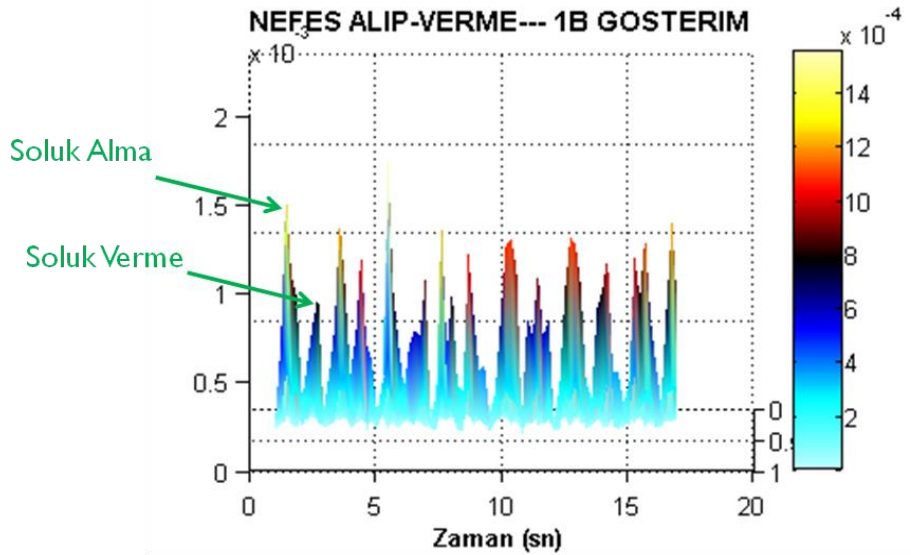
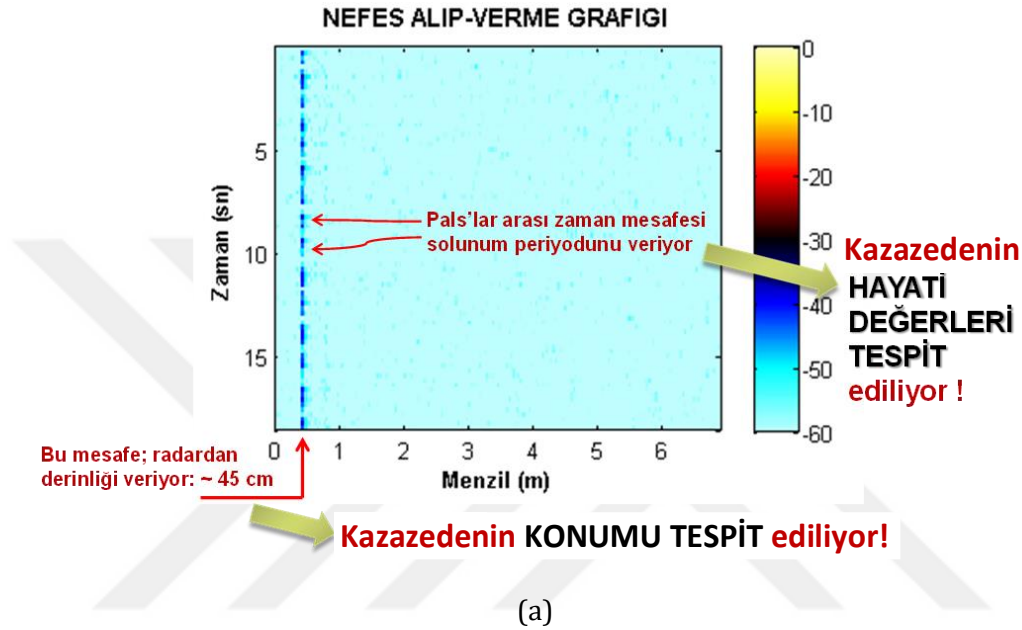
gösterildiği düzenedir. Sistem, adım frekanslı sürekli dalga radar sinyallerini gönderen ve alan Agilent E5071B ENA vektör network analizörü (VNA), C-bantta çalışan bir boynuz anten ve sistem kontrolü ve veri aktarımında kullandığımız bir kişisel dizüstü bilgisayardan oluşmaktadır. Şekil 4.12. (b) deney çalışma anından bir kesiti göstermektedir.



Şekil 4.12. Kalp atışı ve solunum hareketini tespit etmeye yönelik (a) Deney çalışmasının geometrisi (b) Deney anından bir fotoğraf karesi.

Deney çalışmasında, 30 cm kalınlığındaki duvarın hemen arkasında duvara yaslanmış pozisyonda 28 yaşında yetişkin bir bayan 20 sn boyunca normal hızda nefes alıp-verme hareketini gerçekleştirmiştir. 3 GHz ile 5 GHz arasında toplam ayrıık 201 frekans datası hedeften geri yansıyan kompleks radar sinyal cevapları olarak toplanmıştır. Ayrıca, kişinin göğüs hareketinin, geri yansıyan sinyalin genliklerinde farklılıklara neden olduğu iyi bilinmektedir. Hedeften geri yansıyan sinyalin 1B TFD alınarak hedefin menzil profili elde edilmiştir. Kişinin nefes alıp-verme hareketini daha rahat gözlemleyebilmek için ardışık sahnelerin çıkarımı işlemi

uygulayarak, bir farksal menzil profili elde edilmiştir. Bu işlem ile, duvar, oda veya deney ortamında ki sabit nesnelerin büyük oranda filtrelenmesi sağlanmış olup yalnızca büyük oranda hareketli nesnelerin değişiklikleri görüntülenmiştir. Böylelikle, elde edilen imajın SGO yükseltilmiş olmaktadır. Şekil 4.13. (a) ve (b), sırasıyla hedefin 2B menzil-zaman eksenindeki soluk alıp verme grafiğini ve soluk alıp- vermenin zamana karşı genlik değerlerini gösteren 1B menzil profili grafiğini göstermektedir.

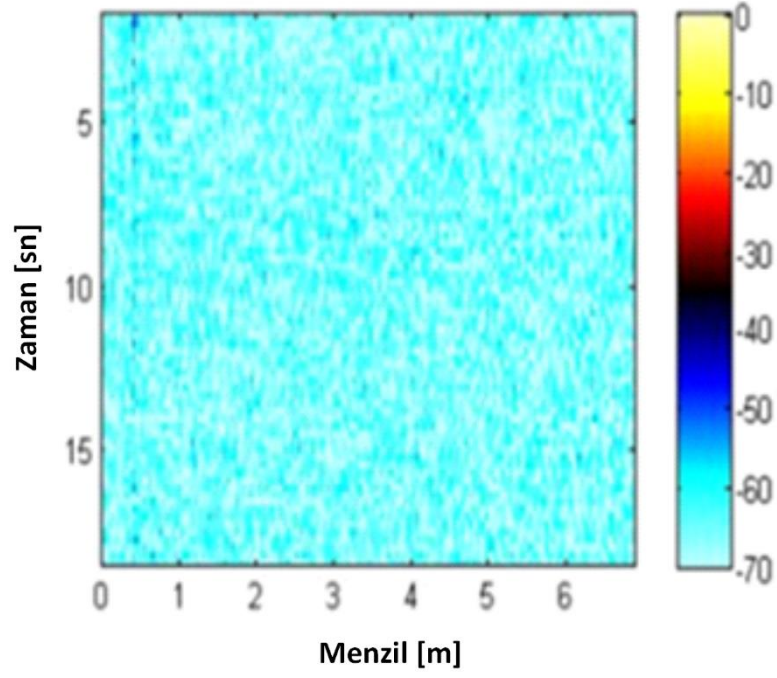


Şekil 4.13. Duvar arkası nefes alan kişinin radar görüntüleri (a) 2B menzil-zaman ekseninde hedefin farksal nefes alıp verme grafiği, (b) 45 cm mesafeye tekabül eden hedefin soluk alıp verme şiddetlerini gösteren 1B menzil profilinden kesit.

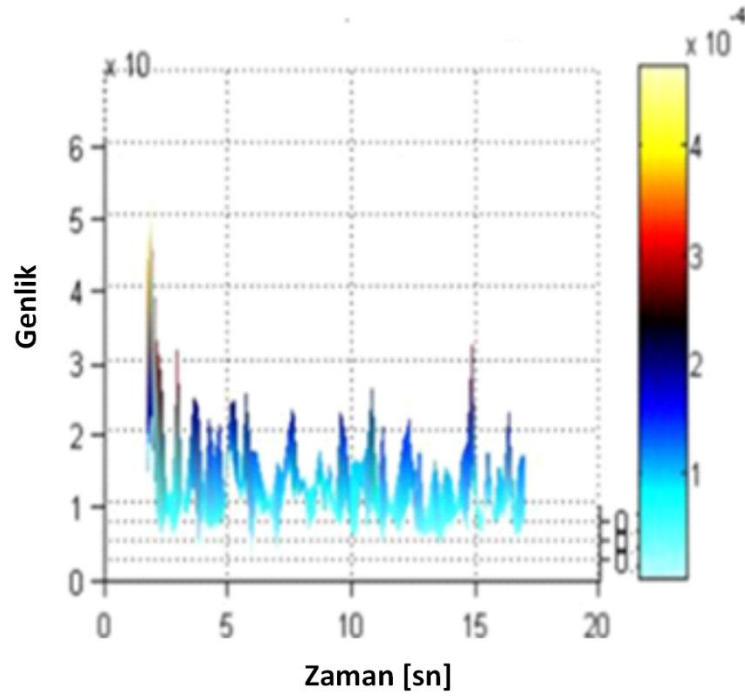
Şekil 4.13. (a)' da soluk alıp- veren kişinin zamanla değişen farksal menzil profili ardışık olarak 2B düzlemde sunulmuştur. Şekilden de anlaşılacağı gibi, değişim menzilde yaklaşık 45 cm civarında olmaktadır ve bu da bize soluk alıp-veren kişinin radardan menzil yönünde ne kadar uzaklıkta olduğu bilgisini vermektedir. Bu grafikten çıkarabileceğimiz diğer önemli sonuç, grafikte ardışık tekrarlayan işaretler arası zaman mesafesinden, solunum periyodunun tespit edilebilecek olmasıdır. Elde edilen bu 2B menzil-zaman grafiği ile tehlikeli yaşamsal şartlarda bulunan kişinin; kazazedenin, hayati değerleri tespit edilebilmektedir.

Şekil 4.13. (b) toplam gözlem zamanına karşın, 45 cm menzil deki farksal verinin kesitini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere, kişi 16 sn lik bir periyotta toplam 7 kez nefes alma ve 7 kez nefes verme olayı gerçekleştirmiştir. Buda bize sağlıklı bir bireyin normal koşullarda ki nominal nefes alma değerleri ile tutarlı olduğunu göstermektedir.

İkinci olarak, kalp atışı tespitine yönelik deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, aynı kişi aynı duvarın arkasında 16 sn boyunca hiç kıpırdamadan ve nefesini tutarak beklemiştir. Deney çalışmasında kullanılan radar sistemi ve parametreleri bir önceki deneydeki ile aynı seçilmiştir. Kişi nefes almadığından göğüs dinlenme halinde ve hiç hareket etmediği için sahnedeki tek değişiklik onun kalp atış hareketidir. Kişiden geri yansıyan EM sinyaller radar alıcısı tarafından toplanmıştır. Toplanan verilerin 1B TFD alınıp, ardışık çıkarma işlemi uygulanması sonrasında hedefin zamana karşı 1B menzil profili verisi elde edilmiştir. Şekil 4.14. (a) ve (b) sırasıyla kişinin 2B menzil-zaman ekseninde farksal kalp atış grafiğini ve 45 cm mesafeye tekabül eden hedefin kalp atış hareketinin 1B menzil profilinden kesiti sunmaktadır. Şekil (a) daki zamanla değişen menzil grafiğine bakıldığında, farksal kalp atış hareketlerinin soluk alıp-verme hareketlerine göre çok daha zayıf olduğu görülmektedir. Yine aynı grafikten; 45 cm deki değişiklikler -50 dB genlik seviyesi civarında ayırt edilebilmektedir. Gözlem zamanına göre 45 cm deki tepkiyi 1B menzil profili olarak Şekil (b)'de daha anlaşılır şekilde görmekteyiz. Şekil incelendiğinde, grafikteki tepe noktaları kişinin kalp atışlarına karşılık gelmektedir. Grafikte, 20 sn boyunca 17 tepe noktası gözükmektedir, bu da dakikada 64 darbeye (64 darbe/dk) tekabül etmektedir. Normal sağlıklı bir bayan bireyinin dakikada nominal 60 – 100 kalp atışına sahip olduğunun bilinmektedir [129]. Buna göre elde edilen sonuçumuz bilinen bu gerçek değerlerle uyumlu olduğunu göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.14. Duvar arkası kalp atışı radar görüntüleri (a) 2B menzil-zaman ekseninde hedefin farksal kalp atış grafiği, (b) 45 cm mesafeye tekabül eden hedefin kalp atış hareketinin 1B menzil profilinden kesit.

Böylelikle, yaşamsal varlığın septomlarının duvar arkası radar uygulaması ile başarılı şekilde tespit edilmiş oldu. Ardışık çıkarma işlemi gibi değişim algılama yöntemleri, kişinin konumunu, soluk alıp-verme hareketini, solunum periyodunu, kalp atış hareketi gibi periyodik hareketi etkin bir şekilde algılmaktadır. Deneysel sonuçlara bakıldığında, elde edilen bulguların sağlıklı bir bayan birey için nominal değerler ile uyum içinde olduğunu söyleyebiliriz. Ayrıca uygulanan yöntemimiz oldukça pratik ve doğruluğu güvenilirdir. Bu metodoloji ile göçük, enkaz altında kalan insanların yaşamsal bulguların tespiti gibi kritik konular için kolaylıkla adapte edilebilir.

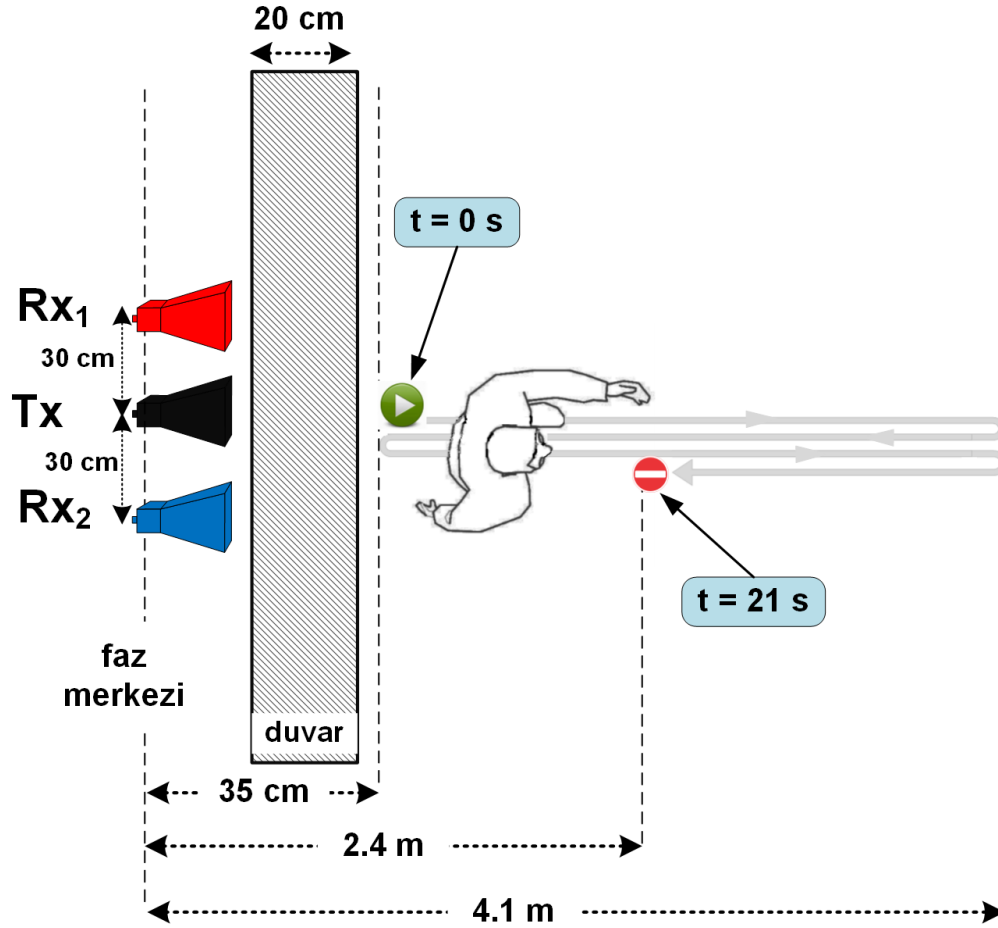
4.2.2. Elipsler Kesişimi Algoritması Deneyleri

Bu bölümde; Bölüm 3.1.1 de bahsedilen elipslerin kesişimi yöntemine dayanan duvar arkası hedef konum tespitine yönelik algoritmanın gerçek deney ölçüm senaryolarına uygulanması ve sonuçları yer almaktadır. Deney çalışması Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi E Blok binasında gerçekleştirilmiştir.

Hareketli Hedef Uygulaması

Bölüm 4.1.1.'de sentetik senaryo yardımıyla algoritmanın doğruluğu onaylandıktan sonra, algoritma bu bölümde gerçek deneysel hedef üzerinde test edilmiştir. Bu amaçla, deneysel senaryomuzun geometrisi Şekil 4.15. (a)'da gösterildiği gibi oluşturulmuştur. Buna göre; radar sistemimizdeki gönderici anten Tx , (0,0) orjin konumuna yerleştirilmiştir. İki alıcı anten; alıcı anten 1, Rx_1 ve alıcı anten 2, Rx_2 gönderici antenin her iki yanına 30 cm olacak şekilde eşit aralıklarla yerleştirilmiştir. Ayrıca, anten konfigürasyonu 20 cm kalınlığındaki duvara hemen hemen boşluk olmayacak şekilde yaslatılmıştır. Anten faz merkezinden yaklaşık 35 cm uzaklıkta duvarın arkasında bir adam, 21 sn boyunca iki kez duvardan uzaklaşıp-yaklaşarak yürüme hareketi sergilemiştir. Anten konfigürasyonu ve adamın yürüme hareketini sergileyen geometri Şekil 4.15. (a)'da açıklayıcı olarak şekillendirilmiştir. İlk olarak adam, Tx den 35 cm uzaklıktan yürümeye başlamıştır ve ilk turda yaklaşık Tx den 4.1 m mesafeye $t = 5.8$ sn de ulaşmıştır. Bu konumda beklemeksizin duvara doğru geri dönerek başladığı noktaya $t = 12$ sn de iken yeniden ulaşmıştır. Yeniden duvardan uzaklaşıp ikinci kez aynı güzergahta ilerleyerek $t = 17.1$ sn anında ikinci kez Tx den 4.1 m uzaklıktaki konumundan geri dönmüştür. Ve adam yürümesini Tx den 2.4 m uzaklıkta ve $t = 21$ sn zaman aralığında tamamlayarak sonlandırmıştır.

Deney çalışmasında kullanılan DARG ölçüm sistemimiz Şekil 4.15.(b)'de gösterilmektedir. Sistem, zaman uzayı alıcı-verici radar birimlerinden oluşmaktadır. Bu amaçla teknik spesifikasyonları Bölüm 3'de tablo halinde sunulan 2 kanallı analog/dijital dönüştürücü, model olarak Geozondas GZ6E ve GZ1118GN-01EV sinyal jeneratörü kullanılmıştır. Ayrıca, 1 - 8 GHz frekans bandında çalışan 3 özdeş çift sırtlı boynuz antenlerden bir tanesi gönderici diğer ikisi alıcı antenler olarak kullanılmıştır.



(a)



(b)

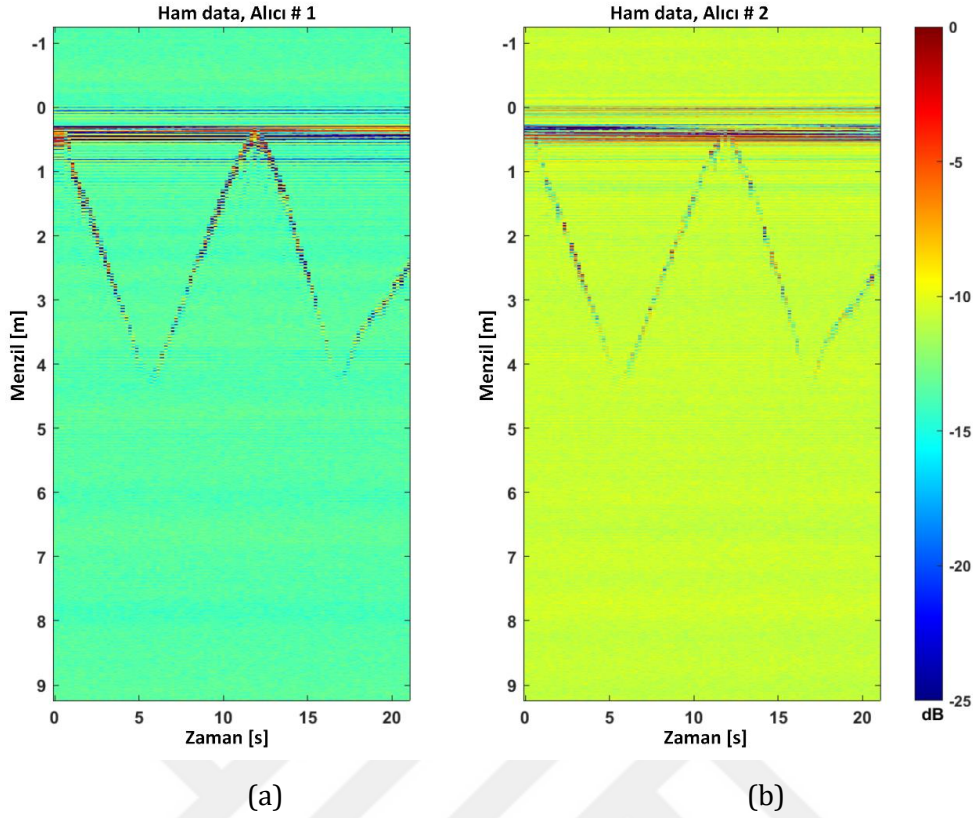
Şekil 4.15. (a) Deney çalışması geometrisi: Anten konfigürasyonları ve adam hedefinin duvardan uzaklaşarak ve duvara doğru olan yürüme hareketi (b) deneyde kullanılan DARG ölçüm düzeneği.

Tüm DARG sisteminin kontrolü geliştirmiş olduğumuz MATLAB® programlama dilinde yazılmış kod ile sağlanmıştır. Şekil 4.16. deney çalışmasından farklı zaman anlarındaki fotoğraf karelerini göstermektedir. Belirtilen fotoğraflarda; adam yürüme seyrinin ilk bölümünde, $t = 3 \text{ sn}'de$ iken göndericiden yaklaşık 2 m uzaklıkta ve $t = 21 \text{ sn}'de$ yürüme seyrinin son noktasındaki görüntüsü sunulmaktadır.



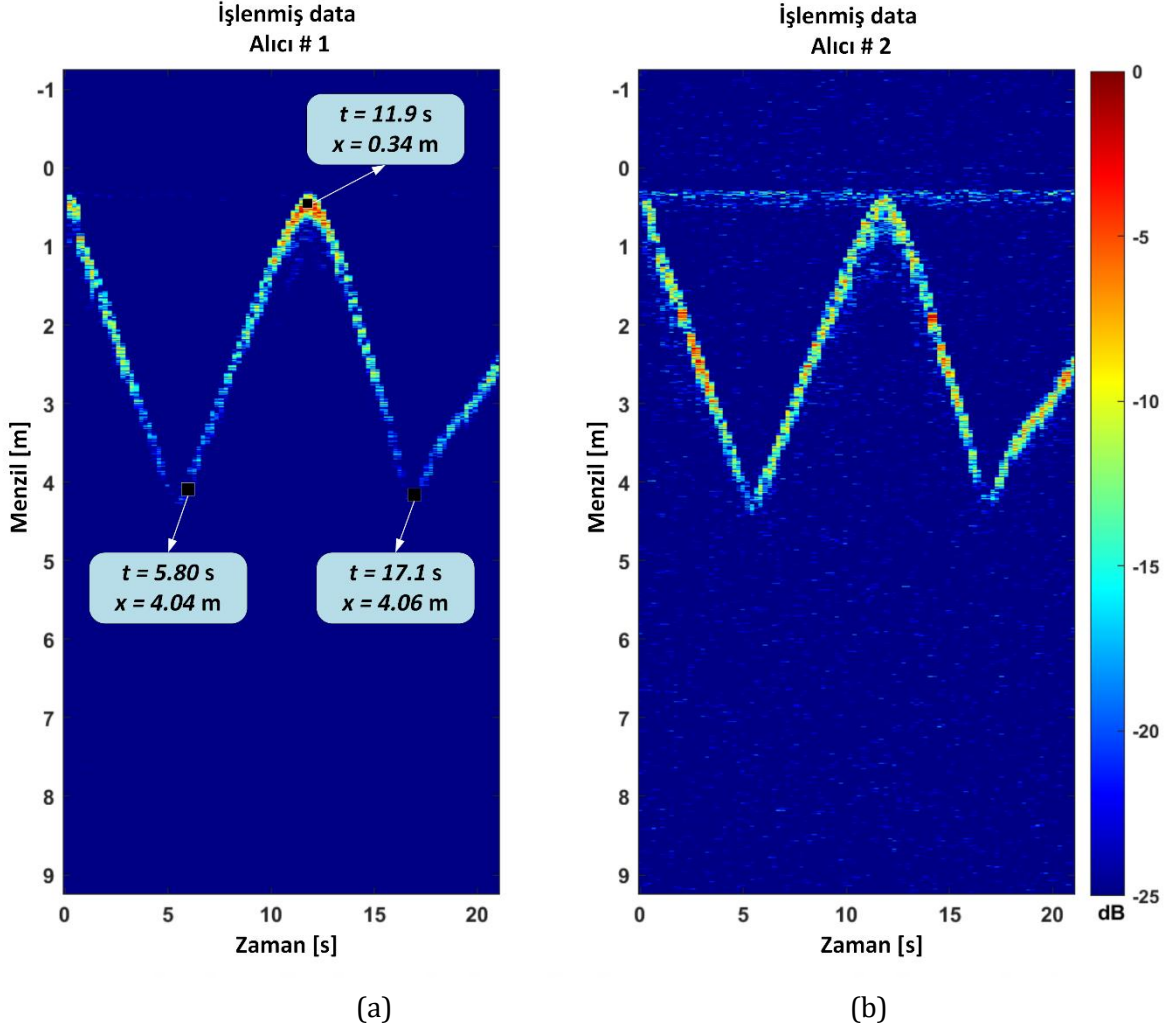
Şekil 4.16. Deney çalışmasından farklı zaman anlıklarındaki fotoğraf kareleri.

Adam, duvar arkasında yürüme hareketini sergilerken 21 *sn* boyunca, sahnenin toplamda 92 kez zaman uzayı cevap tepkisi elde edilmiştir. Alıcı antenler Rx_1 ve Rx_2 tarafından toplanan ham geri saçılım verisi Şekil 4.17. (a) ve (b) de sırası ile sunulmaktadır. Şekillerden, $r = 0$ menziline silik düz çizgi ile gösterilen sinyallerin Tx ve $Rx_{1,2}$ antenleri arasındaki kanal etkileşimi (cross-talk) olduğunu ayrıca deneyimizin de faz merkezi olduğunu görmekteyiz. Ayrıca, duvar yapısı ham menzil profillerinde $r = 0.15 m$ den $r = 0.35 m$ arasında en güçlü yansıyan olarak düz bir çizgi demeti halinde kendini açıkça göstermektedir.



Şekil 4.17. (a) Alıcı anten 1, Rx_1 tarafından toplanılan ham 2B menzil-zaman verisi (b) Alıcı anten 2, Rx_2 tarafından toplanılan ham 2B menzil-zaman verisi.

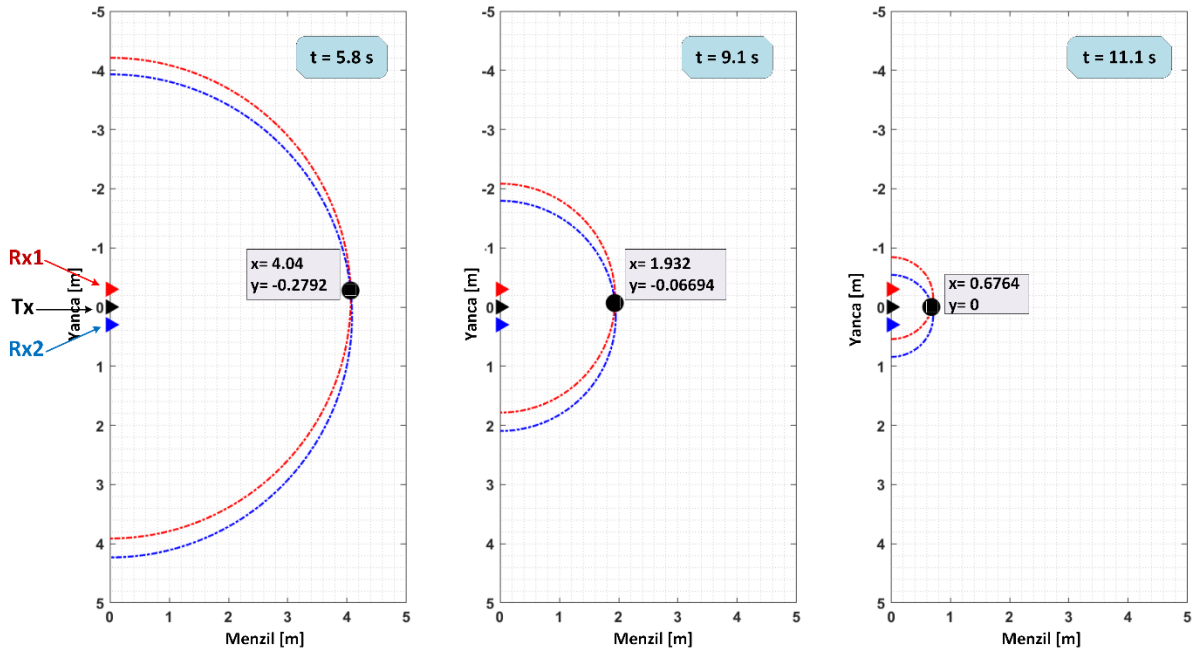
Duvarın istenmeyen bu yansımalarını bastırmak ve diğer sabit nesnelere elimine etmek için geri plan çıkarım yöntemi [130] literatürde de başarılı olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Bu amaçla, hareketli nesnelere farklı zamanlardaki cevaplarından ardışık çıkarma işlemi uygulayarak bu olguyu başarılı bir şekilde elde ederiz. Ardışık çıkarma işlemi ardışık görüntüler arasındaki farkı anlatır. İnsan yürüyüşünün yansımaları, diğer kargaşaların ve duvarın bastırılması ile yükseltilerek Şekil 4.18. (a) ve (b)'de her iki kanal için sırası ile sunulmaktadır. Şekil 4.18.' (a) dan anlaşılacağı üzere; $t = 5.8 sn$ olduğunda adam duvardan yaklaşık $3.75 m$ uzaktaydı ve duvara en yakın pozisyona ulaşmak için $6.1 sn$ devam etti sonrasında $t = 17.1 sn$ de iken menzilde aynı uzaklığa geri ulaştı. 2B menzil-zaman verisinin SGO'nunu bu şekilde yükselttikten sonra Bölüm 3.1.1 de ayrıntılı biçimde açıklanan elipslerin kesişimi metodu bu 2B menzil-zaman verisine uygulanmıştır. Buna göre; Tx ve Rx_1 çifti ile Tx ve Rx_2 çifti hedefin bulunmuş olduğu konumlar için ayrı ayrı birer elips eğrisi oluşturacaktır. Ve hedefin menzil (x) ve yanca (y) uzayındaki görüntülenen konumu; oluşan bu iki elipsin anten konfigürasyonumuza göre olan düzlemdeki kesişim noktalarıdır.



Şekil 4.18. (a) Alıcı anten 1, Rx_1 tarafından toplanılan farksal 2B menzil-zaman verisi (b) Alıcı anten 2, Rx_2 tarafından toplanılan farksal 2B menzil-zaman verisi.

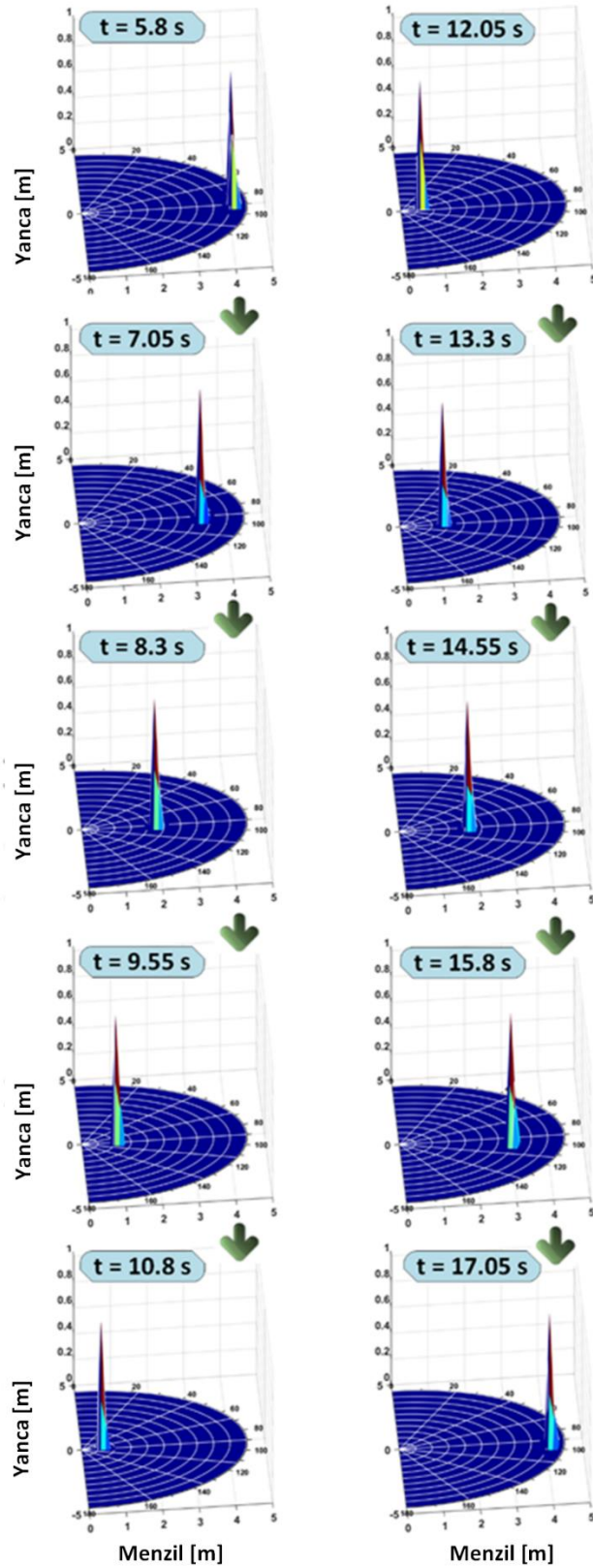
Buna göre; Şekil 4.19. uygulanan elipslerin kesişimi algoritması sonrası elde edilen elips eğrilerini göstermektedir. Şekilde elde edilen 92 zaman tepkisi cevabından yalnızca farklı zamanlardan örnek olarak 3 tanesi sunulmaktadır. En soldaki şekil $t=5.8$ sn iken kırmızı kesik çizgili, gönderici anten ve alıcı anten 1; $Tx - Rx_1$ çiftinin oluşturduğu elips eğrisini, mavi kesik çizgi de $Tx - Rx_2$ çiftinin oluşturmuş olduğu elips eğrisini göstermektedir. Buna göre hedef bu zaman diliminde konumsal olarak menzilde yaklaşık $x = 4.04$ m de ve yanca uzayında $y = -0.27$ m bulunmaktadır. Şekil 4.19.'da ki orta ve en sağ kısımda yer alan şekiller sırası ile hedefin $t = 9.1$ sn ve $t = 11.1$ sn lerinde bulunduğu konumları göstermektedir. Buna göre hedef ortadaki şekilde menzilde 1.93 m de iken sağdaki şekilde 67 cm de yer almaktadır. Burada yine ortadaki şekilde hedef yürüme seyrinin 1.turunu tamamlamak üzeredir ve duvara varmasına yaklaşık olarak 1.6 m mesafe bulunmaktadır. Sağdaki şekilde ise hedef duvara daha da

yakınlaşmıştır ve yaklaşık olarak duvara 32 cm uzaklıktadır. Bu durum tüm şekillerdeki elipslerin hareketinden de rahatlıkla anlaşılmaktadır.



Şekil 4.19. Hedefin, elipslerin kesişimi yöntemi ile elde edilen farklı zaman anlardaki konum bilgisi

Deney esnasında genç adam, mümkün merteye duvardan gönderici antenin hizasında gitmeye gayret göstermiştir. Yukarıda ki şekillerdeki yanca uzayındaki (y) konumlarına bakılarak aynı zamanda diğer zaman aralıklarındaki cevapları da algoritmanın hem menzil hem yanca uzaylarında doğru bilgileri verdiğini göstermektedir. Şekil 4.20., $t = 5.8$ sn ile $t = 17.1$ sn aralığındaki adamın 2B menzil ve yanca uzaylarındaki tahmin edilen konum bilgilerini göstermektedir. Bu sonuçlar adamın gidiş-dönüş yürüme hareketinin gerçek deney sırasındaki sergilemiş olduğu yürüme senaryosu ile çok iyi uyum içerisinde olduğunu göstermektedir.



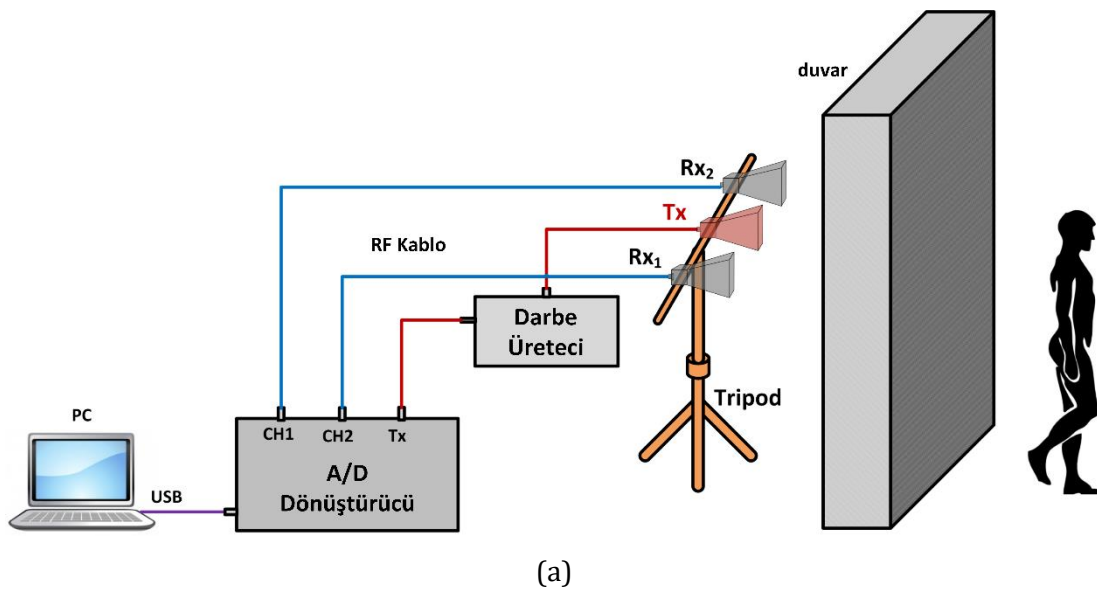
Şekil 4.20. Algoritma sonrası adamın yürüme hareketinin $t=5.8$ sn ve $t=17.05$ sn arasındaki 2B menzil-yanca uzaylarındaki konum bilgisi.

4.2.3. Multistatik Konfigürasyona Dayalı Duvar Arkası Konum Tespiti Algoritması Deneyleri

Bu bölümde Bölüm 3.1.2'de detayları ile anlatılan 1 gönderici ve 2 alıcılı radar konfigürasyonuna dayalı duvar arkasındaki hareketliliğin konumsal bilgisini tespit etmeye yönelik multistatik konum belirleme algoritmasının deneysel çalışmalara uygulanması sonrasında elde edilen sonuçları paylaşılmıştır. Bu amaçla deney çalışması senaryosu ve deney düzeneği ile sunulan hareketli bir insan hedefinin önerilen algoritma ile duvar arkası konumsal bilgisinin başarılı bir şekilde elde edildiği bulguları yer almaktadır.

Hareketli Hedef Uygulaması

Bölüm 3.1.2'de bahsedilen ve Bölüm 4.1.2'de başarı performansının sabit ve hareketli hedef için benzetimi yapılarak değerlendirilen algoritmanın etkinliğini test etmek için geometrisi Şekil 4.21. (a)'da ve ölçüm düzeneği Şekil 4.21. (b) de gösterilen komple bir deneysel DARG sistemi sunulmaktadır. Düzenekte; zaman uzayı radar alıcı-verici sistemi olarak daha önce teknik spesifikasyonları Bölüm 3'de ayrıntılı olarak anlatılan Geozondas GZ6E Analog/Dijital dönüştürücü ve GZ1118GN-01EV sinyal jeneratörü kullanılmıştır. Aynı zamanda EM dalgayı gönderen-alan elemanlar olarak, 1-8 GHz frekans bandında çalışan 3 özdeş çift sırtlı boynuz antenlerden 1'i gönderici ve diğer 2'si alıcı antenler olmak üzere kullanılmıştır. Şekil 4.21. (a) ve (b)'de sunulan DARG sisteminin kontrolü bir laptop bilgisayar ile ve tarafımca geliştirilen MATLAB® programlama dilinde yazılmış bir yazılım kodu ile gerçekleştirilmiştir.

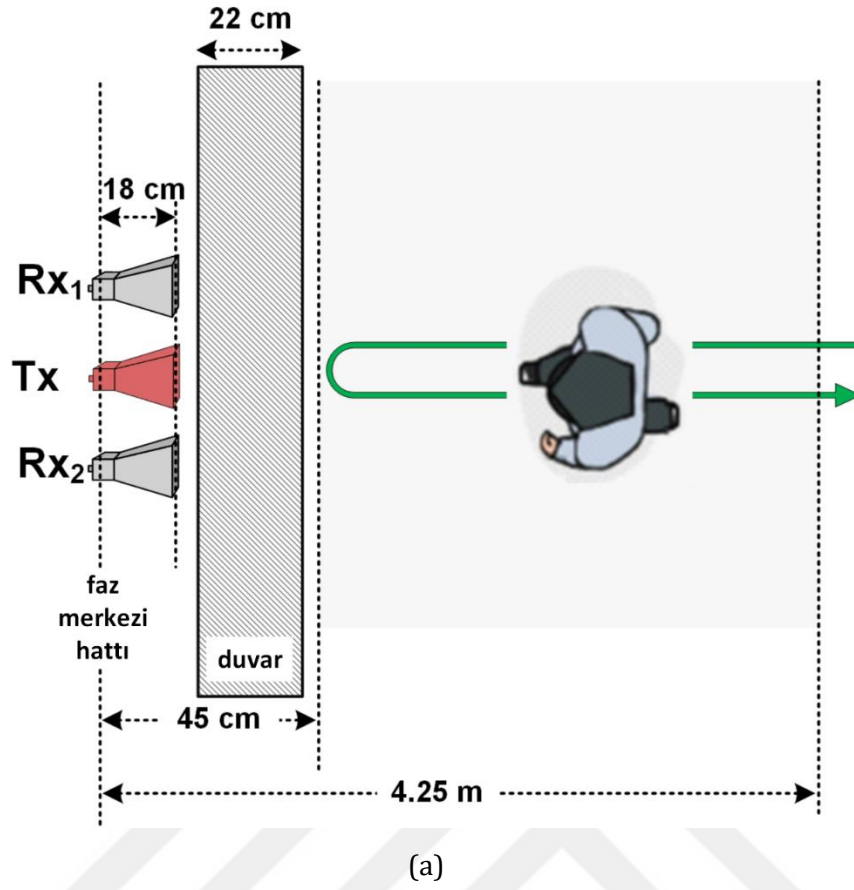




(b)

Şekil 4.21. (a) Hareketli hedef için deneysel ölçüm düzeneği geometrisi, (b) Deneysel düzeneğin fotoğrafı.

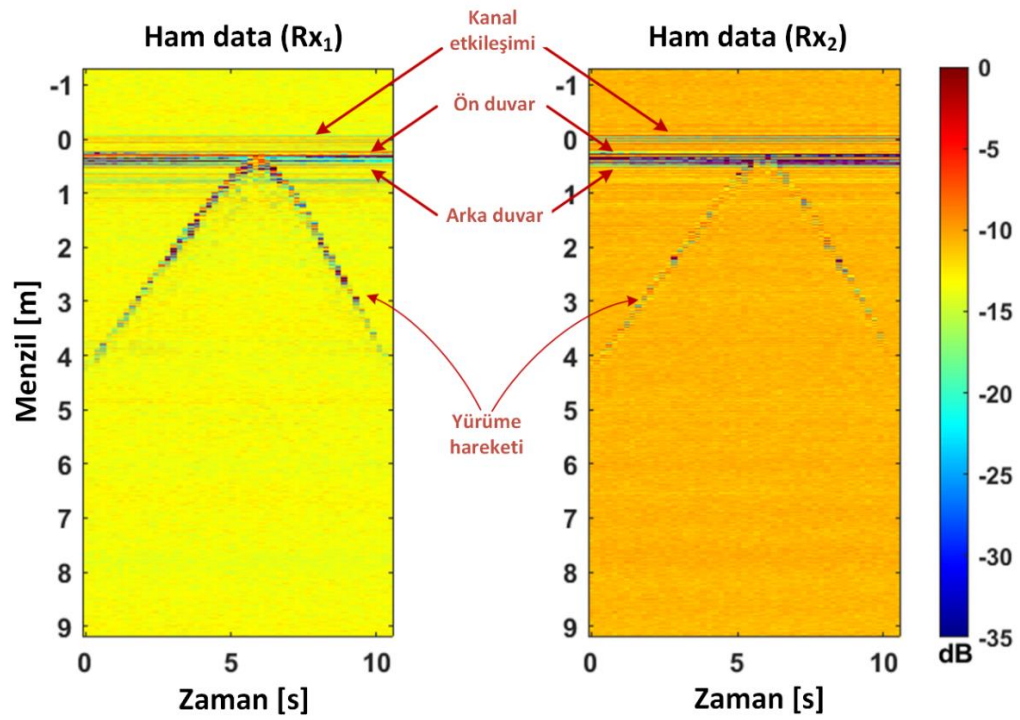
Deneysel düzeneğinde özdeş boynuz antenler Şekil 4.21. (b)'den de görüleceği üzere kalınlığı yaklaşık olarak 22 cm olan duvara yaslatılmıştır. Herbir anten arası mesafe 30 cm olmak üzere iki alıcı anten arası $D = 60\text{ cm}$ olarak belirlenmiştir. Antenlerimizin ve mevcut A/D dönüştürücü sistemimizin spesifikasyonları dikkate alınarak ve aynı zamanda gerçek DARG senaryolarına uygun olarak 1 GHz ile 6 GHz arasında 5 GHz lik bir frekans bandında çalışılmıştır. Deneysel süresi boyunca, duvarın diğer tarafında hedef olarak bir erkek yetişkin insan gönderici antenden $r_0 = 0.45\text{ m}$ ve $r_0 = 4.25\text{ m}$ radyal mesafe arasında Şekil 4.22. (a)'da deneysel geometrisinden ve (b)'de deneysel sırasında alınan bir fotoğraf karesinden de görüleceği üzere önce duvara yaklaşarak ve sonrasında duvardan uzaklaşarak hareket etmiştir. Antenler, Şekil 4.22. (a)'dan da görüleceği gibi duvara çok yakın olarak neredeyse değecek mesafede konuşlandırılmıştır.



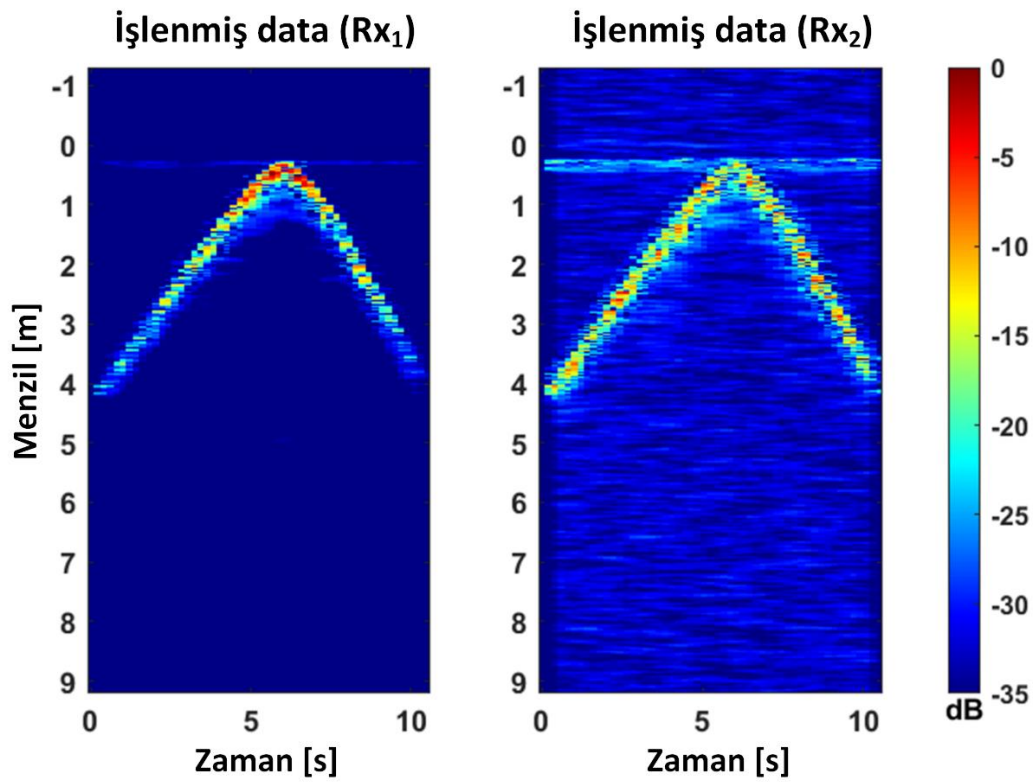
(b)

Şekil 4.22. (a) Ölçüm geometrisi: Hedef kişinin duvara doğru ve duvardan uzaklaşan geometrisi (b) Deney sürecinden anlık bir fotoğraf.

Bölüm 3'de bahsedilen zaman uzayı DARG sistemi kullanılarak, hedef kişi duvar arkasında hareketini sergilerken her 198 ms için deney senaryosunun zaman uzayı cevapları toplanmıştır. Veri toplama süresi 10.5 sn sürmüştür ve alıcı anten 1 ve alıcı anten 2 tarafından toplamda 53 farklı menzil profili verileri elde edilmiştir. Alıcı anten 1 ve alıcı anten 2 tarafından elde edilen menzil profilinin zamana karşı 2B gösterimi Şekil 4.23. (a)'da sunulmaktadır. Kablolardan ve gönderilen darbenin şeklinden kaynaklanan gecikmelerin kırılması ile sistemin faz merkezi, alıcıdan çapraz konuşma olarak da bahsedilen kanal etkileşim anı olarak belirlenmiştir. Gönderici ve alıcı antenler; $Tx-Rx1$ ve $Tx-Rx2$ arasındaki bu kanal etkileşimi Şekil 4.23. (a)'da (sol ve sağda) ve $r=0$ etrafında silik düz çizgi olarak görülmektedir. Şekil 4.23. (a)'daki menzil profilleri için; en yüksek yansımalar duvarın her iki yanından oluşmaktadır. Bu durum $r = 0.23\text{ m}$ ve $r = 0.45\text{ m}$ arasında 2B menzil-zaman düzleminde düz bir çizgi demeti olarak görülmektedir. Ayrıca verilen menzil profilinde adamın yürüme hareketi rahatlıkla görülmektedir. Buna göre; $r_0 = 0.45\text{ m}$ ve $r_0 = 4.25\text{ m}$ arasındaki yürüme hareketini sergileyen çizginin kırılma noktası bize kişinin yönünü değiştirdiğini göstermekte ve yürüme hareketi menzil-zaman düzleminde iki eğik çizgi şeklinde görülmektedir. Elde edilen ham 2B menzil profillerinin sinyal-gürültü-oranı (SGO) arttırmak için daha öncede bahsedilen farklılaştırma yöntemi uyguladık şöyle ki; 53 farklı menzil profillerinden, herbir menzil profile ardışık olarak bir öncekinden çıkartıldı. Böylelikle; duvar dahil tüm statik nesnelerin etkileri yüksek oranda bastırılarak yeni oluşturulan 2B menzil-zaman düzlemi SGO'su yüksek olarak Şekil 4.23. (b)'de görülmektedir.



(a)



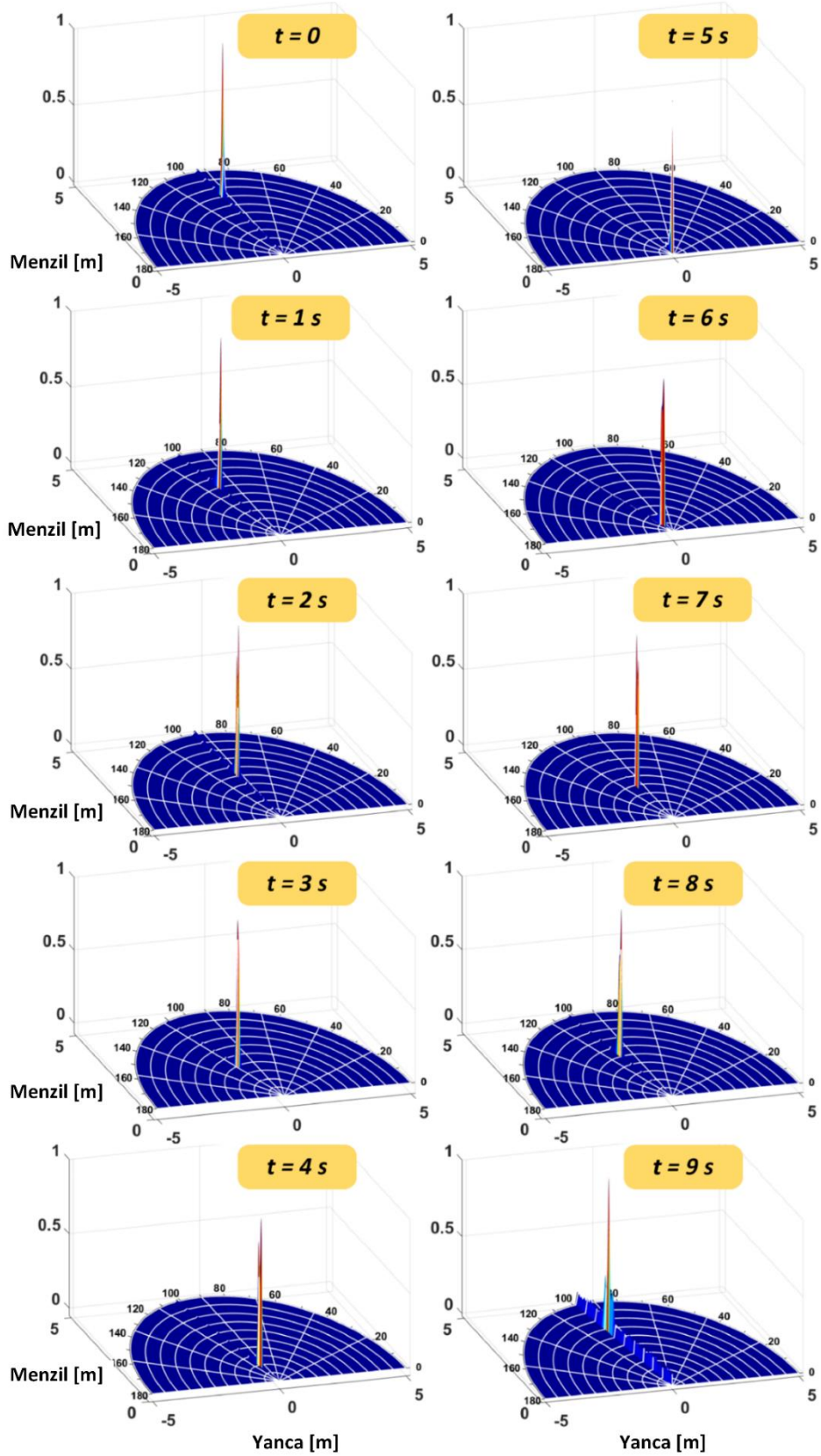
(b)

Şekil 4.23. (a) Alıcı 1 ve Alıcı 2 tarafından toplanan veri setlerinin menzil-zaman ham data görüntüleri (b) ham data verilerinin işlenmiş menzil-zaman görüntüleri.

Ardışık alan çıkarma işlemi olarak, farksal geri saçılan elektrik alan vektörleri $\tilde{E}_{S_1}(k, \zeta)$ ve $\tilde{E}_{S_2}(k, \zeta)$ aşağıdaki denklemler ile elde edilir:

$$\begin{aligned}\tilde{E}_{S_1}(k, \zeta_i) &= \tilde{E}_{S_1}(k, \zeta_i) - \tilde{E}_{S_1}(k, \zeta_{i-1}), \\ \tilde{E}_{S_2}(k, \zeta_i) &= \tilde{E}_{S_2}(k, \zeta_i) - \tilde{E}_{S_2}(k, \zeta_{i-1}),\end{aligned}\quad i = 2, 3, \dots, N \quad (4.2)$$

Bu işlemle Şekil 4.23. (b)'deki 2B menzil-zaman görüntülerinin SGO değerleri ham görüntülerinkinden çok daha yüksek olduğundan; adamın yürüme hareketinin yansıma genliği de önemli ölçüde yükseltilmiştir. Sonrasında, adamın yürüme hareketinin konumsal bilgisini elde etmek için Bölüm 3.1.2'de bahsedilen konum belirleme algoritmamızın adımlarını sırasıyla uyguladık. Ayrıca, algoritma hedefin konum bilgisini elde ederken duvardan (yani $r > 0.45$ m) sonraki bölgede uygulanmıştır. Şekil 4.24., hedefin $r_0 = 0.45$ m ve $r_0 = 4.25$ m arasındaki menzil-yanca uzayında farklı anlık zaman görüntülerini göstermektedir.

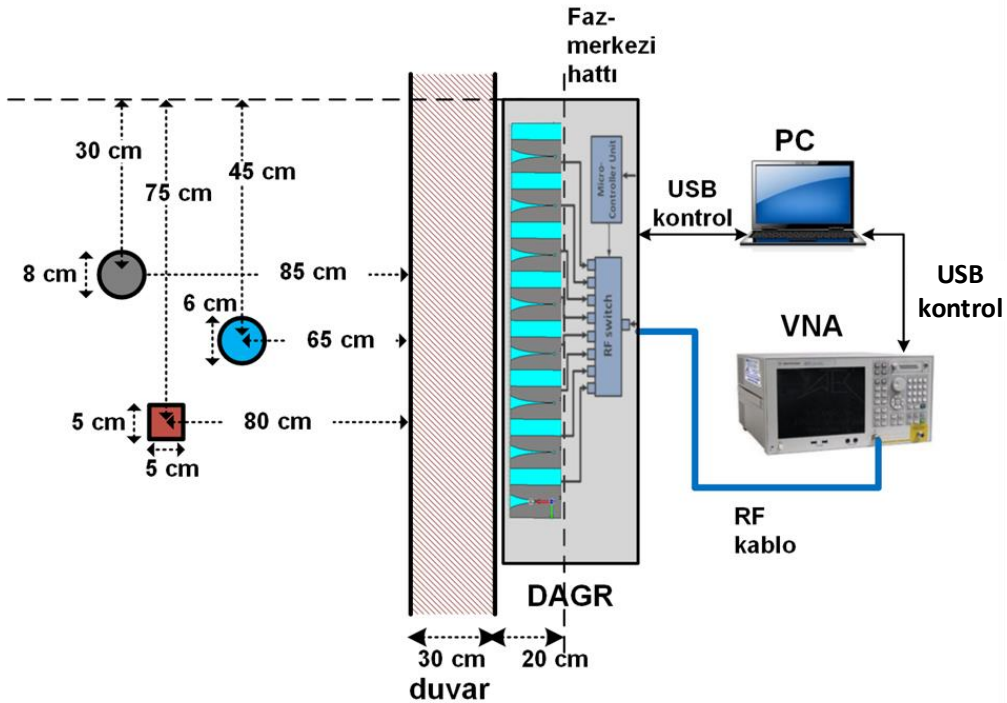


Şekil 4.24. Algoritma sonrası yürüyen adamın farklı zaman aralıklarındaki elde edilen konumları.

4.2.4. Duvar Arkası Geriye İzdüşüm Algoritması Deneyleri

4.2.4.1. Statik Hedef Deneyi

Bölüm 3’de bahsedilen doğrusal anten dizisi yapısına sahip duvar arkası radar sensörünün prototipi tamamlandıktan sonra etkinliğini ve performansını değerlendirmek için deneysel ölçümlerde bulunulmuştur. Belirtilen radar sensörü ile duvar arkası sabit ve hareketli nesnelerin radar görüntülerinin oluşması amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak duvar arkası sabit hedef tespiti deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan bir tanesi geometrisi Şekil 4.25. (a)’da verilen deney çalışmasıdır. Geometriye göre, yaklaşık 30 cm kalınlığındaki duvarın arkasına boyutları ve şekilleri birbirlerinden farklı 3 metal boru menzil ve yanca uzaylarında farklı konumlara yerleştirilmiştir. Geometride boruların konumları ve boyutları bilgisi açıkça görülmektedir. Kullanılan borulardan bir tanesi, demirden yapılmış olup kare kesitlidir ve şekilde kırmızı kareli boru olarak gözükmektedir. Diğer ikisi alüminyum malzemeden olup dairesel kesite sahiptir. Galvaniz kaplı silindirik boru daha büyük çapta olup geometride gri daire olarak, mavi boyalı alüminyum boruda daha ince kesite sahip olup mavi dolu daire olarak şekilde gözükmektedir.



(a)



(b)

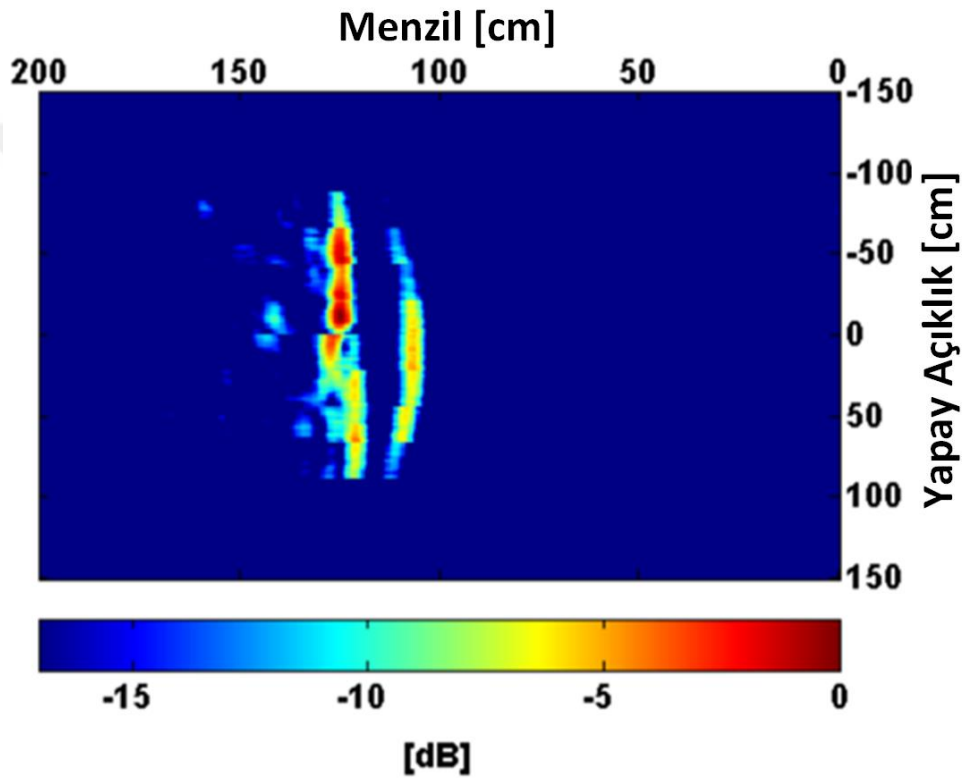


(c)

Şekil 4.25. (a) Sabit hedef deneyi için deney geometrisi, (b) hedef olarak kullanılan 3 metal boru ve (c) deney anından bir fotoğraf karesi.

Şekil 4.25. (b)'de deney sırasında kullanılan boruları göstermektedir. Şekil (c)'de ise gerçekleştirilen deney sahnesinden bir fotoğraf karesi yer almaktadır. Deney süresince VNA'nın frekansı 3 GHz ile 8.5 GHz arasında toplam 201 ayrıık frekans için değişen lineer frekans datası oluşturulmuştur. 88 cm lik bir yanca açıklığında hedeften geri yansıyan ve radar alıcısı tarafından toplanan S_{11} ölçümleri geliştirdiğimiz MATLAB® dilinde yazılan otomatik veri toplama yazılımı ile elde edilmiştir. Duvardan gelen yansımayı ve antenler arası etkileşimi yok etmek için arkaplan

çıkarmı işlemi uygulanmıştır. Böylelikle hedef yansımaları SGO'su yükseltilmiş bir şekilde elde edilmiştir. Ardından hedefin frekans eksenini boyunca 1B TFD alınarak menzil-zaman eksenini görüntüsü oluşturulmuştur Şekil 4.26. toplanan ham veriden arkaplan çıkarmı prosedürü sonrası elde edilen filtrelenmiş yanca eksenindeki yapay açıklığa karşın menzil radar imajını göstermektedir. Elde edilen görüntünün menzil çözünürlüğü $\delta r = c/(2BW_f) = 30/(2 \times 5.5) = 2.73 \text{ cm}$ olarak hesaplanır, burada c ışık hızını ve BW_f gönderilen sinyalin bant-genişliğini göstermektedir.

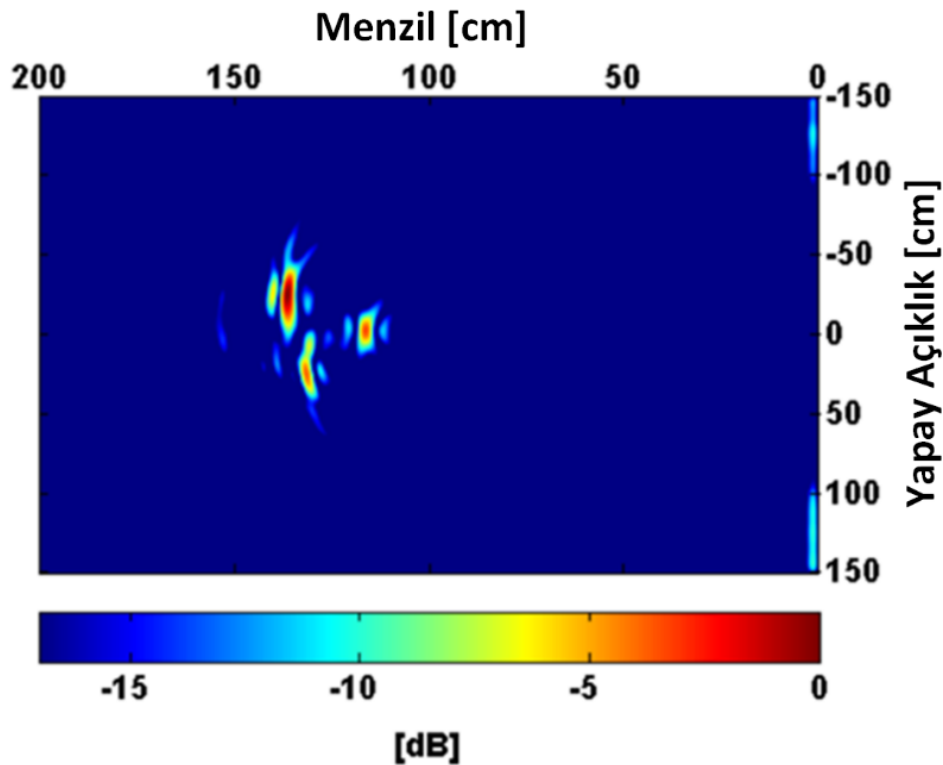


Şekil 4.26. Arkaplan çıkarmı sonrası filtrelenmiş menzil profili.

Şekil 4.26.'ya bakıldığında hedeflerin hiperbolik bir yapı sergilediği gözükmektedir. Bu yanca eksinde yapılan B-tarama işlemi sonrası imajda görülecek beklenen ve bilinen bir durumdur. Bu görüntü tipi özelliği literatürde yaygın olan YNR uygulamalarında oldukça yaygındır. Odaklanmamış bu görüntüyü gerçek konumuna göç ettirmede kullanılan en başarılı yöntemlerden biri GİA'dır. Elde edilen odaklanmamış görüntüye Bölüm 3'de ayrıntılı olarak anlatılan GİA'nın adımları sırası ile uygulanmıştır. GİA uygulamadan önce iki makul varsayımına sahibiz. Şöyleki; birincisi EM dalganın duvarda ilerlerken neden olduğu gecikmenin toplam

yolculuk süresine göre ihmal edilebilir olduğudur. Bu durum pratikte uygundur çünkü duvar kalınlığımız yaklaşık 30 cm civarındadır ve genelde hedefler bu mesafeden çok daha uzak konumdadırlar. İkinci yaklaşımımız; EM dalganın duvara girerken ve çıkarken yapmış olduğu kırınımından kaynaklanan kaymanın, hedefin boyutuna kıyasla küçük olduğu varsayımdır.

Duvar kalınlığının 30 cm ve duvarın dielektrik sabitinin nispeten 5 alınması [108] durumunda menzil yönündeki maksimum azimutdaki kayması, ana hüzmenin maksimum bakış açısı (23.5°) değeri için 4.88 cm olarak hesaplanmıştır. Bu sebepten, hesaplanan bu kayma değeri DARG operasyonları için önemsiz kalmaktadır [109]. Şekil 4.27. GİA sonrası boru hedeflerinin odaklanmış radar görüntüsünü göstermektedir. Şekilden de görüleceği gibi, borular gerçek yerlerine başarılı bir şekilde odaklanmıştır. Ayrıca hedeflerin menzil ve yanca çözünürlükleri radar görüntüsündeki güçlü yansıma noktalarının -3 dB genişliklerine bakılarak şekil üzerinden hesaplanarak ölçülmüştür. DARG sensörünün doğrusal anten dizi yapısından kaynaklı iyileşmiş -3 dB yanca çözünürlüğü 10 cm civarı ölçülmüştür. Menzil çözünürlüğü de, 2.8 cm olarak ölçülerek 2.73 cm olan teorik değerle karşılaştırıldığında başarılı bir odaklama operasyonu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.27. GİA uygulaması sonrası elde edilen boru hedeflerinin odaklanmış radar görüntüsü.

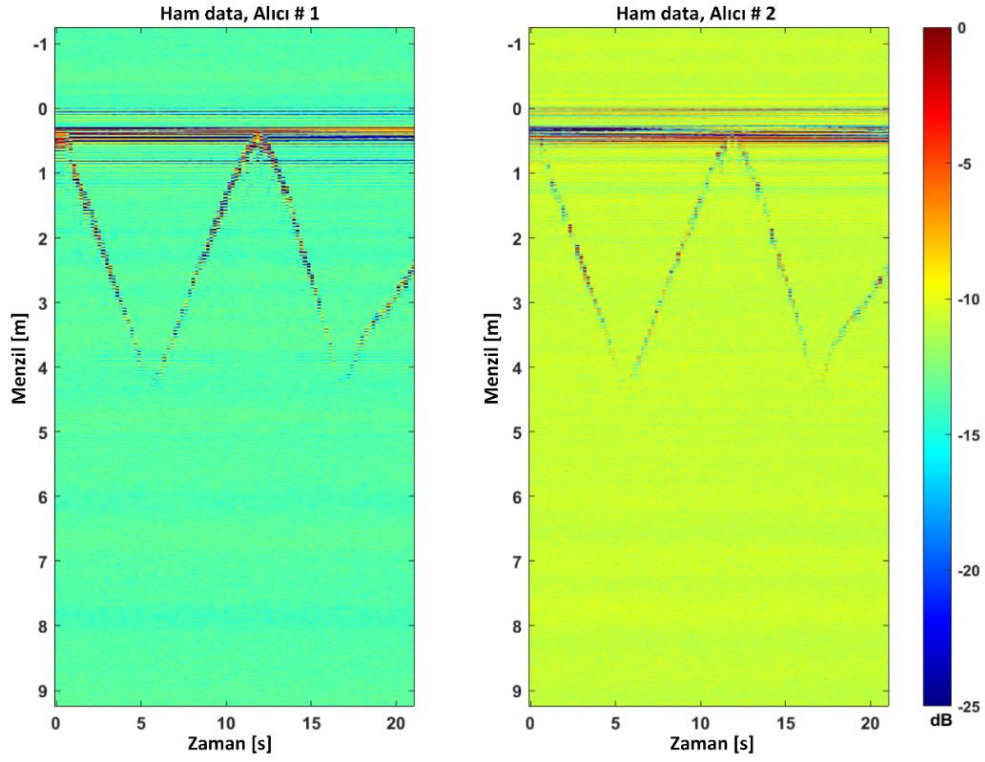
4.2.4.2. Hareketli Hedef Deneyleri

Daha önce Bölüm 4.1.3 de benzetimi sunulan ve 4.2.4.1 de sabit hedefleri için test edilen GİA'nın performansı bu bölümde hareketli hedeflere uygulanarak değerlendirilmiştir.

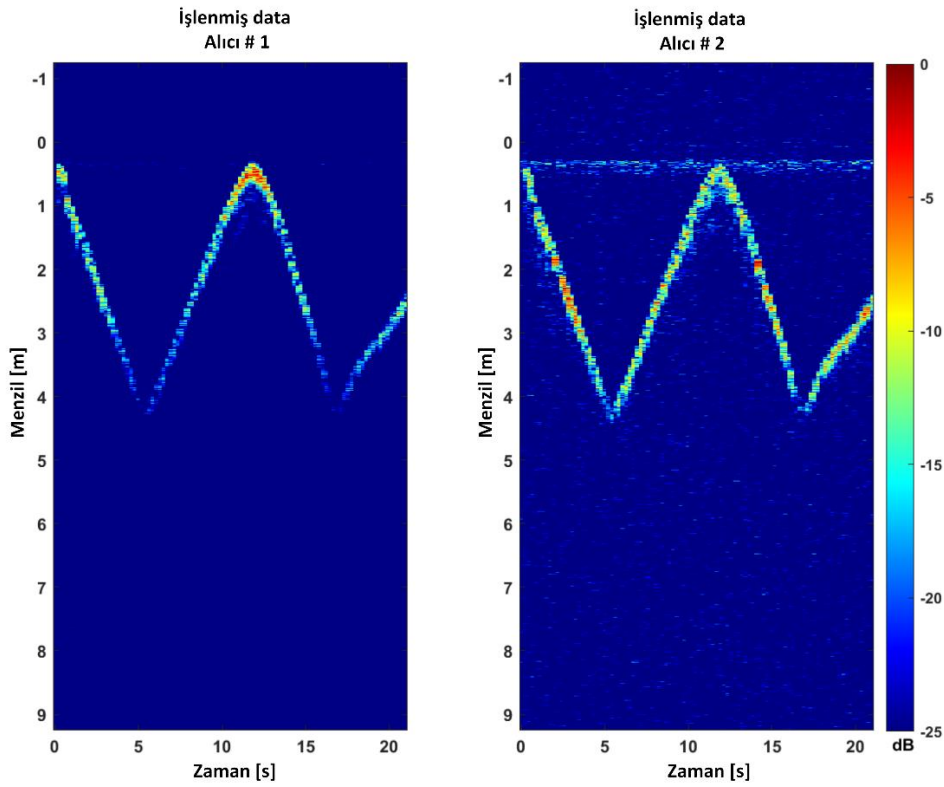
Hareketli Hedef Uygulaması #1

Bu amaçla, daha önceden Şekil 4.15.'de deney senaryosu ve deney düzeneği verilen deneysel ölçüm verisine GİA uygulanarak algoritmanın başarısının gerçek hareketli hedefler üzerindeki başarısı test edilmiştir.

Radar sistem konfigürasyonu gönderici anten Tx merkezde olacak şekilde iki alıcı anten $D = 30 \text{ cm}$ eşit uzaklıklarda her iki yanına yerleştirilmiştir. Anten konfigürasyonu duvara yaklaşık 5 cm uzaklıkta olacak şekilde yaslatılmıştır. Duvar arkasında bulunan yetişkin bir erkek 21 sn boyunca duvardan uzağa ve duvara doğru 2 kez yürüme hareketi sergilemiştir. Bahsi edilen senaryo daha önceki bölümde verilen Şekil 4.15.'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Hedeften radar alıcısı yönüne yansıyan zaman uzayı geri saçılım sinyalleri radar alıcısı tarafından toplanarak hedefin zamana karşı ham menzil profili elde edilmiştir. Deneysel düzende kullanılan radar alıcı-verici sistemi ve anten ekipmanları Bölüm 4.2.2 de ve Bölüm 3'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Şekil 4.28. (a) da daha öncede Bölüm 4.2.2'de ayrıntılı olarak bahsedilen ham 2B menzil-zaman grafiği (b) de arkaplan ve ardışık imajların çıkarımı işlemleri sonrası elde edilen SGO yükseltilmiş filtrelenmiş menzil-zaman grafiği sunulmuştur. Adam duvar arkasında yürürken toplam 92 zaman cevabı toplanmıştır. Menzil profillerinden de görüleceği üzere duvar $r = 0.15 \text{ m}$ ve $r = 0.35 \text{ m}$ de en yüksek yansıma ile gözükmektedir. Gİ algoritması uygulanırken menzilde kanal etkileşiminden kaynaklı ve duvarın oluşturmuş olduğu menzildeki konumu kırılmıştır. Gİ algoritması yalnızca menzilde duvardan sonraki kısma uygulanmıştır. Hedef duvarın hemen hemen bittiği konumdan başladığından, elde edilecek GİA sonuçlarında menzildeki asıl konumu olan yaklaşık $r = 0.45 \text{ m}$ 'den $r = 4.05 \text{ m}$ arası yürüme mesafesi, $r = 0$ dan $r = 3.7 \text{ m}$ civarında olacaktır. Ve son bitiş noktası menzilde faz merkezinden uzaklığı $r = 2.1 \text{ m}$ olduğundan elde edilecek GİA sonuçlarında yaklaşık $r = 1.8 \text{ m}$ 'de gözükmesi gerekmektedir Şekil 4.29. (a) Duvar arkası yürüyen adamın ilk turu için GİA algoritması uygulaması sonrası ilk turunun radar görüntülerini (b) ikinci turunun radar görüntülerini göstermektedir.

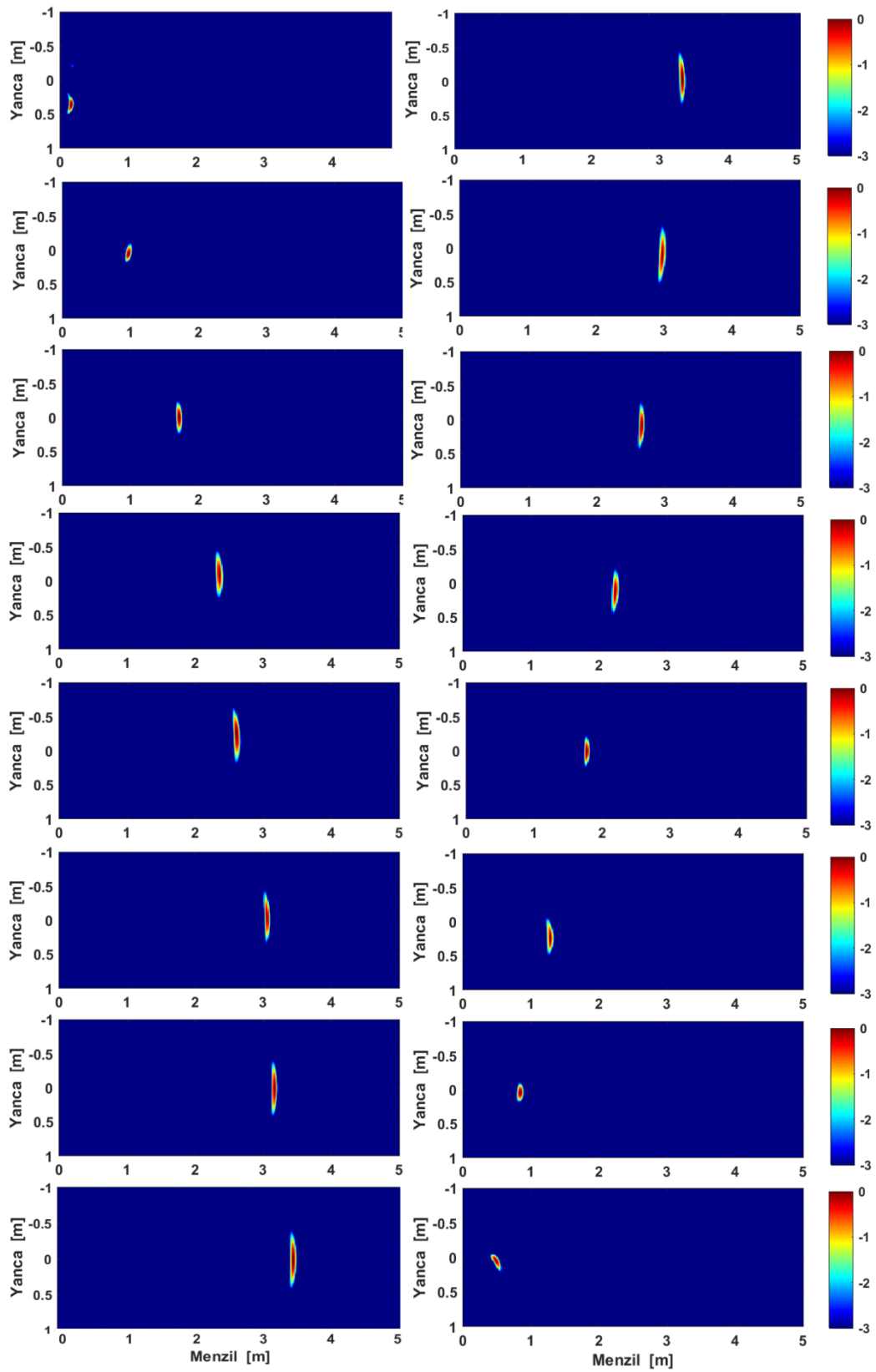


(a)

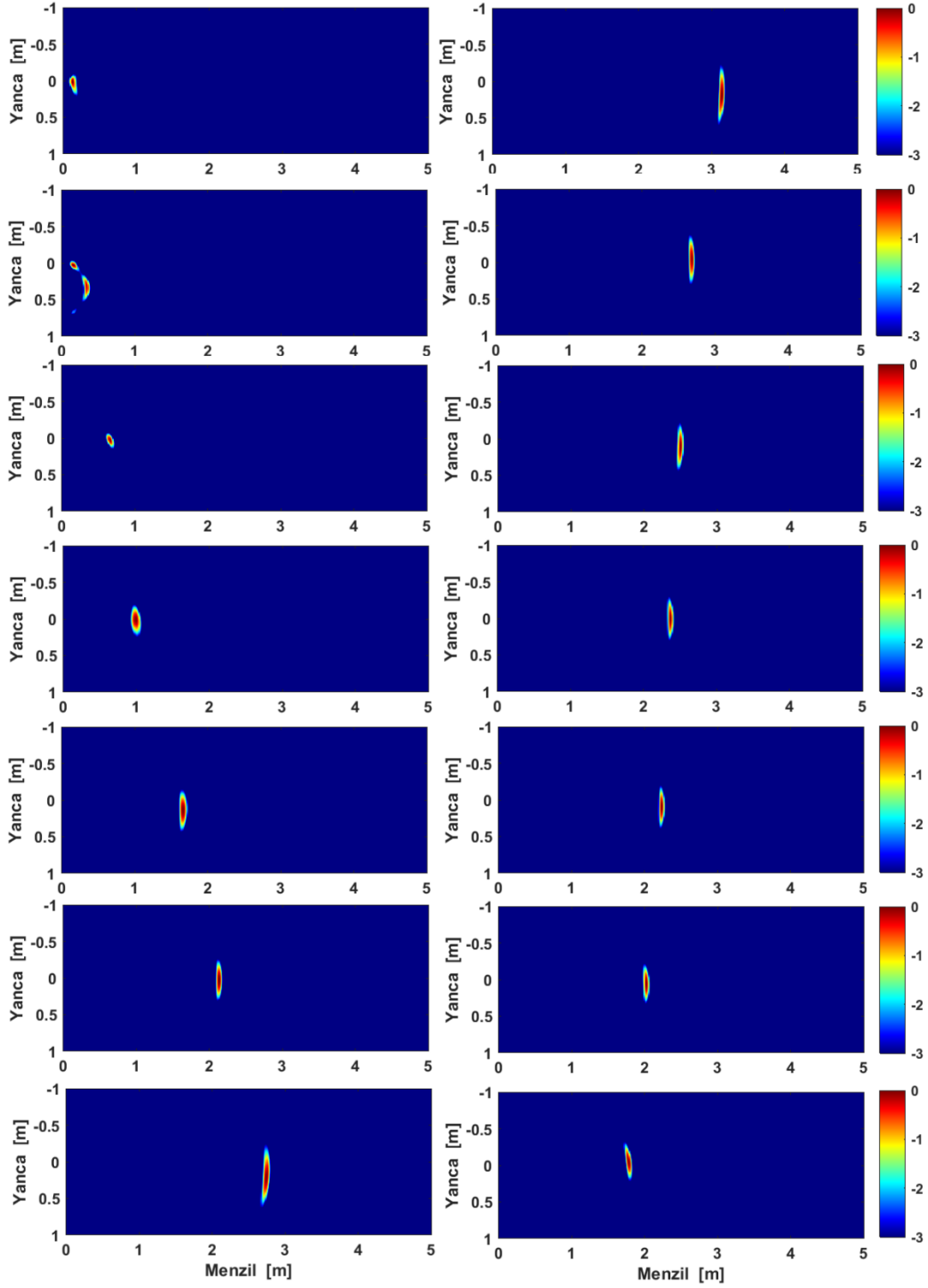


(b)

Şekil 4.28. (a) Ham 2B menzil-zaman grafiği (b) İşlenmiş 2B menzil-zaman grafiği.



(a)



(b)

Şekil 4.29. (a) Duvar arkası yürüyen adamın ilk turu için GİA uygulaması sonrası ilk turunun radar görüntüleri (b) ikinci turunun radar görüntüleri.



Şekil 4.30. (a) Hareketli hedef deneyinin geometrisi (b) deney ortamından bir fotoğraf kesiti.

Ayrıca, deney esnasında duvarın arkasında bulunan bir adam yukarıda ki Şekil 4.30. (b)'de gösterildiği gibi önce duvara doğru sonrasında duvardan uzaklaşarak toplam 12 sn zaman aralığında yürüme hareketi sergilemiştir. Deney süresince VNA'nın frekansı 3 GHz den 8.5 GHz e 27.5 MHz lik ayırık frekans kademeleri ile toplam ayırık 110 frekans örneği toplanmıştır. Hedef duvar arkasında yürürken, deney sahnesinin ardışık görüntüleri alınmıştır. Deney sahnesinin anlık durum görüntülerinin örnekleme zamanı 1.05 sn civarındadır ve bu süreyi esas olarak aslında VNA'nın örnekleme periyodu belirlemektedir. Şeki 4.31., doğrusal anten dizisindeki herbir anten için, duvar arkasında hareket eden hedeften geri yansıyan sinyalin ham 2B menzil-zaman grafiğini göstermektedir. Hedef duvarın arkasında, yanca ekseninde sensörün merkezini pozisyon alacak şekilde yürümüştür. Elde edilen ham menzil profillerinde antenler arası etkileşim, duvardan kaynaklı yüksek yansıma ve diğer çevresel yansımalar hedeften geri yansıyan sinyali bastırmaktadır. Hedef, ham menzil profili datasında neredeyse hiç gözükmemektedir. Hedeften yansıyan sinyali ortaya çıkarmak ve radar imajlarının SGO'sunu arttırmak için farksal görüntü matrisleri oluşturulmuştur. Şöyleki; $\Delta[DARG(i, j)]_{k-1}$ matrisi aşağıda belirtilen denklemde olduğu üzere $(k - 1)$ 'inci görüntüden k 'inci görüntünün çıkarılması ile oluşturulur.

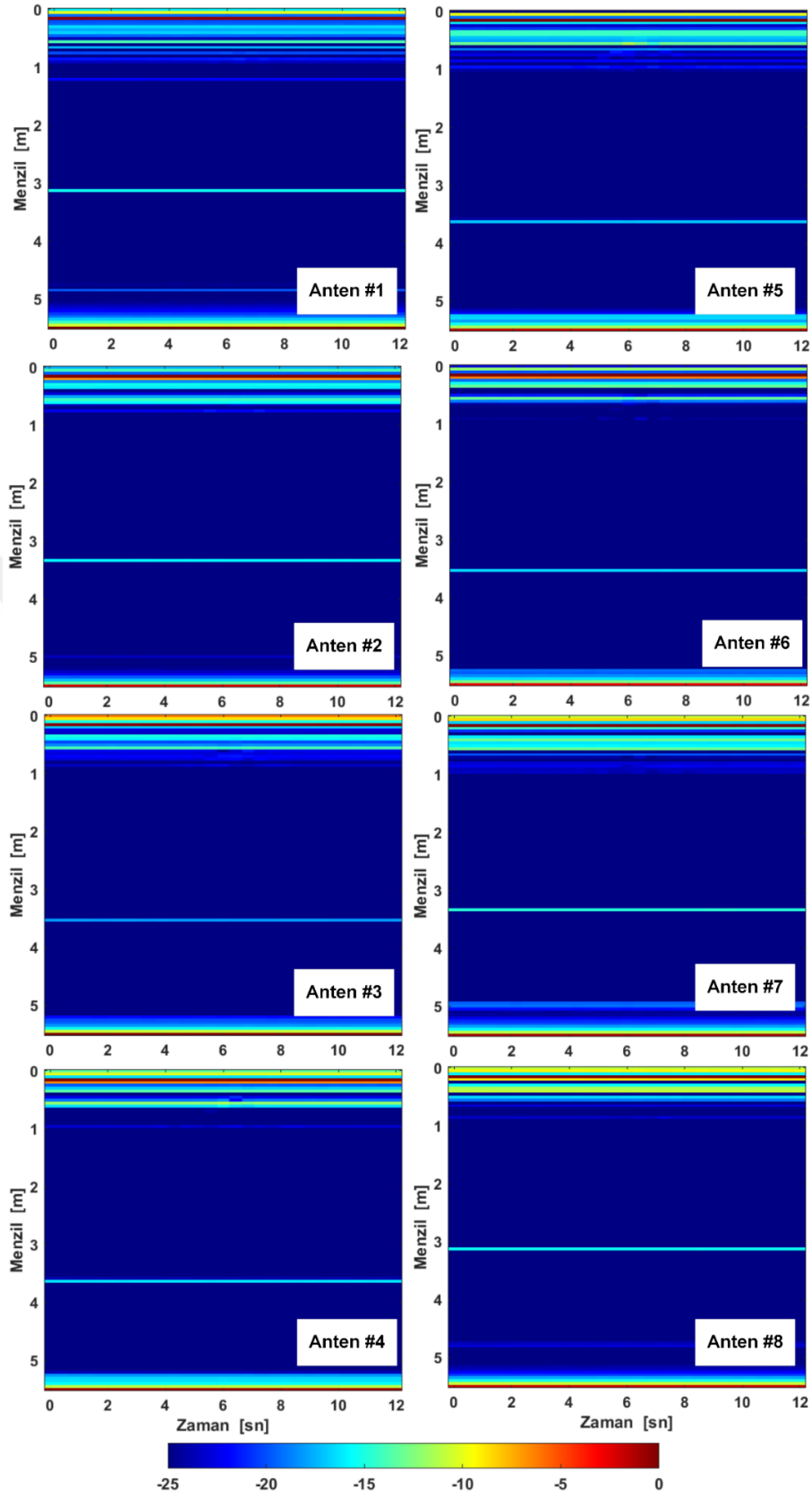
$$\Delta[DARG(i, j)]_{k-1} = [DARG(i, j)]_k - [DARG(i, j)]_{k-1} \quad (4.3)$$

Burada; $[DARG(i, j)]_k$ ve $[DARG(i, j)]_{k-1}$ sırasıyla, k 'inci ve $(k - 1)$ 'inci zaman ölçümleri için 2B menzil-yapay açıklık görüntü matrisleridir. Ayrıca, arkaplan çıkarımı prosedürü istenmeyen ve diğer çevresel yansımaları çıkarmak için uygulanmıştır. Lineer dizinin 8 anteni tarafından toplanan farksal menzil profilleri Şekil 4.32.'de sunulmaktadır. Radar imajları, zaman eksenine karşın menzil profillerini göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, menzil yönündeki değişiklikler insan hedefinin radara doğru ve radardan uzaklaşırken ki hareketlerini göstermektedir. Hedef faz merkezinden yaklaşık 130 cm uzaklıktan yürümeye başlamıştır ve ilk turunu duvara çok yakın mesafede faz merkezinden 55 cm uzaklıkta tamamlayarak durmaksızın geri dönmüştür ve başladığı noktaya yakın mesafede hareketini sonlandırmıştır.

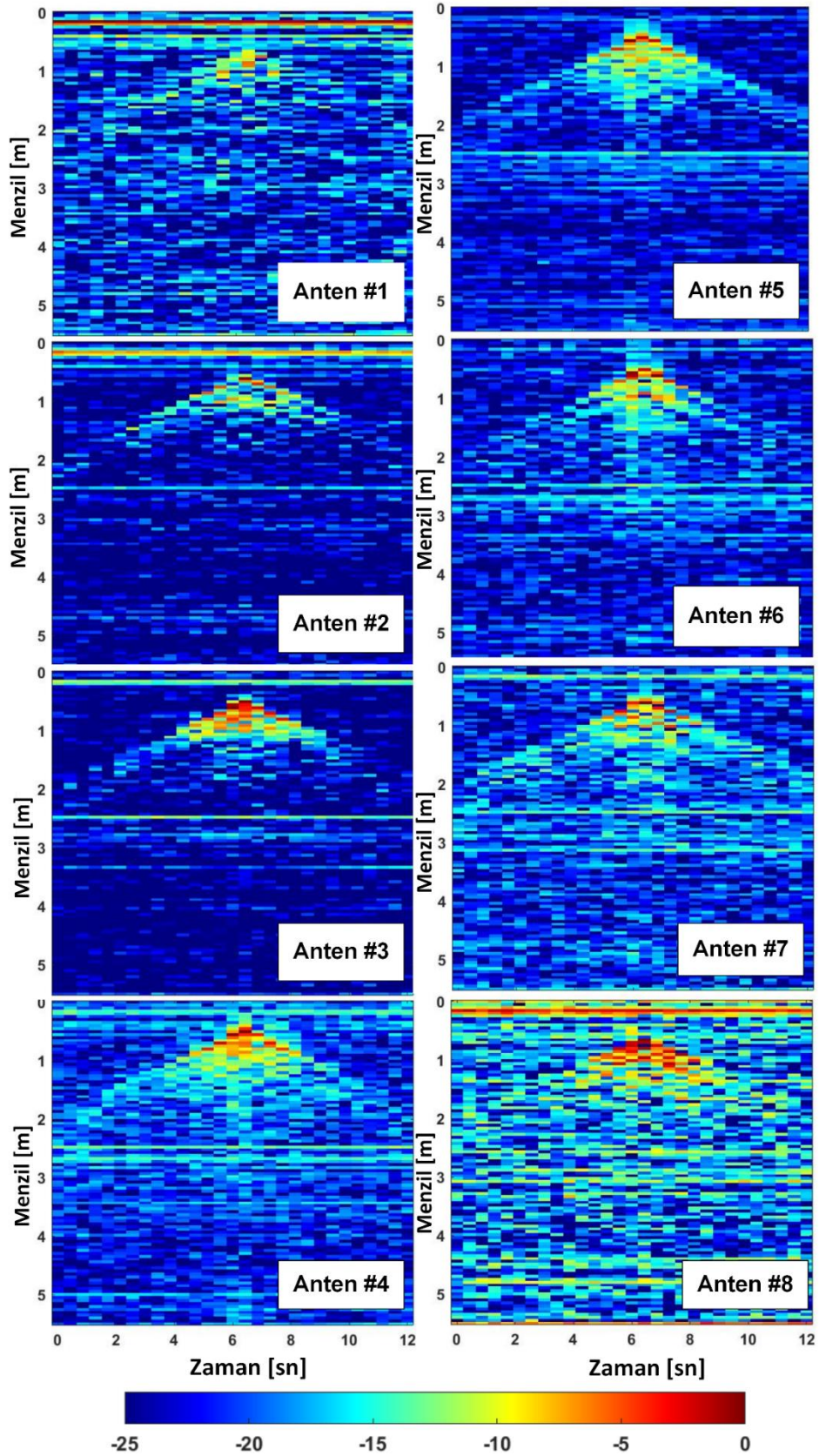
Sonrasında hedefin menzil ve yanca uzaylarındaki görüntüsünü oluşturmak için, elde edilen farksal menzil profiline 3. Bölümde anlatılan geriye izdüşüm algoritması uygulanmıştır. Elde edilen odaklanmış radar görüntüleri Şekil 4.33.'de sunulmaktadır. Şekil, hedefin yürüme hareketinin 12 ayrı konum bilgisini içermektedir. Buna göre $t = 0$ ve $t = 6$ sn arasında hedef duvara doğru yürüme sergilerken, $t = 7$ ve $t = 11$ sn arasında duvardan geri uzaklaşmıştır. Ayrıca, bu figürlerden de rahatlıkla gözüleceği gibi, hedefin yürüme hareketinin imajları gerçek deney sırasındaki senaryosu ile uyum sergilemektedir ve geliştirmiş olduğumuz algoritmamız deneysel sonuçlardaki başarısı test edilmiştir.

Ayrıca, elde edilen görüntüler hakkında vurgulanması gereken iki önemli gözlem mevcuttur. Bunlardan ilki, radar görüntülerinin hedefin gerçek boyutu ya da şeklini resmetmemektedir. Hedef yaklaşık 9 cm hareket ettiğinde ilk kanaldan ve son kanaldan geri yansıyan veriler toplanırken asıl görüntülenen, YAR prosedürü kullanıldığından, birinci kanalın ve son kanalın mesafesi arasındaki değişikliğin toplam enerjisidir. Bu nedenle, oluşturulmuş görüntü bu iki nokta arasındaki bölgeye dayanır. İkinci olarak, hedef, dizide yer alan antenlerin yan lobları ile algılanmadığından, görüntülerde de yan lobun oluşturabileceği istenmeyen etkiler gözükmemektedir.

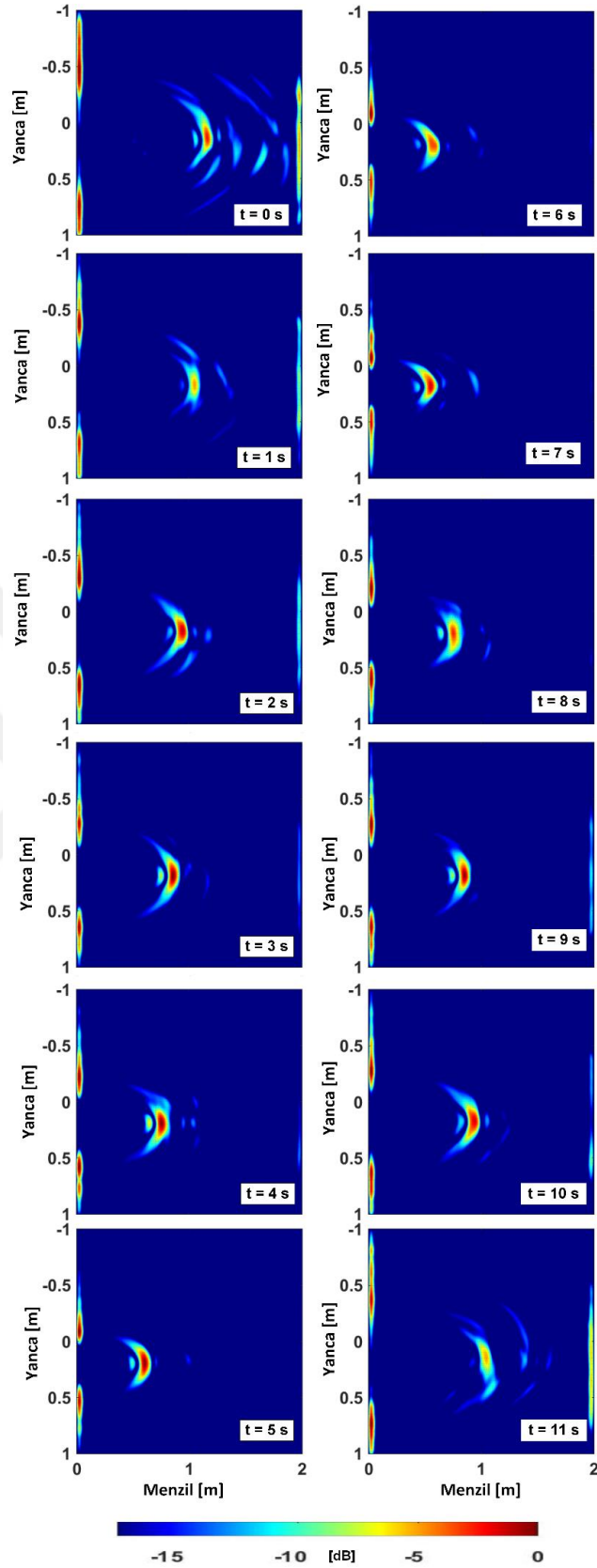
Şekil 4.33.'de verilen görüntülerdeki yüksek yansımaya sahip sıcak noktaların genişlikleri, menzil ve yanca uzayında bu görüntülerin -3 dB genişliklerine bakılarak incelenmiştir. -3 dB görüntü genişliklerinin menzil yönünde 6 cm den 8.5 cm'e (hedefin en yakındaki ve en uzaktaki konumu için) değiştiği tespit edilmiştir. -3 dB görüntü genişliklerinin yanca yönünde 14 cm ve 44 cm (hedefin 55 cm deki ve 130 cm deki konumlarında) olarak ölçülmüştür. Yürüyen insan için insan vücudunun büyüklüğü göz önünde bulundurulduğunda; görüntüler arası yansıyan enerji değişiminin mantıklıca olduğu ve odaklanmış olan bu DARG işleminin başarılı bir sonucu olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4.31. Doğrusal anten dizisi yapısındaki her bir anten için ham 2B menzül-zaman grafiği.



Şekil 4.32. Doğrusal anten dizisi yapısındaki her bir anten için farksal 2B menzıl-zaman grafiği.



Şekil 4.33. Geriye izdüşüm algoritması uygulanması sonrası duvar arkası hareket eden kişinin duvara doğru ve duvardan uzaklaşan hareketinin odaklanmış radar görüntüleri.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Gözle görülmesi mümkün olmayan opak ortamların arkasında ki sabit ve hareketli nesne ve canlıların gözlemlenmesi konusu askeri ve sivil uygulamalar açısından büyük önem arz etmektedir. Özellikle son yıllarda artan güvenlik sorunlarından dolayı bu alanda güvenilir ve yeni teknolojilerin kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Örneğin terörist eylemleri veya rehine kurtarma operasyonları gibi kritik askeri uygulamalarda doğru, güvenilir ve pratik kullanıma imkân sağlayacak ya da doğal afet veya yangın gibi tehlikeli durumlarda engel arkasındaki insan ve canlının yaşamsal bulgularını tespit edebilen ve canlının hareket ve görüntüsünü oluşturabilecek bir teknolojinin kullanılması gerekmektedir. Radar görüntüleme teknolojisi, bahsedilen problemlere son derece doğru çözümler sağlayabilen ve bu alanda yakın geçmişte kullanılmaya başlanan yeni ve umut verici bir yöntem olmuştur.

Bu tez çalışmasında özellikle duvar arkasındaki sabit ve hareketli nesnelerin radar teknolojisi kullanılarak tespit edilmesi ve görüntülenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla DARG problemine yönelik özgün görüntüleme algoritmaları geliştirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak, tek verici anten ve iki alıcı anten geometrisine ve sistemin geometrik pozisyonu esas alınarak geliştirilen elipslerin kesişimine dayanan bir konum belirleme algoritması sunulmuştur. Algoritmada, DA tek hedef için 2 elips geometrisi oluşacak ve hedefin gerçek konumu bu iki elipsin kesişim noktası olacaktır. Buradaki her bir elip eğrisi için odak noktaları, verici anten ve alıcı antenlerden bir tanesidir.

Algoritma geliştirmede ikinci adım olarak; yine bir verici anten ve iki alıcı anten radar geometrisine dayanan ve duvar arkası tek hedef için konum tespitine yönelik geliştirilen bir algoritma literatüre kazandırılmıştır. Algoritmada, her iki alıcı antenin toplamış olduğu sinyallerin faz bilgilerinin kullanılmasıyla; duvar arkasındaki hareketli hedefin hassas olarak tespit edilmesi sağlanmıştır.

Algoritma geliştirmede, üçüncü adım olarak, literatürde mevcut olan ve başarı performansı bilinen GİA'nın DARG problemine yönelik olarak bazı iyileştirmeler yapılarak bu tez çalışmasına uyarlanması sağlanmıştır. GİA algoritması, hem zaman uzayı (tek verici- 2 alıcı bir sistem geometrisine göre) hem de frekans uzayı (monostatik konfigürasyonda) radar sinyali ne göre düzenlenerek uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Tezin bir sonraki aşamasında, geliştirilen odaklama/görüntüleme ve konum belirleme algoritmalarının performanslarını değerlendirilmek üzere; mükemmel ortam ve durumların simüle edildiği benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda, geliştirilen ve uygulanan her bir algoritma için farklı DAR senaryoları kurgulanmış, MATLAB® ortamında algoritmalar, bu senaryolara göre test edilmiş ve başarı performansları değerlendirilmiştir. Ayrıca bu amaçla,

nesnel hata analizi yapılarak bu başarı performansları raporlanmıştır. Algoritmalar, benzetim çalışmaları ile doğrulandıktan sonra, gerçek DARG deney çalışmalarına geçilmiştir.

Sonraki aşama, deneysel DARG uygulamaları için, ölçüm düzeneklerinin oluşturulması olmuştur. Bu amaçla, mevcut ölçüm ekipmanlarına ilaveten gerekli olan bazı donanımsal elemanlar temin edilmiş ve ölçüm düzenekleri kurulmuştur. Bunun için frekans uzayı radar donanımı, zaman uzayı radar donanımı, anten elemanları, RF kablolar, hedef nesnelere, anten elemanlarını düzenek içerisinde yerleştirme ve sabitlemede kullanılan tripod gibi basit materyaller hazırlanarak sistem kurulumu sağlanmıştır. Ayrıca bahsedilen radar sistem elemanları dışında, yine frekans uzayında çalışan özgün bir DARG sensörü tasarlanarak, prototipi oluşturulmuştur. Bu amaçla ilk olarak bu prototip sensörde kullanılan UGB-Vivaldi anten elemanı bir EM simülasyon programında tasarlanmış, deneysel çalışma parametrelerine uygun olarak optimize edilerek benzetim sonuçları bu tez çalışmasında sunulmuştur. Başarılı bir tasarım sürecinden sonra anten elemanının gerekli donanımlarla PCB üretimi sağlanmıştır. Üretilen anten elemanının saçılma parametresi olan S_{11} , mevcut VNA yardımı ile ölçülerek benzetim sonucu ile karşılaştırılmıştır. Geri saçılım ölçüm parametresinin, istenilen bant genişliği aralığında simülasyon sonucuyla neredeyse mükemmel yakın bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Sonrasında bu anten elemanı ile 8'li doğrusal anten dizisi oluşturulmuştur. Radar prototipi için gerekli olan diğer donanımsal elemanlar temin edilmiş ve yine bazı basit PCB devreleri hazırlanmıştır. Ayrıca radar prototipinin tüm elemanlarının birbirleri ile olan senkronizasyonu, kontrolü, veri alımı-aktarımı ve geliştirilen algoritmalar ile görüntülerinin elde edilmesi işlemlerinin hepsi geliştirmiş olduğumuz MATLAB® programlama dilinde yazılmış yazılımlar ile sağlanmıştır. Bahsi edilen radar düzenekleri ve ekipmanları Bölüm 3'de ayrıntıları ile sunulmuştur.

Tez çalışmasında yapılan bir diğer çalışma; hazırlanan frekans uzayı ve zaman uzayı radar düzenekleri ile, Mersin Üniversitesinin çeşitli yerleşkelerinde gerçek DA deneysel çalışmalar yapılmıştır. Geliştirilen ve benzetim çalışmaları ile doğrulanan algoritmalar gerçek deney ölçümlerine uyarlanmıştır. Deneysel çalışmalarda yer alan duvarın fiziksel ve elektriksel karakteristiği bu tez çalışmasında hesaba katılmamıştır. Çünkü deneysel çalışmada yer alan duvarların kalınlıkları 15-30 cm aralıklardadır. EM dalga duvarın içerisinde duvarın karakteristiğinden (dielektrik sabiti, geçirgenlik ve iletkenlik gibi) kaynaklı farklı hızda yayılım sergileyecektir. Bu durumda yayılan EM dalga da zayıflamalar olacaktır. Ayrıca hava-duvar ve duvar- hava arayüzünden dolayı dalga kırınımı ve refraksiyon gerçekleşecektir ve dalga yönü değişecektir. Ve bu durum radar görüntüsünde hedefin gerçek konumundan bir miktar kayarak farklı bir konumda görülmesine neden olacaktır. Ancak bu tez çalışmasında yapılan deneysel çalışmalarda, duvar arkasındaki hedeflerin mesafesi duvarın kalınlığına oranla nispeten çok daha

uzakta yaklaşık 3-5 m olduğundan hedefin radar görüntüsünde ki kayma miktarı çok küçük cm ler mertebesinde kalmıştır ve bu kayma miktarı hesaba alınacak bir büyüklükte değildir. Duvar kompanzasyonunun bu tez çalışmasındaki deneysel bulgular için etkisi dikkate alınmayabilir ölçüde kalmıştır. Deneysel bulgularla ilgili elde edilen sonuçlar, deney senaryoları geometrileri, deneysel düzenekler, deney esnasında alınan farklı uygulamaların fotoğraf kareleri ve görüntüleme/odaklama ve konum tespiti algoritmaların başarılı uygulama sonuçlarının hepsi 4. Bölümde yer almıştır. Ayrıca DARG problemi için geliştirilen algortimaların benzer EAR uygulamaları içinde kullanımları test edilmiştir. Bu doğrultuda; duvar arkasında sabit halde duran bir insanın soluk alıp-verme ve kalp atışı hareketlerini 1B menzil profillerini elde ederek tespit edilmiştir.



KAYNAKLAR

- [1]. Ausherman, D. A.; Kozma, A.; Walker, J.L.; Jones, H. M.; Poggio, E. C., Developments in Radar Imaging. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **1984**, AES-20, (4), 363-400.
- [2]. Griffiths, H. D., *Radar Imaging For Combatting Terrorism*. Springer Netherlands: Netherlands, 2007; p 29-48.
- [3]. Xu, Y.; Shao, J.; Chen, J.; Fang, G., Automatic Detection of Multiple Trapped Victims by Ultra-Wideband Radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **2013**, 10, (6), 1498-1502,
- [4]. Richards, J. A., *Remote Sensing with Imaging Radar*. Springer-Verlag Berlin: Heidelberg, 2009.
- [5]. Ulander, L. M. H., Signal-to-clutter ratio enhancement in bistatic very high frequency (VHF)-band SAR images of truck vehicles in forested and urban terrain. *IET Radar, Sonar & Navigation* **2010**, 4, (3), 438-448.
- [6]. Mora, O.; Mallorqui, J. J.; Broquetas, A., Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2003**, 41, (10), 2243-2253.
- [7]. Martone, M.; Bräutigam, B.; Rizzoli, P.; Yague-Martinez, N.; Krieger, G., Enhancing Interferometric SAR Performance Over Sandy Areas: Experience From the TanDEM-X Mission. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **2016**, 9, (3), 1036-1046.
- [8]. Berg, A.; Dammert, P.; Eriksson, L. E. B., X-Band Interferometric SAR Observations of Baltic Fast Ice *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2015**, 53, (3), 1248-1256.
- [9]. Xia, Y., *Synthetic Aperture Radar Interferometry*. Springer Berlin: Heidelberg, 2010.
- [10]. Klemm, M.; Leendertz, J. A.; Gibbins, D.; Craddock, I. J.; Preece, A.; Benjamin, R., Microwave Radar-Based Breast Cancer Detection: Imaging in Inhomogeneous Breast Phantoms. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* **2009**, 8, 1349-1352.
- [11]. Dourthe, C.; Pichot, C.; Dauvignac, J. Y.; Cashman, J., Microwave imaging of buried objects for ground radar tomography. *Radio Science* **2000**, 35, (3), 757-771.
- [12]. Bassi, M.; Caruso, M.; Khan, M. S.; Bevilacqua, A.; Capobianco, A. D.; Neviani, A., An Integrated Microwave Imaging Radar With Planar Antennas for Breast Cancer Detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **2013**, 61, (5), 2108-2118.
- [13]. Dourthe, C.; Pichot, C.; Dauvignac, J. Y.; Cashman, J., Microwave imaging of buried objects for ground radar tomography. *Radio Science* **2000**, 35, (3), 757-771.
- [14]. Vasquez, J. A. T., Vipiana, F., Casu, M. R., Vacca M., Pulimeno, A., *Microwave imaging for early breast cancer detection: Experimental testing of a low-cost portable system*, 2016 IEEE

- International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Fajardo, June 26 -July 1 2016, pp. 1479-1480.
- [15]. Klemm, M.; Leendertz, J. A.; Gibbins, D.; Craddock, I. J.; Preece, A.; Benjamin, R., Microwave Radar-Based Differential Breast Cancer Imaging: Imaging in Homogeneous Breast Phantoms and Low Contrast Scenarios. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **2010**, 58, (7), 2337-2344.
- [16]. Amin, M. G., *Through-the-Wall Radar Imaging*. CRC Press: Boca Raton, 2010, p. 33.
- [17]. Benedetto, A., Pajewski, L., *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*. Springer International Publishing: Switzerland, 2015, p. 281.
- [18]. Yigit, E., Demirci, S., Ozdemir, C., *Ground Penetrating Radar Image Focusing using Frequency-Wavenumber based Synthetic Aperture Radar Technique*, 2007 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Torino, 17-21 September 2007, pp. 344-347.
- [19]. Yilmaz, B., Ozdemir, C., *A radar sensor design and prototype for through-the-wall imaging radar applications*, 2016 IEEE Radar Methods and Systems Workshop (RMSW), Kiev, 27-28 September 2016, pp. 60-63.
- [20]. Yilmaz, B., Ozdemir, C., *Through-the-wall imaging radar experiments based on 8-element vivaldi radar sensor*, 2016 17th International Radar Symposium (IRS), Krakow, 10-12 May 2016, pp. 1-4.
- [21]. Cetinkaya, H., Kizilhan, A., Vertii, A., Demirci, S., Yigit, E., Ozdemir, C., *The millimeter-wave imaging of concealed objects*, 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Spokane, 3-8 July 2011, pp. 228-231.
- [22]. Terrasse, G., Nicolas, J. M., Trouvé, E., Drouet, E., *Automatic localization of gas pipes from GPR imagery*, 2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Budapest, 29 August-2 September 2016, pp. 2395-2399.
- [23]. Liu, L.; Liu, S., Remote Detection of Human Vital Sign With Stepped-Frequency Continuous Wave Radar. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **2014**, 7, (3), 775-782.
- [24]. Li, W., Jing, X., Li, Z., Wang, J., *A new algorithm for through wall human respiration monitoring using GPR*, 2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Shanghai, 4-8 June 2012, pp. 947-952.
- [25]. Buonanno, A., Urso, M. D., Ascione, M., Schiano Lo Moriello, R., Angrisani, L., *Life signs detection in urban search and rescue applications*, 2012 Tyrrhenian Workshop on Advances in Radar and Remote Sensing (TyWRRS), Naples, 12-14 September 2012, pp. 72-75.

- [26]. Ascione, M.; Buonanno, A.; D'Urso, M.; Angrisani, L.; Schiano Lo Moriello, R., A New Measurement Method Based on Music Algorithm for Through-the-Wall Detection of Life Signs. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **2013**, 62, (1), 13-26.
- [27]. Yilmaz, B., Demirci, S., Yigit, E., Ozdemir, C., *An Experimental Study of Through-the-Wall Radar for Lifesign Detection*, PIERS Proceedings, Stockholm, 12-15 August 2013, pp. 1602-1604
- [28]. Lubecke, V. M., Boric-Lubecke, O., Host-Madsen, A., Fathy, A. E., *Through-the-Wall Radar Life Detection and Monitoring*, 2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, Honolulu, 3-8 June 2007, pp. 769-772.
- [29]. Abbosh, A. M.; Mohammed, B.; Bialkowski, K. S., Differential Microwave Imaging of the Breast Pair. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* **2016**, 15, (1), 1434-1437.
- [30]. Wu, C. W.; Huang, Z. Y., Using the Phase Change of a Reflected Microwave to Detect a Human Subject Behind a Barrier. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* **2008**, 55, (1), 267-272.
- [31]. MATLAB yazılım platformu, <http://www.mathworks.com/products/matlab/> (10.10.2016)
- [32]. Geozondas firması, <http://geozondas.com/> (14.10.2016)
- [33]. Ozdemir, C.; Demirci, S.; Yigit, E.; Yilmaz, B., A Review on Migration Methods in B-Scan Ground Penetrating Radar Imaging. *Mathematical Problems in Engineering* **2014**, 2014, (Article ID 280738), 16 pages.
- [34]. Demirci, S., Cetinkaya, H., Tekbas, M., Yigit, E., Ozdemir, C., Vertiy, A., *Back-projection algorithm for ISAR imaging of near-field concealed objects*, 2011 30th URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul, 13-20 August 2011, pp. 1-4.
- [35]. Demirci, S.; Cetinkaya, H.; Yigit, E.; Ozdemir, C.; Vertiy, A., A Study On Millimeter-Wave Imaging Of Concealed Objects: Application Using Backprojection Algorithm. *Progress In Electromagnetics Research* **2012**, 128, 457-477.
- [36]. Yigit, E.; Demirci, S.; Özdemir, C.; Tekbas, M., Short-range ground-based synthetic aperture radar imaging: performance comparison between frequency-wavenumber migration and back-projection algorithms. *Journal of Applied Remote Sensing* **2013**, 7, (1), 1-14.
- [37]. Jia, Y., Kong, L., Yang, X., *Improved cross-correlated back-projection algorithm for through-wall-radar imaging*, 2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13), Ottawa, 29 April-3 May 2013, pp. 1-3.
- [38]. Cui, G., Kong, L., Yang, J., *A Back-projection algorithm to stepped-frequency synthetic aperture through-the-wall radar imaging*, 2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Huangshan, 5-9 November 2007, pp. 123-126.

- [39]. Yilmaz, B.; Ozdemir, C., Design and prototype of radar sensor with Vivaldi linear array for through-wall radar imaging: an experimental study. *Journal of Applied Remote Sensing* **2016**, 10, (4), 1-16.
- [40]. Chen, L., Ouyang, S., *Modified Cross-Correlated Back Projection for UWB Through-Wall Surveillance*, 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Shanghai, 21-25 September 2007, pp. 516-519.
- [41]. Williams, F. C.; Howell, W. D.; Briggs, B. H., Plan-position indicator circuits. *Electrical Engineers - Part IIIA: Radiolocation Journal of the Institution* **1946**, 93, (7), 1219-1255.
- [42]. Elachi, C.; Bicknell, T.; Jordan, R. L.; Wu, C., Spaceborne synthetic-aperture imaging radars: Applications, techniques, and technology. *Proceedings of the IEEE* **1982**, 70, (10), 1174-1209.
- [43]. Curlander, J. C., McDonough, R. N., *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. Wiley: Canada, 1992; p.45
- [44]. Ozdemir, C., *Synthetic Aperture Radar*. 1st ed.; Encyclopedia of RF and Microwave Engineering Wiley: Hoboken, 2005; p. 4800
- [45]. Wiley, C. A., Synthetic Aperture Radars. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **1985**, AES-21, (3), 440-443.
- [46]. Ozdemir, C., *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging With MATLAB Algorithms*. Wiley: Hoboken, 2012; p. 121.
- [47]. Ghiglia, D. C., Wahl, D. E., *Interferometric synthetic aperture radar terrain elevation mapping from multiple observations*, Proceedings of IEEE 6th Digital Signal Processing Workshop, California, 2-5 October 1994, pp. 33-36.
- [48]. Sharma, J. J.; Hajnsek, I.; Papathanassiou, K. P.; Moreira, A., Estimation of Glacier Ice Extinction Using Long-Wavelength Airborne Pol-InSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2013**, 51, (6), 3715-3732.
- [49]. Fischer, G., Parrella, G., Papathanassiou, K., Hajnsek, I., *Interpretation of Pol-InSAR Signatures from Glaciers and Ice Sheets at Different Frequencies*, Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Hamburg, 6-9 June 2016, pp. 1-6.
- [50]. Carin, L.; Kapoor, R.; Baum, C. E., Polarimetric SAR imaging of buried landmines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **1998**, 36, (6), 1985-1988.
- [51]. Lopez-Sanchez, J. M.; Ballester-Berman, J. D., Potentials of polarimetric SAR interferometry for agriculture monitoring. *Radio Science* **2009**, 44, (02), 1-20.

- [52]. Song, L. P.; Yu, C.; Liu, Q. H., Through-wall imaging (TWI) by radar: 2-D tomographic results and analyses. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2005**, 43, (12), 2793-2798.
- [53]. Soldovieri, F.; Solimene, R.; Brancaccio, A.; Pierri, R., Localization of the Interfaces of a Slab Hidden Behind a Wall. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2007**, 45, (8), 2471-2482.
- [54]. Ahmad, F.; Amin, M. G., Noncoherent approach to through-the-wall radar localization. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **2006**, 42, (4), 1405-1419.
- [55]. Ahmad, F.; Amin, M. G.; Mandapati, G., Autofocusing of Through-the-Wall Radar Imagery Under Unknown Wall Characteristics. *IEEE Transactions on Image Processing* **2007**, 16, (7), 1785-1795.
- [56]. Persico, R., *GPR Data Sampling, Introduction to Ground Penetrating Radar: Inverse Scattering and Data Processing*. Wiley-IEEE Press: Hoboken , 2014; p.392.
- [57]. Gu, K.; Wang, G.; Li, J., Migration based SAR imaging for ground penetrating radar systems. *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation* **2004**, 151, (5), 317-325.
- [58]. Sun, Y.; Li, J., Time-frequency analysis for plastic landmine detection via forward-looking ground penetrating radar. *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation* **2003**, 150, (4), 253-261.
- [59]. Dou, Q.; Wei, L.; Magee, D. R.; Cohn, A. G., Real-Time Hyperbola Recognition and Fitting in GPR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2017**, 55, (1), 51-62.
- [60]. Soldovieri, F.; Lopera, O.; Lambot, S., Combination of Advanced Inversion Techniques for an Accurate Target Localization via GPR for Demining Applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2011**, 49, (1), 451-461.
- [61]. Demirci, S.; Yigit, E.; Eskidemir, İ. H.; Ozdemir, C., Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method. *NDT & E International* **2012**, 47, 35-42.
- [62]. Immoreev, I., Fedotov, P. G. S. D. V., *Ultra wideband radar systems: advantages and disadvantages*, 2002 IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies (IEEE Cat. No.02EX580), Baltimore, 21-23 May 2002, pp. 201-205.
- [63]. Immoreev, I., Ten questions on UWB [ultra wide band radar. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 2003, 18, (11), 8-10.
- [64]. Ferris, D. D.; Currie, N. C., A survey of current technologies for through-the-wall surveillance. *Proc.SPIE* **1998**, 3577, 62-72.
- [65]. Hunt, A. R., A wideband imaging radar for through-the-wall surveillance. *Proc. SPIE* **2004** 5403, 590-596.

- [66]. Borek, S. E., *An overview of through the wall surveillance for homeland security*, IEEE Proceedings of the 34th Applied Imagery and Pattern Recognition Workshop, Washington , 19-21 October 2005, pp. 6-11.
- [67]. Baranoski, E. J., Through-wall imaging: Historical perspective and future directions. *Journal of the Franklin Institute* 2008, 345, (6), 556-569.
- [68]. RETIA firması, <http://www.retwis.com/en/retwis> (18.11.2016)
- [69]. Aftanas, M., Through Wall Imaging With UWB Radar System, Ph.D. Thesis, Technical University of Kosice, Slovakia, 2009.
- [70]. Yang, Y.; Wang, Y.; Fathy, A. E., Design of compact Vivaldi antenna arrays for UWB see through wall applications. *Progress In Electromagnetics Research* **2008**, 82, 401-418.
- [71]. Ren, Y. J.; Lai, C. P.; Chen, P. H.; Narayanan, R. M., Compact ultrawideband UHF array antenna for through-wall radar applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* **2009**, 8, 1302-1305.
- [72]. Zhu, F.; Gao, S.; Ho, A. T. S.; Brown, T. W. C.; Li, J. Z.; Xu, J. D., Low-profile directional ultra-wideband antenna for see-through-wall imaging applications. *Progress In Electromagnetics Research* **2011**, 121, 121-139.
- [73]. Rovňáková, J.; Kocur, D., TOA Estimation and Data Association for Through-Wall Tracking of Moving Targets. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* **2010**, 2010, (420767), 11 pages.
- [74]. Wang, G.; Amin, M. G., Imaging Through Unknown Walls Using Different Standoff Distances. *IEEE Transactions On Signal Processing* **2006**, 54, 4015-4025.
- [75]. Mori, Y., Asano, Y., Yumii, T., *Development of multi-path linear array radar at 10-20GHz*, 8th Int. Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR '15), Florence, 7-10 July 2015, pp. 1-4.
- [76]. Yipeng, D.; Kehui S.; Xuemei, X., Hough-MHAF localization algorithm for dual-frequency continuous-wave through-wall radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **2016**, 52, 111-121.
- [77]. Wu, S., Fang, G., *Detection and Tracking of Moving Target behind Wall Using UWB Through-wall Radar*, 2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, Chansha, 13-14 October 2010, pp. 605- 608.
- [78]. Wang, H.; Narayanan, R. M.; Zhou, Z. O., Through-Wall Imaging of Moving Targets Using UWB Random Noise Radar. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* **2009**, 8, 802-805.

- [79]. Ahmad, F.; Amin, M. G.; Kassam, S. A., Synthetic aperture beamformer for imaging through a dielectric wall. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **2005**, 41, (1), 271-283.
- [80]. Kumar, P. K.; Kumar, T. K., UWB Impulse Radar for Through-The-Wall Imaging. *International Journal of Electromagnetics and Applications* **2011**, 1, (1), 19-23.
- [81]. Wu, S., Tan, K., Xu, Y., Chen, J., Meng, S., Fang, G., *A simple strategy for moving target imaging via an experimental UWB through-wall radar*, 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Shanghai, 4-8 June 2012, pp. 961-965
- [82]. Sakamoto, T.; Sato, T.; Aubry, P. J.; Yarovoy, A. G., Ultra-Wideband Radar Imaging Using a Hybrid of Kirchhoff Migration and Stolt F-K Migration With an Inverse Boundary Scattering Transform. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **2015**, 63, (8), 3502-3512.
- [83]. Yoon, Y. S.; Amin, M. G., High-Resolution Through-the-Wall Radar Imaging Using Beamspace MUSIC. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **2008**, 56, (6), 1763-1774.
- [84]. Soldovieri, F.; Solimene, R.; Ahmad, F., Sparse Tomographic Inverse Scattering Approach for Through-the-Wall Radar Imaging. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **2012**, 61, (12), 3340-3350.
- [85]. Ahmad, F.; Amin, M. G.; Mandapati, G., Autofocusing of Through-the-Wall Radar Imagery Under Unknown Wall Characteristics. *IEEE Transactions on Image Processing* **2007**, 16, (7), 1785-1795
- [86]. Zhang, W.; Hoorfar, A., Through-The-Wall Target Localization With Time Reversal Music Method. *Progress In Electromagnetics Research* **2010**, 106, 75-89.
- [87]. Ahmad, F.; Amin, M. G., Through-the-wall human motion indication using sparsity-driven change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2013**, 51, (2), 881-890
- [88]. Leigsnering, M., Debes, C., Zoubir, A., *Compressive sensing in through-the-wall radar imaging*, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Prague, 22-27 May 2011, pp. 4008-4011.
- [89]. Ahmad, F., Amin, M. G., *Sparsity-based change detection of short human motion for urban sensing*, 2012 IEEE 7th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), Hoboken, 17-20 June 2012, pp. 421-424.
- [90]. Ahmad, F., Amin, M. G., *A noncoherent approach to radar localization through unknown walls*, 2006 IEEE Conference on Radar, Verona, 24-27 April 2006, pp. 583-589.
- [91]. Gazdag, J.; Sguazzero, P., Migration of seismic data. *Proceedings of the IEEE* **1974**, 72, 10, 1302-1315.

- [92]. Nejati, M.; Hashemi, H., Migrated Exploding Reflectors in Evaluation of Finite Difference Solution for Inhomogeneous Seismic Models. *Engineering* **2012**, 4, 12, 950-957.
- [93]. Kempen, L. V., Ground penetrating radar for anti-personnel landmine detection, Ph.D. dissertation, Vrije Universiteit Brussel Faculty of Engineering Sciences Dept. of Electronics and Informatics, Belgium, 2006.
- [94]. Margrave, G. F., Numerical methods of exploration seismology with algorithms in matlab, Master's thesis, The University of Calgary Department of Geology and Geophysics, Calgary, 2001
- [95]. Ozdemir, C.; Demirci, S.; Yigit, E.; Kavak, A., A hyperbolic summation method to focus B-scan ground penetrating radar images: an experimental study with a stepped frequency system. *Microwave and Optical Technology Letters* **2007**, 49, (3), 671-676.
- [96]. Feng, X.; Sato, M., Pre-stack migration applied to GPR for landmine detection. *Inverse Problems* **2004**, 20, (6), 1-17.
- [97]. Yilmaz, O., *Seismic Data Processing*. Society of Exploration: Tulsa, 1988.
- [98]. Stolt, R. H., Migration by Fourier transform. *Geophysics* **1987**, 43, (1), 23 - 48.
- [99]. Gazdag, J., Wave equation migration with the phase-shift method. *Geophysics* **1978**, 43, (7), 1342-1351.
- [100]. Lecomte, I.; Hamran, S. E.; Gelius, L. J., Improving Kirchhoff migration with repeated local plane-wave imaging? A SAR-inspired signal-processing approach in prestack depth imaging. *Geophysical Prospecting* **2005**, 53, (6), 767-785.
- [101]. Ulander, L.; Hellsten, H.; Stenstrom, G., Synthetic aperture radar processing using fast factorized back-projection. *Aerospace and Electronic Systems* **2003**, 39, (3), 760-776.
- [102]. Daniels, D. J., *Ground Penetrating Radar*. 2nd Edition; The Institution of Electrical Engineers (IEE): London, 2004, p. 276.
- [103]. Shrestha, S. M., Arai, I., *High resolution image reconstruction by GPR using MUSIC and SAR processing method for landmine detection*, IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477), Toulouse, 21-25 July 2003, pp. 2921-2923.
- [104]. Natterer, F., Imaging and inverse problems of partial differential equations. *Jahresber. Deutsch. Math.* **2006**, 109, (1), 31-48.
- [105]. Ladas, K.; Devaney, A., Generalized ART algorithm for diffraction tomography. *Inverse Problems* **1991**, 7, (1), 109-125.
- [106]. Soldovieri, F.; Solimene, R., Through-Wall Imaging via a Linear Inverse Scattering Algorithm, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **2007**, 4, (4), 513-517.

- [107]. Zheng, W.; Zhao, Z.; Nie, Z. P., Application of TRM in the UWB Through Wall Radar. *Progress In Electromagnetics Research* **2008**, 87, 279–296.
- [108]. Thajudeen, C.; Hoorfar, A.; Ahmad F.; Dogaru, T., Measured complex permittivity of walls with different hydration levels and the effect on power estimation of TWRI target returns. *Progress In Electromagnetics Research B* **2011**, 30, 177-199.
- [109]. Chen, P. H.; Narayanan, R. M., Shifted Pixel Method for Through-Wall Radar Imaging. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **2012**, 60, (8), 3706-3716.
- [110]. Devaney, A. J., Generalized projection-slice theorem for fan beam diffraction tomography. *Ultrasonic Imaging* **1985**, 7, (3), 264-275.
- [111]. Greenberg, M. C.; Virga, L.; Hammond, C. L., Performance characteristics of the dual exponentially tapered slot antenna for wireless communication application. *IEEE Trans. On Vehicular Technology* **2003**, 52, (2), 305–310,
- [112]. CST benzetim yazılımı, <https://www.cst.com/> (23.11.2016).
- [113]. Agilent Vektör Network Analizör, <http://www.keysight.com/> (23.11.2016).
- [114]. Xaver 200, <http://www.camero-tech.com/> (26.11.2016).
- [115]. Prism 200, <http://www.cambridgeconsultants.com/prism-200> (26.11.2016).
- [116]. Ozdemir, C., Yilmaz, B., Keceli, S. I., Lezki, H., Sutcuoglu, O., *Ultra Wide Band horn antenna design for Ground Penetrating Radar: A feeder practice*, 2014 15th International Radar Symposium (IRS), Gdansk, 16-18 June 2014, pp. 1-4.
- [117]. Mehdipour, A.; Aghdam, K. M.; Faraji-Dana, R., Completed dispersion analysis of Vivaldi antenna for ultra wideband applications. *Progress In Electromagnetics Research* **2007**, 77, 85–96.
- [118]. Yang, Y.; Wang, Y.; Fathy, A. E., Design Of Compact Vivaldi Antenna Arrays For UWB See Through Wall Applications. *Progress In Electromagnetics Research* **2008**, 82, 401–418.
- [119]. Schaubert, D. H.; Shin, J., A parameter study of stripline-fed Vivaldi notch-antenna arrays. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation* **1999**, 47, (5), 879-886.
- [120]. Rogers malzeme, <https://www.rogerscorp.com/documents/606/acm/RT-duroid-5870-5880-Data-Sheet.pdf> (26.11.2016).
- [121]. LDKF, PCB Makinası, <http://www.ldkf.com/products/rapid-pcb-prototyping/circuit-board-plotter/protomat-e44.htm> (26.11.2016).
- [122]. AINFO RF anahtarlama elemanı, <http://www.ainfoinc.com/en/index.asp> (26.11.2016).
- [123]. Arduino Mikrodenetleyici, <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560> (26.11.2016).

- [124]. Kalibrasyon prosedürü, http://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/EUMW2011-CascadeMicrotech-ChoosingOptimalCalibration.pdf?cmpid=MD1583 (26.11.2016).
- [125]. Pasternack, <https://www.pasternack.com/sma-female-standard-pe-sr402al-pe-sr402fl-rg402-connector-pe4115-p.aspx> (26.11.2016).
- [126]. Franchois, A.; Piñero, Y.; Roger, H. L., Microwave Permittivity Measurements of Two Conifers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **1998**, 36, (5), 1384-1395.
- [127]. TreeRadar™, <http://www.treeradar.com/TrunkInspection.htm> (26.11.2016).
- [128]. ERMAKSAN, <http://ermaksanmakine.com/>(26.11.2016).
- [129]. http://www.heart.org/HEARTORG/HealthyLiving/PhysicalActivity/FitnessBasics/Target-Heart-Rates_UCM_434341_Article.jsp#.WGp1ahuLRPY (26.11.2016).
- [130]. Rovnakova, J., Svecova, M., Kocur, D., Nguyen, T. T., Sachs, J., *Signal processing for through wall moving target tracking by M-sequence UWB radar*, 2008 18th International Conference Radioelektronika, Prague, 24-25 April 2008, pp. 1-4.
- [131]. Kol, H. Ş., Thermal and dielectric properties of pine wood in the transverse direction. *BioResources* **2009**, 4, (4), 1662-1668.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Betül YILMAZ

Doğum Tarihi : 13.05.1983

E-mail : betuly@mersin.edu.tr

Öğrenim Durumu :

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Elektronik Mühendisliği	Erciyes Üniversitesi	2000-2005
Yüksek Lisans	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2005-2008
Doktora	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2008-2017

Görevler :

Görev Ünvanı	Görev Yeri	Yıl
Araştırma Görevlisi	MEÜ. Müh. Fak. Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü	2006-2015
Uzman	MEÜ. Müh. Fak. Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü	2015-

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

Makaleler :

1. Toktas A., Akdaglı A., Ozdemir C., Bicer M. B., Toktas F., and **Yılmaz B.**, "Selected Patents on Compact Microstrip Antennas", *Recent Patents on Electrical Engineering*, **5**, 1-10, (2012).
2. Ozdemir, C., **Yılmaz, B.**, and Kirik, O., "A new GO-PO based ray launching simulator for the calculation of electromagnetic scattering and RCS from electrically large and complex structures," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, **22**, 1255-1269, (2013).
3. Ozdemir, C., Demirci, Ş, Yiğit, E., **Yılmaz, B.**, "A Review on Migration Methods in B-scan Ground Penetrating Radar Imaging," *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 16 pages, (2014).
4. **Yılmaz, B.**, Ozdemir, C., "Design and Prototype of Radar Sensor with Vivaldi Linear Array for Through-Wall Radar Imaging: An Experimental Study," *Journal of Applied Remote Sensing (JARS)*, 10 (4), 04612, (2016)
5. **Yılmaz, B.**, Ozdemir, C., Akdaglı, A., "Detection and Localization of a Moving Person behind the Wall based on Bilateralization Technique," *International Journal of Electrical and Electronics Engineering (IJEEE)*, 6 (1), 15-28, (2017)

Uluslararası Bildiriler :

1. Ozdemir, C., Kırık, O., **Yılmaz, B.**, "Sub-aperture Method for the Wide-Bandwidth Wide-Angle Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging", *Int. Conference on Electrical and Electronics Engineering - ELECO'2009*, Bursa, Vol. 2, pp. 288-292, Bursa, 2009 (poster)
2. Ozdemir, C., Demirci, S., **Yılmaz, B.**, Ak, C., Yigit, E., "A New and Practical Formulation of Bistatic Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging and Verification of the Formulation using Numerical Examples", *Int. Conference on Electrical and Electronics Engineering - ELECO'2009*, Bursa, Vol. 2, pp. 161-163, Bursa, 2009 (sözlü)
3. **Yılmaz, B.**, Demirci, Ş., Yiğit, E., Özdemir, C., "An Experimental Study of Through-the-Wall Radar for Lifesign Detection", *Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2013)*, Stockholm, 12-15 August, 2013 (sözlü)
4. Demirci, Ş., Yiğit, E., **Yılmaz, B.**, Özdemir, C., "Wide-field Circular SAR Imaging Studies Based on Ground-based Experiments", *Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2013)*, Stockholm, 12-15 August, 2013 (sözlü)
5. Özdemir, C., Demirci, Ş., Yiğit, E., **Yılmaz, B.**, "Compressed Sensing Based Near-field Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging", *Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2013)*, Stockholm, 12-15 August, 2013 (sözlü)
6. Yiğit, E., Demirci, Ş., **Yılmaz, B.**, Özdemir, C., "Short-range Ground-based SAR Imaging Experiments: Application of Back-projection Algorithm", *Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2013)*, Stockholm, 12-15 August, 2013 (sözlü)
7. Ozdemir, C., Kırık, O., **Yılmaz, B.**, Sutcuoglu, O., "A Fast and Efficient RCS Calculation and ISAR Image Formation Tool: pRediCS", *10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR 2014*, 03-05 June 2014, Berlin.
8. Keceli, S.I., Ozdemir, C., **Yılmaz, B.**, Lezki, H., Sutcuoglu, O., "Ultra Wide Band Horn Antenna Design for Ground Penetrating Radar: A Feeder Practice", *15th International Radar Symposium, IRS 2014*, 16-18 June 2014, Poland.
9. **Yılmaz, B.**, Ozdemir, C., "Through-the-Wall Imaging Radar Experiments Based on 8-Element Vivaldi Radar Sensor", *17th International Radar Symposium, IRS 2016*, 10-12 May 2016, Poland.
10. **Yılmaz, B.**, Ozdemir, C., Gokkan S., "A Focusing Algorithm for Tree-Penetrating Radar Imaging: An Experimental Study and Concept Evaluation", *17th International Radar Symposium, IRS 2016*, 10-12 May 2016, Poland.
11. **Yılmaz, B.**, Ozdemir, C., "A Radar Sensor Design and Prototype for Through-The-Wall Imaging Radar Applications", *2016 IEEE Radar Methods and Systems Workshop, RMSW 2016*, 27-28 September 2016, Kiev.

ULUSAL BİLDİRİLER :

1. **Yılmaz, B.**, Özdemir, C. "Ters Yapay Açıklıklı Radar Görüntülerindeki Saçılma Merkezi Analizi Yardımıyla Büyük ve Karmaşık Platformların Radar Soğurucu Malzeme ile Kaplanarak RKA'larının Azaltılması", *URSI-TÜRKİYE'2008 Bilimsel Kongresi*, s. 228-231, Antalya, 20-22 Ekim 2008 (sözlü)
2. **Yılmaz, B.**, Özdemir, C. "Nümerik Yöntemlerle Saçılan Alan Hesabı, 3-B Ters Yapay Açıklı Radar Görüntülerinin Elde Edilmesi ve Saçılma Merkezleri Analizi", *4. Savunma Teknolojileri Kongresi (SAVTEK 2008)*, s. 259-267, Ankara, Türkiye 26-27 Haziran 2008 (sözlü)

3. **Yılmaz, B.**, Özdemir, C., Ak, C., “Mersin Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde Lisans ve Lisans Üstü Eğitiminin Tanıtımı”, *EEBB Mühendislikleri Eğitimi 4. Ulusal Semp.*, Eskişehir, 22-24 Ekim 2009 (poster)
4. **Yılmaz, B.**, Özdemir, C., “Şaf (Chaff) Bulutundan Elektromanyetik Saçılma Benzetiminin Gerçekleştirilmesi ve Ters yapay Açıklıklı Radar Görüntülerinin Elde edilmesi”, *1'inci Aviyonik ve Sistem Entegrasyonu Sempozyumu (ASES-2010)*, İstanbul, 29-30 Nisan 2010 (sözlü)
5. Özdemir, C., **Yılmaz, B.**, Toktaş, F., “Development of Simulation Software for the Radar Cross Section of Large and Complex Targets at High Frequencies”, *Ulusal Savunma Uyg. Model. Sim. Konf USMOS-2011*, Ankara, Turkey, 14-15 Haziran 2011 (sözlü)
6. Özdemir, C., **Yılmaz, B.**, Toktaş, F., “Kentsel Bölgelerdeki Antenlerden Yayılan Elektromanyetik Alan Dağılımlarının Benzetiminin Gerçekleştirilmesi”, *Elektromanyetik Alanlar ve Etkileri Sempozyumu, EMANET-2011*, İstanbul, Turkey, 7-8 Ekim 2011 (sözlü)

DERS VERME :

Yarıyıl	Dersin Adı	Haftalık Saati		Öğrenci Sayısı
		Teorik	Uygulama	
Güz- Bahar	EEM-311 Electronics I Lab	3	2	60
	FZK121 Fizik I Lab.	3	2	100
	EEM-312 Electronics II Lab.	3	2	60
	EEM-342 Logic Circuit Design Lab.	3	2	100
	EEM-431 Anten Kuramı Lab.	3	2	40
	FZK122 Fizik II Lab.	3	2	100

MAKALE HAKEMLİKLERİ (SCI)

2014: *Mathematical Problems in Engineering*
198370
Chinese Journal of Aeronautics
CJA-D-14-00041

ULUSAL BİLİMSEL TOPLANTI DÜZENLEME

- A.1) Nükleer Enerji Sempozyumu, 19-21 Ekim 2007, Mersin Üniv., Mersin, Türkiye. (Yürütme kurulu üyesi)
- A.2) Elektromanyetik Alanlar ve Etkileri (EMANET 2015) Sempozyumu, 13-15 Kasım 2015, EMO Mersin Şube, Mersin, Türkiye. (Yürütme kurulu üyesi)

KURUM ÜYELİKLERİ

- B.1) Elektrik Mühendisleri Odası, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği.