

ENGEL ARKASI GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMLERİ
PERFORMANS ANALİZİ VE İYİLEŞTİRİLMESİ

MUHAMMED DUMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2012

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Ünver KAYNAK
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Doc. Dr. Hamza KURT
Anabilim Dalı Başkanı

MUHAMMED DUMAN tarafından hazırlanan ENGEL ARKASI GÖRÜNTÜ-
LEME YÖNTEMLERİ PERFORMANS ANALİZİ VE İYİLEŞTİRİLMESİ adlı
bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yard. Doç. Ali Cafer GÜRBÜZ
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Hamza KURT

Üye : Yard. Doç. Ali Cafer GÜRBÜZ

Üye : Yard. Doc. Dr. Gültekin KUYZU

Üye : Yard. Doc. Dr. Tolga GİRİCİ

Üye : Yard. Doc. Dr. İsrail BAHÇECİ

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Muhammed DUMAN

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Elektrik Elektronik Mühendisliği
Tez Danışmanı : Yard. Doç. Ali Cafer GÜRBÜZ
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Aralık 2011

Muhammed DUMAN

ENGEL ARKASI GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMLERİ PERFORMANS ANALİZİ VE İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Engel arkası görüntüleme tek katman, iki katman ve çoklu katman olarak kısımlara ayrılabilir. Tek katmanda çalışma homojen ortamda görüntüleme, iki katmanda çalışma yer altı görüntüleme ve çoklu katmanda çalışma duvar arkası görüntüleme (TWI) olarak tanımlanabilir. Yer altı görüntülemeye en güzel örnek yere işleyen radar (GPR) çalışmalarıdır. Günümüzde GPR çalışmaları için geliştirilen farklı görüntüleme yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerden seyreklik tabanlı görüntüleme yöntemleri giderek önemini artırmaktadır. En yaygın olarak bilinen seyreklik tabanlı görüntüleme yöntemi sıkıştırılmış algılama yöntemidir. Sıkıştırılmış algılama (CS), GPR ile yer altı görüntülemesi veya duvar arkası görüntülemesi çalışmalarında çok kullanışlı bir algoritmadır. CS ölçüm sayısını düşürerek yüksek çözünürlükte görüntü elde edilmesini sağlar. Literatürdeki CS ile engel arkası görüntüleme çalışmaları, hedefleri ızgara noktalarında bulunan noktasal hedefler olarak kabul ederler ve duvar parametrelerinin kesin olarak bilindiğini varsaymaktadırlar. Fakat gerçek uygulamalarda hedefleri sadece ızgara noktalarında kabul etmek veya duvar parametrelerini tam doğru olarak kestirmek mümkün değildir. Bu çalışmada CS tabanlı engel arkası görüntüleme de ızgaralama ve bilinmeyen parametrelerin CS performansına etkileri incelenmiş ve muhtemel çözüm önerileri tartışılmıştır. Engel arkası görüntüleme ile ilgili diğer bir önemli sorun ise 3D GPR görüntülemede mevcut olan sıkıntılardır. Bu sorunlar veri için gereken hafızanın çok yüksek olması ve verinin işlenmesi için gereken sürenin çokluğudur. Bu çalışma 3D GPR görüntülemenin gerçek uygulamalardaki kullanımında karşılaşılan hafıza ve hız sorunlarını azaltacak yeni bir 3D görüntüleme algoritmasını açıklar. Teorik olarak inceler ve yeni yöntem ile eski 3D görüntüleme yönteminin başarımlarını karşılaştırır.

Anahtar Kelimeler: Yere İşleyen Radar (GPR), Yeraltı görüntüleme, Duvar arkası görüntüleme (TWI), Sıkıştırılmış Algılama(CS), Veri modelleme, Görüntüleme algoritmaları, Hedeflerin ızgara noktalarında olmaması, Bilinmeyen Duvar parametreleri, 3D görüntüleme, Yüksek veri miktarı, Boyut azaltma.

University : **TOBB University of Economics and Technology**
Institute : **Institute of Natural and Applied Sciences**
Science Programme : **Department of Electrical and Electronics Engineering**
Supervisor : **Asst. Prof. Ali Cafer GÜRBÜZ**
Degree Awarded and Date : **M.Sc. – DECEMBER 2012**

Muhammed DUMAN

**PERFORMANCE ANALYSIS OF SUBSURFACE/THROUGH THE
WALL IMAGING TECHNIQUES AND IMPROVEMENT
METHODS**

ABSTRACT

Subsurface or through the wall imaging can be divided to sections such as one layer, two layer and multiple layers. Work with one layer can be described as imaging of the homogeneous field, work with two layer can be described as subsurface imaging and work with multiple layer can be described as through the wall imaging. Ground penetrating radar (GPR) is the most known example of subsurface imaging. Several different imaging algorithms for GPR applications is exist. Sparsity based imaging methods from these are becoming significantly important. The most common sparsity based imaging algorithm is compressive sensing (CS). Compressive sensing is a very useful algorithm that is used in ground penetrating radar or through the wall imaging (TWI). CS generates high resolution images by decreasing the required measurement number. Although there are several recent works about TWI with CS, they assume that targets are point like positioned at only discrete grid locations and the wall parameters are perfectly known. However, in real applications, it is not possible to know the exact target positions or estimate the wall parameters exactly. The other important issue about the beyond obstacle imaging is the problems of the 3D GPR imaging. These problems are high dictionary size and computational complexity problems. This work represents a data module which realizes several different imaging algorithm and it have capability to compare and control the GPR datas that they have. In addition details the theory for CS based TWI and the imaging ability of CS are detailed and the effect of errors in unknown parameters on the imaging performance is discussed. Finally, this thesis demonstrates a new approach for

3D GPR imaging and analyzes its theory and compare the performance of the proposed method with previous techniques.

Keywords: Ground Penetrating Radar (GPR), Subsurface Imaging, Through the Wall Imaging (TWI), Compressive Sensing (CS), Data Modelling, Imaging Algorithm, Off the Grid, unknown wall parameter, 3D Imaging, High Dictionary Size, Demission Reduction.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim süresince danışmanlığımı yapan ve çalışmalarım sırasında desteğini esirgemeyen ve çalışmalarımı ve beni sürekli yönlendiren Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Ali Cafer GÜRBÜZ ' e çok teşekkür ederim.

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı bünyesinde bulunan tüm hocalarıma yardımlarından dolayı teşekkür ederim. Ayrıca eğitimim süresince burs imkanı sağlayan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi ve TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca benden maddi manevi hiçbir yardımı esirgemeyen, aile bireylerime çok teşekkür ederim.

Bu çalışma TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından 109E280 numaralı Sıkıştırılmış Uzaktan Algılama ve Görüntüleme başlıklı kariyer projesi ve Avrupa Birliği tarafından PIRG04-GA-2008- 239506 numaralı Marie Curie Reintegration Grant projesi kapsamında desteklenmiştir.

İçindekiler

1	GİRİŞ	1
1.1	Yere İşleyen Radar (GPR)	2
1.2	Yer Altı Görüntüleme	3
1.3	Duvar Arkası Görüntüleme	5
1.4	Üç Boyutlu (3D) GPR Görüntüleme	8
1.5	Tez Planı	9
2	GPR GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMLERİ	10
2.1	Basamak Frekans Sürekli Dalga Sistemler ve Temel Sistem Parametrelerinin Bulunması	10
2.1.1	Sistem parametrelerinin tanımlanması	11
2.1.2	GPR Sistemlerindeki Genel Tanımlanabilecek Parametreler	14
2.2	EAGR için Veri İşlenmesi ve Analizi	17
2.2.1	Modelleme	17
2.2.2	Ön İşleme Metotları	18
2.2.3	Görüntü Oluşturma Metotları	20

3	GPR İÇİN VERİ BENZETİM MODÜLÜ	26
3.1	GPR Veri Benzetim Ortamı	27
3.1.1	Senaryonun Belirlenmesi	27
3.1.2	Uygulama Örneği	32
4	SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA İLE DUVAR ARKASI GÖRÜNTÜLEME VE BİLİNMEYEN PARAMETRELERİN PERFORMANSA ETKİLERİ	36
4.1	GPR ile Duvar Arkası Görüntüleme	37
4.1.1	Üç Katmanda Zaman Gecikmesi Hesabı için Yeni Bir Yaklaşım	39
4.2	Sıkıştırılmış Algılama	41
4.3	CS Tabanlı Duvar Arkası Görüntüleme	44
4.3.1	Sayısal Simülasyonlar ve Simülasyon Sonuçları	47
5	İKİ BOYUTLU KÜTÜPHANELERİN KULLANIMI İLE HIZLI ÜÇ BOYUTLU GPR GÖRÜNTÜLEME UYGULAMASI	61
5.1	Standart 3D GPR Görüntüleme	63
5.2	3D GPR Görüntüleme için Önerilen Yöntem	66
5.3	Hesaplama Yüğü	69
5.4	Simülasyon Sonuçları	70
6	SONUÇ	74
	KAYNAKLAR	77

Şekil Listesi

1.1	Temel yer altı görüntüleme yapısı.	3
1.2	Ortamda elektromanyetik dalganın kırılımı.	4
1.3	TWI genel yapısı.	6
2.1	SFCW dalga yapısı.	11
2.2	GPR yapısı	21
2.3	Stolt migration yapısı	23
3.1	GPR Veri Simülatörü Ana Penceresi	27
3.2	Engel Arkası Görüntüleme Hedef Uzayları a)Yer altı radar görün- tüleme b)Duvar arkası görüntüleme	28
3.3	Hedef ve Radar Parametrelerinin Girişi a)Hedef parametrelerinin alındığı menü b) Yer Altı Görüntüleme için Radar parametrelerinin alındığı menü c) Duvar Arkası Görüntüleme İçin Radar paramet- relerinin alındığı menü	30
3.4	Yer Altı Görüntüleme Uygulama Sonuçları a) Frekans Görün- tüleme(Toprak) b) Zaman Görüntüleme(Toprak) c) Geri Çatma Görüntüleme(Toprak) d) Frekans Görüntüleme(Beton) e) Zaman Görüntüleme(Beton) f) Geri Çatma Görüntüleme(Beton)	34

3.5	Duvar Arkası Görüntüleme Uygulama Sonuçları a) Frekans Görüntüleme(Toprak)b) Zaman Görüntüleme(Toprak) c) Geri Çatma Görüntüleme(Toprak) d) Frekans Görüntüleme(Beton) e) Zaman Görüntüleme(Beton) f) Geri Çatma Görüntüleme(Beton)	35
4.1	Üç katman gösterimi	38
4.2	Gerçekçi olmayan duvar ötesi yaklaşımı	39
4.3	Literatürde uygulanan zaman gecikmesi hesabı yaklaşımı ile ray tracing yöntemi ile zaman gecikmesi hesabı karşılaştırılması	40
4.4	(a) Hedef uzayı. (b) Tüm ölçümler ile geri çatma görüntüsü . (c)Seyrekleştirilmiş geri çatma görüntüsü. (d) CS yönteminin sonuç görüntüsü.	49
4.5	Doğru geri oluşturma oranı vs. çeşitli hedef ayrıklık seviyeleri için ölçümler (a) rastgele ölçüm stratejisi, (b) düzgün ölçüm stratejisi, c) Rastgele seçim için hedef sayısı ve ölçüm sayısı ilişkisi d) Düzgün seçim için hedef sayısı ve ölçüm sayısı ilişkisi.	50
4.6	Doğru geri elde edim oranı ile her tarama noktasındaki rastgele frekans ölçüm sayısı ilişkisi. 'sp' tarama noktasını temsil etmektedir.	52
4.7	Doğru geri elde etme oranı ile SNR ilişkisi.	53
4.8	CS tabanlı TWI da off the grid etkisi: (a) Geri çatma, (b) 1 cm lik ızgarada CS, (c) Geri çatma, (d) 2 cm lik ızgara da CS, (e) Geri çatma, (f) 5 cm lik ızgarada CS,	54
4.9	Bilinmeyen duvar parametrelerinin CS performansına etkisi: Duvar dielektrik geçirgenlik (a) 4.1, (b) 4.5 ve duvar kalınlığı (c) 30.2 cm and (d) 31 cm. Geri çatma: Duvar dielektrik geçirgenlik (e) 7 and duvar kalınlığı (f) 33 cm	56
4.10	CS in mesafe çözünürlük performansı: $\Delta R = 6$ cm (a) $r = 2$ cm, (b) $r = 3$ cm. Geri çatmanın mesafe çözünürlük performansı: $\Delta R = 6$ cm (c) $r = 6$ cm, (d) $r = 10$ cm	58

4.11	Yüzey yansımalarının CS performansına etkisi (a) Hedefler, (b) CS sonucu.	60
5.1	Ayrıklaştırılmış 3D hedef uzayı.	63
5.2	Veri matrisi oluşturulması.	64
5.3	3D görüntüleme için oluşturulan veri matrisi boyutları.	64
5.4	Ayrık noktaların ötelenme özelliği.	66
5.5	3D ölçüm verisi senaryosu.	67
5.6	3D model verisi senaryosu.	67
5.7	3D hedef uzayının başlangıç noktasındaki tarama verisi.	68
5.8	3D hedef uzayının en sonundaki tarama verisi.	68
5.9	Yeni yöntemin matematiksel yapısı.	70
5.10	Hedef uzayı.	71
5.11	Simülasyonun 3D görüntü sonuçları.	72
5.12	Hafıza performans analizi.	73
5.13	Matematiksel işlem performansı.	73

Tablo Listesi

1.1 Dürtü ve Basamak frekanslı EAGR sistemlerinin özellik karşılaştırılması	2
---	---

1. GİRİŞ

Herhangi bir nesnenin veya hedefin uzaktan algılanması, bulunması, ve görüntülenmesi konusu insanoglunu on yıllardır meşğül eden çok temel araştırma alanlarının başında yer almaktadır. Şu ana kadar bu konuda bir çok değişik metotlar kullanılmış olmakla beraber, hiç bir metotun tek başına kapsayıcı bir çözüm sunamadığı ortadadır. Kullanılan metotlar içinde sismik, elektromanyetik indüklenme, kızılötesi ve elektromanyetik metotların kullanışlı oldukları gösterilmiştir. Bunlardan elektromanyetik engel arkası görüntüleme yöntemi olan "Ground Penetrating Radar: (GPR)" yani yere işleyen radar [1, 2, 3] teknolojisi özellikle büyük ilgi gören ve araştırma yapılan bir seçenek halini almıştır. Yere işleyen radarlar katmanlı görüntüleme problemlerine kullanışlı çözümler sunan bir teknolojidir. Yere işleyen radar teknolojisi, iki katmanlı yer altı görüntüleme çalışmalarında kullanıldığı gibi duvar arkası görüntüleme gibi çok katmanlı ortamlarda nesnelere tespit edilmesi çalışmalarında da yaygın olarak kullanılır.

GPR metodu yer altını veya daha genel olarak az kayıplı dielektrik maddeleri incelemek için radyo dalgalarını kullanır. Elbette çok sayıdaki dielektrik maddeler ile geniş bir dalga spektrumu ele alındığında GPR için geniş uygulama alanlarının ortaya çıktığı görülmektedir. GPR tekniklerinin yaygın olarak kullanıldığı bazı uygulama alanları şunlardır: yeraltı mayınların keşfi, duvar ötesi görüntüleme, arkeolojik araştırmalar, yeraltı kablo ve boruların bulunması, yol ve köprülerin sağlamlığının incelenmesi [4]. Her uygulama alanı için uygun olabilecek GPR yapısı ve sinyal işleme yöntemleri değişiklik gösterebilmektedir.

Tablo 1.1: Dürtü ve Basamak frekanslı EAGR sistemlerinin özellik karşılaştırılması

Dürtü EAGR	SFCW EAGR
Değişik ortamlar için değişik anten kullanımını gerektirir.	Değişik ortamlara karşı uyumu kolaydır.
Düşük ölçüm hassasiyeti	Yüksek ölçüm hassasiyeti.
Düşük ortalama güç	Yüksek ortalama güç
Yüksek bantgenişliği	Düşük anlık bantgenişliği
A/D çeviriciler daha yüksek örnekleme hızı kullanırlar	A/D çeviriciler düşük örnekleme frekansı kullanırlar
Tarama zamanı daha düşüktür	Tarama zamanı daha yüksektir
Daha basittir ve düşük maliyettedir	Daha karmaşık bir yapı ve maliyet gerektirebilir

1.1 Yere İşleyen Radar (GPR)

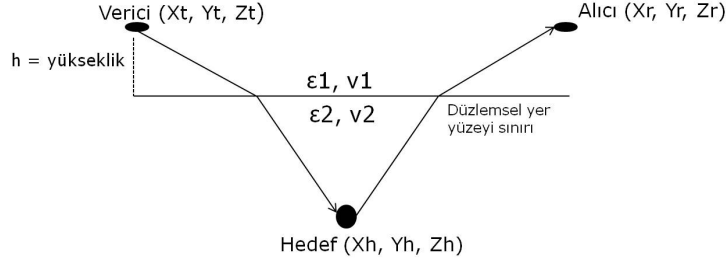
Yere işleyen radar (GPR) yüksek çözünürlüklü elektromanyetik bir tekniktir. Temel olarak GPR, verici antenden ışıyan belirli bir hızdaki elektromanyetik dalganın belirli uzaklıktaki nesneye çarparak saçılımından sonra alıcı antenin bunları algılamasıyla veriler elde eden bir sistemdir. Yere işleyen radar; mühendislik, arkeoloji, jeoloji ve çeşitli çevresel araştırmalar gibi [5, 6, 7] farklı alanlarda kullanılmaktadır. GPR, metalik veya metalik olmayan nesnelere tespit edebilir, yeraltının yüzlerce metre derinliklerini görüntüleyebilir ve araştırılan alanın anlık bilgisini kullanıcıya hızlı şekilde sağlayabilir.

Temel olarak iki çeşit engel arkası görüntüleme sistem yapısı bulunur. Bunlar dürtü tabanlı GPR [8, 9] ve basamak frekans sürekli dalga (SFCW) GPR [10] yapılarıdır. Dürtü tabanlı GPR zaman ortamında veri toplar. SFCW GPR ise frekans alanında veri toplar [11, 12]. Tablo 1.1'de kısaca dürtü ve basamak frekanslı GPR sistemlerinin karşılaştırılması sunulmuştur

Tablo 1.1'de verilen karşılaştırma neticesinde geliştirilmesi düşünülen EAGR sistemi için önerilen sistem yapısı ve temel uygulama senaryoları hakkında kısaca bilgiler verilmiştir.

1.2 Yer Altı Görüntüleme

Yer altı görüntüleme GPR yardımıyla iki katmanda görüntüleme uygulamasıdır. En genel ve basit haliyle bir yer altı görüntüleme senaryosu Şekil 1.1 de gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Temel yer altı görüntüleme yapısı.

Burada alıcı (receiver), vericiden (transmitter) direkt gelen, yer yüzeyinden yansıyan ve yere işleyerek yerdeki dielektrik hedeflerden yansıyan enerjileri toplamaktadır. Alıcılarda toplanan veriler ise işlenerek istenilen bilgiler ortaya çıkarılmaya çalışacaktır. Burada gönderilen sinyal, genliği, frekansı veya fazı modüle edilmiş bir dalga veya bir gürültü sinyali (noise radars [13, 14]) olabilir. GPR sistem çeşidi, band genişliği, seçimi, ortalama güç, uzaysal veri analizi vb. birçok tasarım parametrelerinin neler olduğu ve nasıl seçilebilecekleri önem taşımaktadır. İlk olarak önemli olan vericiden çıkan ve hedeften yansıyarak alıcıya ulaşan Elektromanyetik (EM) dalga hareketinin temel olarak anlaşılmasıdır.

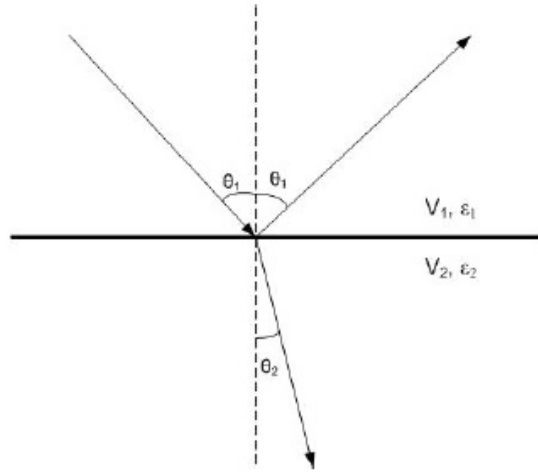
En basit haliyle EM dalga hareketleri Maxwell denklemleriyle ifade edilir [15]. Bizim için maddelerin elektriksel (iletkenlik, dielektrik) ve manyetik (permeability) gibi özellikleri önemlidir.

Elektriksel iletkenlik (σ): Elektrik alanı mevcutken yüklerin hareketini (elektrik akımı oluşturarak) karakterize eder. Yük akışına direç enerji kaybına neden olur.

Dielektrik Permittivity (ϵ): Elektrik alan uygulandığında madde yapısı içindeki yük yerdeğişimini karakterize eder. Bu yerdeğişim bir enerji birikimine neden olur.

Manyetik Permeability (η): Madde içindeki atomik ve moleküler manyetik momentlerin manyetik alana yanıtını açıklar.

EM dalga hareketi dışında diğer önemli nokta herhangi bir engel sınırında EM dalgasının hareketinin tanımlanmasıdır. Burada herhangi bir yüzey için hesaplamalı elektromanyetik analizler olmakla beraber [16] düzlemsel sınırlar ve EM dalgaların ışın olarak modellenmesi en çok kullanılan ve en basit modellerdendir [1, 2]. Şekil 1.2 de dalga hızı (v_1), dielektrik sabiti (ϵ_1) ikinci ortamda dalga hızı (v_2) ve ikinci ortam dielektrik sabiti (ϵ_2) arasındaki ilişki gösterilmiştir. ,



Şekil 1.2: Ortamda elektromanyetik dalganın kırılması.

Kırınım ve yansımaların alan kuvveti dalganın transverse elektrik veya transverse manyetik olmasının yanında, dalganın geliş ve kırılma açlarına ve ortamların empedanslarına bağlıdır. Kırılım ve yansıma ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$R_{TE} = Y_1 \cdot \cos \theta_1 - Y_2 \cdot \cos \theta_2 \div Y_1 \cdot \cos \theta_1 + Y_2 \cdot \cos \theta_2 \quad (1.1)$$

$$R_{TM} = Z_1 \cdot \cos \theta_1 - Z_2 \cdot \cos \theta_2 \div Z_1 \cdot \cos \theta_1 + Z_2 \cdot \cos \theta_2 \quad (1.2)$$

$$T_{TE} = 1 + R_{TE}, T_{TM} = 1 + R_{TM} \quad (1.3)$$

Yer altı görüntüleme senaryosunda veriyi modelleyebilmek için önemli olan diğer bir konu da GPR terimleridir. Bu terimlerin açıklamaları bir sonraki bölümde verilecektir. Yukarıda belirtilen bu hususlar dahilinde yer altı görüntüleme uygulaması için veri modellemesi yapılabilmektedir.

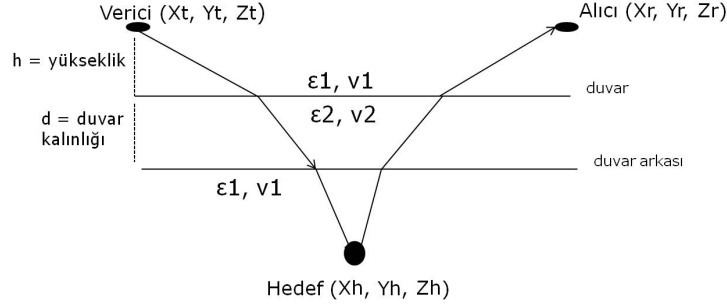
Günümüzde GPR çalışmaları için önemli bir konu veri modelleyebilen ara yüzlerin varlığıdır. Yer altı görüntüleme, duvar arkası görüntüleme gibi engel arkası görüntüleme metotlarının simüle edilebileceği çeşitli ticari paket programlar ve geliştirilmiş farklı simulasyon programları mevcuttur [17, 18, 19]. Ama bunların bir çoğu kullanım olarak karmaşıktır. Ayrıca piyasadaki mevcut simulasyon programlarının kullanımı kadar çalıştırılması bile çok karışık ve kullanımı güç simülatörlerdir. Bu simülatörler olaya zamanda sonlu farklar yöntemi (FDTD) gibi elektromanyetik yoğunluklu bir açıdan baktıkları için hızlı veri elde edemezler [19]. Bu dezavantajlar ile mevcut GPR modülleri değişik sinyal işleme yöntemlerinin karşılaştırılması için uygun bir platform örneği değillerdir.

Piyasadaki simülatörlerin kullanımlarının pratik olmayışı nedeniyle veri modelleyebilen ve veriyi farklı sinyal işleme yöntemleri ile işleyen bir GPR veri modülü geliştirilme çalışması yapılmıştır. Yapılan arayüz Matlab GUI [20] üzerinde gerçekleştirilmiştir. Modül seçilen radar sistemine göre radar parametrelerinin ve senaryoya bağlı ortam parametrelerinin kullanıcıdan alınmasından sonra farklı görüntüleme algoritmalarını ve sinyal işleme yöntemlerini uygulama imkanı sunmaktadır. GPR veri modülü bir sonraki bölümde ayrıntı olarak incelenecektir.

1.3 Duvar Arkası Görüntüleme

Duvar arkası görüntüleme çalışmaları (TWI) [21, 22], son yıllarda askeri alandaki çalışmalarda kullanımının artması ile beraber önemli bir teknoloji konumuna gelmiştir. TWI uygulamaları üç katmanda görüntülemeye dayanır. Duvar arkası görüntüleme temel olarak yer altı görüntülemeye benzemektedir. Genel TWI yapısı Şekil 1.3 ' de gösterilmiştir.

Duvar arkası görüntüleme çalışmalarında veri modellenirken yer altı uygulamalarındaki (iki katman) gibi elektromanyetik kırılım yasaları (Snell Yasası) göz önünde bulundurulur. Fakat buradaki sistem üç katmanlıdır. Sistemin gerçekçi şekilde modellenmesi için çok katmanlı Snell yasasının çözülmesi gerekir. Çok katmanda Snell yasası yüksek dereceden polinomial denklemlere sahiptir ve çözümleri oldukça zor olmanın yanında birçok kez yapılacağından hesaplama karmaşıklığı açısından tercih edilmemektedir. Çok katmanlı sistemlerin çözümü



Şekil 1.3: TWI genel yapısı.

için Snell yasasına alternatif daha basit yöntemler mevcuttur [23, 24, 35]. Bu yöntemleri kullanan çeşitli TWI uygulamaları da yapılmıştır. Bu uygulamalardan [23] referanslı çalışmada GPR duvar üzerinde olduğu varsayılarak aslında iki katmanlı bir veri modellemesine gidilmiştir. TWI sistemine bu şekilde bir yaklaşım verinin gerçekçi modellemesini engelleyecektir. Bu yüzden çok katmanlı sistemlerde yapının doğru çözüldüğünden emin olunması gerekir. Sistemin doğru çözümü için literatürde çeşitli lineer yaklaşımlar ve Ray Tracing methodu [25, 26] olarak bilinen yöntem mevcuttur. Literatürde kullanılan lineer yaklaşım, homojen sistemde elektromanyetik dalganın hareketini baz alır. Homojen ortamda dalga kırılmadan yüzeyden geçer. Lineer yaklaşım, çok katmanlı ortamda dalganın kırıldığı pozisyonların, hedef koordinatları ile homojen ortamda kırılmadan geçeceği koordinat noktaları arasında olduğu kabulüne dayanır, hızlı çalışır ve yaklaşık çözüm sunabilir. Ray Tracing yöntemi ise yavaş çalışır fakat Snell yasasına çok yakın çözümler verebilir.

TWI uygulamaları genelde yüksek çözünürlük ister. Yüksek menzil çözünürlüğü geniş bant (UWB) sinyallerinin kullanımına ihtiyaç duyarken, çapraz açıklık çözünürlüğü de çok uzun bir açıklığa ihtiyaç duyar. UWB sinyali oluşturmanın bir yöntemi basamak frekans sistemini (SFCW) kullanmaktır [12]. SFCW yöntemi, hesaplama işlemlerini düşünülmesi gereken yüksek sürelerde gerçekleştirir. TWI uygulamalarında özellikle pozisyonu sabit olmayan hedefler için bu hesaplama zamanı sorun olmaktadır. Sıkıştırılmış algılama (CS) [27, 28], imge çözünürlüğünde kayıp yaşatmadan gerekli ölçüm sayısını azaltarak hesaplama süresini azaltır. CS nin seyreklik yapısı nedeniyle, çok geniş bir kullanım alanı vardır [29, 30, 31]. Sıkıştırılmış algılama, yere işleyen radar ile yer altı görüntülenmesi ve duvar arkası

görüntülenmesi [32, 33, 34, 35, 36] çalışmalarında da uygulanmıştır.

Daha önceki CS tabanlı TWI uygulamaları ve CS tabanlı GPR uygulamaları [23, 24, 35], çalışmalarında bazı varsayımları kabul etmişlerdir. Bu çalışmalar öncelikle hedefleri ayrık ızgara pozisyonlarında bulunan noktasal yansıtıcılar olarak kabul etmişlerdir. Bununla beraber önceki çalışmalar, dalga hızı veya duvar kalınlığı, duvarın elektriksel geçirgenlik katsayısı gibi ortam parametrelerinin kesin olarak bilindiğini varsayarak veri modellemesi yapmışlardır. Fakat gerçek uygulamalarda hedefler ızgara pozisyonlarında olmayabilir veya duvar parametreleri kesin olarak bilinmeyebilir. Bu parametrelerin etkilerinin incelenmesi CS tabanlı duvar arkası görüntüleme de CS performansının gürbüzlüğünün bilinmesi açısından önemlidir.

CS tabanlı duvar arkası görüntüleme ile ilgili diğer bir soru işareti CS in rastgele veri seçiminin nasıl olacağıdır. Bu problem direkt olarak rastgele ölçüm matrisinin dizaynı ile ilişkilidir. [28] deki çalışmada ölçüm matrisinde her anten pozisyonunu temsil eden satır elemanından rastgele ölçüm yapılmıştır. Yani matrisin sütunlarından (frekans değerlerini tutan) rastgele veriler seçilmiştir. [27, 30] çalışmalarında frekans bölgesinden rastgele seçmek yerine veri uzayından (anten tarama noktaları) rastgele seçim yapılmıştır. Bu şekilde bir seçimin performansı düşürdüğü gösterilmiştir. Veri uzayı ile frekans uzayı arasındaki bu çelişki, CS in başarılı performansı için gerekli gördüğü minimum veri miktarı ve bu verilerin nereden nasıl seçildiğine dair bir araştırma yapılmasını gerektirmektedir.

CS tabanlı duvar ötesi görüntüleme de araştırılması gereken diğer bir konu CS in mesafe çözünürlüğü (range resolution ΔR)' ne etkisinin ne olduğudur. Daha önceki radar uygulamalarında [34, 35] CS in ΔR değerini iyileştirdiği gösterilmiştir. Fakat duvar arkası görüntüleme de CS ile standard geri çatma algoritmasının ΔR performansları karşılaştırılmamıştır.

Bu çalışma da, sıkıştırılmış algılama kullanılarak duvar arkası görüntüleme uygulaması gerçekleştirilmenin teorisi ve sonuçları verilmiştir. Ayrıca CS tabanlı TWI örneğinde bilinmeyen parametrelerin CS performansına etkileri ve CS in gürbüzlüğünün araştırılma sonuçları irdelenmiştir. Ek olarak CS in %90 başarımla çözüm sağlayabilmesi için ihtiyaç duyduğu minimum veri miktarı, bu verilerin ölçüm matrisinden nasıl seçileceği genişçe araştırılmıştır. Son olarak

CS ile standard geri çatma algoritmasının ΔR performansları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

1.4 Üç Boyutlu (3D) GPR Görüntüleme

GPR ile ilgili bazı uygulamalar özellikle mayın veya önemli kaynakların bulunması gibi çalışmalarda hedefler tek düzlem üzerinden net olarak görülemez. Bu yüzden bazı askeri uygulamalar ve jeolojik uygulamalar üç boyutta veri işlenmesine ihtiyaç duyarlar. Fakat, üç boyutlu (3D) GPR görüntüleme [37, 38, 39] yüksek işlem sürelerinde tamamlanır. Bu yüzden sistem hızlı paralel çalışabilen işlemciler ve pahalı veri işleme paketlerine ihtiyaç duyar. Bununla beraber 3D GPR görüntülemeye veri kütüphanesinin boyutu oldukça büyüktür. Bu sebepler ile mevcut 3D görüntüleme algoritmaları yaygın kullanım için uygun değildirler.

GPR ile 3D görselleme teknikleri geniş olarak arkeolojik amaçlar ile kullanılmaya çalışılmaktadır [40, 41, 42]. Bu uygulamaların çalışma alanları genellikle doğrusal özellik gösteren duvar, yol vs. gibi yapılardır. 3D görüntülemeye yönelik mevcut bu uygulamalar henüz etkili çözümlüklere ve veri işleme kapasitesine ulaşamamışlardır. Bunların yanında 3D görüntüleme ile ilgili ilginç araştırmalar mevcuttur [43, 44, 45, 46]. Bu uygulamalarda 3D görüntüleme yapısı mayın bulma uygulamalarına entegre edilmiştir. Diğer bir uygulama da Robertsetal tarafından geliştirilen 2.5D methodudur [47]. Bu method 3D görüntüleme methoduna göre daha hızlı ve uygulaması daha basittir. Fakat bu yöntem çözünürlük kalitesi olarak hala istenilen seviyelere ulaşamamıştır. Tüm bu uygulama örnekleri düşünüldüğünde 3D yöntemlerin zaman, hız, hafıza ve çözünürlük bakımından istenilen seviyelerde olmadığı söylenebilir.

Detaylı yer altı görüntüleme ve yüksek çözünürlüklü arkeolojik uygulamalara giderek artan ihtiyaçlar ile beraber 3D GPR görüntüleme önemli bir konu haline gelmiştir. Fakat çoğu GPR uygulamaları 3D görüntüyü, 1D ve 2D teknikleri yardımıyla geliştirirler [48, 49, 50, 51]. Bu yüzden 3D görüntünün çözünürlüğü yeterli seviyeye ulaşamaz. Ayrıca 3D görüntünün modellenmesinde onlarca tarama noktası ve her tarama noktasında yüzlerce ölçüm olduğu düşünüldüğünde oluşan veri kütüphanesinin hafıza sorunlarına yol açacağı net bir şekilde anlaşılır.

Bu tez çalışmasında 3D GPR görüntüleme için yeni bir yaklaşım önerilmektedir. Bu yaklaşım 3D görüntüyü oluştururken 2D hedef uzayının simetri özelliğini kullanır. Böylece oluşan 3D veri kütüphanesinin bir boyutu azaltılır. Bununla birlikte önerilen yöntemde korelasyonlar evrişim haline dönüştüğünden hesaplamaları hızlı fourier dönüşümü (FFT) tekniği [52] ile yapılabilir. FFT ile birlikte 3D görüntülemenin hesaplama süresinde de etkili bir azalma meydana gelir. Sunulan yeni yöntemle 3D GPR görüntülemenin hafıza gereksinimi ve hesaplama karmaşıklığı azaltılmıştır.

1.5 Tez Planı

Bu tez çalışmasının planı şu şekildedir:

2. bölümde GPR ile görüntülemede kullanılan parametreler ve GPR görüntüleme yöntemleri açıklanmıştır. Görüntüleme yöntemlerinin matematiksel temelleri anlatılmış, başarımları sonuçları verilmiş ve sonuçlar karşılaştırılarak görüntüleme yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları çıkarılmıştır.

3. bölümde GPR ile görüntüleme çalışmaları için gerçekleştirilmiş, veri modelleyebilen ve modellenen veriyi anlatılan görüntüleme yöntemleri ile işleyebilen GPR veri simülatörü detayları ile anlatılmıştır. Uygulama örneği ile veri modülünün kullanımı açıklanmıştır.

4. bölümde sıkıştırılmış algılama ile duvar arkası görüntüleme konusu anlatılmıştır. Sıkıştırılmış algılama ve duvar arkası görüntülemenin nasıl entegre edileceği açıklanmıştır. Şu ana kadar irdelenmemiş olan çeşitli senaryo durumlarının CS performansına etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde verilmiştir.

5. bölümde 3D GPR görüntüleme için önerilen yeni yöntem detayları ile açıklanmış, başarımları sonuçları irdelenmiştir.

6. bölümde tezin sonuçları ve gelecek çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

2. GPR GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMLERİ

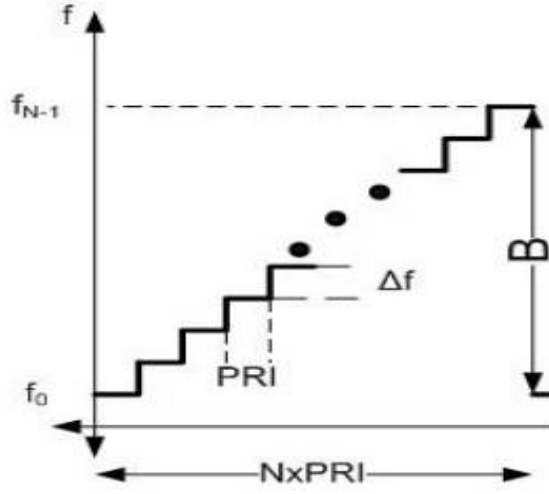
Yer altı görüntüleme radarı ile engel arkası çalışmaları gerçekleştirilirken bilinmesi gereken bazı temel parametreler mevcuttur. Temel parametreler ile beraber sistemin modellenmesi ve işlenmesi gibi GPR ile görüntüleme uygulaması ana başlıklarının anlaşılması gerekir. Bu bölüm bir GPR sistemi için bilinmesi gereken temel noktaları açıklar.

2.1 Basamak Frekans Sürekli Dalga Sistemler ve Temel Sistem Parametrelerinin Bulunması

Basamak frekanslı sürekli dalga (SFCW) radar sistemi belli bir başlangıç frekansı f_0 dan başlayarak sabit Δf frekans basamaklarıyla sürekli olarak ardarda N tane tek ton frekans sinyallerini gönderip yansımaları toplayarak çalışan bir sistemdir. Frekans vs. zaman alanında SFCW radar dalga yapısı Şekil 2.1'de verildiği şekilde olmaktadır.

SFCW radar tek bir uzaysal noktada Şekil 2.1'deki gibi N adet frekans sinyalini göndermekte ve ondan sonra bir sonraki uzaysal noktanın ölçümünü almak için hareket etmektedir. Şekil 2.1'de belirtilen değişkenlerden sırasıyla;

- f_0 : Başlangıç frekansını, (Hz).
- f_{N-1} : Bitiş frekansını, (Hz).



Şekil 2.1: SFCW dalga yapısı.

- N : Frekans basamak adetini, (birimsiz).
- Δf : Frekans basamak genişliği, (Hz).
- B : Sistemin kullandığı bant genişliğini, ($B = f_{N-1} - f_0$) veya ($B = N\delta f$), (Hz).
- PRI : Tek bir frekans basamağının gönderilme süresi olarak tanımlanmıştır.

2.1.1 Sistem parametrelerinin tanımlanması

SFCW tabanlı bir EAGR sisteminin tasarlanmasında ilk olarak sistemin ulaşması gereken tasarım hedefleri veya özelliklerinin yanında sistem tasarımında değiştirilebilen (kontrol edilebilen) ve değiştirilemeyen (kontrol edilemeyen) özelliklerin belirlenmesi gereklidir. Aşağıda bu noktalar kısaca tanımlanmış ve daha sonra birbirleriyle ilişkileri detaylı olarak incelenmiştir.

Engel arkası görüntüleme sistemi için belirlenen sistem hedef alanları (kısıtları) şunlardır:

- **Erişim Menzili (R):** Sistemin kesin olarak bulması hedeflenen en düşük RCS değerli (RCS_{min}) bir hedefin karıştırılmadan belirlenmesi gereken minimum hedef menzildir. Sistemin bu menzilden küçük her menzilde en az belirlenen RCS değerindeki hedefleri bulabilmesi veya görüntülemesi gerekmektedir. Bu menzilden daha uzaktaki hedefler örtüşme sonucunda daha yakında gibi gözükabilir.
- **Menzil Çözünürlüğü (ΔR):** Sistemin menzil boyutunda sağlaması gereken çözünürlük değerini belirtir.
- **Yanca Çözünürlük (ΔCR):** Sistemin yanca boyutunda (cross range) iki hedefi birbirinden ayırt edebildiği en düşük mesafedir.
- **Sistem Tarama Hızı (V_s):** Sistemin engeli tararken çalışması gereken maksimum hız değerini ifade eder.
- **Güç Kaynağı:** Sisteme sağlanabilecek güç kaynağının hangi voltaj aralıklarını sağlaması ve çekmesi gereken maksimum güç bir tasarım parametresi olarak verilebilir.
- **Çalışma Sıcaklığı (T):** Sistemin verilen kısıtları başarıyla sağlayarak çalışması gereken sıcaklık aralığı tasarım kısıtı olarak verilir.

Sistem tasarımcısı bu hedefleri sağlayan bir sistemi tasarlarken kontrol edebildiği ve kendisinin tasarlayacağı bazı parametrelerin yanında kontrol edemediği ancak genel olarak belli aralıklar içinde sistem kısıtlarının sağlanabileceği parametreler mevcuttur. EAGR sisteminde tasarımcının kontrolünde olmayan ve değişik senaryolar için farklılık gösterebilecek ve tasarım yapılırken ele alınması gereken parametrelerin şunlar oldukları kararlaştırılmıştır:

- **Engelin çeşidi:** Duvar ötesi görüntüleme için duvar malzemesinin çeşidi, duvarın kalınlığı bunlara bağlı olarak duvarda gerçekleşen yansıma ve geçme katsayıları, duvarda dalganın yaşadığı kayıp ve dalganın duvar içindeki hızı gibi parametreler tasarımcının kontrolü dışındadır. Ancak bu noktada daha önce belirtilen sistem hedeflerinin nasıl bir engel çeşidiyle (ör. Beton duvar) ve kalınlığında (ör. maksimum $W = 30$ cm) çalışması gerektiği de kısıtlara eklenebilir. Benzer kontrol edilemeyen parametreler yer altı görüntülemede toprak çeşidi vb. konularla da ele alınabilir [1].
- **Hedef Radar Kesit Alanı:** Algılanması istenilen hedefin yaklaşık radar kesit alanları (RCS) değişiklik göstermekle beraber tasarımcının kontrolü dışındadır. Tasarımın belirlenen maksimum menzildeki algılanması istenilen en düşük RCS değerine sahip hedef için yapılması uygun olacaktır. Farklı senaryolarda RCS seçimi örnekleri [53, 54] çalışmalarında mevcuttur.

Tüm bu kısıtlamaların yanında tasarımcı SFCW tabanlı bir EAGR sistemi için aşağıdaki sistem parametrelerini de bilmelidir.

- **Verici Gücü:** İstenilen ulaşılabilir menzil değerinin kontrol edilemeyen engel ve hedef durumlarını da göz önüne alarak vericinin gönderdiği maksimum gücün ne olması gerektiği.
- **Verici ve Alıcı Anten Kazançları:** Sistemde kullanılacak antenlere bağlı olan bu değerler anten tasarımı veya seçiminde rol oynayacaktır.
- **Dinamik aralık, kesin menzil, minimum SNR, Intermediate Frequency (IF) ve IF Frekans Bant Genişliği (BIF) ve PRI süresi ve toplam tarama süresi.**

2.1.2 GPR Sistemlerindeki Genel Tanımlanabilecek Parametreler

Bu kısmın geliştirilmesinde [55, 56] çalışmalarından faydalanılmıştır.

Menzil Çözünürlüğü: Engel arkası görüntüleme sistemlerinde menzil çözünürlüğü aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Delta R = \frac{c}{2\beta} = \frac{c}{2(f_{N-1} - f_0)} \quad (2.1)$$

Dielektrik özellikler içindeki menzil çözünürlükleri ise;

$$\Delta R = \frac{c}{2\beta\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.2)$$

formülasyonu ile ifade edilir. Denklem 2.2'de ϵ_r ortamın bağıl dielektrik sabitidir. Sistem tasarımcısının kontrolünde olmayan bu parametrenin alabileceği değer aralıkları için gerekli ΔR kısıtını gerçekleştiren bant genişliği β seçilmelidir.

Kesin Menzil: Sistemin kesin (örtüşme olmadan) belirleyebileceği maksimum menzil değeri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$R_u = \frac{c}{2\Delta f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.3)$$

Burada $\epsilon_r = 1$ değeriyle duvar ötesi sistemler için ulaşılabilecek kesin menzil değeri elde edilecektir. Bu noktada R_u değerinin sistem performans hedefi olarak belirlenen maksimum ulaşılabilen menzil R 'den büyük olması gerektiği görülmektedir. R 'den büyük bir R_u değerinin belirlenmesi sistemin frekans basamak değeri Δf 'i ve dolayısıyla sistemin toplam basamak sayısı N değerini belirlemektedir.

Pulse Repetition Interval (PRI): SFCW sistemleri her frekans basamağında sistem tek bir frekans gönderir ve bu frekans basamağına ait süre içinde de istenilen menzilden geri yansımanın alıcıya ulaşması gerekmektedir (transmission time - t_t). Bu süre içinde ayrıca verinin sistem tarafından bir süre alınması (data capture

time - t_{dc}) ve sistemin bir sonraki basamağa geçebilmesi için sentezleyicinin gerektirdiği sürenin (synthesizer step time - t_{su}) bulunması gerekmektedir. Bu bakımdan PRI aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$PRI = \frac{2R}{c} + t_{dc} + t_{su} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'de t_{su} değeri tasarlanan devre ve donanımdan gelen bir parametredir. Ne kadar süre bu frekansta verinin toplanacağını belirleyen süre olan t_{dc} ise o frekansta evreyuymulu (coherent) toplamdan oluşacak SNR kazancını belirleyecektir. R değeri için kesin menzil R_u değeri alınırsa aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir.

$$PRI = PRI > 1/\Delta f \quad (2.5)$$

IF Merkez frekansı ve IF Frekansındaki Bant Genişliği: PRI'ın belirlediği bir diğer önemli parametre de IF frekansında kullanılması gereken minimum bant genişliği B_{IF} 'tir. Tek bir frekans f 'in basit bir pulse olarak τ zaman süresinde anlık frekans bandı f merkez frekansı etrafında $1/\tau$ olduğundan SFCW radarın anlık bantgenişliği $1/PRI$ 'dir. Alıcının IF frekansına indirilen sinyalleri filtrelerken kullanılması gereken filtrelerin bant genişliği en az sinyalin anlık bant genişliği kadar olmalıdır ki sinyalin bir kısmı filtreleme esnasında kaybolmasını B_{IF} 'in daha da artırılması ise fazladan gürültü gücü ekleyeceği için B_{IF} tasarım kriteri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$B_{IF} = \frac{1}{PRI} \quad (2.6)$$

IF merkez frekansı ise radar sistemlerinde 'flicker' gürültüsünü engellemek için sinyalin DC yerine indirildiği ara frekanstır. Genellikle geliştirilen sistemlerde 2-5 MHz civarında kullanıldığı görülmektedir.

Erişim Menzili: Radarın erişim menzilinün bulunması için menzili R olan hedeften yansıyan gücün radarın duyarlılığından yüksek olması gerekmektedir. Geri yansıyan gücün hesaplanması için değiştirilmiş bir radar menzil denklemi kullanılabilir ancak bu konuya girilmeden önce radarın duyarlılığının açıklanması gerekir.

Radara duyarlılık seviyesi: Radar sistemi eğer hedeften yansıyan gücün algılanabilmesi için gerekli olduğu seviyeyi ifade etmektedir. Duyarlılık alınan sinyal gücünün alıcıdaki gürültü gücünden belli bir SNR değeri yukarısında olmasını gerektirir. Sistemin alıcısındaki gürültü gücü aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$N = kT_0 B_{IF} F \quad (2.7)$$

Denklem 2.5'de k Boltzmann sabiti, T_0 standart sistem sıcaklığı (290 K), B_{IF} ara frekans değerindeki bant genişliği ve F ise alıcının toplam gürültü figürüdür.

Alınan Güç: Alıcıdaki güç aradaki engelden kaynaklanan kayıplar L_w de eklenerek aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$P_r = \frac{P_T G_T G_R \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L_s L_w} \quad (2.8)$$

Denklem 2.8'de P_T vericinin gücü, G_T ve G_R verici ve alıcı antenlerin kazançları, σ hedefin radar kesit alanını, λ kullanılan dalga boyunu, L_s sistem kayıplarını ve L_w ise duvar gibi bir engelden kaynaklanan kayıpları ele almaktadır.

Denklem 2.7 ve 2.8 beraber ele alınarak erişilebilir menzil şu şekilde ifade edilebilir.

$$R^4 = \frac{P_T G_T G_R \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 L_s L_w k T_0 B_{IF} F (SNR)} \quad (2.9)$$

Dinamik Aralık: Alınabilen en büyük sinyal değerinin en küçük sinyal değerine oranına dinamik aralık denir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$DA = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{MAX}}{P_{MIN}} \right) \quad (2.10)$$

Engel arkası görüntüleme için dinamik aralık şu şekilde tanımlanır.

$$DA = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{r1}}{N} \right) \quad (2.11)$$

Yanca Çözünürlük (Cross-range resolution) ve Tarama Hızı: Bir sistemin yanca çözünürlüğü hedefin menziline (R) ve antenin beam genişliğine (θ_{az}) göre aşağıdaki gibi verilir.

$$\Delta CR = R\theta_{az} \quad (2.12)$$

Bu yanca çözünürlük uzak alan durumunda, yani menzilin $R > 2D^2/\lambda$ durumunu sağladığında geçerlidir. Burada D antenin etkin çapı ve λ kullanılan dalga boyudur. Beam genişliği $\theta_{az} = \lambda/D$ olarak da kullanılabilir.

2.2 EAGR için Veri İşlenmesi ve Analizi

Genel olarak EAGR için veri analizi ve işlenmesi aşağıdaki alt konular üzerinde incelenecektir:

- Modelleme
- Ön işleme metotları
- Görüntüleme metotları

2.2.1 Modelleme

EM dalganın antenden çıkışından ortamlarla etkileşimi ve geri gelmesine kadar olan hareketinin doğru olarak anlaşılabilmesi, bunların yanında gürültü, parazit yansıma ve ortam parametrelerinin kestirimi gibi konuların doğru olarak kavranması her bir parça sinyalin doğru modellenmesine dayanır. Modelleme konusunda çeşitli literatür araştırmaları [57, 58] yayınlanmıştır.

Gönderilen EM dalgasının yayılmasını ve genellikle de yeraltı veya engeli oluşturan ortam ile ilişkisini benzetim yoluyla oluşturmaya çalışan çalışmalar genel olarak bir kaç gruba ayrılabilirler. Bunlardan en basit fakat en yaygın olarak

kullanılanı 'ray-tracing' olarak adlandırılan ışık yayılım modelini kullanarak elde edilecek veriyi modellerler. Bu tür çalışmalara örnek olarak [59, 60, 61, 62, 63, 64] verilebilir. Bunun yanında ortamı daha iyi modelleyen ve özellikle kayıplı ve dağıtıcı ortam özelliklerini de modellemeye katabilen ama 'ray-tracing' metoduna göre çok fazla hesaplama yükü de içeren sonlu alan zaman farkı (finite domain time difference FDTD) metotları da kullanılmaktadır. Bu tür modelleme çalışmalarının içinde [65, 66, 67, 68, 69, 70] sayılabilir. Bu ana modelleme yöntemlerinin yanında elektromanyetik tam dalga analizi [71] veya rastgele şekle sahip herhangi dielektrik hedefteki saçılmayı modelleyen EM tabanlı çalışmalar [72] veya Galerkin metodu [73] gibi değişik modelleme çalışmaları da yapılmıştır.

2.2.2 Ön İşleme Metotları

Direk toplanan GPR verileri görüntüleme veya algılama algoritmalarının kullanılmasından önce bir dizi ön işlem den geçirilir. Bundaki amaçlar parazit yansıma, engel yansıması, gürültü vb. gibi istenmeyen sinyal kısımlarının azaltılması ve bunun yanında da görüntüleme ve algılamada kullanılacak bazı parametrelerin kestirilmesidir.

2.2.2.1 Sinyalin DC kısmını süzme (Dewow Filtering)

Bu ön işlemin amacı sinyalde bulunan DC biası veya düşük frekans trendini çıkarmaktır. Bu işleme 'dewow filtering' veya 'zero-offset removal' da denmektedir. Kaydedilen sinyalin saturasyonundan veya induktif etkileşimden kaynaklanan bu etkiler DC biasın çıkarılmasını ve [74, 75, 76] araştırmaları gibi çalışmaların uygulanmasını gerektirir.

2.2.2.2 Engel sınırından yansımaların çıkarılması

GPR veri işleminin ana problemlerinden bir tanesi engel sınırından kaynaklanan yansımaların temizlenmesidir. Bu yansımalar ortama işleyip bir hedeften yansıyan sinyalin gücüne göre çok daha yüksek oldukları için ortamın görüntülenmesi ve hedeflerin algılanmasındaki en büyük engellerden birini oluşturmaktadır. Bunun

için görüntüleme ve algılama algoritmaları uygulanmadan bu tür yansımaların veriden temizlenmesine çalışılmaktadır. Bu konuda [77, 78] çalışmalarında değişik yöntemler karşılaştırılmıştır. Bunlar kısaca;

Ortalama A-tipi verinin çıkarılması: Tüm B-tipi veriden ortalamaıyla elde edilen A-tipi veri, her bir A-tipi veriden çıkarılarak hava-yer yansımalarını ortadan kaldırmaya hedefleyen bir yöntemdir. Klasik ve çok geniş olarak kullanılan bu yöntem genel olarak yatay sınırlar için iyi çalışabilirken, birçok durum için tamamen yetersizdir.

Yatay olarak yüksek geçiren bir Butterworth filtresinin uygulanması: Değişik arka plan sinyallerini başarılı olarak azaltmasına rağmen, hedeften kaynaklanan hiperbolik sinyal yapısını da değiştirebilir.

Ayrık Parçacık Dönüşümü (Discrete Wavelet Transform): Metot yatay yönde ayrık parçacık dönüşümü uygulanmasını ve düşük frekansların katsayıların sıfırlanarak ters dönüşümün alınmasıyla hava-yer yansımalarının azaltılmasını hedeflemektedir. Döbuchi parçacıkları kullanılmıştır. Başarılı sonuçlar gösterilmesine rağmen, hesaplama maliyeti belirtilmemiştir.

Pencereli Ortalama Çıkarması: Burada çıkarılacak A-tipi veri tüm B-tipi verinin ortalaması yerine sadece uygulanacak sinyalin etrafında bir penceredeki sinyaller kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada uygulanacak sinyal etrafında 'guard' hücreler de kullanılabilir. Gerçekleştirilen uygulamalarda son iki algoritmanın en başarılı olduğu belirtilmektedir.

2.2.2.3 Parazit Yansımaların Azaltılması

Engel yüzeyinden kaynaklanan yansımaların azaltılmasının yanında ortamın homojen olmamasından ve hedef dışındaki yansıtıcılardan kaynaklanan parazit yansımaların da azaltılması EAGR verisinin görüntüleme ve algılama işlemlerinden önceki kalitesinin artırılması için önemli bir basamaktır. Bu konudaki çalışmalardan [79]'da parazit yansımalar parametrize edilerek bu parametrelerin kestirimi ve daha sonrada kestirilen kısmın çıkarılması gibi bir filtreleme yöntemi uygulanmıştır. Nöral ağları ve öz uzay dönüşümleri kullanılarak parazit yansımaların azaltılması çalışmalarının yanında [80] ana bileşen analizi ve bağımsız bileşen

analizi yöntemleri parazit yansımaların azaltılması için kullanılmış ve karşılaştırılmıştır [81] . Adaptif yöntemlerden sentetik açıklıklı veri toplama yöntemleri için parçacık dönüþümü [82] ve istatistiksel veri işleme yöntemleri [83] kullanılmıştır. Zor ortam şartlarında da başarılı olduğu iddia edilen yöntem deneysel ölçümlerle denenmiştir. [84] çalışmasında Wigner-ville dağılımıyla zaman-frekans analizi yapılarak parazit yansımalar azaltılmaya çalışılmıştır.

2.2.2.4 Sıfır Zamanının Belirlenmesi

Termal kayma, elektronik kararsızlık, kablo uzunlukları vb. farklılıklar bazen uzay-zaman verisinde hava ve yüzey seviyesinde zıplamalara neden olabilmektedir [85]. Bu farklılıkların görüntüleme ve algılama işlemleri uygulanmadan önce düzeltilmesi gerekmektedir. Bu noktada A-tipi ölçümlerin tümü için ortak bir kriter belirlenerek hepsinin aynı sıfır zamanına gelmesi sağlanır.

2.2.3 Görüntü Oluşturma Metotları

GPR için kullanılan ve geliştirilmiş olan görüntü oluşturma metotlarının temeli sismik veri işleme yöntemlerine dayanmaktadır [86, 87, 88, 89]. 'Migration' veya 'backprojection' olarak bahsedilebilecek bu metotların temel amacı engeli oluşturan ortamın içi veya arkasındaki hedeflerin doğru olarak fiziksel pozisyonları, şekilleri vb. konularda bilgi sağlamaktır. Raporun bu kısmında GPR için kullanılan temel görüntüleme metotları bir literatür araştırması olarak belirtilecektir. Bu metotların çalışmalarının açıklanması, detayları konusunda verilen referanslardan faydalanılması gerekmektedir.

2.2.3.1 Geri Çatma Yöntemi

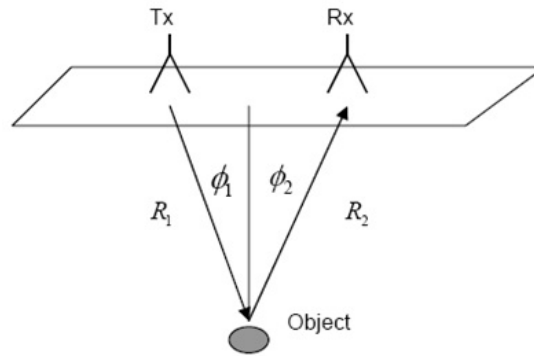
Zaman alanında en yaygın olarak kullanılan metotlardan birisi standard geri çatma (backprojection) metodudur. Detaylı bilgi için [90, 91] ulaşılabilir. Bu yöntem elde edilen veri tipine göre iki şekilde gerçekleştirilir. Eğer veri frekans ortamında oluşturulmuş ise uygulanan yöntem frekans alanında geri çatma yöntemi, eğer veri zaman ortamında oluşturulmuş ise uygulanan yöntem zaman

alanında geri çatma yöntemi olarak isimlendirilir. Temel olarak iki yöntem de sistemin veri toplama işlemine dürtü yanıtının uyumlu filtresini uygulayarak görüntü oluşturulması şeklinde tanımlanabilir. Gerçekleştirilen çalışmalar da noktasal hedefler kullanılmıştır. Noktasal hedeflerin oluşturduğu uzay-zaman yanıtı hiperbolik bir şekle sahiptir. Geri çatma metodu her bir uzaysal nokta için bu hiperbolik şekle karşılık gelen verilerin ağırlıklı toplamı olarak da tanımlanabilir. Matematiksel olarak geri çatma şu şekilde ifade edilir.

$$f(x_n, y_n, z_n) = \int \int w(u_x, u_y) d(u_x, u_y, t) \delta(t - \tau(u_x, u_y, z_n)) dt \partial u_x \partial u_y \quad (2.13)$$

Denklem 2.13 ' de $d(\cdot)$ toplanan veri, $f(\cdot)$ oluşturulan görüntü, $w(\cdot)$ açıklık ağırlık fonksiyonu, ve τ ise anten ile görüntü değeri oluşturulan nokta arasındaki dalga gidiş-geliş zamanıdır. Her bir (x_n, y_n, z_n) uzaysal noktası için denklem 2.13 uygulanarak o noktanın görüntü değeri hesaplanır. Geriçatma yöntemi uygulama olarak basit olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmakla beraber hesaplama gereksinimi yüksek metotlardan bir tanesidir.

Frekans Alanında Geri Çatma Yöntemi: Frekans alanında geri çatma ile görüntüleme yöntemi ham verilerin frekans ortamında elde edildikten sonra bu verilere geri çatma algoritması uygulanması olarak özetlenebilir. Genel olarak düşünülen yer altı radar sistemi şekil 2.2 de gösterilmiştir. Tx verici anten, Rx alıcı anten, R_1 ve R_2 ise antenlerin nesneye olan uzaklıklarıdır.



Şekil 2.2: GPR yapısı

Uygulanan yöntemde 2-D bir görüntüleme gerçekleştirilmiştir. Sistem x-z eksenlerde olduğu varsayılmıştır. Z eksen derinlik, X eksen ise radarın pozisyon bilgisini içermektedir. Yere işleyen radarın x ekseninde belirli aralıklar ile tarama yaptığı varsayılmıştır. Radarın bulunduğu her noktada, taranan bölgenin belirlenen sınırlar içerisinde ve belirli aralıklarda bulunan her noktası için R1 ve R2 uzaklıkları hesaplanarak gereken zaman gecikme bilgisi elde edilmiştir.

$$u(r', t) = \int \int w(r)u(r, t + ((R_1 + R_2)/v))\partial x\partial y |_{t=0} \quad (2.14)$$

Denklem 2.14 göz önünde bulundurularak modellenmiş veri işlenir. Burada $w(r)$ ağırlıklı yansıma katsayısını, $u(r, t + ((R_1 + R_2)/v))$ ifadesi modellenen verinin ilgili zaman noktasındaki değerini temsil eder.

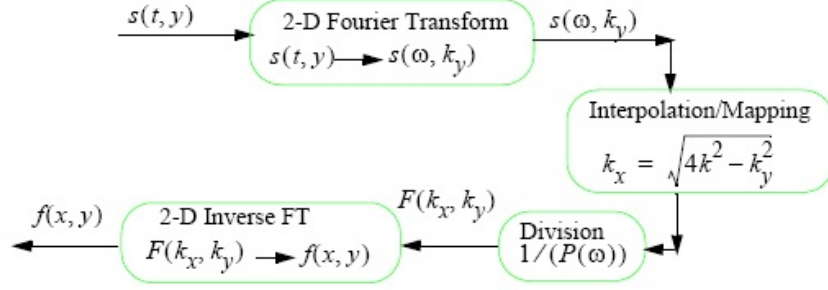
Zaman Alanında Geri Çatma Yönteminin Uygulanması: Zaman alanında geri çatma yönteminde ham veri, frekans alanında elde edilen verinin ters FFT si alınarak oluşturulur. Zaman alanında geri çatma yönteminin uygulanması, zaman alanında oluşturulan verinin, bulunan zaman gecikmesine karşılık gelen o andaki değerlerinin bulunarak bunların toplanmasıdır.

Bu iki geri çatma yönteminin başarımları karşılaştırılacak olursa, ikisinde hedefi bulma ve sunduğu çözünürlük bakımından benzer olduğu söylenebilir. Farklı olarak zaman alanında ters FFT gibi işlemler yapıldığı için ikinci yöntemin işlem olarak daha yoğun olduğu söylenebilir.

2.2.3.2 F-K (Stolt) Migration Yöntemi

Frekans alanında kullanılan görüntüleme yöntemlerinin başında F-K (frequency-wavenumber) migration veya Stolt migration adı verilen yöntem gelmektedir [92]. Bu yöntemin genel olarak şekil 2.3 deki yapıda olduğu söylenebilir.

Burada uzay-zaman alanındaki veri veya frekans alanında toplanan veri 2D FFT ile frekans alanına taşınır ve burada stolt eşleştirmesi denen interpolasyon uygulanarak 2D IFFT ile görüntü oluşturulmaktadır [93, 94]. FFT tabanlı bir metot olduğundan hızlı çalışmakla beraber metot tek ve homojen bir ortam



Şekil 2.3: Stolt migration yapısı

kabullerine dayanır. Katmanlı (hava-yer veya duvar ötesi) ortamlarda direk kullanılırken görüntüleme ve metodun konumlandırma kabiliyeti azalmaktadır. Bu yöntemde hız değişim profiline katmanlı ortamlara uyarlanması çözülmesi için çeşitli metotlar denenmiş, başarılı sonuçlar alınmasına karşın hesaplama yükünün fazla oluşu ayrı bir problem olarak meydana çıkmıştır. Hız değişim profiline uyarlanma probleminin çözülmesi için faz kaydırmalı migration yöntemi [95, 96] tasarlanmıştır. F-K migration yönteminin uygulama basamakları aşağıdaki gibidir:

- Gerekli ham veri oluşturulmalıdır.
- Oluşturulan ham veri 2-D fourier dönüşümü ile frekans ortamına taşınır.
- K uzayına geçiş gerçekleştirilmelidir.
- K uzayı geçişinde gereken iç değer bulma (interpolation) ve yerleştirme (mapping) algoritmaları gerçekleştirilmelidir.
- İç değer bulma işleminden sonra oluşan verinin ters FFT si alınarak görüntülenecek veri bulunmuş olur.

2.2.3.3 Kirchoff Migration Yöntemi

Kirchoff migration yöntemi [97] zamanda geri çatma yöntemine benzer bir matematiksel alt yapıya sahiptir. Temelde dalga denklemi bazlı bir algoritmadır ve kirchoff ile helmholtz integralleri [98] kullanılarak oluşturulmuştur. Geri çatma yöntemiyle karşılaştırıldığında daha iyi bir görüntü kalitesi ve düşük sidelobe seviyesine sahiptir.

Kirchoff migration yöntemi zamanda geri çatma yönteminden farklı olarak zaman ortamında elde edilen verinin türevini işleme sokmasıdır. Geri çatma yöntemindeki gibi zaman gecikmeleri bulunur ve verinin türevinin o andaki değerleri çeşitli sabitlerle çarpılarak teker teker toplanır. Kirchoff algoritmasının matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$u(r', t) = \frac{1}{2\pi} \int \int \frac{(\cos \phi)}{(vR)} \frac{du}{dt} \left(r, t + \frac{2R}{v} \right) \partial x \partial y \Big|_{t=0} \quad (2.15)$$

Denklem 2.15 ifadesi multistatik anten için geçerlidir. Alıcı ve verici antenin aynı yapıda olması durumunda geçerlidir. Buradaki ϕ açısı hedefe olan uzaklık ve anten arasındaki açıdır. Alıcı ve vericinin farklı antende olduğu durumu için 2.16 ifadesi kullanılır.

$$u(r', t) = \int \int \frac{(\cos \phi_1 + \cos \phi_2)}{v} \frac{du}{dt} \left(r, t + \frac{(R_1 + R_2)}{v} \right) \partial x \partial y \Big|_{t=0} \quad (2.16)$$

Başarım olarak geri çatma yöntemine göre daha net bir şekilde hedefleri bulur. Hedefler etrafındaki bozulmalar daha azdır.

Yukarıda belirtilen görüntüleme yöntemleri genel yöntemler olup duvar ötesi görüntüleme konusunda da kullanılabilir. Beraber, bu uygulama için daha özel metotlar da geliştirilmiştir. Dizilim sinyal işleme metotlarından 'beamforming', duvar ötesi görüntüleme ve konumlandırma yöntemi olarak uygulanmıştır [99, 100]. Bu araştırmalarda duvardaki kırılma ve gecikmeler doğrusal bir dizilim veya sentetik açıklıkla oluşturulmuş sentetik bir dizilim verisinde 'delay-and sum beamforming' kullanılarak görüntü oluşturulmaya çalışılmıştır. Dağınık radar sensor sistemleriyle kablosuz haberleşme de kullanarak duvar ötesi görüntüleme ve hareket tespiti yapan çalışmaların [101] yanında duvar özellikleri hakkında

herhangi bir önkabul yapmadan otofokus yöntemi kullanarak duvar ötesi görüntüleme yapan çalışmalar [102] da vardır. Bu çalışmaların yanında temeli geriçatma metodu olan duvar ötesi görüntüleme yöntemleri [103] ve tomografi benzeri yöntemler [104] de bu alanda uygulanmış metotlardır.

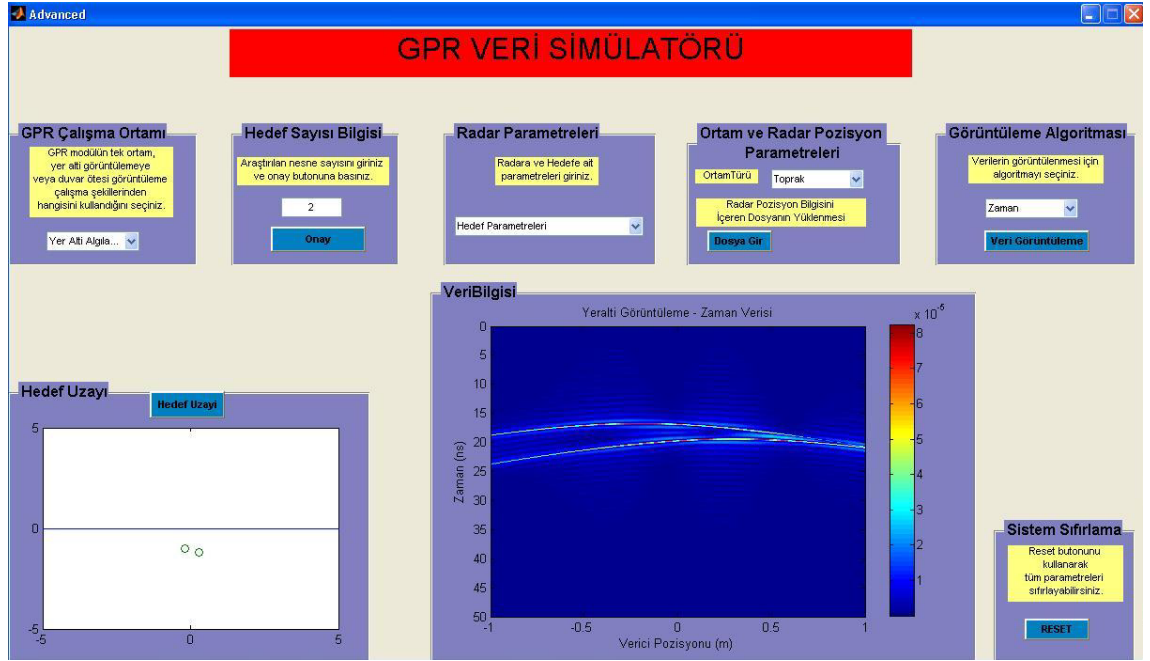
3. GPR İÇİN VERİ BENZETİM MODÜLÜ

Yere işleyen radar (GPR) veri benzetim ortamı, tasarlanan çeşitli değişik senaryolar üzerinden veri elde etmek için hazırlanmış bir simülasyon programıdır. Matlab GUI arayüzü ile tasarlanan bu simülasyon, kullanıcıya senaryosunu geniş bir şekilde kontrol etme imkanı verir. Ayrıca sistem için gereken çeşitli parametreler de kullanıcının yönetimindedir. Temel GPR teorisi üzerine kurulan bu modül kullanıcıya parametreler dışında, tasarlanmış farklı görüntüleme algoritmalarından seçerek birbirinden bağımsız algoritmalar ile GPR verisini işleme imkanı sağlar. Böylece kullanıcı elde ettiği GPR verilerini karşılaştırma ve kontrol etme imkanına sahip olur.

Veri benzetim ortamı çeşitli farklı senaryolar için (yer altı görüntüleme, duvar arkası görüntüleme ve tek ortam görüntüleme) veri elde edebilmesini sağlamaktadır. Seçilen radar sistemine göre radar parametrelerinin ve senaryoya bağlı ortam parametrelerinin kullanıcıdan alınmasından sonra farklı görüntüleme algoritmalarını ve sinyal işleme yöntemlerini uygulama imkanı sunulmaktadır. Modülün diğer simülasyonlardan farkı aynı anda farklı senaryolar ile çalışabilme imkanı sunan esnek bir yapısının olması ve ayrıca geliştirilen farklı görüntüleme algoritmaları ile veri görüntüleme ve bunları karşılaştırma imkanına sahip olmasıdır. Ayrıca modülün geliştirilebilir ve genişletilebilir olması en büyük avantajlarından biridir.

3.1 GPR Veri Benzetim Ortamı

GPR veri benzetim ortamı genel olarak 3 bölümde incelenebilir. Birinci kısım incelenen senaryo tipinin belirlendiği kısımdır. İkinci kısım gereken parametrelerin girildiği kısım, ve son kısım ise görüntüleme ve sinyal işleme algoritmasının seçildiği kısımdır. GPR veri işleme arayüzünün ana sayfası Şekil 3.1 de gösterilmiştir.

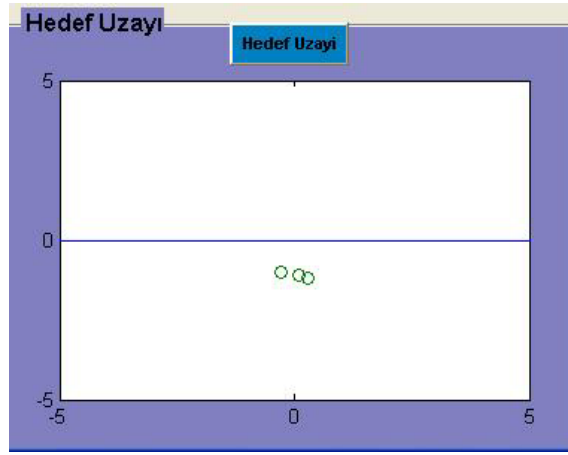


Şekil 3.1: GPR Veri Simülâtörü Ana Penceresi

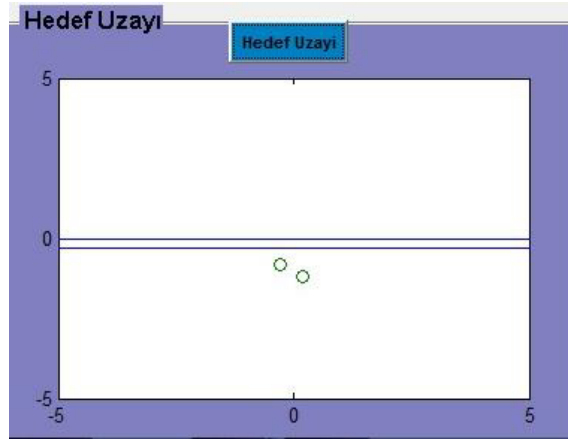
3.1.1 Senaryonun Belirlenmesi

Oluşturulan modül engel arkası görüntüleme senaryolarından 3 farklı tür için veri benzetimi yapabilir. Bunlar; homojen tek ortam, yer altı görüntüleme ve duvar arkası görüntülemedir. Homojen tek ortam tamamen aynı ortam içerisinde çalışma olarak tanımlanabilir. Yer altı görüntüleme metodu radar ve nesnenin farklı ortamda olduğu durum yani iki farklı ortam olarak tanımlanabilir. Duvar arkası görüntüleme ise nesne ve radar arasında farklı ortam özelliklerine sahip bir katman girmiş gibi düşünülebilir. Şekil 3.1 deki modülün GPR çalışma ortamı olarak isimlendirilmiş kısmı senaryo seçiminin yapılması imkanı sağlar.

Hedef uzayı olarak isimlendirilen grafiksel bölgede ise senaryonun nasıl olduğunu gösteren bir taslak grafik görüntülenebilir. Bu işlem hedef bilgilerini girdikten sonra hedef uzayının nasıl olduğunun görüntülenmesini sağladığı gibi GPR senaryosunu belirlerken de hedef bilgileri girilmemiş olsa bile nesne olmadan sistemin taslak görüntüsünün görüntülenme olanağını sunar. Örnek olarak Şekil 3.2(a) ve Şekil 3.2(b) de yer altı ve duvar arkası görüntüleme senaryolarının geometrisi gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.2: Engel Arkası Görüntüleme Hedef Uzayları a)Yer altı radar görüntüleme b)Duvar arkası görüntüleme

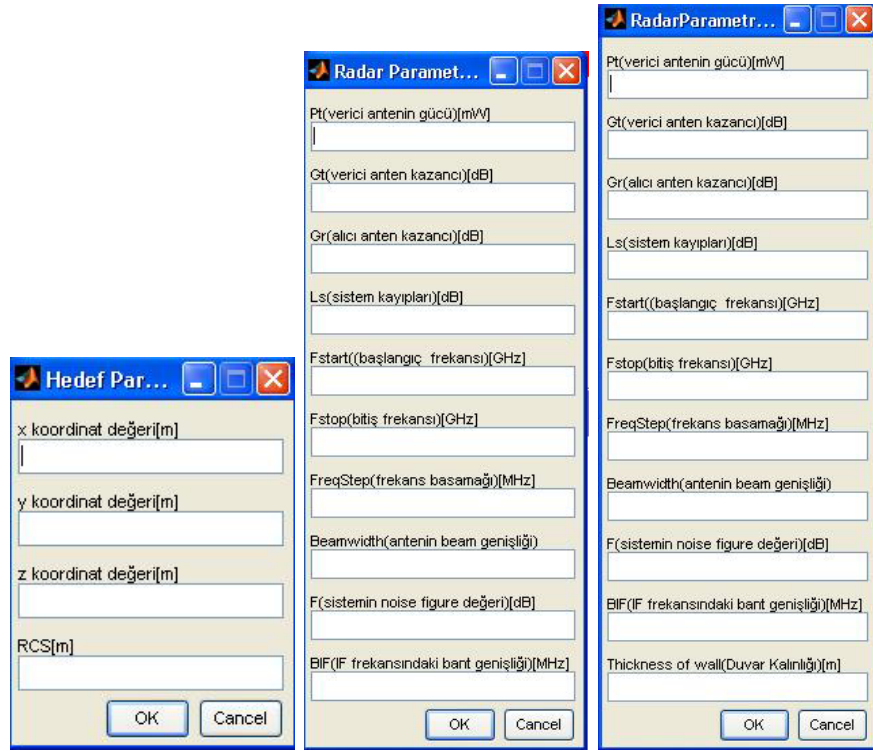
3.1.1.1 Parametrelerin Girilmesi:

Sistem parametreleri 3 temel bölüme ayrılabilir. Bunlar; hedeflerin bilgilerini içeren hedef parametreleri; radar kazançları, başlangıç frekansı, bitiş frekansı gibi temel radar parametreleri içeren radar parametreleri kısmı; ortamın çeşidinin seçilmesi ve radarın pozisyon parametrelerinin girildiği ortam ve radar pozisyon parametreleridir.

Hedef Parametreleri: Veri simülasyonunda hedefler noktasal yansıtıcılar olarak modellenmiştir. Modül, senaryodaki hedef sayısına göre giriş alabilme yeteneğine sahiptir. Öncelikle kullanıcı kaç adet hedef ile çalıştığını belirtmelidir. Bu işlem sonrası kullanıcı hedef parametre bilgilerini hedef sayısı kadar giriş bilgileri Şekil 3.3(a) daki gibi ayrı bir pencere de girebilecektir. Bu parametreler hedefin (x, y, z) koordinat değerleri ve RCS değerleridir. Bu parametreler girildikten sonra incelenen sistemin taslak görüntüsü oluşturulabilir. Hedef parametreleri giriş ekranı Şekil 3.3(a) da gösterilmektedir.

Radar Parametreleri: Sistem için gereken temel değerlerin alındığı kısımdır. Bu değerler seçilen senaryo tipine göre farklılık gösterir. Örneğin, duvar arkası görüntülemeye duvar kalınlığı parametresi diğer senaryolara göre ekstra istenen bir parametredir. Temel parametreler olarak kullanıcıdan istenen değerler şu şekildedir: Verici anten kazancı, alıcı anten kazancı, verici antenin gücü, sistem kayıpları, başlangıç frekansı, bitiş frekansı, basamak frekans değeri, antenin beam genişliği, sistemin noise figure değeri ve IF frekansındaki bant genişlik değeridir. Bu parametreler basamak frekans yapısında çalışan bir GPR için gerekli radar parametreleridir. Zaman alanında çalışan dürtü GPR yapısı da sisteme eklenecektir. Homojen tek ortam ve yer altı görüntüleme için bu parametreler değişmez. Duvar arkası görüntüleme için duvar kalınlığı ekstra istenir. Bu parametreler hedef bilgileri gibi ayrı bir pencere üzerinden girilir. Şekil 3.3(a), Şekil 3.3(b) ve Şekil 3.3(c) de bu pencereler görülebilir. Bu parametreler açılan pencerelerden alınarak sistemin ana sayfasının karmaşık görünmesinin önüne geçilmeye çalışılmıştır. Kullanıcıdan istenen parametrelerin birimleri değerlerin girildiği pencerede spesifik olarak belirtilmiştir.

Ortam ve Radar Pozisyon Parametreleri: Sistem içerisinde ortama bağlı değişen parametreler vardır. Bunlar dielektrik geçirgenlik, iletkenlik gibi ortamdan



(a)

(b)

(c)

Şekil 3.3: Hedef ve Radar Parametrelerinin Girişi a)Hedef parametrelerinin alındığı menü b) Yer Altı Görüntüleme için Radar parametrelerinin alındığı menü c) Duvar Arkası Görüntüleme İçin Radar parametrelerinin alındığı menü

ortama farklılık gösteren ortamsal özelliklerdir. Modülün bu kısmında ortam türü seçilerek bu değerler sisteme tanıtılır. Yani ortamsal özelliklerin bilinmesine gerek kalmadan kullanıcı, çalıştığı ortamı seçerek bunu gerçekleştirebilir. Geliştirilen veri benzetim ortamı için bu anda 3 farklı ortam seçeneği belirlenmiştir. Bunlar; hava, toprak ve betondur. Bunlar dışında da, istenilen her türlü ortam modüle eklenebilir. Böylece çok daha geniş bir çerçevede çalışma imkanına sahip olunur.

Radar pozisyon parametreleri ise radarın hangi pozisyonlarda ölçüm aldığı tanımlandığı kısımdır. Veri benzetim ortamında bu değerlerin simülatöre bağlılığını yok etmek ve esnek bir şekilde kullanıcı tarafından alınması sağlayacak bir sistem mevcuttur. Kullanıcı radar pozisyon bilgilerini içeren MATLAB veri dosyasını senaryosuna ekleyebilir. Böylelikle radarın pozisyon bilgileri sisteme tanıtılmış olur. Oluşturulacak pozisyon dosyası radarın ölçüm noktalarını $3 \times N$ lik bir matris şeklinde ifade edecek şekilde tasarlanmalıdır. Burada N ölçüm sayısını göstermekte ve her bir sütunda sırasıyla $[x; y; z]$ pozisyon bilgileri bulunmalıdır.

3.1.1.2 Benzetim Verisinin Gösterimi ve Sinyal İşleme Yöntemleri

Gerçekleştirilen simülasyon ortamı gerekli tüm giriş parametre değerleri girildikten sonra verileri zaman ve frekans alanında gösterebilmektedir. Şu anda basamak frekans alanında bir sistem için veri benzetimi yapılmakta ancak oluşturulan veri ters Fourier dönüşümü ve sentetik dalga yöntemiyle zaman alanına çevrilmektedir. Veri benzetim modülü, verilerin gösterilmesinin yanında; benzetim verisinin üzerinde bazı sinyal işleme yöntemleri uygulayabilmektedir. Bu görüntüleme yöntemleri şu anda zaman ve frekans alanındaki geri çatma yöntemleri, F-K (Stolt) migration ve Kirchoff migration yöntemleridir [105, 106, 107]. Görüntüleme algoritması seçildikten sonra ilgili imge veri bilgisi olarak adlandırılan kısımdan incelenebilir.

3.1.1.3 Sistem Sıfırlama

Modülün sağ alt köşesinde bulunan bu kısım sistemde kayıtlı tüm parametreler ve grafiklerin temizlenmesi sağlayan sistem sıfırlama bölümüdür. Sistemdeki tüm kayıtlı parametreler, değişkenler ve grafikler bu kısımda sıfırlanır. Böylece sistem

en baştan çalışmaya hazır hale gelir.

3.1.2 Uygulama Örneği

Uygulama olarak iki farklı senaryo belirlenerek bunların sonuçları gösterilmiştir. İlk olarak yer altı görüntüleme çalışması yapıldı. Kullanılan parametre değerleri şu şekildedir:

Radar Parametreleri

- Anten gücü (P_t) = 50 mW
- Verici Anten Kazancı(G_t) = 12 dB
- Alıcı Anten Kazancı(G_r) = 12 dB
- Sistem kayıpları(L_s) = 5 dB
- Basamak Frekansı = 4 MHz
- Başlangıç frekansı = 0.5 GHz
- Bitiş frekansı = 5.5 GHz
- Antenin beam genişliği = 40 derece
- Sistemin noise figüre değeri = 5 dB
- IF bant genişliği = 2 MHz dir.

Hedef Parametreleri

- **Nesne1** koordinat değerleri $(-0.3, 0, -1)$ m RCS = $0.5m^2$
- **Nesne2** koordinat değerleri $(0.1, 0, -1.1)$ m RCS = $1m^2$
- **Nesne3** koordinat değerleri $(0.3, 0, -1.2)$ m RCS = $1m^2$

Ortam olarak toprak ve beton kullanıldı. Radar pozisyon bilgileri de hazırlanan MATLAB dosyası ile sisteme eklendi. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.4 de gösterilmiştir. Şekil 3.4(a) ortamı toprak olan verinin frekans alanında elde edilen görüntüsüdür. Şekil 3.4(b) ortamı toprak olan verinin frekans alanındaki veriden yararlanılarak zaman alanında oluşturulan görüntüsüdür. Şekil 3.4(c)

ortamı toprak olan frekans alanındaki verinin geri çatma algoritması ile elde edilen görüntüsüdür. Aynı şekilde Şekil 3.4(d), 3.4(e), 3.4(f), aynı verilerin beton ortamındaki cevaplarıdır.

İkinci uygulama olarak duvar arkası görüntüleme senaryosu ele alındı. Uygulamada kullanılan parametre bilgileri şu şekildedir:

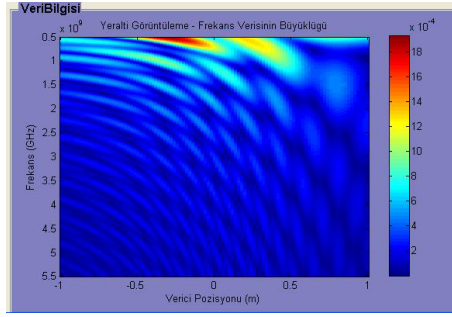
Radar Parametreleri

- Anten gücü (P_t) = 50 mW
- Verici Anten Kazancı (G_t) = 12 dB
- Alıcı Anten Kazancı (G_r) = 12 dB
- Sistem kayıpları (L_s) = 5 dB
- Basamak Frekansı = 4 MHz
- Başlangıç frekansı = 0.5 GHz
- Bitiş frekansı = 5.5 GHz
- Antenin beam genişliği = 40 derece
- Sistemin noise figüre değeri = 5 dB
- IF bant genişliği = 2 MHz
- Duvar kalınlığı = 0.3 m dir.

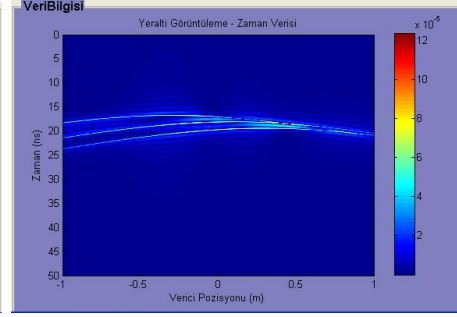
Hedef Parametreleri

- **Nesne1** koordinat değerleri $(-0.3, 0, -0.8)$ m RCS = $0.5m^2$
- **Nesne2** koordinat değerleri $(0.3, 0, -1.2)$ m RCS = $1m^2$
- $Z = 0$ ortamlar arası sınır olarak kabul edilmiştir.

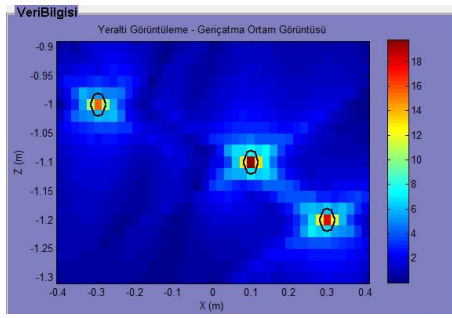
Ortam olarak beton kullanıldı. Radar pozisyon bilgileri de hazırlanan MATLAB dosyası ile sisteme eklendi. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.5 de gösterilmiştir. Şekil 3.5(a) ortamı toprak olan verinin frekans alanında elde edilen görüntüsüdür. Şekil 3.5(b) ortamı toprak olan verinin frekans alanındaki veriden yararlanılarak zaman alanında oluşturulan görüntüsüdür. Şekil 3.5(c) ortamı toprak olan frekans alanındaki verinin geri çatma algoritması ile elde edilen görüntüsüdür. Aynı şekilde Şekil 3.5(d), 3.4(e), 3.4(f) aynı verilerin beton ortamındaki cevaplarıdır.



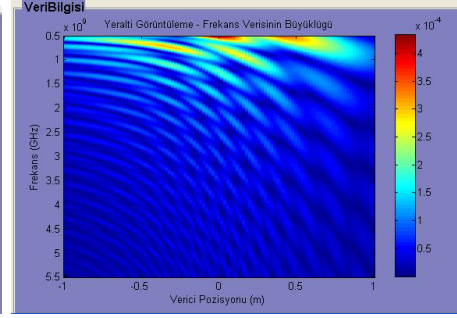
(a)



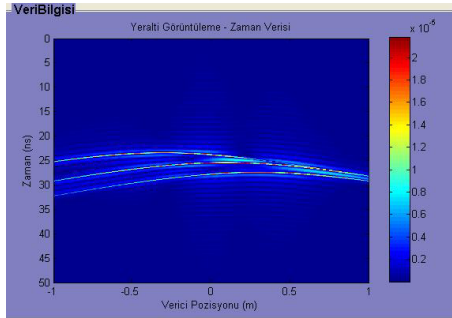
(b)



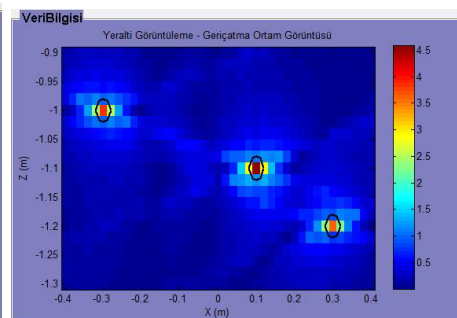
(c)



(d)

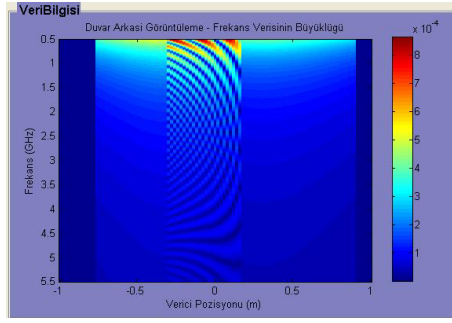


(e)

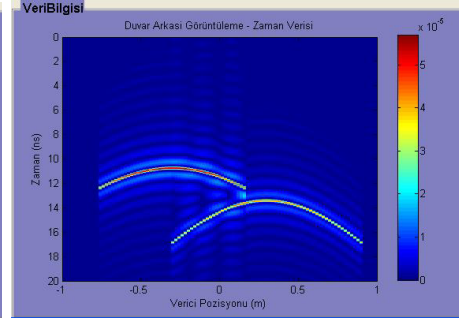


(f)

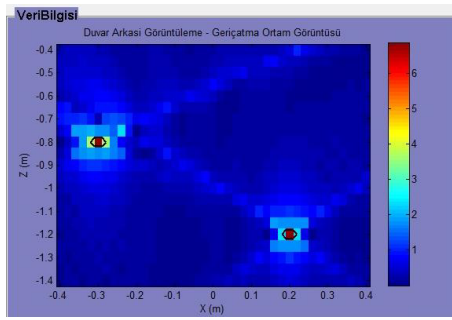
Şekil 3.4: Yer Altı Görüntüleme Uygulama Sonuçları a) Frekans Görüntüleme(Toprak) b) Zaman Görüntüleme(Toprak) c) Geri Çatma Görüntüleme(Toprak) d) Frekans Görüntüleme(Beton) e) Zaman Görüntüleme(Beton) f) Geri Çatma Görüntüleme(Beton)



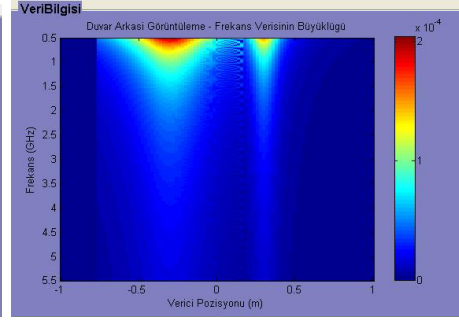
(a)



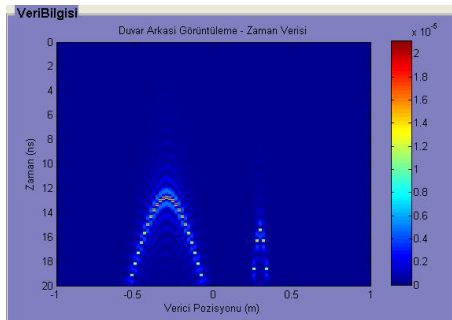
(b)



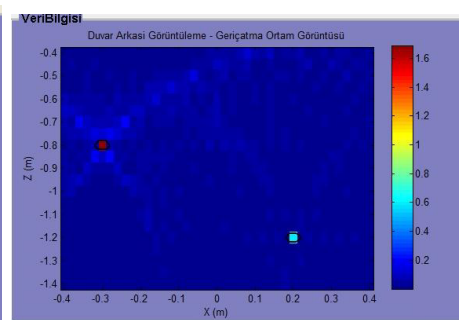
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 3.5: Duvar Arkası Görüntüleme Uygulama Sonuçları a) Frekans Görüntüleme(Toprak)b) Zaman Görüntüleme(Toprak) c) Geri Çatma Görüntüleme(Toprak) d) Frekans Görüntüleme(Beton) e) Zaman Görüntüleme(Beton) f) Geri Çatma Görüntüleme(Beton)

4. SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMA İLE DUVAR ARKASI GÖRÜNTÜLEME VE BİLİNMEYEN PARAMETRELERİN PERFORMANSA ETKİLERİ

Duvar arkası görüntüleme radarı (TWI) [21, 22], son yıllarda askeri alandaki çalışmalarda kullanımının artması ile beraber önemli bir teknoloji konumuna gelmiştir. TWI sistemi üç katmanda görüntüleme ve genelde yüksek çözünürlük ister. Yüksek menzil çözünürlüğü geniş bant (UWB) sinyallerinin kullanımına ihtiyaç duyarken, çapraz açıklık çözünürlüğü de çok uzun bir açıklığa ihtiyaç duyar. UWB sinyali oluşturma bir yöntemi basamak frekans sistemini (SFCW) kullanmaktır [12]. SFCW yöntemi, hesaplama işlemlerini düşünlmesi gereken yüksek sürelerde gerçekleştirir. TWI uygulamalarında özellikle pozisyonu sabit olmayan hedefler için bu hesaplama zamanı sorun olmaktadır. Sıkıştırılmış algılama (CS) [27, 28], imge çözünürlüğünde kayıp yaşatmadan gerekli ölçüm sayısını azaltarak hesaplama süresini azaltır. CS nin seyreklik yapısı nedeniyle, çok geniş bir kullanım alanı vardır [30, 31, 32].

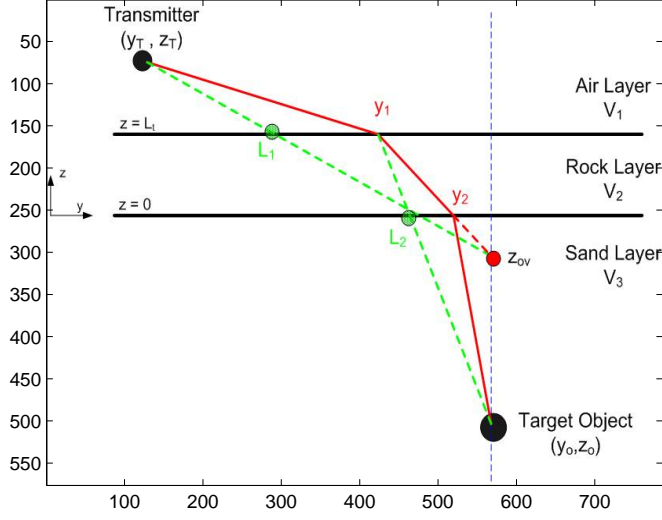
Sıkıştırılmış algılama, yere işleyen radar(GPR) ile yer altı görüntülemesi veya duvar arkası görüntülemesi çalışmalarında çok kullanışlı bir algoritmadır. CS ölçüm sayısını düşürerek yüksek çözünürlükte görüntü elde edilmesini sağlar.

CS ile duvar arkası görüntüleme üzerine çeşitli çalışmalar olmasına rağmen, CS tabanlı duvar arkası görüntüleme çalışmaları hedefleri ızgara noktalarında bulunan noktasal hedefler olarak kabul ederler ve duvar kalınlığını ve dielektrik katsayını kesin olarak bilindiğini farz ederler. Fakat gerçek uygulamalarda hedeflerin pozisyonlarını bilmek veya duvar parametrelerini kesin olarak kestirmek mümkün değildir. Bu yüzden CS tabanlı duvar arkası görüntülemenin bu senaryolar dışındaki başarımının incelenmesi gerekmektedir.

4.1 GPR ile Duvar Arkası Görüntüleme

GPR ile duvar ötesi görüntüleme teorisi, GPR ile yer altı görüntüleme teorisiyle çok benzerlik taşır. Temel sistem parametreleri, kestirilmesi gereken değerler tamamen aynıdır. Duvar arkası görüntülemede ek olarak bir de duvar parametrelerinin işin içine sokulması gerekir. Bu iki GPR çalışmasındaki en önemli farklılık, duvar arkası görüntülemenin çok katmandan oluşmasıdır. En genel düşüncede duvar tamamen aynı malzemeden oluşan homojen bir yapı olarak düşünülürse oluşacak yapının üç katmanlı olduğu varsayılabilir. Kısaca yer altı görüntüleme modeline ek olarak yeni bir katman daha gelmesi onu duvar ötesi görüntüleme uygulamasına çevirdiği söylenebilir. Sisteme yeni bir katman eklenmesinin yaratacağı en büyük değişiklik kestirilen gecikme zamanı (verici antenden ışyan EM dalgasının tekrar alıcı antende algılanması için geçen süre) üzerinde olacaktır. Şekil 4.1 de genel olarak duvar arkası görüntüleme (üç katman) sisteminin yapısı görülmektedir.

Bu yapıdaki en önemli noktalardan biri dalga kırılım yasalarına uygun şekilde gecikme zamanının gerçeğe yakın bir şekilde kestirimini gerçekleştirmektir. Zaman gecikmesinin kestirimi için mevcut bir kaç yöntem vardır. Bunlardan en bilineni Snell yasası [108] yöntemidir. Snell yasası yöntemi dalga kırılım yasası olarak da bilinir. Bu yöntemin temelinde dalga kırılım yasası olduğu için kestirilecek zaman gecikmesi gerçeğe çok yakın çıkacaktır. Snell yasası yöntemi uygulanması sonrası belirli derecelerde polinomial denklemler çıkar. Sonucun bulunması için bu denklemlerin çözülmesi gerekir. Yer altı görüntülemede oluşan denklem sonuçları çözülebilir oldukları için kestirilen zaman gecikmesi gerçeğe çok uygundur. Fakat duvar arkası görüntülemede bu yöntem yer altı görüntülemedeki kadar etkili



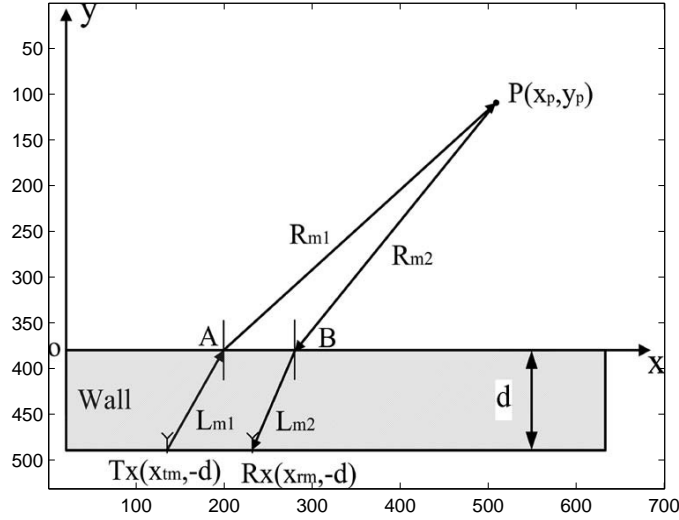
Şekil 4.1: Üç katman gösterimi

değildir. Üç katmanda oluşan diferansiyel denklemler 4. dereceden denklemlerdir bu yüzden bunların çözümü karmaşık ve hesaplama yükü fazladır.

Literatürde Snell yasasına alternatif olarak uygulanmış yöntemler mevcuttur. Bunlardan biri [23, 24, 109, 110] referanslı çalışmalarda uygulanan analitik geometri kullanılarak dalganın kırılım noktalarının kestirildiği yöntemdir. Bu yöntem için Şekil 4.1 göz önünde bulundurulur. Yöntem ile ilgili referanslar incelendiği zaman yöntem kısaca şöyle açıklanabilir. Verici antenden gönderilen EM dalgası tek ortamda yayılırken L_1 ve L_2 noktalarından geçerek z_{ov} noktasına ulaşacaktır. Teoride z_{ov} noktasının koordinat değerleri hesaplanabilir. Ortamın farklılaştığı durumda ise gönderilen EM dalgası ilk katman geçişinde L_1 ile L_2 arası bir noktada, ikinci katman geçişinde ise L_2 ile z_{ov} arası bir noktadan geçerek hedef noktasına ulaşacaktır. Bu sınırlar çerçevesinde analitik geometri kuralları ile yaklaşık kırılım noktaları kestirilebilmektedir. Böylece kestirilecek zaman gecikmesi değeri de yaklaşık bir sonuç verecektir. Bu yaklaşımın genel formülizasyonu aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} y_2 &= y_0 + (\ell_2 - y_0)v_3/v_2 \\ y_1 &= y_0 + (\ell_1 - y_0)v_2/v_1 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Duvar ötesi görüntüleme ile ilgili geçmiş çalışmaların bir çoğu [23, 24] zaman gecikmesinin karmaşasından kaçmak için farklı bir yapı oluşturmuşlardır. Bu çalışmalarda GPR duvarın üzerinde olduğu varsayılmıştır. Şekil 4.2 de sistem [23] deki duvar arkası görüntüleme çalışmasının yapısıdır.



Şekil 4.2: Gerçekçi olmayan duvar ötesi yaklaşımı

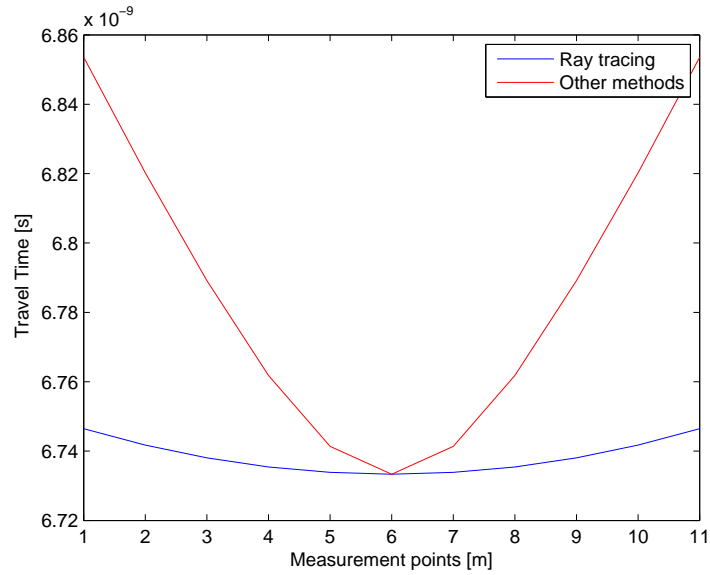
Şekil 4.2 deki gibi GPR radarının duvar üzerinde olduğu uygulamalar tıpkı iki katmanlı yer altı görüntüleme uygulaması gibi olur. Aradaki diğer katman geçişi olmadığı zaman EM dalganın kırılması bir kere olur dolayısıyla çalışılan sistem de iki katmanlı sisteme dönüşür. Bu şekilde çalışmaların buldukları sonuçlar gerçeğe yakın değildir. Böyle bir yapıda bulunan zaman gecikmesi bir miktar eksiktir. Bu yüzden bulunan hedeflerin pozisyonları da gerçek noktalarında değil bir miktar ötelenmiş şekilde bulunacaktır.

4.1.1 Üç Katmanda Zaman Gecikmesi Hesabı için Yeni Bir Yaklaşım

Duvar arkası görüntülemelerde zaman gecikmesinin gerçeğe yakın (Snell yasasına) hesaplanması için yeni bir yaklaşım düşünülmüş, uygulanmış ve uygulama sonuçları ile yukarıda anlatılan yaklaşık çözüm sağlayan yöntemin başarımları

sonuçları karşılaştırılmıştır. Geliştirilen yeni yöntem literatürde 'ray tracing' [26] metodu olarak bilinen yaklaşıma benzer bir yöntemdir. Yeni yöntem hedef noktasını bulabilmek için tarama düzlemini çok küçük açılar (0.1 derece) ile 180 derece boyunca tarar. Tarama işlemi radarın her EM dalgası gönderdiği noktada bir yapılır. Tarama işlemi çok küçük açılar ile yapıldığı için hedefin tam bulunduğu koordinat değerleri veya hedefe olabilecek en yakın noktanın (0.01 mm) koordinat değerlerinin bulunması sağlanacaktır. Tarama işlemi sonrası hedefin yeri bulunur ve bu bilgi ile gerçek zaman gecikmesi değeri hesaplanabilir.

Bu yeni yöntem ile önceki çalışmalarda uygulanan yaklaşık sonuçlar bulan yöntemin başarımlarının karşılaştırılması Şekil 4.3 de verilmiştir.



Şekil 4.3: Literatürde uygulanan zaman gecikmesi hesabı yaklaşımı ile ray tracing yöntemi ile zaman gecikmesi hesabı karşılaştırılması

Şekil 4.3 deki başarımlarını göz önünde bulundurulduğunda ikinci yöntemin yeni yöntemle göre özellikle hedeften uzaklaştıkça önemli ölçüde hatalı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Fakat yeni yöntemin gerçeğe yakınlığının yanında işlem süresinin uzunluğu bu yöntemin uygulamalarda kullanımını zorlaştırmıştır. Bu yöntemde tarama açıları ne kadar küçülürse işlem o kadar uzayacaktır.

4.2 Sıkıştırılmış Algılama

Ölçülen verilerden sinyallerin veya imgelerin geri elde edilmesinde dikkate alınan standart yaklaşım Shannon örnekleme teoremi [111] olarak bilinir. Bu teorem örnekleme frekansının minimum şekilde sistem frekansının iki katı kadar seçilmesi gerektiğini söyler. Benzer şekilde doğrusal cebir teoreminde başarılı bir geri elde edim için sonlu ayrık zaman sinyalinden elde edilecek toplam örnek sayısının en az kendi boyutu kadar olması gerektiğini savunur. Bu iki yaklaşım analog-dijital çevirim, tıbbi görüntüleme veya ses-video elektroniklerinde yaygın bir şekilde kullanılırlar. Bu yaklaşımların sağladığı başarıyı daha az örnek sayısı ile gerçeklemeyi sağlayan yöntem ise yeni bir yöntem olan sıkıştırılmış algılama (CS) teoremidir.

Sıkıştırılmış algılama [27, 112, 113] bir x sinyalinde örnekleme ve hesaplama maliyetini büyük oranda düşüren sıkıştırmaya dayalı yeni bir yaklaşımdır. Sıkıştırılmış algılama tüm sinyali yüksek örnekleme hızı ile ölçmek yerine sinyalin sadece en fazla bilgi içeren kısımları ölçer. Böylece standart yöntemlere göre enerji ve zamandan kazanılabilir.

CS, deneysel olarak, bir çok çeşitli sinyal veya imgenin uygun etkinlik alanında ayrık bir biçimde ifade edilebileceği için ayrık bir biçimde geri elde edilmesinin mümkün olduğunu söyler. Sinyalin geri elde edilebilmesi için az sayıda sıfır olmayan (non-zero) katsayılara sahip olması gereklidir. Bu anahtar yapı, JPEG ve MP3 gibi teknolojilerde etkin olarak görülür. Sıkıştırma işlemi en büyük temel katsayıların bütün katsayılardan çekilip kayıt edilmesi ile elde edilir. Kayıt edilmeyen diğer katsayılar ise sıfıra çekilir. Bu şekilde bir yaklaşım sinyalin tüm bilgileri bilindiğinde kabul edilebilir strateji olarak düşünülebilir. Bu durumda şu şekilde bir soru meydana gelir. Herhangi bir sinyale sıkıştırma işlemi uygulamadan bu sinyal ile ilgili tüm bilgileri bilmek gereklidir ve bunu yapabilmek de çok fazla maliyetli ve efor isteyen bir basamaktır. Ayrıca tüm sinyal bilgilerinin yanı sıra işe yarayan katsayıların yerinin de kesin olarak bilinmesi gereklidir. İşte bu noktada sıkıştırılmış algılama klasik sıkıştırma algoritmalarından farklı bir alternatif sunabilir. CS, orjinal sinyalin geri elde edilmesini küçük boyutlu doğrusal ve uygunsuz ölçümler ile bunu yapabilir. Bu şekilde bir ölçüm matrisi rastgele belirlenmiş bir matris olarak düşünülebilir.

CS, rastgele izdüşümleri kullanarak ölçümler alır ve bazı tabanlarda seyrek temsili

mümkün sinyallerin az sayıda lineer ölçümler ile yeniden oluşturulabileceğini gösterir.

Örnek olarak, N uzunluğunda bir x sinyali varsayalım. Eğer x sinyali denklem (4.2) gibi yazılabilirse x sinyalinin seyreklik derecesi K ' dir denebilir.

$$x = \sum_{i=1}^K w_i \psi_i \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)'de w_i ağırlık katsayıları, ψ_i ise taban vektörleridir. x sinyali matris gösterimi şeklinde de yazılabilir:

$$x = \Psi w \quad (4.3)$$

Ψ , seyreklik taban matrisidir ve sütunları ψ_i 'den oluşmaktadır. w ise ağırlık vektörüdür.

Sıkıştırılmış algılamada, sinyali Shannon-Nyquist teoremine göre örnekleme yerine ϕ_m , $m = 1, 2, ..M$ taban vektörleri üzerinden sinyalin lineer izdüşümleri ölçülür:

$$y(m) = \langle x, \phi_m^T \rangle \quad (4.4)$$

Burada x sinyalinin boyutu ile karşılaştırıldığında az ölçümler, $M < N$, kullanılmıştır. Alınan ölçümler matris gösterimi şeklinde yazılırsa:

$$y = \Phi x \quad (4.5)$$

$M < N$ olduğu durumda, x sinyalini y ölçümlerinden geri oluşturmak sorundur. Fakat sıkıştırılmış algılama teorisine göre eğer $\Phi\Psi$ matrisi sınırlı izometri özelliğine (RIP) [114, 115] sahipse $O(K \log(N))$ tane ölçümden x sinyali denklem (4.6)'daki ℓ_1 minimizasyon problemi [28, 116] çözdürülerek geri oluşturulabilir.

$$\min \|x\|_1 \quad s.t. \quad y = \Phi\Psi \hat{x} \quad (4.6)$$

Denklem (4.6)'daki optimizasyon problemi lineer programlama teknikleri ile çözdürülebilir.

Φ matrisinin boyutu N 'den M 'e azaltılırken K seyreklik seviyesine sahip sinyaldeki bilgi bozulmamalıdır. Bu, ölçüm matrisi Φ oluşturulurken dikkat edilmesi gereken temel husustur. $A = \Phi\Psi$ matrisi tanımlansın. $A_T, T(1, \dots, N)$; A matrisinin sütunlarından oluşturulan $M \times |T|$ boyutlu bir matristir.

$$1 - \delta_K \leq \frac{\|A_v\|_2}{\|v\|_2} \leq 1 + \delta_K \quad (4.7)$$

Katsayı dizileri $v_j, j \in T$ ve $|T| \leq K$ dır [117]. Tüm T 'ler için A 'nın K -sınırlı izometri sabiti δ_K , denklem (4.7)'yi sağlayan en küçük değerdir. Bu özellik esasen gereklidir çünkü kümelerin kardinalitesi K 'dan küçük sütunları ortonormal bir sistem gibi davranır. [115]'de, K seyreklik seviyesine sahip x sinyalinin $\delta_{2K} + \delta_{3K} < 1$ özelliğini sağladığında denklem (4.6) ile doğru olarak geri oluşturulabildiği gösterilmiştir.

Ölçüm matrisi Φ rastgele matris olarak oluşturulabilir. Örneğin, R^M birim çemberinin üzerinden bağımsız ve rastgele N tane vektör örneklenebilir. $K = O(M/\log(N/M))$ için denklem (4.7), $1 - O(\exp^{-\gamma N})$ olasılığı ile sağlanır. Burada $\gamma > 0$ dır [117]. Bağımsız özdeşçe ayrılmış (i.i.d) Bernoulli veya Gaussian rastgele değişkenlerinden oluşturulan ölçüm matrisi Φ ; sinizoidal, dalgacık, Gabor fonksiyonları, vb. Ψ tabanlarında sınırlı izometri özelliğini (RIP) sağlar [114].

Genellikle sinyaller sıkıştırılabilir. Yani dönüşüm katsayılarının sıralanmış büyüklükleri hızlı şekilde sıfıra doğru azalabilir. Sıkıştırılabilir sinyaller seyrek olarak yakınsanabilir. x_K ; rastgele bir $x \in R^N$ sinyalinin K seyreklik seviyesindeki en iyi yakınsanmış hali olsun. Eğer sınırlı izometri özelliği sağlanıyorsa, sinyalin geri oluşturulma hatası $\|x - x_K\|_{\ell_1}$ 'dan daha kötü olamaz [113]. Üstelik sinyalin geri oluşturulma prosedürü ölçüm hatalarına karşı gürbüzdür. Ölçümlere bozulma ϵ_n eklenmesi sinyalin geri oluşturulma hatasını ϵ_n 'nun küçük bir katından daha fazla etkilemez [113]. Gürültülü ölçümler için bazı geri oluşturma yöntemleri kullanılabilir [113, 118, 119, 120]. Bu yöntemlerden bazılarında geri oluşturulma hatasının enerjisi denklem (4.8)'deki gibi kısıtlanmaktadır.

$$\min \|x\|_1 \quad s.t. \quad \|y - Ax\|_2 < \epsilon \quad (4.8)$$

Denklem (4.8)'de geri oluşturma kararlı ve geri oluşturulma hatası sonludur [113]. Bu ikinci dereceden bir koni programıdır (SOCP). Gürültülü geri oluşturma için kullanılacak daha kolay bir lineer program ise Dantzig Seçicisidir [118]. Dantzig seçicisinde kalan vektörünün her elementi gürültü seviyesinin içinde olmalı ve kalan vektörü ile A matrisinin sütunları arasındaki kolerasyon iyi olmamalıdır. Dantzig seçicisi denklem (4.9)'teki gibi gösterilebilir:

$$\min \|x\|_1 \quad s.t. \quad \|A^T(y - Ax)\|_\infty < \epsilon \quad (4.9)$$

Sıkıştırılmış algılama yöntemi, görüntü geri oluşturulması [121], tıbbi görüntüleme [122], radar ile görüntüleme [33], kaynakların yerini belirleme [123, 124], ve kodlama [125] gibi çok çeşitli alanlarda kullanılabilir. Bu bölümde TWI çalışmasında CS nin nasıl kullanılacağı hakkında bilgiler verilmiştir.

4.3 CS Tabanlı Duvar Arkası Görüntüleme

Standart TWI geriçatma algoritmaları, imgeyi ölçüm verisine uygun uyumlu süzgeç uygulayarak oluştururlar. Geriçatma (DSBF) [126] algoritması yaygın olarak kullanılan TWI algoritmalarındandır. Bu yöntem ölçüm verisinin uyumlu olarak toplamını bularak çalışır. Sıkıştırılmış algılama algoritması ise hedef uzayını parçalar ve görüntülenecek hedef uzayı ile ölçüm verisini ilişkilendirerek performans gösterir. Bu uygulamada basamak frekans (SF) radar sistemi baz alınmıştır. İki katmanlı ortamda CS tabanlı yer altı görüntüleme teorisinin detayları [127] de bulunmaktadır. Bu çalışma diğer TWI çalışmalarındaki gerçek üç katmanda veri modellemesi hatası tekrarlamamış, yukarıda belirtilen 'ray tracing' metodu ile üç katman için zaman gecikmesini bularak hazırlanmıştır.

CS ile TWI gerçekleştirirken ana amaç hedef uzayı ile ölçüm verisini doğrusal bir şekilde ilişkilendirmektir. Bu ilişkilendirme için veri kütüphanesi oluşturulmalı ve hedef uzayı ızgara noktalarına ayrılmalıdır. Veri kütüphanesinin her sütunu, hedef uzayının ızgara noktalarında bulunabilecek tek hedeflerinin ölçüm verilerini

içerir. Böylece ölçüm verisi ile veri kütüphanesinin sütunları doğrusal bir şekilde ilişkilendirilmiş olur. Bu ilişki ile birlikte verinin ayrıklık (sparsity) özelliği kullanılabilir duruma gelir.

Doğrusal ilişkinin kurulması için öncelikle hedef modeli oluşturulması gerekir. Muhtemel hedeflerin birbirini etkilemedikleri varsayılır ise sürekli hedef uzayı için yayılan alan aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$E_s(x_0, w) = \int \int E_{inc}(x_0, w, x, z)G(x_0, w, x, z)\pi(x, z)dx dz \quad (4.10)$$

Burada $E_{x_0, w}$, x_0 noktasından yansıyan alandır. E_{inc} gelen elektromanyetik ve $G(x_0, w, x, z)$ ise ilişkili Green fonksiyonudur.

Bu yapının oluşturulması için genelde 4.10 daki denklemin ayrıklaştırılmış hali kullanılır. Hedef olarak basit noktasal hedefler düşünülür. Böylece hedefler kolayca modellenebilirler. Böylelikle tüm hedef uzayı muhtemel noktasal hedeflerin bulunabileceği ızgara noktalarına ayrıştırılmış olur. Bu şekilde oluşturulan hedef uzayında ayrıklık özelliği kullanılabilir duruma gelir.

Ölçümlerin P adet hedef üzerinden alındığı varsayılır ise, i^{th} taram noktasındaki alınan frekans ölçümleri (4.11) deki gibi ifade edilebilir.

$$d_i = \sum_{k=1}^P r_k e^{-j\omega(t-\tau_i(p_k))} \quad (4.11)$$

Her GPR pozisyonundan her hedef pozisyonuna kadar geçen zaman gecikmesinin doğru olarak hesaplanması için dalga yayılım hızının çeşitli ortamlardaki değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Burada $\tau_i(p_k)$, i^{th} anten noktasındaki ve p_k pozisyonundaki hedef için zaman gecikmesidir. Hedef yansımaları gibi etkiler r_k ağırlık katsayı ile temsil edilmektedir. CS için veri kütüphanesi modellenirken, sürekli hedef uzayı, sonlu ızgara noktaları $T_S = \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N$ şeklinde ayrıştırılır. Burada N mümkün olan toplam ayrık hedef uzayı noktalarını belirler. Her π_j ise olası hedef noktası için 3D vektörü $[x_j, y_j, z_j]$ temsil eder. Veri kütüphanesinin olası her hedef noktasındaki π_j zaman/frekans verisinin sentezlenmesi ile oluşturulabilir. Olası hedeflerin π_j ızgara noktalarında olmama durumunu da unutmamak gerekir. Bu problem literatürde 'off-the grid' ismiyle

bilinir. Bu durumun etkileri simülasyonlarda araştırılmıştır.

Radar i^{th} tarama noktasında iken ve kütüphane Ψ_i nin j^{th} sütununda iken, π_j deki ilişkili hedef (4.3) deki gibi ifade edilebilir. (4.12) numaralı eşitlik, olası her hedef noktasında tekrarlanması Ψ_i kütüphanesini oluşturur.

$$[\Psi_i]_j = \exp[-j\omega(t - \tau_i(\pi_j))] \quad (4.12)$$

Ψ_i , $L \times N$ boyuttan oluşacaktır. L basamak frekans sayısı, N ise seyreklik seviyesidir. Böylece, ölçüm verisi d_i , $[\Psi_i]_j$ kütüphanesinin doğrusal kombinasyonu olarak yazılabilir.

$$d_i = \Psi_i b + e \quad (4.13)$$

(4.13) ifadesinde b , hedef uzayını tanımlayan indikatördür. e ise gürültüdür. (4.13) deki amaç, b yi bulmaktır. Bu aşamadan sonraki en önemli aşama $\tau_i(\pi_j)$ zaman gecikmesinin hesaplanmasıdır. Zaman gecikmesini doğru bir şekilde hesaplama için gerçek üç katmanda sistemin analiz edilmesi gerekir. Bunun içinde duvar kalınlığı, duvarın dielektrik geçirgenliği gibi duvara has parametrelerin kesin olarak bilinmesi gerekir. Duvar parametrelerinin kesin olarak bilinmediği zaman oluşacak etkiler simülasyon sonuçlarında irdelenmiştir. Zaman gecikmesinin hesaplanması bölüm 4.1 deki gibi yaklaşımlar uygulanabilir.

Standard basamak frekans GPR sistemi frekans bandından L adet frekans ölçümüne sahiptir. CS algoritması oluşturulan sinyal ayrık (sparse) özelliğe sahipse normal durumdan daha az sayıda ölçüm kullanımını sağlar. CS algoritmasında L adet frekans sayısından M adet kullanılır. Burada $M < L$ dir. Alınan ölçümler $\beta_i = \Phi_i d_i$, Φ_i $M \times L$ boyutlu bir ölçüm matrisi olarak dizayn edilmiştir. Bu şekilde veri elde etme süresi tüm tarama noktaları kullanılır ise L/M oranında azalacaktır. β_i kullanılarak, hedef uzayı b nin yeniden oluşturulması için [113, 119] (4.13) ifadesinin çözülmesi gerekir. Burada $\beta = [\beta_1^T, \dots, \beta_S^T]^T$, $\Psi = [\Psi_1^T, \dots, \Psi_S^T]^T$, $\Phi = \text{diag}\Phi_1, \dots, \Phi_S$ ve $A = \Phi\Psi$ şeklinde ifade edilebilir.

$$\hat{b} = \arg \min \|b\|_1 \quad s.t. \quad \|A^T(\beta - Ab)\|_\infty < \epsilon \quad (4.14)$$

(4.14) referanslı matematiksel ifade de doğrusallaştırma parametresi ε seçimi önemlidir. Çünkü bu değer çözümün ayrıklığı ile verinin seviyesi arasındaki dengeyi sağlar. ε değerinin kestirimi gürültünün varyansı veya çapraz sağlama (crossvaridation) [113, 119] tekniklerinin uygulanması ile gerçekleşir. Bu çalışmanın sayısal çözümlerinde doğrusallaştırma parametresi $\varepsilon = 0.2 * A^T \beta$ olarak belirlenmiştir. (4.14) daki optimizasyon problemi *CVX* [128] optimizasyon paketi kullanılarak çözülebilir.

4.3.1 Sayısal Simülasyonlar ve Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde CS tabanlı duvar arkası görüntüleme çalışmasının analiz sonuçları sunulmuştur. Öncelikle, görüntüleme senaryosu şu şekildedir. 2D boyutlu TWI problemi 60 cm - 60 cm lik bir hedef uzayı şeklinde modellenmiştir ve modellenen hedef uzayı içerisine üç adet noktasal hedef rastgele bir biçimde yerleştirilerek simüle edilmiştir.

Hedef uzayı 3 cm - 3 cm genişliğinde ızgara noktalarına ayrılmıştır ve noktasal hedefler ızgara noktalarında olacak şekilde yerleştirilmiştir. Hedef pozisyonları Şekil 4.4(a) da verilmiştir.

Antenin duvardan uzaklığı 20 cm, duvarın kalınlığı 30 cm ve duvarın elektriksel geçirgenlik katsayısı $\varepsilon = 4$ olarak alınmıştır. Simülasyonun yapıldığı frekans ölçümleri 500 MHz - 5.5 GHz aralığında 40 MHz frekans basamak değeri olacak şekilde belirlenmiştir. Böylece, her frekans basamağında ölçüm alınacak olunursa toplamda 126 adet frekans ölçüm noktası mevcut olacaktır. Frekans ölçüm noktasından alınan her ölçüm her anten tarama noktasından alınmaktadır. Simülasyonda anten tarama noktaları 20 olacak şekilde belirlenmiştir. Sonuçta toplam alınan ölçümler $126 * 20 = 2520$ adet olacaktır.

CS algoritması uygulandığında ölçüm alınan frekans noktası sayısı azalacaktır. Simülasyonda 126 adet frekans ölçüm noktasından 25 tanesi rastgele bir şekilde seçilmiştir. Böylece toplam ölçüm sayısı 2520 den 500 e düşürülmüştür. Bu da toplam verinin 20 % lik bir kısmına karşılık gelmektedir.

Eğer frekans uzayındaki veri, tüm ölçüm noktalarındaki verilerin ölçülmesi ile modellenir ve standart geri çatma algoritması $\hat{b} = A^T y$ na uygun olarak çözümlenir

ise Şekil 4.4(b) deki sonuç elde edilir. Bu çözümde oluşan imgenin gürbüzlüğünün az olmasına karşın hedefler düzgün pozisyonlarında bulunabilmiştir.

Eğer standart geri çatma algoritmasını frekans uzayındaki veriden rastgele seçilerek seyrekleştirilmiş bir model üzerine uygulanırsa Şekil 4.4(c) deki imge elde edilir. Görüldüğü üzere bu yaklaşımdan elde edilen sonuç başarılı değildir.

Amaçlanan şekilde CS methodu ile frekans uzayındaki veri seyrekleştirilerek görüntüleme yapılacak olunursa Şekil 4.4(d) deki imge elde edilecektir. CS yöntemi hedefleri yansıma verileri olmadan net bir şekilde bulabilmiştir. Bunun en önemli sebebi konveks optimizasyon programının (CVX) ayrık bir cevaba sistemi zorlamasıdır.

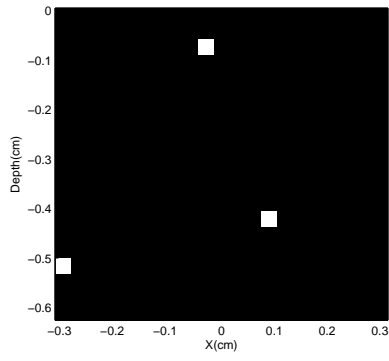
Şekil 4.4 deki tüm sonuçlar 30 dB faktörü ile oranlanmıştır. Sonuçlarda CS yönteminin standart yöntemle göre daha az veri ile daha keskin bir sonuç çıkardığı net bir şekilde görülmektedir.

4.3.1.1 Ölçüm Sayısının Performansa Etkisi

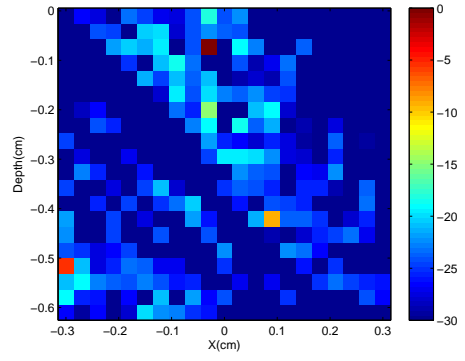
Şekil 4.4 deki sonuçlar, 3 hedeften oluşan ve toplam verinin 20 % lik kısmını kullanarak sonuç elde eden tek durum için verilmiştir. Gerçek uygulamalarda çeşitli ayrıklık seviyelerine göre CS in düzgün görüntüleme yaptığı minimum gerekli ölçüm sayısının bilinmesi önem taşımaktadır.

Ayrıklık seviyesi ile istenen ölçüm sayısı arasındaki ilişkinin anlaşılabilmesi için yeni bir analiz simülasyonu yapılmıştır. Bu simülasyonda hedef uzayının ayrıklık seviyesi 2 ila 12 arasında değiştirilmiş ve her ayrıklık seviyesi için ölçüm sayısı 10 ila 500 arasında değiştirilerek ölçümler alınmıştır. Tüm durumlarda CS tekniği ile görüntüleme yapılarak elde edilen sonuçların hedef uzayı ile tutarlı olup olmadığı karşılaştırılmış ve başarımları kayıt edilmiştir. Her durum için bu işlem 50 kere gerçekleştirilmiştir. İki farklı ölçüm stratejisi rastgele ve düzgün ölçüm seçimleri ayrı ayrı denenmiştir ve birbirleriyle sonuçları karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları Şekil 4.5 de verilmiştir. Burada M ölçümün anlamı 2520 ölçüm noktasından seçilen M adet ölçüme karşılık gelir.

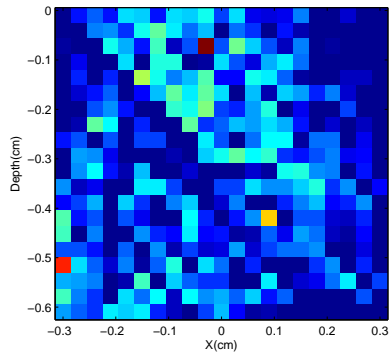
Hedef sayısının artması veya başka bir değiş ile hedef uzayının ayrıklık seviyesinin



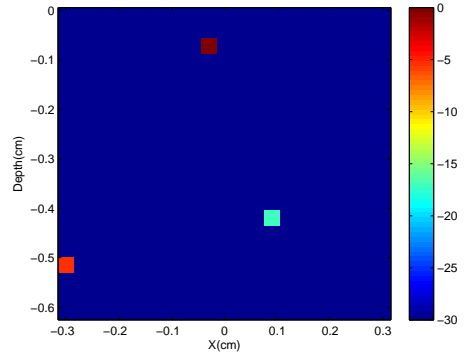
(a)



(b)

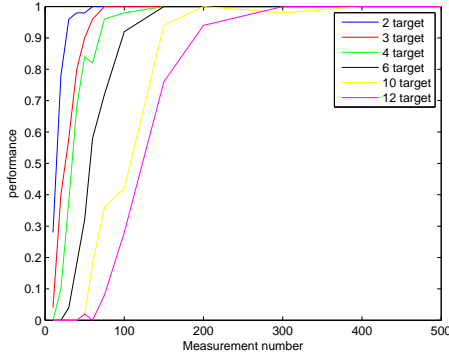


(c)

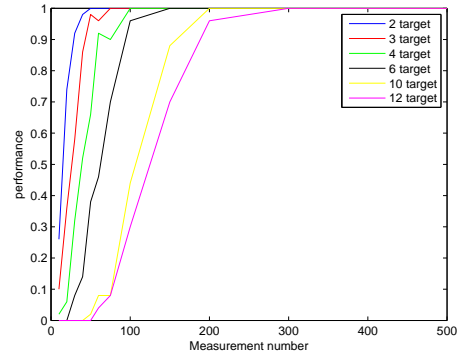


(d)

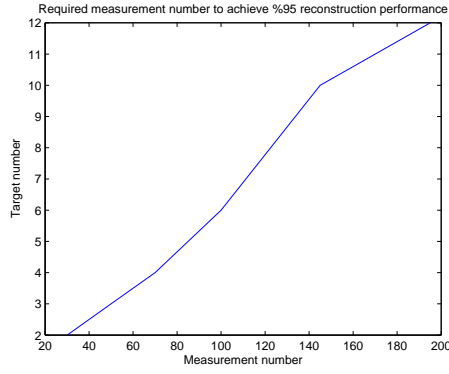
Şekil 4.4: (a) Hedef uzayı. (b) Tüm ölçümler ile geri çatma görüntüsü . (c) Seyrekleştirilmiş geri çatma görüntüsü. (d) CS yönteminin sonuç görüntüsü.



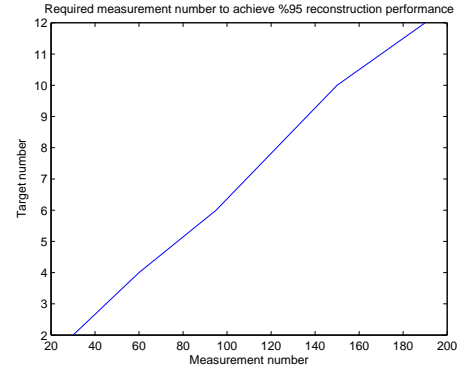
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.5: Doğru geri oluşturma oranı vs. çeşitli hedef ayrıklık seviyeleri için ölçümler (a) rastgele ölçüm stratejisi, (b) düzgün ölçüm stratejisi, c) Rastgele seçim için hedef sayısı ve ölçüm sayısı ilişkisi d) Düzgün seçim için hedef sayısı ve ölçüm sayısı ilişkisi.

artışı ile istenen ölçüm sayısını doğrusal olarak birbiriyle ilişkili olduğu simülasyon sonuçlarında görülebilmektedir. Ayrıca toplam ölçüm miktarının 10% bir miktarının 10 ayrıık hedef uzayında başarılı olduğu görülmüştür. Bu da toplam ölçüm miktarının önemli bir biçimde azaltılabileceğinin bir göstergesidir.

Bunlara ek olarak uzay-frekans ortamında rastgele veya düzgün bir biçimde veri seçimi sonuçları etkilememektedir. Simülasyon sonuçlarında iki farklı ölçüm tekniği için aynı sonuçların elde edildiği görülebilmektedir.

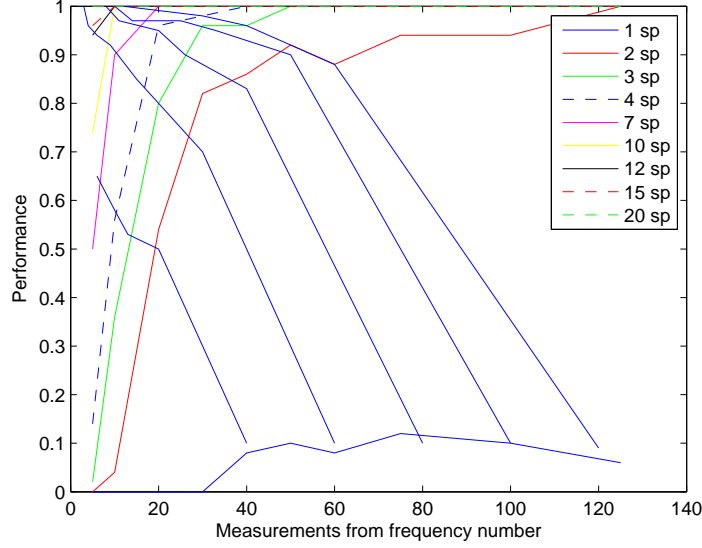
4.3.1.2 Frekanstan veya Ayrıık Uzaydan Ölçüm Seçiminin Performansa Etkileri

Ölçüm stratejisi için diğeri bir önemli nokta ölçümlerin frekans ve ayrıık uzaya uygun bir şekilde nasıl dağılması gerektiğini çözebilmektir. Örneğin; toplam 50 adet ölçüm alınması gerekiyor ise bu ölçümler frekans ve ayrıık uzaydan nasıl seçilmeli ki CS performansı en üst seviyeye çıksın. Bir başka değış ile toplam 50 adet ölçüm frekans noktalarından 5 er adet olacak şekilde 10 farklı ayrıık tarama noktasından da seçilebilir veya frekans noktasından 10 ar adet olacak şekilde 5 farklı ayrıık tarama noktasından da seçilebilir. Ölçüm seçimindeki bu farklı durumların CS performansını nasıl etkilediği incelenmek istenmiştir. Asıl cevaplanacak soru acaba bu iki farklı seçim stratejilerinden CS performansını güçlendirecek etkiler var mı sorusudur.

CS in bu performansını test etmek için 4 hedeflik ayrıık seviye seçilmiştir. Toplam ölçümlerin seçilmesi, frekans ölçüm noktalarından 5 – 125 adet arası seçim yapılarak ve ayrıık uzay noktaları da 2 – 20 arasında seçilerek belirlenmiştir. Her durumda ölçümler rastgele seçilmiş ve her deney 50 kez tekrarlanmıştır. Şekil 4.6 , ortalama doğru geri elde edim oranı ile ölçüm sayısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

Simülasyon sonuçlarında ayrıık tarama noktalarının sayısı 4-7 aralığına ulaşana kadar ne kadar fazla ayrıık nokta kullanılarak ölçüm alınır ise performansın o kadar iyi olduğu görülmüştür. Örneğin toplamda 80 adet ölçümün tek bir ayrıık noktadan alınması, 40 x 2 şeklinde iki farklı ayrıık noktadan alınmasından daha kötü bir performans meydana getirecektir. Ayrıık noktaların performansa etki ettiği kritik

sayı 4 olarak görülmüştür. Ayrıca ayrıık noktalar ve ölçüm sayısı arasındaki ilişki Şekil 4.6 deki eğride verilmiştir.

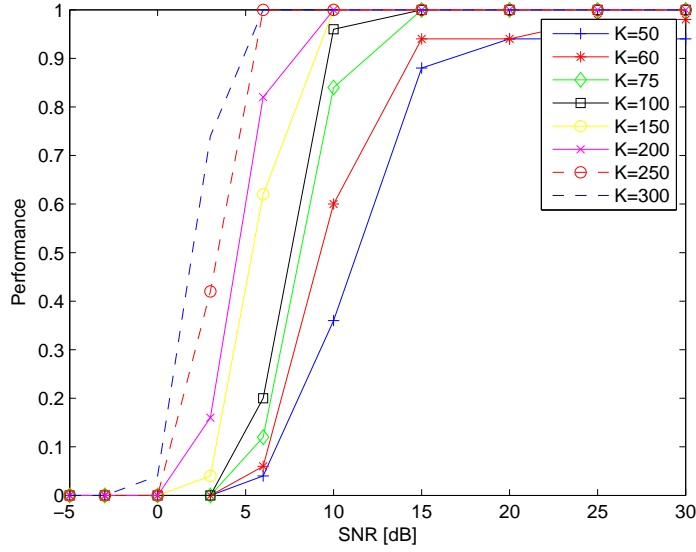


Şekil 4.6: Doğru geri elde edim oranı ile her tarama noktasındaki rastgele frekans ölçüm sayısı ilişkisi. 'sp' tarama noktasını temsil etmektedir.

4.3.1.3 Gürültü Seviyesinin Performansa Etkisi

Gürültü seviyesinin görüntüleme performansına etkilerinin analizi için simülasyon koşturulmuştur. Simülasyonda frekans ortamındaki veri tek hedef için oluşturulmuştur. Hedefin SNR değeri -5 ile 25 dB arasında değiştirilmiştir. Ölçüm miktarı ise $50 - 300$ arasında alınmıştır. Her ölçüm değeri için karşılık gelen SNR değeriyle 50 deneme yapılmıştır. Her denemede eklenen gürültü kompleks beyaz gauss gürültüsüdür (CWGN). Şekil 4.7 de doğru geri elde etme oranı ile SNR ilişkisini göstermektedir.

Simülasyon sonuçlarında düşük SNR değerlerinde CS in yeterli performansı için gerekli ölçüm sayısının fazla olduğu görülmüştür. Yani gürültünün CS in iyi bir başarımla gösterebilmesi için gerek duyduğu ölçüm miktarını doğrusal olarak etkilediği söylenebilmektedir.



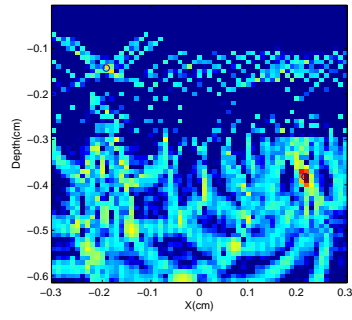
Şekil 4.7: Doğru geri elde etme oranı ile SNR ilişkisi.

4.3.1.4 İzgara Dışı Hedef Sorununun Performansa Etkisi

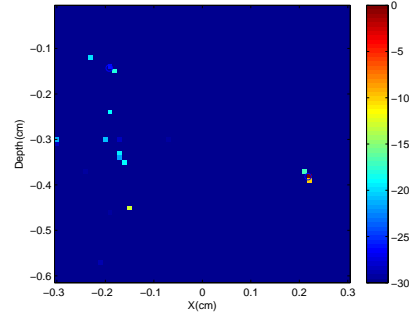
Veri kütüphanesi bazlı görüntülemeye ölçüm verisi ızgara noktalarına ayrılır. Bu sistemlerdeki önemli bir problem gerçek hedeflerin modellenmiş ızgara noktalarının pozisyonlarında bulunamama olasılığının olmasıdır. Hedeflerin oluşturulan ızgara noktalarında olmadığı zaman CS in performansının incelenmesi için hedefler ızgara noktasına denk gelmeyecek şekilde $(-0.192, 0, -0.143)$ ve $(0.218, 0, -0.382)$ pozisyonlarına yerleştirilmiştir. Ayrıca simülasyonda duvar parametrelerinin kesin olarak bilindiği varsayılmıştır.

Hedef uzayı olarak $60 \times 60 \text{ cm}^2$ bir alan simüle edilmiştir. Bu hedef uzayı sırasıyla 1 cm, 2 cm ve 5 cm lik ızgara noktalarına ayrılmıştır. SNR olarak 10 dB kullanılmıştır. CS yöntemi kullanılarak toplam verinin 20 % ile elde edilen sonuçlar Şekil 4.8 de verilmiştir. Ayrıca standart geri çatma yönteminin başarımı da simülasyon sonuçlarında görülmektedir.

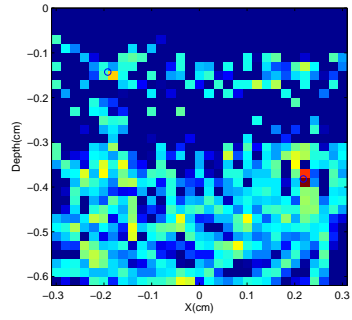
Simülasyon sonuçlarında CS performansının özellikle yüksek ızgara değerlerinde çok bozulduğu görülmektedir. En düşük ızgara değeri 1 cm de hedeflerin bulunduğu gözlemlenmiştir. Fakat ek hedefler de imgede mevcuttur. Bu performansa ek olarak ızgara noktaları 2 cm ve 5 cm yapıldığında başarımın



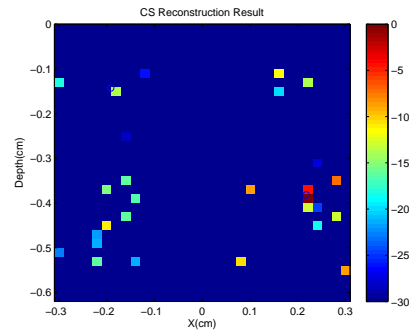
(a)



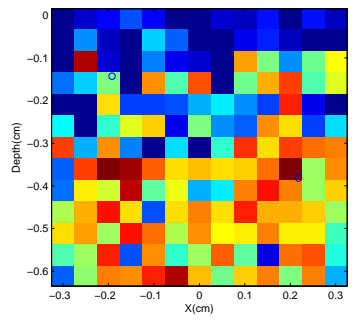
(b)



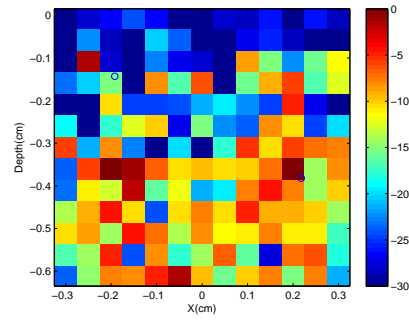
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.8: CS tabanlı TWI da off the grid etkisi: (a) Geri çatma, (b) 1 cm lik ızgarada CS, (c) Geri çatma, (d) 2 cm lik ızgara da CS, (e) Geri çatma, (f) 5 cm lik ızgarada CS,

iyice kötüleştiği görülmektedir. CS uygulamalarında off the grid sorununun performansı etkileyen önemli bir konu olduğu görülmüştür. Bu soruna çözüm amaçlı başlangıç çalışmaları [129] da mevcuttur. İlerleyen çalışmalarda bu sorunun çözümü için çalışılacaktır.

4.3.1.5 Bilinmeyen Parametrelerin Performansa Etkileri

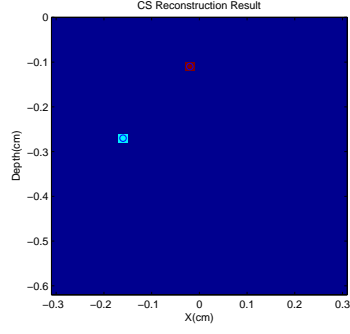
Duvar arkası görüntülemeye en temel sorunlardan biri duvar kalınlığı ve dalganın duvardaki hızı gibi parametrelerin tam olarak bilinmemesidir. Bu parametreler veri kütüphanesinin oluşturulması aşamasında aktif olarak kullanılan parametrelerdir. Bu parametrelerin kestirim ile tahmin edilebilmeleri mevcuttur fakat tam olarak kesin tahminler elde edebilmek henüz tam olarak gerçekleştirilebilmiş değildir. Bilinmeyen parametrelerinin doğru kestirilmediği zamanlarda CS in performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Simülasyonda hedefler ızgara noktalarında bulunan noktasal hedefler olarak modellenmiştir.

Veri kütüphanesi duvar kalınlığı 30 cm ve duvarın dielektrik geçirgenliği 4 olacak şekilde oluşturulmuştur. Şekil 4.9(a,b) duvarın gerçek dielektrik geçirgenliğinin 4.1 ve 4.5 olduğu durumda oluşan imge sonuçlarıdır. Hata çok küçük olduğunda hedefler doğru bulunmaktadır. Fakat hatalar büyüdükçe başarımlar bozulması artmaktadır.

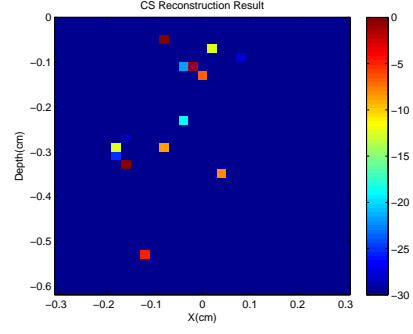
Ölçümler duvar kalınlığı 30.2 cm olduğu durum için simüle edilğinde 2 mm lik bir hatanın bile CS de çok önemli bir bozulmaya neden olduğu görülmektedir. Bu değer 31 cm olduğunda artık oluşan imgenin gerçek sonuçla bir alakası olmadığı aşıkardır.

Sonuç olarak CS yönteminin gürbüz bir sonuç verebilmesi için duvar parametrelerinin çok keskin bir şekilde tahminin şart olduğu görülmüştür. Buna ek olarak [130, 131] deki gibi farklı parametrelerin kullanılması ile veri kütüphanesinin oluşturulma yöntemi bir çözüm getirecektir fakat bu yöntemde imgenin kompleksliğini arttıracaktır.

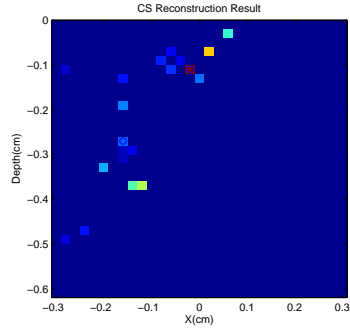
Bir başka taraftan, bu simülasyon standart geri çatma algoritması içinde gerçekleştirilmiştir. Simülasyon yine duvar kalınlığı 30 cm ve duvarın dielektrik geçirgenliği 4 olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.9(e,f) de geri çatma



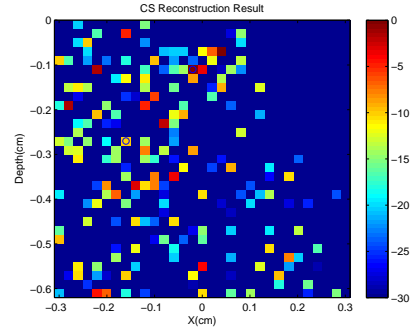
(a)



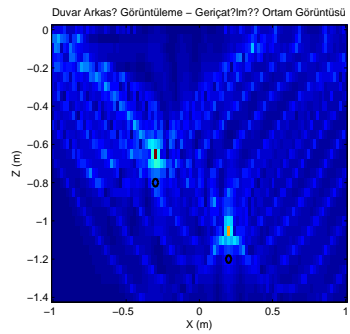
(b)



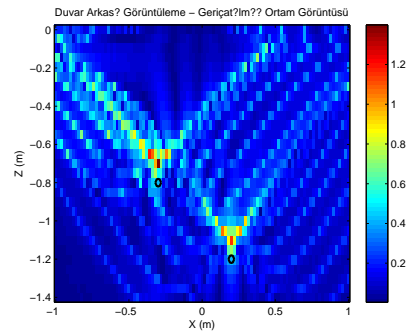
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.9: Bilinmeyen duvar parametrelerinin CS performansına etkisi: Duvar dielektrik geçirgenlik (a) 4.1, (b) 4.5 ve duvar kalınlığı (c) 30.2 cm and (d) 31 cm. Geri çatma: Duvar dielektrik geçirgenlik (e) 7 and duvar kalınlığı (f) 33 cm

performansı gösterilmektedir. CS in tersine geri çatma algoritmasının bilinmeyen parametrelerin etkilerine karşı daha az bozulma gösterdiği görülmektedir. CS in 2 mm de gösterdiği bozulma geri çatmada 3 cm, CS in dielektrik geçirgenlikte 0.5 birim gösterdiği bozulma geri çatmada 3 birimde görülür. CS in az ölçümle iyi performans vermesine karşılık geri çatmaya göre daha dayanıksız olduğu simülasyon sonuçlarında gösterilmiştir.

4.3.1.6 CS in Bant Genişliği Performansı

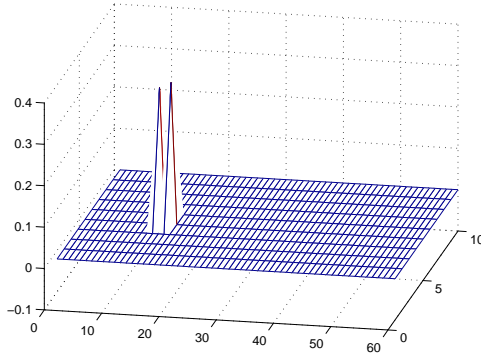
Alışlagelmiş mesafe çözünürlüğü (range resolution) uzaktan algılama sistemlerinde [127, 132] önemli parametrelerden biridir. Mesafe çözünürlüğü $\Delta R = c/2\beta$ şeklinde tanımlanır. Burada c ışık hızı ve β ise sistemin bant genişliğidir.

Bu çalışmada CS yöntemi ve geri çatma yönteminin bant genişlik performansları karşılaştırılmıştır. Simülasyonda sistemin başlangıç frekansı 0.5 GHz, bitiş frekansı 3 GHz olarak belirlenmiştir. Sistemin bant genişliği 2.5 GHz dir. Mesafe çözünürlüğünün tanımından yararlanılarak 6 cm olarak bulunmuştur. Teoride iki farklı hedef birbirine 6 cm den daha yakın olursa bu iki hedefin birbirinden ayırt edilmesi imkansız olmaktadır. Bu çalışmada hedefler çeşitli mesafeler ile birbirlerine yaklaştırılarak bu iki yöntemin performansları karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları Şekil 4.10 de verilmiştir.

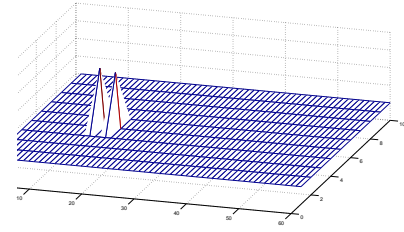
CS in mesafe çözünürlük performansı Şekil 4.10 (a) ve 4.10 (b) de incelenebilir. Geri çatmanın mesafe çözünürlük performansı ise Şekil 4.10 (c) ve 4.10 (d) de incelenebilir. Şekil 4.10 (a) da iki hedef arasındaki mesafe 2 cm dir. Şekil 4.10 (b) de iki hedef arasındaki mesafe 3 cm dir. Şekil 4.10 (c) de iki hedef arasındaki mesafe 6 cm dir. Şekil 4.10 de ise iki hedef arasındaki mesafe 10 cm dir.

Teoride hesaplanan sınır değer 6 cm olmasına rağmen, CS nin birbirine 2 cm uzaklıkta bulunan iki hedefi ayırt edebildiği tespit edilmiştir. Diğer taraftan geri çatma yönteminin teorideki değeri de performans olarak gösteremediği gözlemlenmiştir. Bu yöntemin iki hedefi birbirinden başarılı bir şekilde ayırt edebilmesi için gerekli minimum mesafenin 10 cm olduğu tespit edilmiştir. Halbuki teoride bu değer 6 cm di.

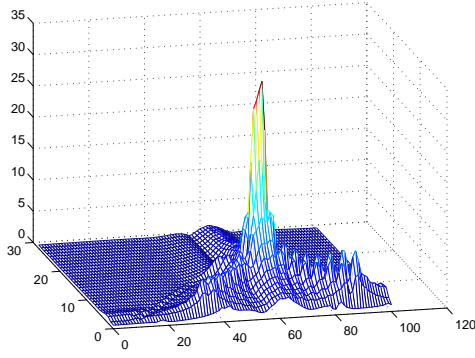
Sonuç olarak CS teorideki mesafe çözünürlüğünden daha iyi bir değerde iki



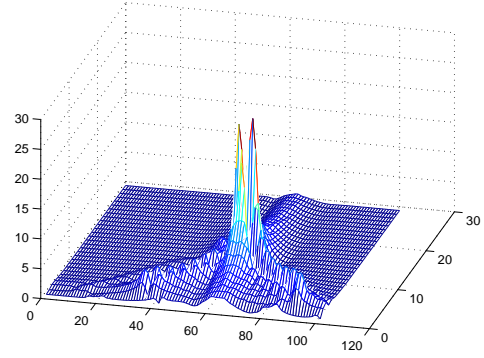
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.10: CS in mesafe çözünürlük performansı: $\Delta R = 6$ cm (a) $r = 2$ cm, (b) $r = 3$ cm. Geri çatmanın mesafe çözünürlük performansı: $\Delta R = 6$ cm (c) $r = 6$ cm, (d) $r = 10$ cm

hedefi ayırabilmektedir. Geri çatma algoritması ise teorideki değerden daha kötü değerlerde iki hedefi ayırt edebilmektedir. Kısaca CS nin geri çatmaya göre daha iyi bir çözünürlüğe sahip olduğu söylenebilir.

4.3.1.7 Yer Yansımalarının Performansa Etkileri

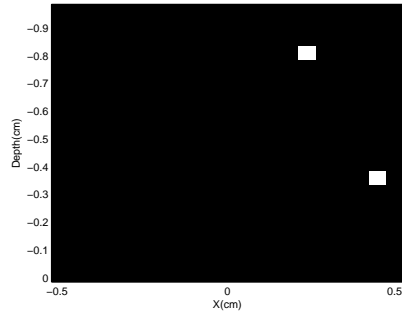
Engel arkası görüntüleme çalışmalarındaki diğer bir önemli konu yer yansımalarıdır. Yer yansımaları yüzey sınır bölgelerinden yansıyan elektromanyetik dalgalar ile ilgilidir. Dalga yayılım teorisine göre elektromanyetik dalgalar yüzey sınır bölgelerine rastladıklarında bir kısmı yüzeyin diğer tarafına geçiş yaparlar, dalgaların bir kısmı ise yüzeyden yansıyarak saçılım yaparlar. Bu saçılmalar nedeniyle gönderilen elektromanyetik dalganın gücünde kayıplar meydana gelir.

Yüzey yansımalarının etkileri bazı çalışmalarda [133] araştırılmıştır. Bu çalışmada duvar arkası görüntüleme üzerine simülasyonlar yapılmaktadır. Dolayısıyla elektromanyetik dalganın iki yüzeyden yansımalarının işin içine katılarak simülasyonlar yapılması gerekir. Bu simülasyonda birinci yüzeyden gelen yansıyan güç ile ikinci yüzeyden gelen yansıyan güç hedefteki alınan güce eklenerek performansa etkileri incelenmiştir. Birinci yüzeyden gelen yansıma (4.15) numaralı denklemde, ikinci yüzeyden yansıyan güç (4.16) numaralı denklemde ifade edilmiştir. Burada σ_1 and σ_2 yüzeylerin yansıma katsayıları, h duvar ile anten arasındaki yükseklik, d duvar kalınlığı, v ise dalganın yayılım hızıdır. Bu simülasyonda $\sigma_1 = 1$ ve $\sigma_2 = 1$ olarak, $h = 2$ cm ve $d = 3$ cm olarak belirlenmiştir. Dalga hızı duvarın dielektrik geçirgenliği yardımıyla hesaplanır. Son olarak alınan güç $P_r = P_1 + P_2$ şeklinde hesaplanmıştır. Simülasyon sonuçları Şekil 4.11 verilmiştir.

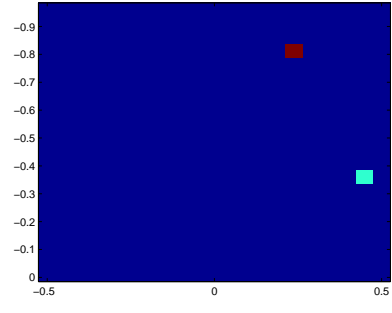
$$P_1 = \sigma_1 * e^{-jw(2h/v)} \quad (4.15)$$

$$P_2 = \sigma_2 * e^{-jw(2(h+d)/v)} \quad (4.16)$$

Simülasyon sonuçlarında CS in yüzey yansımalarından etkilenmediği gözlemlenmiştir. Yüzey yansımalarının alınan güce eklenmesine rağmen, CS hedefleri doğru bir şekilde bulabilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.11: Yüzey yansımalarının CS performansına etkisi (a) Hedefler, (b) CS sonucu.

5. İKİ BOYUTLU KÜTÜPHANELERİN KULLANIMI İLE HIZLI ÜÇ BOYUTLU GPR GÖRÜNTÜLEME UYGULAMASI

Yere işleyen radar uygulamaları; askeri uygulamalar, jeoloji uygulamaları ve sığ yüzeylerde görüntüleme uygulamaları gibi farklı alanlarda önemli bir teknoloji haline gelmiştir [37, 38]. Mayın taranması veya bazı faydalı algılamalarda hedefler tek çizgi üzerinde bulunmadıkları için görüntüleme çalışmalarında üç boyutta veri işlenmesine ihtiyaç duyarlar. Fakat, üç boyutta (3D) GPR görüntüleme tüm 3D migrasyonu için zaman alıcı bir özelliğe sahiptir. Bu yüzden bu yöntem, yüksek hızlı paralel işlemciler ve pahalı veri işleyici paketlere ihtiyaç duyar. Bunların yanı sıra 3D GPR görüntülemenin veri kütüphanesi yüksek boyutlu olacaktır. Bu nedenler ile günümüzdeki standart 3D GPR görüntüleme yöntemi doğrudan sistemlere uygulanamamaktadır.

İki boyutlu (2D) GPR gerçek zaman uygulamalarında uzun yıllardır kullanılmaktadır. Fakat 3D GPR görüntüleme için literatürde ve gerçek zaman uygulama örneklerinde çok az çalışma mevcuttur. Günümüzde GPR için 3D görselleştirme amaçlı etkili teknikler geliştirilmeye başlanmıştır. Geliştirilen bu yeni yaklaşımların çoğu arkeoloji amaçlı [39, 40, 41, 42] olarak GPR arayüzlerine eklenmiştir. Bu incelemeler genelde sürekli doğrusal özellikler içeren görüntülerdir. Fakat bu çalışmalara rağmen çoğu arkeoloji inceleyicileri yere işleyen radarın tüm

potansiyelini kullanamamışlardır. Elde edilen en iyi çözünürlüklü görüntüler çok karmaşık veri işleme bloklarından oluşmaktadır.

Bunların yanı sıra 3D görselleştirme ile ilgili ilginç [43, 44, 45, 46] araştırmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda imgenin üçüncü boyutu başarılı bir şekilde çeşitli uygulamalara eklenmiştir. Bir başka araştırma örneği ise 2.5D migrasyon yaklaşımı [47] olarak literatürde yerini almıştır. Bu uygulamanın avantajları: (1) hızlı ve uygulanması kolay oluşu, (2) çoğu hedefin yatay, doğrusal ve migrasyon yönüne paralel olmasıdır. Sonuç olarak 2.5D yöntemi de 3D uygulamaları için alternatif bir seçenek olarak uygulanabilir duruma gelmiştir. Şu ana kadar ki gerçekleştirilen 3D GPR uygulamaları incelendiğinde, tüm örneklerin zaman gereksiniminin çok olduğu, pahalı sistemlere ihtiyaç duyduğu ve veri içinde fazla hafıza gereksinimi duyduğu görülebilmektedir. Bu yüzden örnek 3D GPR uygulamaları ulaşılması zor işlerdir.

Yüzeye yakın sığ alanların görüntülenmesinde giderek artan 3D görselleştirme ihtiyacına rağmen çoğu GPR görüntüleme uygulamaları [48, 49, 50, 51] veriyi 1D veya 2D teknikler kullanarak oluştururlar. Bu yüzden 'crossline' uzayı hala uygulamalarda geliştirilememiştir. Direk olarak 3D GPR verisini gerçek yer altı konfigürasyonuna göre modellemek çok geniş bir hesaplama görevine sahiptir. Onlarca tarama pozisyonunda çok boyutlu veriler ölçülmekte dolayısıyla zaman ve hesaplama işlemleri zor görevler haline gelmektedir. Ayrıca 3D uzayda işlenen verinin görselleştirmesi standart zaman dilimi tekniğiyle beraber 3D yansımaların enerjilerinin gerçekleşmesini istemektedir.

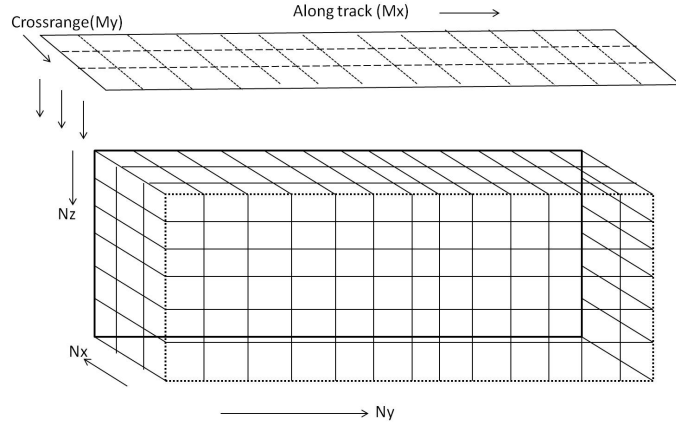
Bu çalışmadaki ana amaç 2D hedef uzayının simetri özelliğini kullanarak 3D GPR görüntüleme literatürüne şu ana kadar mevcut olmayan yeni bir yaklaşım sunabilmektir. Gerçeklenen yeni teknik 3D veri kütüphanesinin bir boyutunu yok eder ve hesaplama işlerini düzenler. Böylece 3D GPR görüntüleme başlıca sorunlar olan hafıza sorunu, hesaplama sorunu ve zaman sorunu gibi konulara iyileştirmeler getirir. Aşağıdaki bölümlerde öncelikle standart 3D GPR görüntüleme detayları ile verilecektir. Daha sonra yeni yöntem tanıtılacak ve simülasyon sonuçları sunulacaktır.

5.1 Standart 3D GPR Görüntüleme

GPR veri sunumunun amacı, işlenen veriyi gerçek yer altı imgesine çok yakın bir görüntü şekline dönüştürmektir. Veri gösterimi, veri yorumlanmasının merkezidir. Bu yüzden iyi bir görüntü oluşturmak yorumlamanın en önemli parçasıdır.

Yeryüzeyinin görüntülenmesi için üç basamak vardır: bir boyutlu dilim, iki boyutlu çapraz alan ve üç boyutlu görüntüleme. Bir boyutlu dilim tek başına pek bir anlam ifade etmez. Tek boyutlu dilimlerin yan yana gelmesi ile iki boyutlu veri oluşur. İki boyutlu alanların bir araya gelmesi ile 3D görüntüleme hacmi meydana gelir.

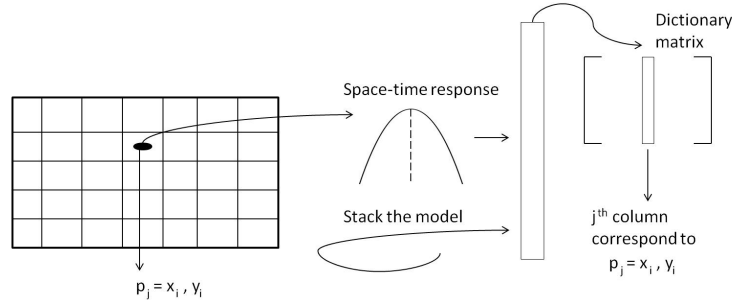
3D GPR görüntülemenin standart veri işleme kısmında ayrıklaştırma tekniği kullanılır. Hedef uzayı ayrıklaştırılarak ızgara noktalarına ayrılır. Ayrık hedef uzayı Şekil 5.1 de gösterilmiştir. 3D uzay bir çok paralel ve birbirine yakın düzlemler tarafından yapılanmıştır.



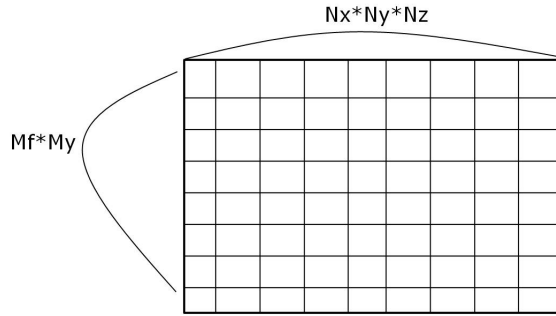
Şekil 5.1: Ayrıklaştırılmış 3D hedef uzayı.

Hedef uzayının görüntüsünü oluşturmak için kullanılan tekniklerden standart geri çatma yöntemi [134] teorisinde, uyumlu filtre (match filter) kullanılır. Uyumlu filtreyi gerçeklemek için ayrık noktadaki noktasal yansıtıcının uzay-frekans cevabı oluşturulur. Sonra bu cevap ile ölçüm matrisi filtrelenir. Bu işlem tüm ayrık noktalar için tekrarlanır. Anlatılan işlemlerin görselleştirilmiş hali Şekil 5.2 de verilmiştir. Bu işlemler sonrası veri kütüphanesi meydana gelir.

GPR görüntülemenin standart yöntemlerinde $(x_a, x_b), (y_a, y_b), (z_a, z_b)$ aralığındaki sürekli uzay görüntülenir. Bu uzay, ızgara noktalarına ayrıştırılır. Her bir eksendeki toplam ayırık nokta sayısı N_x, N_y, N_z formatı ile gösterilir. Ayrıca bu ayırık noktalar veri kütüphane matrisinin boyutunu şekillendirirler. Veri kütüphane matrisinin boyutsal gösterimi Şekil 5.3 de gösterilmiştir. Şekil 5.3 ü detaylı bir biçimde açıklayacak olursak, matrisin sütunları tüm ayırık noktaları içerir. Matrisin satırları ise frekans basamaklarını ve toplam tarama noktalarını içerir. Böylece matrisin boyutu $((M_f * M_y) \times (N_x * N_y * N_z))$ şeklini alır. Küçük değerlerde bile matrisin boyutunun çok büyük olacağı açıktır.



Şekil 5.2: Veri matrisi oluşturulması.



Şekil 5.3: 3D görüntüleme için oluşturulan veri matrisi boyutları.

Sistemi veri kütüphanesi oluşturarak çözmenin avantajı ayırık (sparse) çözümler sağlayan sıkıştırılmış algılama ve uyarlamalı dik takipleme (orthogonal matching pursuit (OMP)) yöntemlerinin uygulanabilir duruma getirebilmesidir.

Sıkıştırılmış algılama teorisinin detayları bir önceki bölümde açıklandığı gibi sinyalin ayırık katsayılarının kullanımı ile klasik tekniklerden daha az ölçüm ile

başarım sağlayan bir yaklaşımdır. K ayrık katsayılı, N boyutlu bir x sinyalinin ayrık gösterimi $x = \Psi s$ şeklinde ifade edilebilir. CS, $M = O(K \log N)$ adet rastgele doğrusal ölçümler alır. $y = \Phi x$ ifadesinden, konveks ℓ_1 minimizasyon yöntemi kullanılarak (5.1) s katsayıları çözümlenir. Böylece N adet ölçüm yerine M ölçüm alma sinyalin geri elde edilmesi için yeterli olacaktır. Burada $M < N$ ve Φ veri kütüphanesi matrisidir.

$$\min \|s\|_1, \quad \text{subject to} \quad y = \Phi \Psi s \quad (5.1)$$

OMP [135, 136] algoritması ℓ_1 yöntemine alternatif bir çözüm sağlayan minimizasyon metodudur. OMP yöntemi iteratif çalışan bir yöntemdir. Yöntem detayları [135, 136] de mevcuttur.

Ayrık geri dönüşüm algoritmalarında veri kütüphanesi matrisinden kaçmak imkansızdır. CS gibi algoritmaların çözümlenmesi için (OMP veya ℓ_1 yöntemi) veri matrisi bir gerekliliktir. Bu yüzden 3D hedef uzayına ait veri kütüphanesinin boyutlarının küçültülmesi sistemin ayrıklaştırılmış çözümü için de kritik bir önem taşımaktadır.

Şekil 5.1 hedef uzayının ve Şekil 5.3 de veri kütüphanesi boyutlarının anlaşılması ve 3D görüntülemenin dezavantajlarının görülebilmesi için bir senaryo anlatılmıştır. Örnek senaryoda hedef uzayındaki her eksen $1m$ uzunluğundadır ve her eksen $2cm$ lik ızgara noktalarına ayrıklaştırılmıştır. Sonuçta $1m^3$ lük bir hacim taranacaktır. Eksenlerdeki ayrık noktalar N_x, N_y, N_z belirlenen ızgara noktaların genişliklerine bağlı olarak 50 olacaktır. Frekans basamakları (M_f) da her tarama noktası için 100 olarak belirlenmiştir. Son olarak da tarama noktalarının sayısı $M_y = 20$ belirlenmiştir.

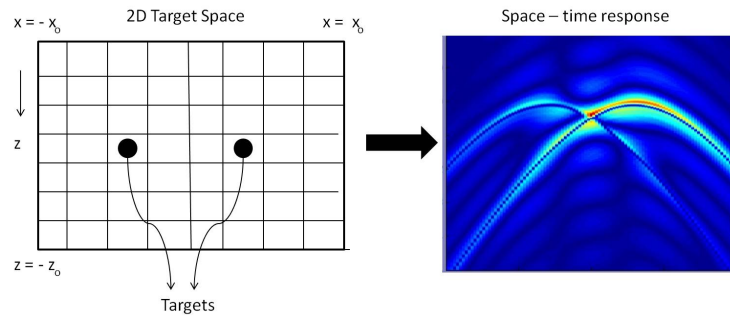
Tüm bu veriler göz önüne alındığında veri matrisinin boyutu 2000×125000 olacaktır. Toplam ayrık nokta sayısı böylece $2000 * 125000 = 250000000$ olur. Tüm bu noktalar birer kompleks sayı içerir. Her kompleks sayı reel ve sanal olmak üzere iki kısımdan oluşur. MATLAB analiz programında her bir değişken 32 bit ile ifade edilir. Böylece her bir ayrık nokta hafıza $64 \text{ bit} = 8 \text{ byte}$ lık bir alan kaplayacaktır. Toplamda veri matrisi için gerekli hafıza ise $250000000 * 8 = 2000000000 \text{ bytes} = 1.86265 \text{ gigabytes}$ olarak hesaplanabilir. Görüldüğü üzere çok küçük bir hacimin görüntülenmesi için bile gereksinim duyulan hafıza alanı uygulanabilir ölçütlerde

değildir. Ayrıca klasik yöntemin hesaplama yükü kabaca $(N_x * N_y * N_z) * (M_y * M_f$ çarpma + $M_y * M_f$ toplama) olarak ifade edilebilir bu da yaklaşık olarak N^5 adet matematiksel işlem demektir. Bu yüzden geniş bir hafızanın yanında bu işlemleri yapabilecek hızlı bir işlemci gerekir. Bu şartlar düşünüldüğünde klasik yöntemlerin iyileştirilmesi olmadan uygulanabilirlikleri neredeyse imkansızdır.

5.2 3D GPR Görüntüleme için Önerilen Yöntem

Bir önceki bölümde klasik 3D GPR görüntüleme yöntemi tartışılmış ve yöntemin uygulanabilirlik açısından dezavantajları belirtilmiştir. Yöntemin gerçek uygulamalarda kullanılmasını zorlaştıran hafıza problemi ve hesaplama yükü sorunu gibi sebepler nedeniyle 3D GPR literatüründe bu sorunları çözebilecek yeni bir metodoloji ihtiyacı vardır. Bu bölümde bahsedilen sorunlara çözüm sunan 3D GPR görüntülemeye yeni bir bakış açısı kazandıracak yaklaşım tartışılacaktır.

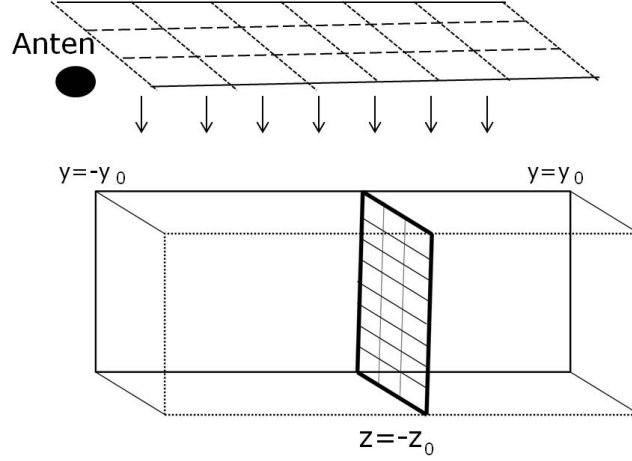
Öncelikle, önerilecek yeni yöntemin temel amacı veri matrisinin boyutunu düşürerek hafızadan kazanım sağlamak ve sistemin hesaplama yükünü azaltarak zamandan kazanım gerçekleştirmektir. Bu metod, bu başarımları sağlamak için ayrı noktaların ötelenme özelliğini kullanır. Şekil 5.4 ayrı noktaların ötelenme özelliği görülebilir.



Şekil 5.4: Ayrı noktaların ötelenme özelliği.

2D tarama verisinde aynı satırdaki her ayrı nokta benzer uzay-zaman cevabına sahiptir. Bu cevaplar ızgara noktalarının mesafesiyle ilişkili olarak birbirlerinin ötelenmiş şekilleridir. 3D veri kütüphanesinin boyutunu düşürmek için belirtilen ötelenme özelliği kullanılacaktır.

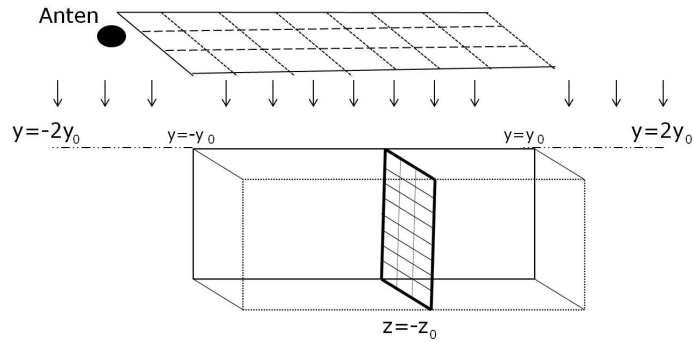
Yeni yöntemin anlaşılması için öncelikle 3D ölçüm verisi ile 3D model verisi arasındaki farklılığın açıklanması gerekir. Şekil 5.5 de 3D ölçüm verisi senaryosu görülebilir.



Şekil 5.5: 3D ölçüm verisi senaryosu.

Şekil 5.5 de anten tarama sınırları $y = -y_0$ ve $y = y_0$ koordinat noktaları arasında olduğu varsayılmıştır. Tarama verisi ise $y = 0$ noktasında varsayılmış; 3D ölçümleri $y = -y_0$ ile $y = y_0$ aralığında oluşturulmuştur.

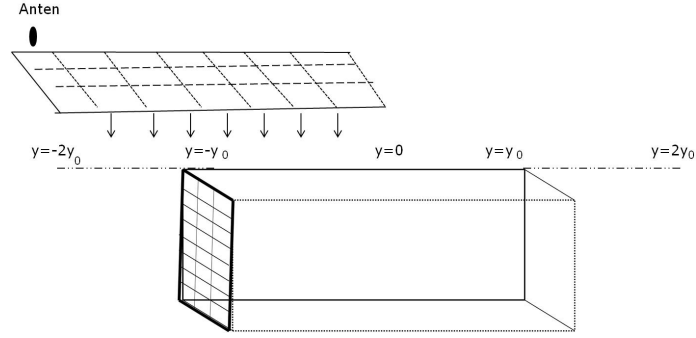
3D model verisinin görselleştirilmesi için Şekil 5.6 incelenebilir.



Şekil 5.6: 3D model verisi senaryosu.

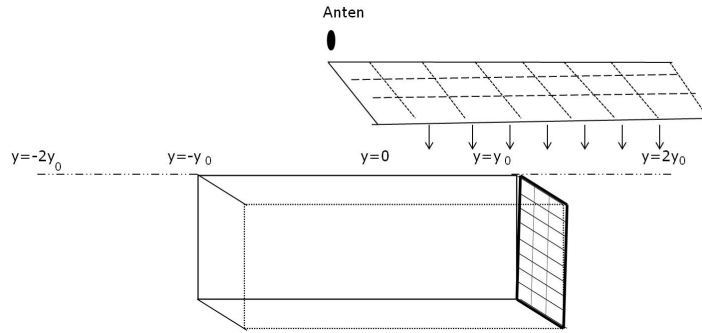
Şekil 5.5 de anten tarama sınırları yine 2 birim genişliğindedir. Şimdi, $y = -y_0$ daki 2D tarama verisi incelensin. Bu noktadaki tarama verisi için tarama sınır koordinatları $y = -2y_0$ noktasında ve $y = 0$ noktasında olur ise önceki tarama

verisi gibi toplam tarama miktarı 2 birim olacaktır. Şekil 5.7 de bu yapı görülebilir. Bu yapının Şekil 5.5 deki modelin ötelenmiş bir hali olduğu açıktır.



Şekil 5.7: 3D hedef uzayının başlangıç noktasındaki tarama verisi.

$y = y_0$ noktasındaki tarama noktası için anten tarama koordinat sınırları sırasıyla $y = 0$ ile $y = 2y_0$ olacaktır. Bu yapıda 3D hedef uzayının en sağ noktasındaki tarama verisinin ötelenme özelliğini gösterir. Bu yapı Şekil 5.8 de görülebilir.



Şekil 5.8: 3D hedef uzayının en sonundaki tarama verisi.

Aslına bakılırsa, yukarıda verilen tüm 2D tarama düzlemleri birbirinin aynıdır. Her birini teker teker modellemenin bir önemi yoktur. Önemli olan şey, 3D hedef uzayının sınır noktalarındaki tarama verileri için gerekli anten pozisyonlarının net olarak belirlenmesidir. Anten sınır pozisyonları Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 deki düzlemler için olacak pozisyonlardır.

Anten tarama pozisyonları belirlendikten sonra yapılacak ana amaç sadece $y = 0$ daki 2D tarama verisini kullanarak 3D imgeyi geliştirebilmektir. Belirtilen ötelenme özelliğinin kullanımı aşağıda basamak basamak açıklanmıştır:

- 1) Hedef uzayı $(-y_0, 0, y_0)$ pozisyonlarında oluşturulmalıdır.
- 2) 3D veri kütüphane matrisi $(-2y_0, 0, 2y_0)$ pozisyonlarına göre oluşturulmalıdır.
- 3) Model verisi $(-y_0, 0, y_0)$ pozisyonlarında modellenmelidir.

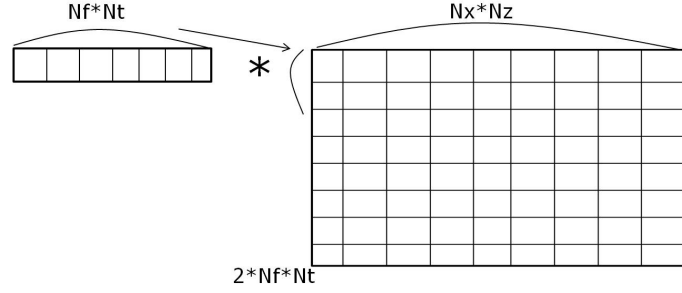
3D veri kütüphane matrisi $(-2y_0, 0, 2y_0)$ pozisyonlarını baz alarak oluşturulduğu zaman, hedef uzayındaki tüm 2D tarama düzlemleri modellenmiş olur. Yani sadece $y = 0$ daki tarama verisi ile tüm 3D hedef uzayı bir bakıma modellenmiş sayılır. Sonuç olarak geliştirilen yeni yöntemde tüm 2D tarama verilerinin modellenmesine gerek yoktur. Bu yüzden 3D hedef uzayının Y eksenini, 3D model verisi oluşturulurken kullanışsızdır. Bunun sonucu olarak 3D veri matrisinin bir boyutu azaltılmış olur. Klasik 3D görüntüleme yönteminde, 3D veri boyutu $(M_f * M_y)X(N_x * N_y * N_z)$ kadardır. Diğer taraftan, yeni yöntemdeki 3D veri boyutu $(2 * M_f * M_y)X(N_x * N_z)$ şeklini alır. Veri boyutunun önemli miktarda azaltıldığı ve hafızadan kazanım yapıldığı açıktır.

5.3 Hesaplama Yüğü

Klasik yöntemin hesaplama yüğü düşünöldüğünde matematiksel operasyon sayısı $(N_x * N_y * N_z) * (M_y * M_f \text{ çarpma} + M_y * M_f \text{ toplama})$ şeklinde ifade edilebilir. Ortalama olarak toplam hesaplama yüğü N^5 adet matematiksel operasyondan oluştuğı söylenebilir.

Yeni teknikte ise matematiksel yapı biraz farklıdır. Yeni yöntemin matematiksel yapısı Şekil 5.9 da verilmiştir.

Yeni yöntemde, $M_f * M_y$ boyutundaki vektör ile $(2 * M_f * M_y)X(N_x * N_z)$ boyutlarındaki veri matrisi konvolv edilir. Konvolüsyon işlemi vektörün veri matrisi sütunlarında ötelenerek gerçekleştirilir. Konvolüsyon işlemi düşünöldüğünde, matematiksel işlem sayısı ortalama olarak N^5 şeklinde kabul edilebilir. Yani yeni yöntem sistemin matematiksel işlem şeklini değıştirmiş fakat toplamda yapılan işlem sayısını azaltamamıştır. Fakat diğer taraftan; konvolüsyon işleminin



Şekil 5.9: Yeni yöntemin matematiksel yapısı.

yerine FFT ile çözüm sağlanabileceği gibi bir avantaj oluşturulmuştur. Normal konvolüsyon işleminde $N * N$ adet çarpım operasyonu mevcuttur. Bu sayı FFT kullanılır ise $N * \log(N)$ olarak güncellenecektir. Buradan da görülebileceği gibi sistemin çözümü için FFT kullanımı matematiksel operasyon sayısını önemli bir düzeyde azaltacaktır. Bunların yanı sıra sistem OMP algoritması ile çözüm getiren sıkıştırılmış algılma tekniği ile de çözülebilecektir.

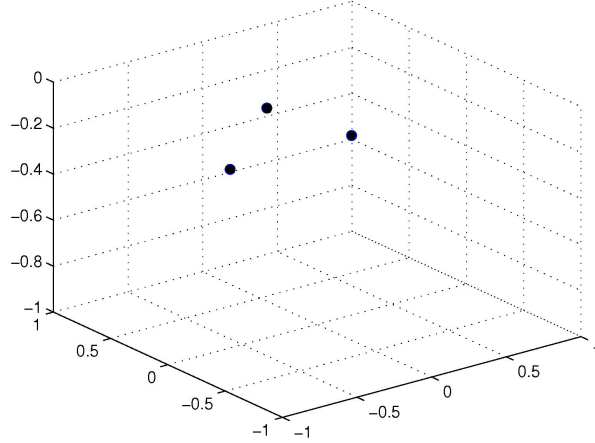
5.4 Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde yeni yöntemin başarımının araştırılması için gerçekleştirilen simülasyon sonuçları sunulmuştur. Simülasyon basamak frekans sürekli dalga GPR sistemine göre modellenmiştir. Sistemin başlangıç frekansı 0.5 GHz, bitiş frekansı 5.5 GHz ve basamak frekans değeri 80 MHz olarak belirlenmiştir. Böylece frekans sayısı (M_f) = 63 olacaktır.

Hedef uzayı tasarımı ise şu şekilde yapılmıştır. X eksenini -0.5 m - 0 . m aralığında, Z eksenini 0 m - -1 m aralığında ve Y eksenini -1 m to 1 m aralığında modellenmiştir. Böylece $N_x = 51$, $N_z = 51$ ve $N_y = 101$ olarak belirlenmiştir. Veri uzayı Şekil 5.5 gösterilmiştir. Veri matrisi bu değerlere göre modellenmiştir.

Veri kütüphanesi matrisi tasarımı için anten pozisyonları sırasıyla -2 m to 2 m de olacak şekilde oturtulmuştur. Şekil 5.6 veri kütüphanesi sistemi gösterilmiştir. Veri kütüphanesinin formu 2 boyutludur. Sadece $y = 0$ daki tarama düzlemi kullanılarak geliştirilmiştir. Böylece y eksenini geçersiz duruma gelmiştir.

Simülasyonda kullanılan hedefler noktasal hedeflerdir ve sırasıyla $(0, -0.25, -0.13)$, $(0, 0.44, -0.16)$ ve $(0, 0.76, -0.49)$ pozisyonlarında yerleştirilmiştir. Hedef uzayı Şekil 5.10 da verilmiştir.



Şekil 5.10: Hedef uzayı.

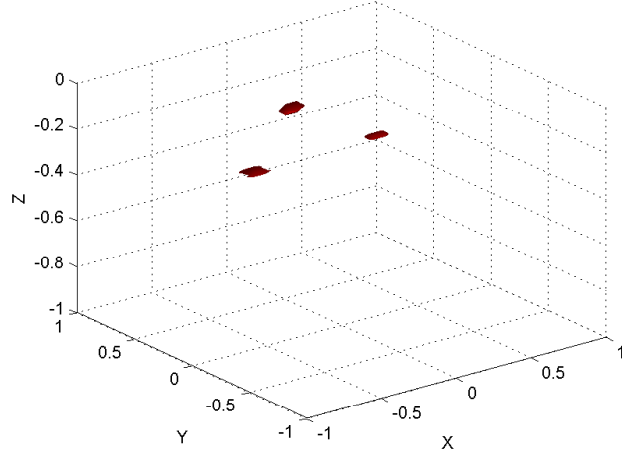
Simülasyonda toplam tarama noktası M_y 20 olarak belirlenmiştir. Sonuçta veri boyutu $(2x20x63) * (51 * 51) = 2520 * 2601$ olarak şekillenmiştir. Diğer taraftan klasik 3D görüntüleme yöntemine göre veri boyutu $(20x63) * (51 * 51 * 101) = 1260 * 262701$ şeklinde oluşacaktır. Görüldüğü üzere veri boyutu 262701 den 2601 a düşürülmüştür.

3D görüntüleme simülasyon sonuçları Şekil 5.11 de verilmiştir. Hedefler başarılı bir şekilde bulunmuş ve gösterilebilmiştir.

Düşünüldüğü gibi ayırık noktaların ötelenme özelliği veri boyutunun düşürülüp hafızadan kazanım gerçekleştirilmesinde net bir şekilde başarı sağlamıştır.

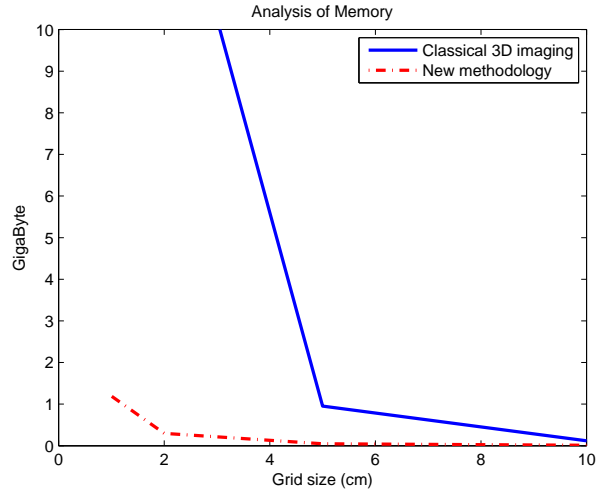
Klasik yöntem ile yeni yöntemin hafıza performanslarının karşılaştırılması için farklı ızgara genişliklerindeki veri kütüphanesindeki ayırık noktalar hesaplanarak hafıza karşılıkları simülasyon sonucu olarak Şekil 5.12 verilmiştir.

Simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi yeni yöntemin hafıza performansı klasik yöntemle göre açık bir şekilde daha başarılıdır.

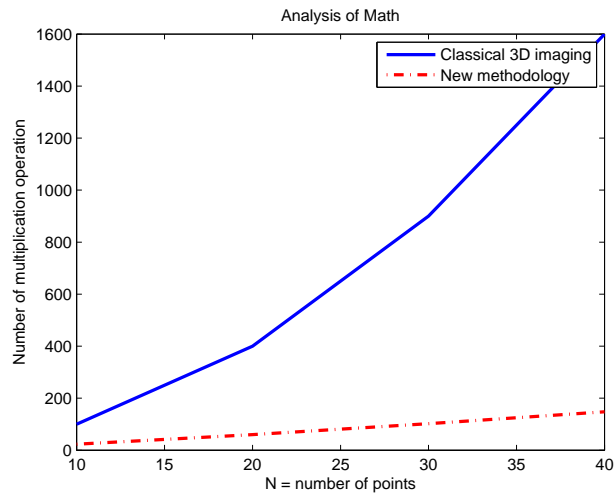


Şekil 5.11: Simülasyonun 3D görüntü sonuçları.

Bu simülasyonlara ek olarak klasik yöntem ile yeni yöntemin FFT ile gerçekleştirilmesi sonucu hesaplama yükünün nasıl değişeceğinin görülebilmesi için simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bir önceki kısımda toplam çarpma işlemi sayılarının sırasıyla N^2 ve $N * \log(N)$ olduğu anlatılmıştır. Simülasyonda bu değerler ayrık nokta N sayısının değişimine göre çizdirilmiştir. Simülasyon sonuçları Şekil 5.13 verilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre de FFT kullanıldığı zaman sistemin hesaplama yükü önemli bir şekilde azalacaktır.



Şekil 5.12: Hafıza performans analizi.



Şekil 5.13: Matematiksel işlem performansı.

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında engel arkası görüntüleme yöntemlerinden yer altı görüntüleme, duvar arkası görüntüleme ve 3D yer altı görüntüleme üzerinde iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Mevcut standart yöntemlerin performans incelemeleri yapılmış ve çeşitli durumlarda daha iyi performans gösterebilmeleri için öneriler sunulmuştur.

Tezin ikinci bölümünde yer altı radarı için tanımlanan temel parametrelerin ne olduğu ve bu parametrelerin nasıl sınıflandırıldığı hakkında literatür bilgisi verilmiştir. Ayrıca bu bölümde yer altı radarı için veri modellenmesi, modellenen verinin işlenmesi ve görüntü oluşturma metotları tanıtılmıştır. Bu bölüm bir sonraki bölümde anlatılan yer altı radarı için geliştirilen veri benzetim modülünün daha iyi anlaşılması için bir ön hazırlık olma özelliğini taşır.

Tezin üçüncü bölümünde Matlab GUI kullanarak geliştirilen GPR veri benzetim modülü, basamak frekans GPR sistemleri veri benzetimi ve geri çatma ile görüntü oluşturma çalışmaları sunulmuştur. Bu modül klasik GPR simülatörlerinin çok karmaşık yapılardan ziyade, basitçe alınan girdilerden belirlenen senaryo çerçevesinde ve seçilen görüntüleme ve sinyal işleme tipine bağlı olarak kullanıcıya benzetim yapma ve karşılaştırma imkanı sunmaktadır. Oluşturulan modülü diğer simülatörlerden ayıran özelliği geliştirilebilmesi ve genişletilmesinin basit oluşudur. Geliştirilen modül üzerine eklenmesi düşünülen çalışmalar mevcuttur. Örneğin, dürtü GPR sisteminin eklenmesi planlanmaktadır. Ayrıca sinyal işleme algoritmasına üzerinde çalışılan Stolt ve F-K migrasyonu ve sıkıştırılmış algoritma çeşitlerinin de eklenmesi planlanmaktadır. Bunların dışında yüzey yansımalarının modellenmesi ve benzetim verisine eklenmesi bunun yanında yüzey yansımalarını çıkartan yöntemlerin de modüle eklenmesi planlanmaktadır. Geliştirilen

modül sunduğu çalışma kolaylığı ile karmaşık yapılara girmeden GPR verisinin kullanıcıya aktarımını sağlayan veri benzetim ortamıdır. Bu çalışma ve ileride genişletilmiş çalışmalar internet ortamında paylaşımı da sağlanacaktır. Böylece modül herkesin kullanımına açık olacaktır.

Tezin dördüncü bölümünde CS tabanlı duvar arkası görüntüleme uygulaması sunulmuştur. Gerçekleştirilen çalışmada daha önceki sistemlerin zaman gecikmesi hesabının gerçek üç katmanlı modele uygun olmadığı vurgulanmış ve bunun iyileştirilmesi için ray-tracing metoduna benzer bir yaklaşım önerilmiştir. Bu bölümdeki tüm simülasyonlar önerilen yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları verilmeden önce sıkıştırılmış algılama teorisi açıklanmıştır. CS tabanlı duvar arkası görüntüleme uygulaması sonuçlarında toplam ölçüm miktarının %20 si ile CS in başarılı bir geri elde etme gerçekleştirdiği görülmüştür. Ayrıca geri çatma yönteminin toplam ölçüm miktarının %20 alınarak geri elde etme performansının iyi olmadığı gözlemlenmiştir. Daha sonra CS in çeşitli senaryolardaki performansı incelenmiştir. Öncelikle ayrıklık seviyesi ile istenen ölçüm sayısı arasındaki ilişkinin anlaşılabilmesi için yeni bir analiz simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarında hedef sayısının artması veya başka bir değiş ile hedef uzayının ayrıklık seviyesinin artışı ile istenen ölçüm sayısını doğrusal olarak birbiriyle ilişkili olduğu simülasyon sonuçlarında görülebilmektedir. Bunlara ek olarak uzay-frekans ortamında rastgele veya düzgün bir biçimde veri seçimi sonuçları etkilemediği görülmüştür. Daha sonra CS in performansında ölçüm stratejisinde ölçümlerin frekans ve ayrık uzaya uygun bir şekilde nasıl dağılması gerektiğinin çözülebilmesi için simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarında ayrık tarama noktalarının sayısı 4-7 aralığına ulaşana kadar ne kadar fazla ayrık nokta kullanılarak ölçüm alınır ise performansın o kadar iyi olduğu görülmüştür. Daha sonra gürültü seviyesinin görüntüleme performansına etkilerinin analizi için simülasyon koşturulmuştur. Simülasyon sonuçlarında düşük SNR değerlerinde CS in yeterli performansı için gerekli ölçüm sayısının fazla olduğu görülmüştür. Bunlara ek olarak CS in bazı varsayımlar olmadan nasıl performans göstereceği konusuna bakılmış ve bazı çalışmalar yapılmıştır. İlk olarak hedeflerin oluşturulan ızgara noktalarında olmadığı zaman CS in performansının incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarında CS performansının özellikle yüksek ızgara değerlerinde çok bozulduğu görülmektedir. En düşük ızgara değeri 1 cm de hedeflerin bulunduğu gözlemlenmiştir. Bu performansa ek olarak ızgara

noktaları 2 cm ve 5 cm yapıldığında başarımın iyice kötüleştiği görülmüştür. CS uygulamalarında hedefin ızgara noktalarında bulunmama sorununun performansı etkileyen önemli bir konu olduğu görülmüş, ilerleyen çalışmalarda bu sorunun çözümü için çalışılması planlanmıştır. Bunların dışında duvar parametrelerinin tam olarak bilinmediği durumlarda CS performansı incelenmiştir. Sonuç olarak CS in gürbüz bir performans vermediği gözlemlenerek bu sorununun çözülmesi gereken önemli bir konu olduğu görülmüştür. Son olarak CS in bant genişlik performansı ve yer yansımalarının sisteme etkileri konuları incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarında CS in teorideki mesafe çözünürlüğünden daha iyi bir değerde iki hedefi ayırt edebildiği geri çatma algoritmasının ise teorideki değerden daha kötü değerlerde iki hedefi ayırt edebildiği görülmüştür. Kısaca CS nin geri çatmaya göre daha iyi bir çözünürlüğe sahip olduğu söylenebilir. Yüzey yansımaları için gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarında CS in yüzey yansımalarından etkilenmediği gözlemlenmiştir. Yüzey yansımalarının alınan güce eklenmesine rağmen, CS hedefleri doğru bir şekilde bulabilmiştir.

Tez çalışmasının beşinci kısmında, klasik 3D GPR görüntüleme yönteminin gerçek çalışmalarda uygulanabilirlik bakımından zaman kaybı fazla olan, hafıza sorunları yaşayan ve hesaplama bakımından yoğun olduğu için sistem gereksinimi yüksek olan bir method olduğu açıklanmıştır. Bu kısımda bahsedilen sorunların çözümü olabilecek 3D GPR görüntülemeye yeni bir bakış açısı getiren yaklaşım açıklanmıştır. Bu yaklaşımın veri matrisini bir boyut düşürmesi ve farklı bir matematiksel çözümleme sunmasıyla 3D GPR görüntüleme gerçek uygulamalarda uygulanabilir şartlara yakınlaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasından sonra planlanan gelecek çalışmalar öncelikle yukarıda da bahsedildiği gibi GPR veri benzetim modülünün genişletilmesi ve sinyal işleme yöntemlerine eklentiler yapılmasıdır. Bunun dışında duvar arkası görüntüleme sıkıştırılmış algılamının performansını etkileyen çeşitli faktörlerin çözülmesi için çalışmaktır. Ek olarak 3D GPR görüntüleme veri matrisini bir boyut daha düşürerek çok daha iyi performans sağlayacak bir şekilde gerçekleştirilen yöntemi revize etmektir. Ayrıca GPR laboratuvarında gerçek veriler toplayarak bu çalışmaları gerçek veriler ile gerçekleştirmektedir.

Kaynakça

- [1] David J. Daniels, Ground Penetrating Radar, 2nd edition. *IET radar sonar and navigation series*, 2004.
- [2] Harry M. Jol, Ground penetrating radar: theory and applications. *Elsevier*, 2009.
- [3] M. Soumekh, Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms. *Wiley-Interscience*, 1999.
- [4] N. Metje, P.R. Atkins, M.J. Brennan , D.N. Chapman , H.M. Lim , J. Machell , J.M. Muggleton, S. Pennock , J. Ratcliffe , M. Redfern , C.D.F. Rogers , A.J. Saul , Q. Shan , S. Swingler, A.M. Thomas, Mapping the Underworld Ő State-of-the-art review. *Tunnelling and Underground Space Technology*, pp. 568Ū586, 2007.
- [5] S. Hubbard, C. Jinsong, K. Williams, Y. Rubin, and J. Peterson, Environmental and agricultural applications of GPR, in Proc. 3rd Int. Workshop on Adv. Ground Penetrating Radar, 2005, pp. 45-49
- [6] M. Sciotti, F. Colone, D. Pastina, and T. Bucciarelli, GPR for archaeological investigations: Real performance assesment for different surface and subsurface conditions, in Proc. IGARSS 03,2003, pp. 2266-2268
- [7] G. Grandjean, J. Gourry, and A. Bitri, Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: Study on a test site, *J. Appl. Geophys.*, vol. 45,no. 3,pp. 141-156,2000.
- [8] Fang Guangyou, Michele Pipan, Instantaneous Parameters Calculation And Analysis Of Impulse Ground Penetrating Radar (GPR) Data. *IEEE*, 2001.

- [9] D.J Daniels, Surface Penetrating Radar. *IEEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 6*, 1996.
- [10] K.Iizuka, A.Freundorfer, K.Wu,H.Mori, H.Ogura,V.Nguyen, Step frequency radar. *J.Appl.Physics*, vol.56, no.9, pp.2572-2583, 1984.
- [11] Kong,F.-N., Ground penetrating radar using a frequency sweeping signal. *Proceedings, Third International Conference on GPR, Lakewood, Colorado*, 1990.
- [12] A.Langman, The design of hardware and signal processing for a stepped frequency continuous wave ground penetrating radar. *Ph.D. dissertation, Univ. Cape Town, Cape Town, South Africa*, 2002.
- [13] Narayanan, R.M., Xu, Y., Hoffmeyer, P.D., and Curtis, J.O., *Design, performance, and applications of a coherent ultra-wideband random noise radar*, 2001.
- [14] J.D. Taylor (ed.), Ultra-Wideband Radar Technology. *CRC Press, Boca Raton, Florida*, pp. 181-203, 2001.
- [15] David K. Cheng, Field and wave electromagnetics 2nd edition. *Addison Wesley*, 1992.
- [16] W. C. Chew, J.-M. Jin, E. Michielssen, and J. Song, Fast and Efficient Algorithms in Computational Electromagnetics. *Artech House Publishers*, 2001.
- [17] Spanoudakis S.Nikolaos, Vafidis Antonios, GPR-PRO:A MATLAB module for GPR data processing. *IEEE*, 2009.
- [18] Randy J. Jost, Ph. D.,Avinash Uppuluri,M.S., MATLAB Based Toolkit For An Introductory Course in SAR Image. *IEEE. Processing, Utah State University*, 2005.
- [19] www.gprmax.org.
- [20] Mathworks, INC. , MATLAB 7 Creating Graphical User Interfaces. 2004.
- [21] Moeness G. Amin, Through The Wall Radar Imaging. *CRC Press*, 2010.

- [22] E. J. Baranoski, Through-wall imaging: Historical perspective and future directions. *Journal of the Franklin Institute*, vol. 345, pp. 556-569, 2008.
- [23] Qiong Huang and Lele Qu and Bingheng Wu and Guangyou Fang, UWB Through-Wall Imaging Based on Compressive Sensing. *IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing*, vol.48, no.3, pp.1408 - 1415, 2010.
- [24] Yeo-Sun Yoon and Moeness G. Amin, Imaging of Behind the Wall Targets Using Wideband Beamforming with Compressive Sensing. *Statistical Signal Processing*, pp. 93 - 96, Aug. 2009.
- [25] Chang-Fa Yang, Boau-Cheng Wu, Chuen-Jyi Ko, A Ray Tracing Method for Modelling Indoor Wave Propagation and Penetration. *IEEE Tran. on Antennas and Propagation*, vol. 46, no . 6, June 1998.
- [26] Atsushi Takagi, Ray Tracing Method. *United States Patent*, Appl. no: 616,455 March 15, 1996.
- [27] D. L. Donoho, Compressed Sensing. *IEEE Trans. Information Theory*, vol.52, no.4 pp. 1289-1306, 2006.
- [28] E.J. Candes, J.Romberg, T.Tao, Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 52, pp. 489-509, 2006.
- [29] M. Lustig, D.L. Donoho, J.M. Pauly, Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging. *Magnetic Resonance in Medicine*, vol. 58, no.6, pp. 1182-1195, Dec. 2007
- [30] W. Bajwa and J. Haupt and A. Sayeed and R. Nowak, Compressive wireless sensing. *Int. Conf. on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pp. 134 - 142, April 2006.
- [31] A.C. Fannjiang, P. Yan, T.Strohmer, Compressed remote sensing of sparse objects. *Archieve*, 2009.
- [32] Y. Yu, A. Petropulu, H.V. Poor, Compressive sensing for mimo radar. *ICASSP*, 2009.
- [33] R. Baranuik, P. Steeghs, Compressive radar imaging. *IEEE Radar Conf.*, 2007.

- [34] A.C. Gurbuz, J.H. McClellan, W.R. Scott Jr., Compressive sensing for GPR imaging. *Asilomar Conf.*, 2007.
- [35] A.C. Gurbuz, J.H. McClellan, W.R. Scott Jr., Compressive sensing for subsurface imaging using ground penetrating radars,. *Signal Processing*, vol. 89, no.10, pp. 1959- 1972, 2009.
- [36] A.C. Gurbuz, J.H. McClellan, Volkan Cevher, A compressive Beamforming Method. *ICASSP*, 2008.
- [37] Conyers, L. B, Goodman, D., Ground-Penetrating Radar - An introduction for archaeologists. 1997.
- [38] Fisher, S.C., Stewart, R.R., and Jol, H.M., Processing ground penetrating radar (GPR) data. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol 1, issue 2, August 1996, p. 89-96.
- [39] Goodman, D, J. Steinberg, B. Damiata, Y. Nishimura, K. Schneider, H. Hiromichi, N. Higashi, GPR Overlay Analysis for Archaeological Prospection. *Proceedings of the 11th International Conference on Ground Penetrating Radar, Columbus, Ohio, USA*, 2006.
- [40] Grasmueck, M. and D.A. Viggiano, Integration of Ground-Penetrating Radar and Laser Positioning Sensors for Real-Time 3-D Data Fusion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol 45, no 1, January 2007.
- [41] Groenenboom, J., J. van der Kruk and J.H. Zeeman, 3D GPR data acquisition and the influence of positioning errors on image quality. *63rd EAGE Conference and Technical Exhibition, Amsterdam*, pp 11-15, June 2001.
- [42] Leckebusch, J, Ground-Penetrating Radar: A Modern Threedimensional Prospection Method. *Archaeologica Prospection*, pp 213-240.
- [43] Valle S., Zanzi L., Sghezzi M., Lenzi G., Friberg J., Ground penetrating radar antennas: theoretical and experimental directivity functions. *Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, Apr 2001.
- [44] Lualdi, M., L. Zanzi and G. Sosio, A 3D GPR Survey Methodology for Archaeological Applications. *Proceedings of the 11th International Conference on Ground Penetrating Radar, Columbus, Ohio, USA*, 2006.

- [45] Valle, S., L. Zanzi and G. Lenzi, 2D and 3D focusing of ground penetrating radar data for NDT. *in Proceedings of the 8th International Conference on Ground Penetrating Radar, Gold Coast, Australia*, May 23-26.
- [46] Zanzi, L. and S. Valle, Elaborazione di dati GPR 3D per la ricerca di mine antiuomo. *in Atti del 18qr Convegno Nazionale del Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida, Roma*, Novembre 1999.
- [47] Roger Roberts, David Cist, and Andreas Kathage, Full-Resolution GPR Imaging Applied to Utility Surveying: Insights from Multi-Polarization Data Obtained over a Test Pit. *IWAGPR*, 2009.
- [48] Rita Streich, Jan van der Kruk and Alan G. Green, Vectormigration of standard copolarized 3D GPR data. *Surface and borehole ground-penetrating-radar developments Geophysics*, v. 75, p. 75A103-75A120, September 2010.
- [49] Van der Kruk, J, Wapenaar C.P.A and Fokkema, J.T, Comparison of resolution functions of 3-D multi-component with 3-D singlecomponent imaging algorithms for ground penetrating radar data. *Proceedings 5th SEGJ International Symposium- Imaging Technology - The Society of Exploration Geophysicists of Japan (SEGJ), Tokyo, Japan*, January 2001.
- [50] Pipan, M., L. Baradello, E. Forte, A. Prizzon and I. Finetti, 2D and 3D processing and interpretation of multi-fold ground penetrating radar data. *a case history from an archaeological site, J. Appl. Geophys*, pp 271-292.
- [51] Sigurdsson, T. and T. Overgaard, Application of GPR for 3D visualization of geological and structural variation in a limestone formation. *J. Appl. Geophys*, pp 29-36.
- [52] William T. Cochran, James W. Cooley, David L. Favin, Howard D. Helms, Reg A. Kaenel, William W. Lang, George C. Maling, Jr., David E. Nelson, Charles M. Rader, Peter D. Welch, What is the Fast Fourier Transform? *Proceedings of the IEEE*, vol.55, no. 10, October 1967.
- [53] Mark Farwell, Jennifer Ross, Richard Luttrell, Douglas Cohen, Wilbur Chin, Traian Dogaru, Sense through the wall system development and design considerations. *Journal of the Franklin Institute*, pp. 570-591, 2008.

- [54] D.G. Falconer, R.W. Ficklin, K.W. Konelige, Robot mounted through wall radar for detecting, locating and identifying building occupants. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automations*, vol. 2, pp. 1868-1878, April 2000.
- [55] Joongsuk Park, Development of a microwave and millimeter wave integrated circuit stepped frequency radar sensors for surface and subsurface profiling. *Phd thesis, Texas A M University*, December 2003.
- [56] Gordon Farquharson, Design and implementation of a 200 to 1600 MHz stepped frequency, Ground penetrating radar transceiver. *Phd Thesis, University of Cape Town*, August, 1999.
- [57] Cassidy, N.J., A review of practical numerical modelling methods for the advanced interpretation of ground-penetrating radar in near-surface environments. *Near Surface Geophysics*, vol. 5, no.1, pp. 5-22, 2007.
- [58] VE Giannopoulos A., Modeling ground penetrating radar by GprMax. *Construction and Building Materials*, vol. 19, pp. 755-762, 2005.
- [59] Goodman, D.J., Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics*, vol. 59, no. 1, pp. 224-232, 1994.
- [60] Olhoeft, G.R., Acquisition, Processing, Modeling and Display of Dispersive Ground Penetrating Radar Data. *GROADARTM*, version 2001.01, 2001.
- [61] J. R. Berryhill, Diffraction response for nonzero separation of source and receiver. *Geophysics*, vol. 42 no 6 pp. 1158-1176, 1997.
- [62] E. M. Johansson and J. E. Mast, Three dimensional ground penetrating radar imaging using a synthetic aperture time-domain focusing. *in Proc. SPIE Conf. Adv. Microw. Millimeter Wave Detectors*, vol. 2275, pp. 205-214, 1994.
- [63] L. Baradello, J.M. Carcione, D. Gei, Fast monostatic GPR modeling. *Geophysics*, vol 69, no 2, pp. 466-471, 2004.
- [64] M. El-Shenawee, The multiple interaction model for nonshallow scatterers buried beneath 2D random rough surfaces. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, vol 40, no 4, pp. 982-987, 2002.

- [65] Bergmann T., Robertsson J.O.A., Holliger K., Finite-difference modelling of electromagnetic wave propagation in dispersive and attenuating media. *Geophysics*, vol. 63, no. 3, pp. 856-867, 1998.
- [66] Teixeira F.L., Chew W.C., Straka, M. Oristaglio, M.L. Wang T., Finite-difference time-domain simulation of ground penetrating radar on dispersive, inhomogeneous and conductive soils. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 6, pp. 1928-1937, 1998.
- [67] Cassidy, N., The Application of Mathematical Modelling in the Interpretation of Ground Penetrating Radar Data. *Ph.D. Thesis, Keele University*, 2001.
- [68] L. Gürel, U. Oğuz, Simulations of Ground Penetrating Radars over lossy and heterogeneous grounds. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, vol 39, no 6, pp. 1190-1197, 2001.
- [69] Y. Zhan, C. Liang, G. Fang, Development of a 3D GPR simulator using the FDTD method. *IEEE*, 2000.
- [70] YA. R. Bretones, G. G. Martin, On the simulation of a GPR using an ADI-FDTD/MoMTD Id Method. *Tenth Int. Conference on GPR*, Delft, Netherlands, 2004.
- [71] B. Oswald, K. Roth, P. Bastian, Electromagnetic Full wave analysis of ground penetrating radar. *Tenth Int. Conference on GPR*, Delft, Netherlands, 2004.
- [72] P. Barber, C. Yeh., Scattering of electromagnetic waves by arbitrarily shaped dielectric bodies. *Applied Optics*, vol 14, no 12, pp. 2864-2872, 1975.
- [73] T. Lu, W. Cai, P. Zhang, Discontinuous galerkin time-domain GPR simulation in dispersive media. *IEEE Tran. on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 1, pp. 72-80, 2005.
- [74] Gerlitz K., Knoll M.D., Cross G.M., Luzitano R.D., Knight R., Processing groundpenetrating radar data to improve resolution of near-surface targets. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 93)*, San Diego, USA, pp. 561-575, 1993.

- [75] Dougherty M.E., Micheals P., Pelton J.R., Liberty L.M., Enhancement of ground penetrating radar data through signal processing. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP '94)*, Boston, USA, pp. 1021-1028, 1994.
- [76] Fisher C.S., Stewart R.R., Jol H.M., Processing ground penetrating radar data. *Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR'94)*, Canada, pp. 661-675, 1994.
- [77] L.C. Kempen, H. Sahli, Ground penetrating radar data processing: a selective survey of the state of the art literature. *IRIS report*, 1999.
- [78] M. Fritze, Detection of buried landmines using ground penetrating radar. *SPIE Proc.*, vol 2496 pp. 100-108, 1995.
- [79] Kempen V. L., H. Sahli, Signal processing techniques for clutter parameters estimation and clutter removal in GPR data for landmine detection. *Statistical Signal Processing, 2001 Proceedings of the 11th IEEE Signal Processing Workshop*, pp. 158-161, May 2001.
- [80] Chan L. A., N. M. Nasrabadi, D. Torrieri, Eigenspace transformation for automatic clutter rejection. *Optical Engineering*, vol. 40, no. 4, pp. 564-573, Apr. 2001.
- [81] Karlsen B., J. Larsen H. B. D. Sorensen, K. B. Jakobsen, Comparison of PCA and ICA based clutter reduction in GPR systems for anti-personal landmine detection. *Proceedings of the 11th IEEE Signal Processing Workshop on Statistical Signal Processing*, pp. 146-149, Aug. 2001.
- [82] H. Deng, H. Ling, Clutter reduction for synthetic aperture radar images using adaptive wavelet packet transform. *PIEEE*, 1999.
- [83] Gerald OSSberger, Thomas Buchegger, Erwin Schimback, Reimar Pfeil, Andreas Stelzer, Robert Weigel, Adaptive Ground Clutter Removal Algorithm for Ground Penetrating Radar Applications in Harsh Environments. *Sensing and Imaging: An International Journal*, vol. 7, No. 3, September 2006.

- [84] H. Jin-Feng, Z. Zheng-ou, A novel method in clutter reduction in the FLGPR Measurements. *IEEE*, 2004.
- [85] Olhoeft G.R., Maximizing the information return from ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 43, pp. 175–187, 2000.
- [86] Berkhout A.J., Wave field extrapolation techniques in seismic migration, a tutorial. *Geophysics*, vol. 46, pp. 1638–1656, 1981.
- [87] Berkhout A.J., Seismic Migration – Imaging of Acoustic Energy by Wave Field Extrapolation: A. Theoretical Aspects. *Amsterdam. Chew, W.C.*, 1990.
- [88] Claerbout J.F., Toward a unified theory of reflector mapping. *Geophysics*, vol. 36, pp. 467–481, 1971.
- [89] Gazdag J., Sguazzero P., Migration of seismic data. *Proceedings of the IEEE*, pp. 1302–1315, 1984.
- [90] Leuschen C., Plumb R., A matched-filter approach to wave migration. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 43, pp. 271–280, 2000.
- [91] Johansson E. M., Mast J. E., Three dimensional ground penetrating radar imaging using a synthetic aperture time-domain focusing. *in Proc. SPIE, Conference on Advanced Microwave and Millimeter Wave Detectors*, vol. 2275, pp. 205–214, 1994.
- [92] Stolt R.H., Migration by Fourier transform. *Geophysics*, vol. 43, pp. 23–48, 1978.
- [93] Leuschen C., Plumb R., A matched-filter approach to wave migration. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 43, pp. 271–280, 2000.
- [94] L.C. Kempen, H. Sahli, Ground penetrating radar data processing: a selective survey of the state of the art literature. *IRIS report*, 1999.
- [95] J. Gazdag, Wave equation migration with the phase shift method. *Geophysics*, vol. 43, pp. 1342–1351, 1978.
- [96] S. Lee, G. McMechan, C. Aiken, Phase-field imaging: The electromagnetic equivalent of seismic migration. *Geophysics*, vol. 52, pp. 678–693, 1987.

- [97] Moran M., Arcone S.A., Delaney A.J., Greenfield R., 3-D migration/array processing using GPR data. *Proceedings of the 7th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR'98), USA*, pp. 225-231, 1998.
- [98] Paul Docherty, A brief comparison of some Kirchhoff integral formulas for migration and inversion. *GEOPHYSICS*, vol. 56, no.8, pp. 1164-1169, 1991
- [99] F. Ahmad Y. Zhang, M.G. Amin, Three-dimensional wideband beamforming for imaging through a single wall. *Geosci. Remote Sensing Lett.*, 2008.
- [100] F. Ahmad M.G. Amin, S.A. Kassan, Synthetic aperture beamformer for imaging through a dielectric wall. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 41, pp. 263-271, 2005.
- [101] A.R. Hunt, Image formation through walls using a distributed radar sensor network. *Proc. SPIE: Laser Phys. Photonics, Spectrosc., Mol. Modeling V*, pp. 169-174, 2005.
- [102] F. Ahmad, M.G. Amin, G. Mandapati, Autofocusing of through-the-wall radar imagery under unknown wall characteristics. *IEEE Trans. Image Process*, pp. 1785-1795, 2007.
- [103] F. Aryanfar, K. Sarabandi, Through wall imaging at microwave frequencies using space-time focusing. *Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, pp. 3063-3066, 2004.
- [104] Lin Ping Song, Chun Yu, Qing Huo Liu, Through-wall imaging (TWI) by radar: 2-D tomographic results and analyses. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.*, pp. 2793-2798, 2005.
- [105] Lingjiang Kong, Jianyu Yang , A Back-projection algorithm to stepped-frequency synthetic aperture through-the-wall radar imaging, *AP SAR*, 2007.
- [106] R. H. Stolt, Migration by Fourier Transform, *GEOPHYSICS*, vol. 43, no. 1, pp. 23-48, 1978.
- [107] X.Zhuge, T.G. Savelyev, A.G. Yarovoy, and L.P. Ligthart, UWB Array-Based Radar Imaging Using Modified Kirchhoff Migration, *ICUWB*, vol. 3, 2008.

- [108] Wolf, K. B., Geometry and dynamics in refracting systems, *European Journal of Physics*, pp. 14-20, 1995.
- [109] Moeness G. Amin, Fauzia Ahmad, Wenji Zhang, Target RCS Exploitations in Compressive Sensing for Through Wall Imaging, *IEEE*, 2010.
- [110] Yeo-Sun Yoon, Moeness G. Amin, Through the Wall Radar Imaging Using Compressive Sensing Along Temporal Frequency Domain, *ICASSP*, 2010.
- [111] C. E. Shannon, Communication in the presence of noise, *Proc. Institute of Radio Engineers*, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [112] Candès, E.J., Wakin, M.B, An Introduction To Compressive Sampling, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 21, 2008.
- [113] E. J. Candès, J. Romberg and T. Tao, Wakin, M.B, Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements, *Comm. Pure Appl. Math.*, vol. 59, pp. 1207-1223, 2006.
- [114] R. Baraniuk, M. Davenport, R. DeVore, and M. Wakin, A simple proof of the restricted isometry property for random matrices, *Constructive Approximation*, 2008
- [115] E. Candès, E. J. and T. Tao, Decoding by linear programming, *IEEE Tran. on Information Theory*, vol. 51, pp. 4203-4215, 2005.
- [116] R. Baraniuk, Compressive sensing, *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 4, pp. 118-121, 2007.
- [117] E. Candès, Compressive sampling, in *Proc. of International Congress of Mathematicians*, Madrid, Spain 2006.
- [118] E. Candès, T. Tao, The Dantzig selector: Statistical estimation when p is much larger than n , *Ann. Statist.*, vol. 35, no. 6, pp. 2313-2351, 2007.
- [119] D. Donoho, M. Elad, V. Temlyakov, Stable recovery of sparse overcomplete representations in the presence of noise, *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 1, pp. 6-18, 2006.
- [120] J. Haupt, R. Nowak, Signal reconstruction from noisy random projections, *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 9, pp. 4036-4048, 2006.

- [121] D. T., et. al. A new compressive imaging camera architecture using optical domain compression, *in Proc. Comp. Imaging IV at SPIE Electronic Imaging*, 2006.
- [122] M. Lustig, D. Donoho, L. M. Pauly, Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging, *Preprint*, 2007.
- [123] V. Cevher, A. C. Gürbüz, J. H. McClellan, R. Chellappa, Compressive wireless arrays for bearing estimation, *in ICASSP*, 2008.
- [124] A. C. Gürbüz, V. Cevher, J. H. McClellan, A compressive beamformer, *in ICASSP*, 2008.
- [125] E. Candes, M. Rudelson, T. Tao, R. Vershynin, Error correction via linear programming, *in Proceedings of the 46th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS)*, pp. 295-308.
- [126] F. Ahmad, Y. Zhang, M. G. Amin, Threedimensional wideband beamforming for imaging through a single wall, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol.5, no.2, pp. 176-179, 2008.
- [127] A.C. Gurbuz, J.H. McClellan, W.R. Scott Jr., A compressive sensing data acquisition and imaging method for stepped frequency GPRs, *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.57, no.7, pp. 2640-2650, 2009.
- [128] M. Grant, S. Boyd, CVX: Matlab software for disciplined convex programming (web page and software), <http://standford.edu/boyd/cvx>.
- [129] M.A. Herman, T. Strohmer, General deviants: An analysis of perturbations in compressed sensing, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 4, no.2, pp.342-349, 2010.
- [130] Genyuan Wang, Moeness G. Amin, Imaging Through Unknown Walls Using Different Standoff Distances, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 54, no.10, 2006.
- [131] Fauzia Ahmad, Moeness G. Amin, Noncoherent Approach to Through-the-Wall Radar Localization, *IEEE Transactions on Aerospace And Electronic Systems*, vol. 42, no.4, 2006.

- [132] S. O. Piper, Homodyne FMCW radar range resolution effects with sinusoidal nonlinearities in the frequency sweep, *in Proceedings of the IEEE International Radar Conference*, pp. 563–567, 1995.
- [133] M.A.C Tuncer, A.C. Gurbuz, Surface Reflection Removal in Compressed Sensing GPR and Sparse Subsurface Imaging, *SIU* , 2011.
- [134] Guolong Cui, Lingjiang Kong, Jianyu Yang, A Back-Projection Algorithm to Stepped-Frequency Synthetic Aperture Through-the-Wall Radar Imaging, *IEEE*, 2007.
- [135] T. Tony Cai and Lie Wang, Orthogonal Matching Pursuit for Sparse Signal Recovery with Noise, *Information Theory IEEE Transactions on*, July 2011.
- [136] Joel A. Tropp, and Anna C. Gilbert, Signal Recovery From Random Measurements Via Orthogonal Matching Pursuit, *Information Theory IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 12, December 2007.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : DUMAN, Muhammed
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum tarihi ve yeri : 13.01.1987 ANKARA
Medeni hali : Bekar
Telefon : 05065715898
e-mail : muhammedduman.duman@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Uludağ Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği	2010

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010-2011	TOBB ETÜ	Proje Asistanı
2011-2012	Simsoft Bilgi Teknolojileri	Yazılım Mühendisi
2012 - Halen	TÜBİTAK SAGE	Araştırmacı

Yabancı Dil

İngilizce (Çok iyi)
İtalyanca (Orta)

Yayınlar

Muhammed DUMAN, Ali Cafer GÜRBÜZ, Performance analysis of Compressive Sensing Based Through The Wall Imaging with Effect of Unknown parameters, International Journal of Antennas and Propagation, Volume 2012 (2012), Article ID 405145, doi:10.1155/2012/405145.

Muhammed DUMAN, Ali Cafer GÜRBÜZ, Analysis of compressive sensing based through the wall imaging, Radar Conference 2012 IEEE, pp. 0641- 0646

Muhammed DUMAN, Ali Cafer GÜRBÜZ, Faster 3D GPR Imaging Using 2D Dictionaries with Applications to Sparse Reconstruction, ICECCO 2012.

Muhammed DUMAN, Ali Cafer GÜRBÜZ, Developing data simulation platform and signal processing technics for ground penetrating radar, Signal Processing and Communications Applications (SIU), 2011 IEEE 19th Conference on, Page(s): 190-193

Muhammed DUMAN, Ali Cafer GÜRBÜZ, Through the wall imaging with Compressive Sensing and effects of unknown parameters to the performance , Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2012 20th , pp:1-4.

Muhammed DUMAN, Ali Cafer GÜRBÜZ, Yere İşleyen Radarda Veri Benzetimi ve Görüntüleme Yöntemlerinin Geliştirilmesi, 4. Ulusal Savunma Uygulamaları Modelleme ve Simülasyon Konferansı 2011.