

**BASAMAK FREKANSLI YERE İŞLEYEN RADAR (GPR) İÇİN SEYREKLİK
TABANLI HIZLI YER ALTI GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMİNDEKİ
PROBLEMLERE ÇÖZÜMLER**

Mehmet Ali Çağrı Tuncer

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2011

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Doç. Dr. Kahraman Güçlü KÖPRÜLÜ

Anabilim Dalı Başkanı

Mehmet Ali Çağrı Tuncer tarafından hazırlanan BASAMAK FREKANSLI YERE İŞLEYEN RADAR (GPR) İÇİN SEYREKLİK TABANLI HIZLI YER ALTI GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMİNDEKİ PROBLEMLERE ÇÖZÜMLER adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Ali Cafer GÜRBÜZ

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Hamza Kurt

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ali Cafer GÜRBÜZ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ahmet Murat Özbayoğlu

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.

Mehmet Ali Çağrı Tuncer

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı : Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ali Cafer GÜRBÜZ
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans - Ağustos 2011

Mehmet Ali Çağrı Tuncer

**BASAMAK FREKANSLI YERE İŞLEYEN RADAR (GPR) İÇİN SEYREKLİK
TABANLI HIZLI YER ALTI GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMİNDEKİ
PROBLEMLERE ÇÖZÜMLER**

ÖZET

Basamak Frekanslı Yere İşleyen Radarlar (SF-GPR) ile az sayıda rastgele frekans ölçümü gerektiren Sıkıştırılmış Algılama (CS) tabanlı görüntüleme yöntemi kullanılarak hedef uzayının görüntüsü oluşturulabilmektedir. Bu yöntem veri toplama zamanını fazlasıyla düşürmesine rağmen görüntüleme çok süre harcamaktadır. CS tabanlı görüntüleme yöntemine alternatif olarak daha hızlı bir yöntem olan Dik Eşleme Takibi (OMP) yöntemi önerilmiştir. OMP ile çok daha hızlı bir şekilde benzer görüntüler elde edilebilmiştir. Ayrıca, seyreklik tabanlı yeraltı görüntüleme yöntemleri yeryüzü yansımalarını toplanan GPR verisinden çıkartmamaktadır. Frekans düzleminde az ve rastgele ölçüm alındığı için yeryüzünden yansıyan sinyallerin toplanan GPR verisinden çıkartılması için kullanılan standart yöntemler direkt uygulanamamaktadır. Az ve rastgele ölçüm alındığı zaman yeryüzünden yansıyan sinyalleri frekans alanında GPR verisinden çıkartabilen bir yöntem geliştirilmiş ve bazı bilinen yöntemlerle performansı karşılaştırılmıştır. Son olarak dalganın yeraltındaki gerçek hızı ile varsayılan yayılım hızı arasındaki uyumsuzluğun ve hedef pozisyonlarının ızgara noktalarında olmamasının CS tabanlı görüntüleme yönteminin performansına etkileri analiz edilmiş ve bazı olası çözümler önerilmiştir. Geliştirilen OMP tabanlı yöntemle hedef pozisyonlarının doğru şekilde bulunabildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yere İşleyen Radar (GPR), Yeraltı görüntüleme, Sıkıştırılmış Algılama (CS), ℓ_1 minimizasyonu, Dik Eşleme Takibi (OMP), Yeryüzü yansımalarının çıkartılması, Hız uyumsuzluğu, Hedeflerin ızgara noktalarında olmaması

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Electrical and Electronics Engineering
Supervisor : Assistant Professor Ali Cafer GÜRBÜZ
Degree Awarded and Date : M.S. - August 2011

Mehmet Ali Çağrı Tuncer

**SOLUTIONS TO THE PROBLEMS OF SPARSITY ENHANCED
SUBSURFACE IMAGING FOR STEPPED FREQUENCY GPRS**

ABSTRACT

In Stepped Frequency Ground Penetrating Radars (GPR), an image of the target space can be constructed with making measurements at only a small number of random frequencies by Compressive Sensing (CS) based imaging method. Although this method greatly reduces the data acquisition time, it wastes time in imaging. Orthogonal Matching Pursuit (OMP) which is faster than CS based imaging method is proposed as an alternative method. Similar results are obtained within much shorter times. Additionally, sparsity enhanced imaging methods do not remove ground reflections. Standard methods can not be directly applicable for removing the ground reflections because of random and fewer number of measurements. A surface reflection removal method for random and fewer measurements is developed and compared with standard ground reflection methods. Finally, the performance of the CS based subsurface imaging methods are analyzed for the velocity mismatch and off-grid problems and possible solutions are discussed. It is shown that target positions could be find correctly with the developed OMP based method.

Keywords: Ground Penetrating Radar (GPR), Subsurface imaging, Compressive Sensing (CS), Sparsity, ℓ_1 minimization, Orthogonal Matching Pursuit (OMP), Ground bounce removal, Velocity mismatch, Off-grid

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Ali Cafer Gurbüz'e ve kıymetli tecrübelerinden yararlandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümü öğretim üyelerine,

ve bana her zaman güvenen, destekleriyle beni bugünlere getiren aileme teőekkürlerimi sunarım.

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

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
1. GİRİŞ	2
1.1. Uygulama Alanları	2
1.2. GPR'ın Çalışma Prensipleri	3
1.3. Basamak Frekanslı GPR	5
1.4. Yeraltı Görüntüleme Yöntemleri	6
2. YERE İŞLEYEN RADAR (GPR) İLE YERALTI GÖRÜNTÜLEME	11
2.1. Sıkıştırılmış Algılama	11
2.2. GPR İle Sıkıştırılmış Görüntüleme	14
2.2.1. Sözlük matrisi oluşturma	15
2.2.2. Sıkıştırılmış algılama ile görüntüleme	16
2.3. Benzetim Sonuçları	16
2.4. Çıkarımlar	19
3. DİK EŞLEME TAKİBİ (OMP) YÖNTEMİ İLE HIZLI YERALTI GÖRÜNTÜLEME	20
3.1. Dik Eşleme Takibi (OMP)	21
3.2. Benzetim Sonuçları	22
3.2.1. Hesaplama Yüğü Karşılaştırması	23

3.2.2. Ölçüm ve Seyreklik Seviyesi Analizi	26
3.2.3. Gürültü Analizi	26
3.3. Deneysel Sonuçlar	27
3.4. Çıkarımlar	29
4. SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMALI GPR İÇİN YÜZEY YANSIMALARININ ÇIKARTILMASI VE SEYREK YERALTI GÖRÜNTÜLEME	30
4.1. Yüzey Yansımalarını Çıkartan Standart Yöntemler	30
4.1.1. Yürüyen Ortalama Yöntemi (MA-BS)	30
4.1.2. Zaman Alanında Kaydırma Ve Genlik Ölçeklendirme Yöntemi (aSaS-BS)	31
4.2. Yer Yüzünden Yansıyan Sinyallerin Sıkıştırılmış Veriden Çıkartılması	31
4.3. Benzetim Sonuçları	33
4.3.1. Geliştirilen Yöntemin Standart Yöntemlerle Karşılaştırılması	36
4.4. Deneysel Sonuçlar	40
4.5. Çıkarımlar	40
5. CS TABANLI GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMİNDE BİLİNMEYEN DALGA HIZI VE HEDEFİN IZGARA NOKTALARINDA OLMAMASI PROBLEMLERİNE ÇÖZÜMLER	42
5.1. Bilinmeyen Hız Problemi	42
5.1.1. Genişletilmiş Sözlük	45
5.2. Hedefin Izgara Noktalarında Olmaması Problemi	47
5.3. Geliştirilen OMP Tabanlı Görüntüleme Yöntemi	48
5.3.1. Izgara Seçimi	49
5.3.2. Teori	50

5.3.3. Benzetim Sonuçları	53
5.4. Çıkarımlar	54
6. SONUÇ	58
6.1. Yorumlar	58
6.2. Gelecek Çalışmalar	60
KAYNAKLAR	60

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Dik Eşleme Takibi'nin (OMP) algoritması	22
Çizelge 4.1. Yöntemlerin Performans Karşılaştırmaları	38
Çizelge 5.1. Geliştirilen OMP Tabanlı Yöntemin Algoritması	52

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Bilgisayar kontrollü verici ve alıcı içeren GPR sistemi	5
Şekil 1.2. GPR'ın ölçüm alması	6
Şekil 1.3. Veri toplama işleminin dürtü cevabı	8
Şekil 2.1. GPR'ın ölçüm alması	15
Şekil 2.2. Geriçatma yöntemi ve Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan hedef uzayı görüntüleri. (a) Gerçek hedef uzayı (b) Tüm frekans basamakları kullanıldığında alınacak veri (c) Her uzaysal noktada ölçülen rastgele 20 frekans. Seçilen frekanslar siyah ile gösterilmiştir. (d) Her uzaysal noktada tüm frekans verisi kullanılarak geriçatma ile oluşturulan görüntü, (e) Her uzaysal noktada (c)'de belirtilen frekans ölçümleri kullanılarak geriçatma ile oluşturulan görüntü (f) Her uzaysal noktada 20 tane ölçüm kullanılarak CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan görüntü	18
Şekil 3.1. Geriçatma yöntemi, Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi ve OMP ile oluşturulan hedef uzayı görüntüleri. (a) Gerçek hedef uzayı (b) Her uzaysal noktada tüm frekans verisi kullanılarak geriçatma ile oluşturulan görüntü (c) Tüm ölçümleri almak yerine her uzaysal noktada rastgele seçilen frekans ölçümleri. Seçilen frekanslar siyah ile gösterilmiştir. Rastgele seçilen az ölçümler kullanılarak (d) Geriçatma ile oluşturulan görüntü (e) CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan görüntü (f) OMP yöntemi ile oluşturulan görüntü	24
Şekil 3.2. OMP ve Sıkıştırılmış Algılama Tabanlı görüntüleme yöntemlerinin hedef uzayı görüntülerini oluşturmak için harcadıkları ortalama süreler	25
Şekil 3.3. OMP ve Sıkıştırılmış Algılama tabanlı yöntemler ile hedef uzayını görüntülemeye oluşan hataya ölçüm sayısının etkisi	26
Şekil 3.4. OMP ve Sıkıştırılmış Algılama tabanlı yöntemler ile hedef uzayını görüntülemeye oluşan hataya gürültünün etkisi	27
Şekil 3.5. Deneysel GPR verileri kullanılarak OMP ve Sıkıştırılmış Algılama tabanlı yöntem ile oluşturulan görüntüler (a) Deneysel GPR verisinin tüm ölçümler kullanıldığında zaman alanındaki gösterimi. Az ve rastgele seçilen ölçümler kullanıldığında; (b) Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan görüntü (c) OMP yöntemi ile oluşturulan görüntü	28

- Şekil 4.1. Yüzey yansımalarının geliştirilen yöntem ile çıkartılması. Sıkıştırılmış algılama tabanlı yöntem ile (a) Yüzey yansımaları varken tüm hedef uzayının görüntülenmesi (b) Yüzey yansımaları varken ilk 4 cm'lik derinlik dışındaki hedef uzayının görüntülenmesi (c) Yüzey yansımaları geliştirilen yöntemle çıkarıldıktan sonra tüm hedef uzayının görüntülenmesi 34
- Şekil 4.2. Yüzey yansımalarının geliştirilen yöntem ile çıkartılması. (a) Tüm ölçümler alındığında frekans verisinin büyüklüğü (b) Tüm ölçümler alındığında hedef uzayının zaman alanında gösterimi (c) Tüm ölçümleri almak yerine her uzaysal noktada rastgele seçilen frekans ölçümleri. Seçilen frekanslar siyah ile gösterilmiştir. Rastgele seçilen az ölçümler kullanılarak; (d) Yeryüzü yansımaları çıkartılmadan Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan hedef uzay görüntüsü (e) Hedef uzayının yeryüzü yansımalarından etkilenen sığ kısmının çıkartıldığı Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan hedef uzay görüntüsü (f) Geliştirilen yöntem ile yeryüzü yansımaları çıkartıldıktan sonra Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan hedef uzay görüntüsü 35
- Şekil 4.3. Yeryüzünden yansıyan sinyallerin GPR verisinden çıkartılarak zaman alanında gösterilmesi. (a) Sıkıştırılmış frekans verisinin zaman alanında gösterimi, Yer yüzünden yansıyan sinyallerin; (b) MA-BS yöntemi ile çıkartılıp zaman alanında gösterimi (c) AsAs-BS yöntemi ile çıkartılıp zaman alanında gösterimi (d) Önerilen yöntem ile frekans alanında GPR verisinden çıkartılıp zaman alanında gösterimi 37
- Şekil 4.4. Ölçülen GPR verisinden çıkartılamayan yeryüzü yansımalarının enerji yüzdeleri 38
- Şekil 4.5. Gerçek veriden yüzey yansımalarının çıkartılması. (a) Hedeflerin doğru pozisyonları (b) Frekans verisinin büyüklüğü (c) Tüm ölçümler alındığında hedef uzayının zaman alanındaki gösterimi (d) Yeryüzü yansımaları çıkartılmadan Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan hedef uzay görüntüsü (e) Hedef uzayının yeryüzü yansımalarından etkilenen sığ kısmının çıkartıldığı Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan hedef uzay görüntüsü (f) Geliştirilen yöntem ile yeryüzü yansımaları çıkartıldıktan sonra Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan hedef uzay görüntüsü 39
- Şekil 5.1. Yeraltındaki gerçek dalga hızı $v=2x10^{10}$ cm/s'ken varsayılan her dalga hızı ile yapılan 100 denemenin sonucunda elde edilen ortalama görüntüler. Varsayılan dalga hızı (a) $1x10^{10}$ cm/s'ken (b) $1.5x10^{10}$ cm/s'ken (c) $2x10^{10}$ cm/s'ken (d) $2.5x10^{10}$ cm/s'ken 43

- Şekil 5.2. (a) Hedefin gerçek konumu ile Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi sonucunda bulunan hedef pozisyonu arasındaki ortalama farkın hız uyumsuzluğuna göre değişimi. (b) Derinlik kaymasının gösterimi için aynı homojen ortamda bulunan iki noktasal hedef 44
- Şekil 5.3. Genişletilmiş Sözlük kullanılarak oluşturulan hedef uzayı görüntüleri. (a) Doğru hedef uzayı. Hedef uzayı görüntüleri; (b) $v = 1.8 \times 10^{10}$ cm/s'ken (c) $v=1.9 \times 10^{10}$ cm/s'ken (d) $v=2 \times 10^{10}$ cm/s'ken (e) $v=2.1 \times 10^{10}$ cm/s'ken (f) $v=2.2 \times 10^{10}$ cm/s'ken 46
- Şekil 5.4. Hedefler ızgara noktalarında değilken oluşturulan görüntüler. Izgara büyüklüğü (a) 1 cm'ken (b) 2 cm'ken (c) 3 cm'ken (d) 5 cm'ken 48
- Şekil 5.5. Anten ve hedefin aynı homojen ortamda bulunduğu senaryo 50
- Şekil 5.6. Ölçülen veri ile sözlüğün korelasyon grafikleri. (a) Ölçülen veri ile sözlüğün Z uzayında korelasyon grafiği. Z uzayında, (b) Standart seyreklik tabanlı görüntüleme yöntemleri ile bulunan ızgara noktasına teğet geçen doğru (c) Tepe noktasına teğet geçen doğru (d) Ölçülen veri ile sözlüğün X uzayında korelasyon grafiği. X uzayında, (e) Standart görüntüleme yöntemleri ile bulunan ızgara noktasına teğet geçen doğru (f) Tepe noktasına teğet geçen doğru 51
- Şekil 5.7. Geliştirilen OMP tabanlı yöntem, OMP ve Sıkıştırılmış Algılama tabanlı yöntemlerin görüntüleme performanslarının karşılaştırılması. Hedeflerin ızgara noktalarında olmadığı durum için, ızgara büyüklüğü 2 cm'ken (a) Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi (b) OMP yöntemi (c) Geliştirilen yöntem ile ızgara noktalarında olmayan hedeflerin görüntülenmesi. Dairesel işaretler hedefin gerçek pozisyonlarını; artı işareti (+); bulunan hedef pozisyonlarını; noktalar ise ızgara noktalarını temsil etmektedir 55
- Şekil 5.8. Geliştirilen OMP tabanlı yöntem, OMP ve Sıkıştırılmış Algılama tabanlı yöntemlerin görüntüleme performanslarının karşılaştırılması. Hedeflerin ızgara noktaları üzerinde olmadığı durum için, ızgara büyüklüğü 5 cm'ken (a) Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi (b) OMP yöntemi (c) Geliştirilen yöntem ile ızgara noktalarında olmayan hedeflerin görüntülenmesi. Dairesel işaretler ile gösterilen yerler gerçek hedef pozisyonlarını; artı işareti (+); hesaplanan hedef pozisyonlarını; noktalar ise ızgara noktalarını temsil etmektedir. 56
- Şekil 5.9. Geliştirilen OMP tabanlı yöntem, OMP ve Sıkıştırılmış Algılama tabanlı yöntemlerin görüntüleme performanslarının karşılaştırılması. Hedeflerin ızgara noktaları üzerinde olmadığı durum için, ızgara büyüklüğü 10 cm'ken (a) Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi (b) OMP yöntemi (c) Geliştirilen yöntem ile ızgara noktalarında olmayan hedeflerin görüntülenmesi. Dairesel işaretler ile gösterilen yerler gerçek hedef pozisyonlarını; artı işareti (+); hesaplanan hedef pozisyonlarını; noktalar ise ızgara noktalarını temsil etmektedir. 57

BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

Sivil, ticari ve askeri alanlarda toprak altındaki nesnelere tespit etmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlara gömülü mayınlar ve çevresel araştırmalar örnek verilebilir [1]. Tespit edilmek istenen yeraltındaki nesne; metalik, manyetik veya bunların karışımı olabilir. Ayrıca araştırılan ortam; toprak, kaya veya beton ve tuğla gibi insan yapımı malzemelerden oluşuyor olabilir. Hedef alınan nesne, nesnenin ve araştırılan ortamın özelliklerine göre özel seçilmiş bir çok yöntemle tespit edilebilir. Seçilecek bu yöntem, araştırılan alanın saha koşullarına uygun olarak sismik [4], elektriksel özdirenç [5], indüklenmiş kutuplanma [6], yerçekimi ölçme [7], manyetik ölçme [8], radyometrik [9], termografik [10] ve elektromanyetik yöntemler [11] olabilir.

Araştırılan alan iletken olmayan yada yarı iletken bir ortam ise en uygun yöntem Yere İşleyen Radar'dır (GPR) [2]. GPR, elektromanyetik dalgaların yere gönderilmesi ve yeraltındaki dielektrik sabiti değişimlerinden dolayı yansıyan sinyallerin geri toplanıp işlenerek yeraltı görüntüsünün çıkarılmasını sağlayan önemli bir uzaktan algılama aracıdır [1–3]. GPR, metalik veya metalik olmayan nesnelere tespit edebilir, yeraltının yüzlerce metre derinliklerini görüntüleyebilir ve araştırılan alanın anlık bilgisini kullanıcıya hızlı şekilde sağlayabilir.

Dalganın yayılım limitlerinde, GPR araştırılan alan içindeki tüm elektriksel empedans değişimlerini tespit eder. Bu değişimlerin bazıları tespit edilmek istenen hedeflerden kaynaklanırken istenmeyen etkilerin yol açtığı empedans değişimleri de olabilir. Genelde bunu ayırt edebilmek zordur, ancak elde edilen radar görüntüsü, araştırılan alanın yapısı ve tespit edilmek istenen hedeflerin karakteristik özellikleri kullanılarak doğru sonuçlar çıkartılabilir.

1.1. Uygulama Alanları

GPR, metal ve metal olmayan nesnelere tespit edebildiği için mayın bulma [39–41], yeraltı veya duvar ötesi hedeflerin konumlandırılması ve tespiti [42], sivil uygulamalar [43], arkeolojik ve çevresel araştırmalar [44–46] gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

GPR ilk kez Scott Polar Institute tarafından 1930'larda Antartika'da buzun kalınlığını ölçmek için kullanılmıştır [47]. Yolun temel kalınlığı, asfaltın kalınlığı veya

yolun altındaki anormallikler GPR tarafından ölçülebilmektedir. İngiltere'deki ünlü Fountains manastırının toprak altındaki misafir salonu, York Üniversitesi ve ERA Teknoloji tarafından geliştirilen GPR ile görüntülenmiştir [1]. Polis birimleri tarafından gömülü cesetlerin yerlerini tespit etmek amacıyla GPR kullanılmaktadır.

GPR'ın en önemli avantajlarından biri antenlerinin yeryüzü ile temasına gerek olmamasıdır. Bu sayede araştırılan alan hızlı görüntülenebilmektedir. 400 m havadan GPR ile Sentetik Açıklık Radar (SAR) modunda yeraltındaki mayınlar tespit edilebilmiştir. Dünya yörüngesindeki uydulardan Sahara Çölü'nün jeolojik özellikleri görüntülenmiştir. Ayrıca, Apollo Uzay Mekiğinde GPR kullanılarak Ay'ın kalınlığı ölçülmüştür [1–3].

Dünya üzerinde eski savaş dönemlerinden kalan milyonlarca patlamamış metal veya plastik mayın bulunmaktadır. Bunlar, insanlar için büyük tehdittir. Tam gelişmemiş GPR tekniği 1940'ların başında 2. Dünya Savaşı'ndaki mayınları bulabilmek için test edilmiştir [2]. Özellikle 1990'lardan sonra GPR ile mayın tespiti için Avrupa ülkelerinde, Avustralya'da, Kanada'da ve Amerika'da birçok proje başlatılmıştır.

Çevre kirliliğine önlem olarak belediyelerde GPR kullanılmaktadır. GPR ile kanalizasyon ve atık su boruları ile taşınan kirli suyun toprağa karışıp karışmadığı kontrol edilmektedir. Düşük frekanslı elektromanyetik yöntemler ile toprak altındaki kablo ve metal boruları tespit etmek kolay olmasına rağmen, gaz, su vb. maddeler taşıyan plastik boruların tespiti sadece radar yöntemleri ile mümkündür. Çünkü GPR yüksek çözünürlüğe ve yeraltını görüntüleyebilme özelliklerine sahiptir. Bu amaçla birçok yöntem geliştirilmiştir [48].

Her geçen gün anten performanslarının geliştirilmesi, daha iyi alıcı hassasiyetleri ve geliştirilen hızlı sinyal işleme kapasiteleri ile GPR daha başarılı sonuçlar vermektedir. Şu anda piyasada askeri ve ticari amaçla üretilmiş birçok GPR bulunmakta ve her geçen gün araştırmacılar tarafından daha da geliştirilmektedir.

1.2. GPR'ın Çalışma Prensipleri

GPR, ultra geniş bantlı radarlara örnek gösterilebilir ve birkaç önemli fark haricinde hava radarları ile benzer çalışır. Hava radarları [12] yüzlerce km'yi tararken GPR için genelde bu mesafe yüz metre'yi geçmemektedir. Ayrıca, hava radarlarında çözünürlük onlarca metre olabilirken GPR'da hassas konum tespiti için bu değer santimetre seviyelerinde olmaktadır. En önemli fark; elektromanyetik (EM) dalgalarındaki

etkileşimlerdir. Hava radarlarının gönderdiği dalgalar az zayıflama ile havayı tarayabilmektedir. Ancak GPR toprak veya duvar gibi ortamları taradığı için gönderdiği EM dalgada zayıflama fazla olmaktadır. Bu çoğu zaman görüntüleme performansını kötü yönde etkilemektedir.

Standart bir GPR sistemi şu şartları sağlamalıdır [13],

- 1) Gönderilen EM enerji ile yeraltı arasında yeterli bağlaşım¹ olması,
- 2) Gönderilen enerjinin hedef derinliğine kadar yeraltında yayılabilmesi,
- 3) Yeraltındaki hedeften veya diğer dielektrik değişimlerden yansıyan sinyallerin ayırt edilebilecek kadar geniş olması,
- 4) İstenilen çözünürlük seviyesi dikkate alınarak, yansıyan sinyalin yeterli bant genişliğine ve yeterli sinyal-gürültü oranına sahip olması.

Basit bir GPR sistemi, birkaç nanosaniye boyunca kısa darbe sinyali üretir. Daha sonra bu darbe sinyali anten aracılığı ile yayımlanır. Hedeften yansıyan sinyal, alıcı anteni tarafından toplanır. Genellikle verici-alıcı antenleri benzer veya aynı olur. Alıcı; gelen bilgiyi örnekler, filtreden geçirir ve kullanıcının anlayacağı şekilde görüntüler. Basit bir GPR modeli Şekil 1.1.'de gösterilmiştir. Verici-alıcı antenleri sabit hızla hareket ederek alanı tararsa hedeflerin kesitsel görüntüleri² elde edilebilir. Eğer antenler hedef uzayındaki bölünmüş ızgaraları hem enine hem boyuna tararsa, taranılan alanın 3 boyutlu görüntüsü çıkartılabilir [3].

Havada, EM dalganın yayılma hızı yaklaşık 3×10^8 m/s 'dir. Fakat bu hız, yer altında daha yavaştır. Eğer farklı bir ortamın içinde dalganın hızı ölçülebilir veya tahmin edilebilirse hedefin derinliği veya araştırılan alanın kalınlığı doğru bulunabilir. Homojen ortamlar için dalganın hızı denklem 1.1'de gösterilmiştir;

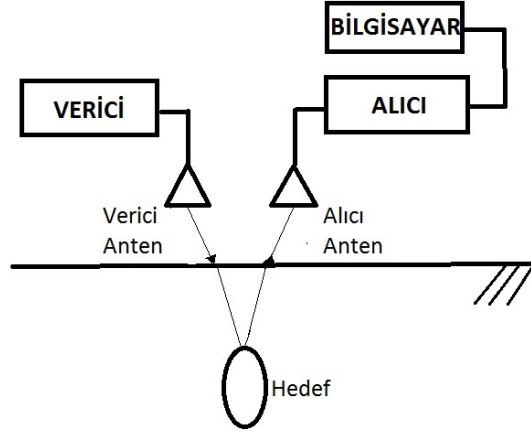
$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.1)$$

c, dalganın havada yayılım hızı, ϵ_r ise bağıl dielektrik sabitidir. Ortam içindeki dalganın hızı doğru bulunduktan sonra hedefin derinliği denklem 1.2 ile bulunabilir;

$$d = v \frac{\tau_r}{2} (\text{metre}) \quad (1.2)$$

¹ing: Coupling

²ing: Cross Sectional images



Şekil 1.1. Bilgisayar kontrollü verici ve alıcı içeren GPR sistemi

τ_r , zamandaki gecikmedir. Yani gönderilen dalganın hedeften yansıyıp alıcı antene ulaşmaya kadar geçen zamandır.

GPR uygulamalarında, EM dalganın gönderileceği ortamın bağıl dielektrik sabiti önceden bilinmemektedir. Bunun için aynı ortamda derinliği bilinen bir yere hedef gömülüp gönderilen sinyalin ne zaman geri alındığı ölçülerek ortamın bağıl dielektrik sabiti hesaplanır. Yada çoklu ölçüm alınarak bu değer hesaplanmaya çalışılır [2].

Sistemin alıcı girişinde aynı sinyal-gürültü oranı sağlandıkça, araştırılan ortama gönderilmesi için önerilen çeşitli dalga formlarının hedefi tespit performansları aynıdır. Bu nedenle vericinin taban bantta, dürtü, tek çevrimli, çok çevrimli veya frekans modülasyonlu dalga formları üretmesi sadece sistemin ekonomik olması ve dizaynı ile ilgilidir [14].

1.3. Basamak Frekanslı GPR

Yere işleyen radar (GPR), Zaman Alanında Çalışan ve Frekans Alanında Çalışan GPR olmak üzere ikiye ayrılır. Frekans Alanında çalışan sistemlerinin yüksek sinyal-gürültü oranını sağlaması daha kolay olmasına rağmen dürtü dalga üreten zaman alanında çalışan sistemlere oranla daha fazla maliyete ve daha karışık dizayna sahiptirler. Bu sebeple, dürtü dalga üreten GPR'lar daha yaygın kullanılmaktadır [15–17]. Son zamanlarda kullanımını artıran bir diğer GPR türü ise Basamak Frekanslı Sürekli Dalga³ (SFCW) GPR'lardır [49, 50]. [13, 35, 51, 52]'de SFCW GPR yer altındaki mayın ve nesnelere bulmak için kullanılmaktadır. SFCW GPR'lar belirli frekans

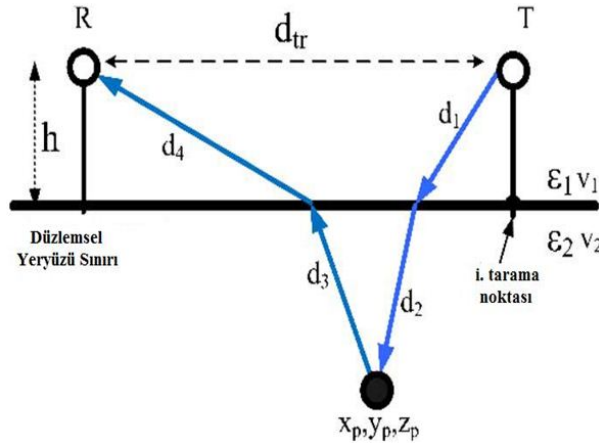
³ing: Stepped Frequency Continuous Wave

aralığındaki elektromanyetik dalgaları yer altına gönderip yansıyan sinyallerden faz farkını ve hedefin yansıtılabilirlik katsayısını ölçerek görüntüleme yaparlar. Kullanılan frekans aralığının değişik derinliklerdeki hedefler için ayarlanabilmesi, daha doğru ve hassas ölçümler alınabilmesi, yüksek dinamik aralığa sahip olması, yüksek güç gönderebilmesi ve alıcıda düşük gürültüye sahip olması gibi özelliklerinden dolayı SFCW GPR'lar zaman alanında çalışan GPR'lara göre daha avantajlı özelliklere sahiptirler.

SFCW GPR'ın çok iyi özellikleri olmasına rağmen piyasada kullanılan sistemlerde yaygın değildir [53–55]. Bunun en önemli sebebi, veri toplama zamanının uzun olmasıdır. Her tarama pozisyonunda harcanan zaman; vericinin anahtarlama süresi, gönderilen sinyalin seçilen maksimum uzaklıktaki hedeften yansıyıp geri dönmesi için gereken zaman, alıcının yeterli sinyal ve gürültü oranını (SNR) oluşturabilmesi için harcanan zaman gibi etkenlere bağlıdır.

1.4. Yeraltı Görüntüleme Yöntemleri

Genellikle standart görüntüleme yöntemlerinde uyumlu süzgeç⁴ kullanılır. Bu bölümde standart yöntemler kullanılarak GPR ile yeraltı görüntüleme örneği verilmiştir. GPR anteni bir alanı tararken yeraltına sinyaller gönderir ve yansımaları



Şekil 1.2. GPR'ın ölçüm alması

toplayıp işleyerek yeraltı görüntüsünü oluşturmaya çalışır. Hedeflerden gelen yansımalar çok kompleks yapılara sahip olabilir. Bu bölümde görüntüleme yöntemleri hakkında fikir verebilmek için gönderilen sinyallerin noktasal hedeflerden yansıdığı

⁴ing: Matched Filter

varsayılmıştır. p noktasındaki noktasal hedeften yansıyan sinyal, gönderilen sinyalin genlikte ölçeklenmiş ve zamanda kaymış halidir.

$$\zeta_i(t) = As(t - \tau_i(p)) \quad (1.3)$$

$\tau_i(p)$, GPR anteni i . tarama noktasındayken gönderilen sinyalin p noktasındaki hedeften yansyıp geri gelmesi için geçen zamandır. A ise sinyaldeki zayıflamayı gösteren ölçekleme faktörüdür.

τ_i 'yi hesaplamak için yeraltındaki sinyal yayılım hızının yanısıra gönderilen sinyalin vericiden hedefe, hedeften geri alıcıya giderken izlediği yolun bilinmesi gerekmektedir. Şekil 1.2.'de GPR'ın ölçüm alması gösterilmiştir. İki değişik ortam (hava ve toprak gibi) arasındaki sınırdaki dalga, Snell yasasına göre yön değiştirir. Mayın bulma gibi yüzeye yakın hedefleri görüntüleme anten ile hedef arasındaki mesafe az olduğu için ortam değişirken dalganın kırılması dikkate alınmalıdır. Kırılma noktasının tam bulunabilmesi için 4. dereceden bir polinom çözülmelidir. Kırılma noktasını hesaplayabilmek için bazı yöntemler kullanılmaktadır [18]. Kırılma noktası bulduktan sonra hesaplanan $d_{1:4}$ (Şekil 1.2.) ile τ_i şu şekilde hesaplanabilir:

$$\tau_i = \frac{d_1 + d_4}{v_1} + \frac{d_2 + d_3}{v_2} \quad (1.4)$$

Araştırılan alana gönderilen dalgalar sentetik açıklık oluşturur böylece gelen yansımalar tüm tarama noktaları ile zaman alanında çizdirilirse eğriler elde edilir. Şekil 1.3., tek hedeften yansıyan sinyalin zaman alanında gösterimidir.

Standart görüntüleme yöntemleri her tarama noktası için ölçülen veriye, veri toplama işleminin dürtü cevabı (Şekil 1.3.) ile uyumlu süzgeç uygular. Zaman alanında standart geriçatma yöntemi (SBP) [18–20] denklem 1.5'deki gibi gösterilebilir.

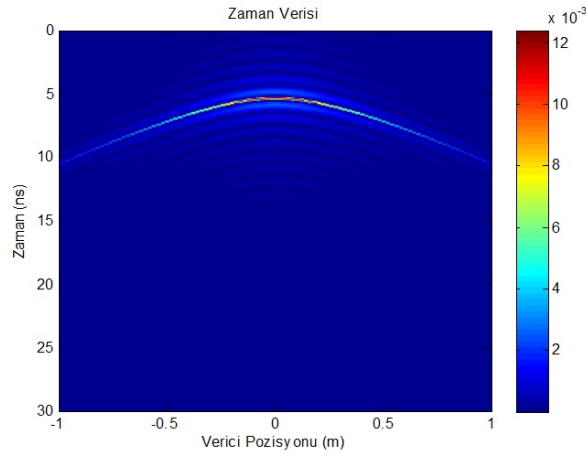
$$f(x_n, y_n, z_n) = \int \int w(u_x, u_y) d(u_x, u_y, t) \delta(t - \tau(u_x, u_y, z_n)) dt du_x du_y \quad (1.5)$$

$d(u_x, u_y, t)$ zaman alanında ölçülen GPR verisi, $w(u_x, u_y)$ açıklık ağırlık fonksiyonu⁵, $f(x_n, y_n, z_n)$ oluşturulan yeraltı görüntüsü, $\tau(u_x, u_y, z_n)$ ise gönderilen sinyalin (x_n, y_n, z_n) noktasından yansyıp alıcıya gelmesi için geçen zamandır. Ayrıca frekans

⁵ing: Aperture Weighting Function

alanındaki görüntüleme yöntemleride [21, 22] frekans alanında benzer bir uyumlu süzgeç uygulamaktadır. Geri çatma yöntemi, basit olarak ölçülen verinin veri toplama işleminin dürtü cevabı ile uyumlu filtrelenmesi olarak düşünülebilir.

GPR’da sinyal işleminin amacı, araştırılan ortamdan yansıyan sinyalleri kullanıcı tarafından doğru ve kolay yorumlanabilecek hale getirmektir. Geniş alanları taramak için dalgacık serileri araştırılan alana gönderilir ve gelen yansımalar uygun dekonvolüsyon yöntemleri ile işlenerek görüntüleme yapılır. Alternatif olarak kısa zamanlı fourier dönüşümü (STFT), dalgacık dönüşümü, Gabor dönüşümü, Wigner dağılım analizi gibi yöntemler hedef tespiti için kullanılabilir [23]. Ayrıca, yeraltındaki borular gibi geometrik özellikleri bilinen ve izole olmuş hedeflerde; sentetik açıklık [24], eşlenik gradyent [25], kırınım yığını migrasyonu [26], Hough dönüşümü [27] ve ters zaman migrasyonu [28] gibi yöntemler iyi sonuçlar vermektedir.



Şekil 1.3. Veri toplama işleminin dürtü cevabı

Yukarıda anlatılan tüm yöntemler alınan sinyalleri Nyquist teoremine göre örneklemektedir. Ayrıca veri toplama zamanları çok fazladır. Bu durum çoğu GPR uygulamasında problem yaratmaktadır. Onun için Sıkıştırılmış Algılama⁶ (CS) [29–31] teorisinden yararlanılarak GPR için [32]’de veri toplama zamanını azaltan ve daha az parazitli görüntüler oluşturabilen seyreklik tabanlı yeni bir görüntüleme yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem seyreklik varsayımına bağlıdır. Genellikle hedefler buldukları ortamın küçük bir kısmını kapsadığı için hedef uzayının seyrek olduğu söylenebilir. Seyreklik, hedef sayısının hedef uzayındaki toplam uzaysal noktadan az

⁶ing: Compressive Sensing

olması demektir. Seyrek sinyallerin az ölçümlerle nasıl geri oluşturulabildiği [29–31]’de anlatılmıştır. Bir diğer yandan, kullanılan Sıkıştırılmış Algılama (CS) tabanlı görüntüleme yöntemi veri toplama zamanını azaltmasına rağmen sinyali geri oluşturmada çok zaman harcamaktadır çünkü hesaplama yükü fazladır. Bu tezde Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemine alternatif olarak daha hızlı ve hesaplama yükü az olan Dik Eşleme Takibi⁷ (OMP) [37, 38] yöntemi incelenmiş ve önerilmiştir. Bu konular tezin 2. ve 3. bölümünde detaylı şekilde incelenmiştir.

Bu tezde yere işleyen radar (GPR) ile seyreklik tabanlı yeraltı görüntüleme hızlandırılmış ve yeryüzünden yansıyan sinyallerin çıkarılması gibi yeni yöntemler eklenerek geliştirilmiştir. Bu bölümde yere işleyen radar (GPR) hakkında fikir sahibi olunabilmesi için genel bilgiler verilmiştir. GPR’ın iç yapısı Şekil 1.1.’de gösterilmiştir. Yeraltının görüntüsünü çıkarabilmek için GPR’ın gönderdiği elektromanyetik dalgaların hedeften yansıyıp tekrar GPR tarafından alınması ise Şekil 1.2.’de modellenmiştir.

2. bölümde basamak frekanslı yere işleyen radar (SF-GPR) için hedef uzayının seyrek olduğu bilgisini kullanan Sıkıştırılmış Algılama (CS) tabanlı görüntüleme yöntemi anlatılmıştır. Bu yöntem ile standart yöntemlere göre az ölçüm alınarak daha net görüntüler elde edilebilmektedir. Aynı zamanda az ölçüm alınması SF-GPR’ın çoğu uygulamada problem olan veri toplama zamanını azaltabilmektedir.

3. bölümde Sıkıştırılmış Algılama (CS) tabanlı görüntüleme yöntemine alternatif olarak Dik Eşleme Takibi (OMP) yöntemi önerilmiştir. CS tabanlı görüntüleme yöntemi az ölçüm kullanarak GPR’ın veri toplama zamanını azaltmasına rağmen kullanılan algoritmanın hesaplama yükü fazladır. Yani veri toplamada kazanılan zaman görüntüyü oluşturmada kaybedilmektedir. Bunun için hesaplama yükü çok daha az olan ama global bir çözümü garanti etmeyen Dik Eşleme Takibi (OMP) yöntemi alternatif olarak önerilmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda OMP’nin CS tabanlı görüntüleme yöntemine benzer performanslarda ve çok daha hızlı görüntüleme yapabildiği gösterilmiştir.

4. bölümde az ve rastgele ölçüm alındığı zaman yeryüzünden yansıyan sinyalleri frekans alanında GPR verisinden çıkartabilen bir yöntem geliştirilmiş ve bazı bilinen yöntemlerle performansı karşılaştırılmıştır. Basamak frekanslı yere işleyen radarlar (SF-GPR) için geliştirilen seyreklik tabanlı yeraltı görüntüleme yöntemi, yer yüzünden yansıyan sinyalleri toplanan GPR verisinden çıkartmamaktadır. Frekans düzleminde

⁷ing: Orthogonal Matching Pursuit

az ve rastgele ölçüm alındığı için yer yüzünden yansıyan sinyallerin toplanan GPR verisinden çıkartılması için kullanılan standart yöntemler direkt uygulanamamaktadır. Bu bölümde geliştirilen yöntemin standart yöntemlere göre daha başarılı şekilde yüzey yansımalarını veriden çıkartabildiği gösterilmiştir.

5. bölümde dalga hızının yeraltındaki gerçek dalga hızı ile varsayılan dalga hızı arasındaki uyumsuzluğun ve hedef pozisyonlarının ızgara noktaları üzerinde olmamasının görüntüleme performansına etkileri analiz edilmiş ve bazı olası çözümler önerilmiştir. Model verisinin doğru oluşturulabilmesi için yeraltındaki dalga hızının tam olarak biliniyor olması gerekmektedir. Ayrıca, gerçek uygulamalarda hedefler genellikle hedef uzayı içinde bölünmüş ızgara noktalarının tam üstünde olmazlar. Bu bölümde bu iki önemli noktanın görüntüleme performansına etkileri incelenmiş, genişletilmiş sözlük, çoklu-çözünürlük gibi çözümler önerilmiştir. Ayrıca bu gibi problemlerde hedeflerin gerçek pozisyonlarını doğru şekilde bulabilen bir yöntem geliştirilmiştir. 6. bölümde ise genel olarak bu tezde yapılanlar özetlenmiş ve gelecekteki çalışmaların neler olabileceği tartışılmıştır.

BÖLÜM 2

2. YERE İŞLEYEN RADAR (GPR) İLE YERALTI GÖRÜNTÜLEME

Standart görüntüleme yöntemlerinde fazla miktarda veri toplanmaktadır. Bu verileri kaydedebilmek, hızlı iletebilmek veya kolay işleyebilmek için sıkıştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Sinyaller, bazı taban vektörlerinin (dalgacık, Fourier, vb.) lineer kombinasyonları kullanılarak temsil edilebiliyorsa sıkıştırılabilirler. Standart sıkıştırma algoritmalarında sinyaller Nyquist örnekleme hızına uygun örneklenir, dönüşümleri hesaplanır ve yüksek katsayılar¹, sinyali geri oluşturabilmek için muhafaza edilir. Az sayıda katsayı kullanılmasına rağmen tüm sinyal örneklenir ve dönüşümler hesaplanır. Bu zaman ve enerji israfıdır. Sıkıştırılmış algılama (CS) teorisi, sinyalin sadece bilgiyi taşıyan kısımlarının ölçülmesini anlatmaktadır.

2.1. Sıkıştırılmış Algılama

Sıkıştırılmış algılama tüm sinyali yüksek örnekleme hızı ile ölçmek yerine sinyalin sadece en fazla bilgi içeren kısımları ölçülebilir. Böylece standart yöntemlere göre enerji ve zamandan kazanılabilir. CS, rastgele izdüşümleri² 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 (2.1) gibi yazılabilirse x sinyalinin seyreklik derecesi K 'dır denebilir.

$$x = \sum_{i=1}^K w_i \psi_i \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de w_i ağırlık katsayıları, ψ_i ise taban vektörleridir. x sinyali matris gösterimi şeklinde de yazılabilir:

$$x = \Psi w \quad (2.2)$$

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

¹ing: Large coefficients

²ing: Randomized projections

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

$$y(m) = \langle x, \phi_m^T \rangle \quad (2.3)$$

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

$$y = \Phi x \quad (2.4)$$

$M < N$ olduğu durumda, x sinyalinin y ölçümlerinden geri oluşturmak sorundur. Fakat sıkıştırılmış algılama teorisine göre eğer $\Phi\Psi$ matrisi sınırlı izometri özelliğine³ (RIP) [57, 58] sahipse $O(K \log(N))$ tane ölçümden x sinyali denklem (2.5)'deki ℓ_1 minimizasyon problemi [29–31] çözdürülerek geri oluşturulabilir.

$$\min \|\hat{x}\|_1 \quad \text{s.t.} \quad y = \Phi\Psi\hat{x} \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'deki 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.

$$1 - \delta_K \leq \frac{\|A_v\|_2}{\|v\|_2} \leq 1 + \delta_K \quad (2.6)$$

Katsayı dizileri $v_j, j \in T$ ve $|T| \leq K$ 'dir [59]. Tüm T 'ler için A 'nın K -sınırlı izometri sabiti δ_K , denklem (2.6)'yı sağlayan en küçük değerdir. Bu özellik esasen gereklidir çünkü kümelerin kardinalitesi K 'dan küçük sütunları ortonormal bir sistem gibi davranır. [58]'de, K seyreklik seviyesine sahip x sinyalinin $\delta_{2K} + \delta_{3K} < 1$ özelliğini sağladığında denklem (2.5) 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. $K = O(M/\log(N/M))$

³ing: Restricted Isometry Property

için denklem (2.6), $1 - O(\exp^{-\gamma N})$ olasılığı ile sağlanır. Burada $\gamma > 0$ 'dır [59]. Bağımsız özdeşçe ayrılmış⁴ (i.i.d) Bernoulli veya Gaussian rastgele değişkenlerinden oluşturulan ölçüm matrisi Φ ; sinüzoidal, dalgacık, Gabor fonksiyonları, dalgacık, vb. Ψ tabanlarında sınırlı izometri özelliğini (RIP) sağlar [57].

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 [60]. Üstelik sinyalin geri oluşturulma prosedürü ölçüm hatalarına karşı gürbüzdür. Ölçümlere bozulma ϵ_n eklenmesi sinyalin geri oluşturulma hatasını ϵ_n 'nin küçük bir katından daha fazla etkilemez [60]. Gürültülü ölçümler için bazı geri oluşturma yöntemleri kullanılabilir [60–63]. Bu yöntemlerden bazılarında geri oluşturulma hatasının enerjisi denklem (2.7)'deki gibi kısıtlanmaktadır.

$$\min \|x\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \|y - Ax\|_2 < \epsilon \quad (2.7)$$

Denklem (2.7)'de geri oluşturma kararlı ve geri oluşturulma hatası sonludur [60]. Bu ikinci dereceden bir koni programıdır⁵ (SOCP). Gürültülü geri oluşturma için kullanılacak daha kolay bir lineer program ise Dantzig Seçicisidir⁶ [61]. Dantzig seçicisinde kalan vektörünün her elementi gürültü seviyesinin içinde olmalı ve kalan vektörü ile A matrisinin sütunları arasındaki kolerasyon iyi olmamalıdır. Dantzig seçicisi denklem (2.8)'teki gibi gösterilebilir:

$$\min \|x\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \|A^T(y - Ax)\|_\infty < \epsilon \quad (2.8)$$

Sıkıştırılmış algılama yöntemi, görüntü geri oluşturulması [64], tıbbi görüntüleme [65], radar ile görüntüleme [66], kaynakların yerini belirleme [67,68], ve kodlama [69] gibi çok çeşitli alanlarda kullanılabilir. Bu bölümde GPR ile elde edilen ölçümler kullanılarak yeraltı görüntüsünün CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulması anlatılmıştır.

⁴ing: Independent Identically Distributed

⁵ing: Second-Order Cone Program

⁶ing: Dantzig Selector

2.2. GPR İle Sıkıştırılmış Görüntüleme

Çeşitli görüntüleme yöntemleri kullanılarak SFCW GPR ile yeraltı görüntülenebilir. Buna örnek olarak frekans alanında ölçülen veri, ters fourier dönüşümü ile zaman alanına çevrilir. Zaman Alanında Geri Çatma yöntemi⁷ [19, 20] uygulanarak yada frekans alanındaki görüntüleme yöntemleri [21,22,56] ile frekans alanında ölçülen veri direk kullanılarak görüntü oluşturulabilir. Temel olarak kullanılan tüm bu yöntemler uyumlu süzgeç ile veri toplama işleminin dürtü cevabını kullanarak görüntüyü oluşturur ve hiçbir hedef uzayının seyreklik bilgisini kullanmamaktadır.

Hedef uzayının seyreklik bilgisini kullanabilmek, zaman veya frekans alanında geri çatma yöntemlerine göre SFCW GPR sistemlerinin veri toplama hızını arttırmak ve daha az parazitli hedef uzayı görüntüleri oluşturabilmek için, [32]'de Sıkıştırılmış Algılama (CS) [29–31] teorisinden yararlanılarak frekans alanında az sayıda ve rastgele seçilen ölçümler kullanılarak görüntüleme yapılabildiği gösterilmiştir.

Bu bölümde hedef uzayındaki seyreklik bilgisini kullanan CS tabanlı görüntüleme yöntemi özetlenmiştir. Basamak frekanslı devamlı dalga GPR sistemi, her tarama noktasında L tane farklı frekansta sinyal gönderir. ℓ frekansında GPR'ın göndereceği sinyal:

$$E_T(\ell, t) = Ae^{-j2\pi(f_0 + \ell\Delta f)t} = Ae^{-j\omega_\ell t} \quad (2.9)$$

$\omega_\ell = 2\pi(f_0 + \ell\Delta f)$, f_0 başlangıç frekansı, $\ell = 0, 1, 2, \dots, L - 1$ toplam frekans basamak sayısı ve Δf frekans basamak aralığıdır. A gönderilen sinyalin kuvvetidir. Araştırılan ortam homojen ve ortam parametreleri bilindiği varsayılarak GPR i . tarama pozisyonundayken, p noktasındaki hedeften alınacak sinyal ise:

$$E_R(\ell, t, p, i) = \alpha(p)e^{j(k_1 r_1 + k_2 r_2 - \omega_\ell t)} \quad (2.10)$$

k_1 ve k_2 havanın ve toprağın yayılma sabitleridir. Sinyal kayıplarını anlatan katsayı $\alpha(p) = A\sigma/S(R(p))$ 'da σ hedefin yansımaya katsayısı, $S(R)$ sinyaldeki zayıflamayı anlatan sinyal açılma fonksiyonudur. r_1 ve r_2 hava ve toprakta alınan yol uzunluklarıdır.

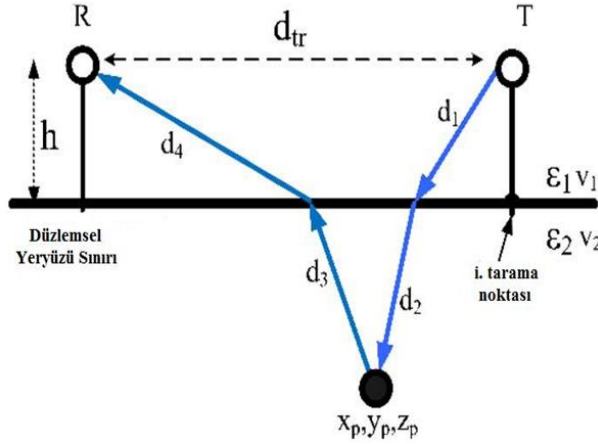
Şekil 2.1.'de GPR'ın ölçüm alması gösterilmiştir. Bu durumda denklem (2.10)'da $r_1 = d_1 + d_4$ ve $r_2 = d_2 + d_3$ olur. Ayrıca denklem (2.10), zaman gecikmesi $\tau_i(p) = r_1/v_1 +$

⁷ing: Time Domain Backprojection

r_2/v_2 cinsindende yazılabilir. Burada v_1 ve v_2 havada ve topraktaki dalga yayılım hızlarıdır. Denklem (2.10)'daki önemli bilgi zamandaki toplam gecikmeyi gösteren yansıyan sinyaldeki faz farkıdır. Hedef uzayının seyrek olduğu varsayımı hedeflerin tüm uzayın küçük bir kısmını kapsadığı için geçerli bir kabüldür. Amaç ölçümler ile uzaysal alan arasında doğrusal bir ilişki kurarak uzaysal alanın görüntüsünü seyreklik bilgisini kullanacak şekilde oluşturabilmektir:

$$d(u_x, u_y, f) = \Psi \pi_T(x, y, z) \quad (2.11)$$

$d(u_x, u_y, f)$ uzay frekans ölçümleri, $\pi_T(x, y, z)$ hedef uzayı, Ψ hedef ve ölçüm uzayları arasındaki dönüşüm operatörüdür.



Şekil 2.1. GPR'ın ölçüm alması

2.2.1. Sözlük matrisi oluşturma

Ψ 'yi oluşturabilmek için hedef uzayı $[x_i, x_f] \times [y_i, y_f] \times [z_i, z_f]$ şeklinde ayrıştırılmalıdır. (x_i, y_i, z_i) ve (x_f, y_f, z_f) görüntülenecek hedef uzayının başlangıç ve bitiş noktalarını temsil etmektedir. Ayrıklaştırmadan sonra N adet $\mathcal{B} = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N\}$ şeklinde noktasal hedef elde edilir. Burada N çözünürlüğü belirler ve her π_j , 3 boyutlu $[x_j; y_j; z_j]$ vektörüdür. π_j noktaları ayrıklaştırılmış olası noktasal hedef pozisyonlarıdır. Hedef herhangi bir ayrıklaştırılmış pozisyonda iken, her frekans basamağı ve her tarama pozisyonu için alıcı tarafından toplanacak frekans verisi $\alpha(p) = 1/R^2$ kabul edilerek denklem (2.10)'la hesaplanır. Radar i . tarama noktasında iken, π_j 'deki noktasal hedef için Ψ_i 'nin j . sütunu denklem (2.12)'deki gibi gösterilebilir.

$$[\Psi_i]_j = \exp[-j\omega(t - \tau_i(\pi_j))] \quad (2.12)$$

Denklem (2.12)'deki ω , L tane farklı frekansı içeren vektördür. P tane hedef için GPR'nin i . tarama noktasındaki frekans yanıtı ise:

$$\zeta_i(\omega) = \sum_{k=1}^P \mathbf{b}(\mathbf{k}) \exp[-j\omega(t - \tau_i(\pi_k))] = \Psi_i \mathbf{b} \quad (2.13)$$

Denklem (2.13), ayrık hedef uzayı \mathbf{b} ile denklem (2.12) arasındaki doğrusal ilişkiyi belirtmektedir. Amaç, hedeflerin nerede olduklarını gösteren \mathbf{b} 'nin oluşturulmasıdır.

2.2.2. Sıkıştırılmış algılama ile görüntüleme

Sıkıştırılmış Algılama teorisi [29–31] ile seyrek olarak gösterilebilen bir sinyalin az sayıda ölçüm alınarak geri oluşturulabileceği gösterilmiştir. \mathbf{b} 'yi geri oluşturabilmek için basamak frekanslı devamlı dalga GPR ile her tarama noktasında L tane ölçüm almak yerine L frekans ölçümünün rastgele seçilmiş alt kümesi olan M tane ölçüm alınır:

$$\beta_i = \Phi_i \zeta_i = \Phi_i \Psi_i \mathbf{b} \quad (2.14)$$

Φ_i , $M \times L$ boyutunda ölçüm matrisidir ve $L \times L$ birim matrisin rastgele bazı satırlarının seçilmesiyle oluşturulmuştur. Her i . tarama noktasında farklı bir Φ_i kullanılabilir. Bu, GPR'nin veri toplama hızını L/M oranında arttırmaktadır.

Sıkıştırılmış Algılama teorisi kullanılarak gürültüsüz ortamda seyrek olarak kabul edilebilen ayrık hedef uzayı \mathbf{b} 'nin:

$$\hat{\mathbf{b}} = \arg \min \|\mathbf{b}\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \beta = \Phi \Psi \mathbf{b} \quad (2.15)$$

şeklinde gösterilebilen ℓ_1 konveks optimizasyon problemi çözülerek geri oluşturulabildiği [32]'de gösterilmiştir. Denklem (2.15) sadece gürültüsüz durum için geçerlidir. Eğer sinyalde gürültü varsa \mathbf{b} vektörü gürbüz olarak:

$$\hat{\mathbf{b}} = \arg \min \|\mathbf{b}\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \|A^T(\beta - A\mathbf{b})\|_\infty < \epsilon_1 \quad (2.16)$$

şeklinde geri oluşturulabilir [33, 61]. Denklem (2.16)'da $\mathbf{A} = \Phi \Psi$ 'dir.

2.3. Benzetim Sonuçları

Bu bölümde basamak frekanslı GPR sistemi kullanılarak yeraltının görüntülenmesi için bir benzetim sistemi geliştirilmiştir. Bunun için 30 cm x 30 cm'lik 2 boyutlu hedef

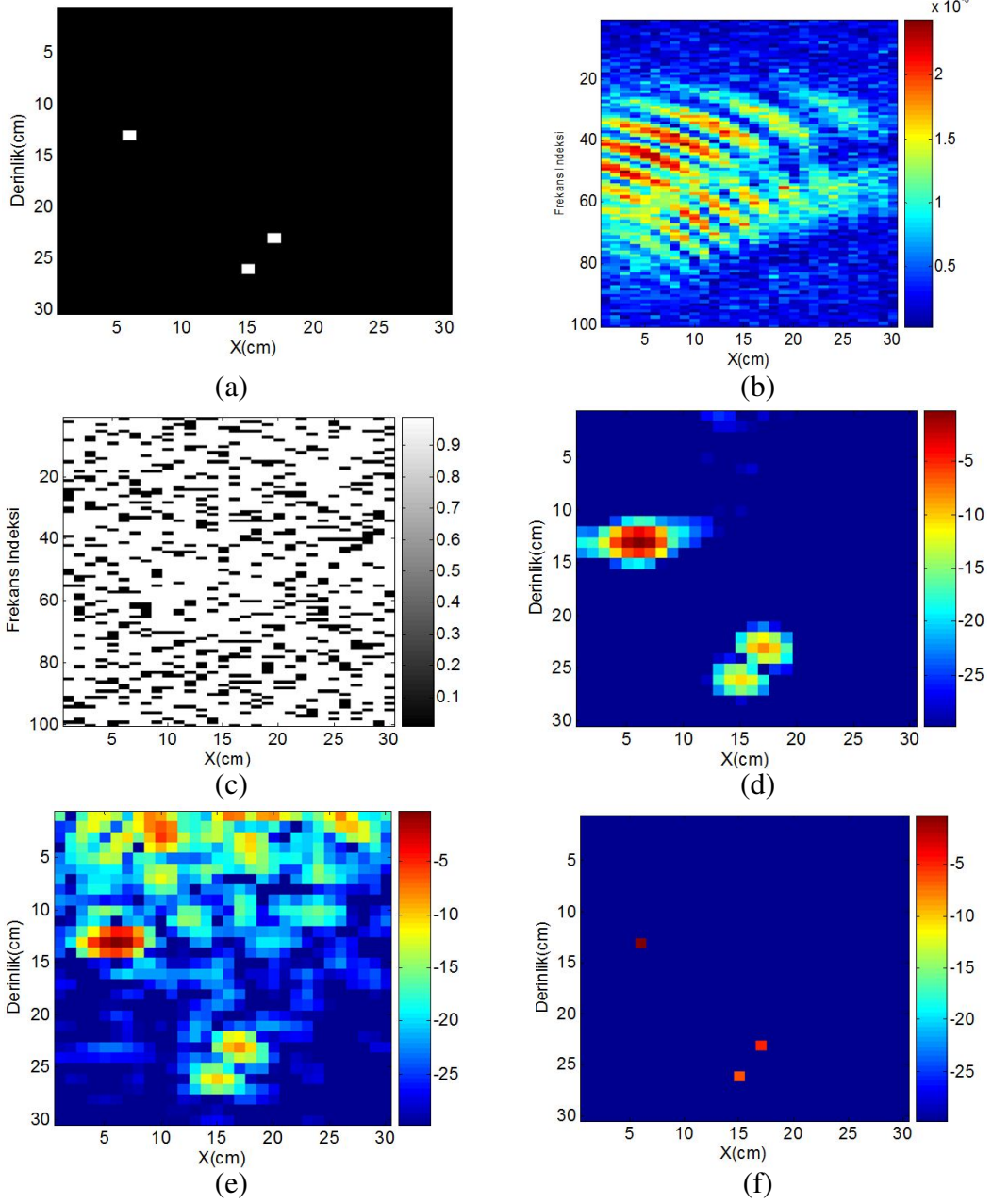
uzayı ele alınmış ve bu uzay 1 cm'lik aralıklarla ayrıştırılmıştır. Hedef uzayında rastgele konumlandırılmış 3 tane noktasal hedef oluşturulmuştur. Bu hedeflerin konumları Şekil 2.2.(a)'da gösterilmiştir. Verici ve alıcı aralığı 5 cm olan bistatik bir sistem (Şekil 2.1.) ele alınıp yerden 10 cm yükseklikten 100 MHz'den 10 GHz'e kadar 100 MHz'lik aralıklar ile alınan frekans ölçümleri benzetilmiştir. Yani her bir uzaysal tarama noktasında standart ölçüm olarak GPR 100 tane frekans ölçümü almaktadır. Sinyal gürültü oranı 10 dB'ken hedef uzayından alınan gürültülü ölçümler Şekil 2.2.(b)'de gösterilmiştir.

CS teorisi seyrek bir hedef alanı için tüm ölçümler yerine daha az ölçüm sayısının kullanılabilmesini göstermektedir. Bu benzetimde her tarama noktasında 100 frekans ölçümü almak yerine sadece rastgele 20 frekans ölçümü alınmıştır. Şekil 2.2.(c) her uzaysal noktada ölçülen frekansları göstermektedir.

Eğer Şekil 2.2.(b)'de gösterilen tüm ölçümlere standart geriçatma algoritması uygulanırsa Şekil 2.2.(d) elde edilir. Standart geriçatma yöntemi, alınan ölçümlerin veri toplama işleminin dürtü yanıtı ile uyumlu fitrelenmesi olarak ele alınabilir. Yani geriçatılmış görüntü kısaca $\mathbf{b}_g = A^T \beta$ şeklinde hesaplanabilir. Şekil 2.2.(d)'de geriçatma yönteminin doğru hedef pozisyonları etrafında yoğunlaşacak şekilde görüntü oluşturduğu görülmektedir. Ancak geriçatma yöntemi Şekil 2.2.(c)'de belirtilen rastgele seçilmiş daha az sayıdaki ölçüme uygulandığında Şekil 2.2.(e) elde edilmiştir. Görüntüde yalancı hedefler oluşmakta ve azaltılan ölçüm sayısından geriçatma yönteminin performansı önemli ölçüde etkilenmektedir. Geriçatma, ölçüm frekanslarının rastgele seçilerek azaltılmasına dayanlı değildir.

Şekil 2.2.(c)'de gösterilen az sayıdaki ölçüme [32]'de geliştirilen ve bölüm 2.2.'de özetlenen yöntem uygulanmış ve Şekil 2.2.(f)'deki görüntü elde edilmiştir. Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi ile görüntüyü oluşturmak için denklem (2.16), CVX optimizasyon paketi [70] kullanılarak çözdürülmüştür. CS tabanlı görüntüleme yöntemi Şekil 2.2.(a)'da gösterilen doğru hedef uzayına çok benzer bir görüntü ortaya çıkarmıştır. Geriçatma yönteminin sonuçlarına göre az sayıda ölçüm kullanan CS tabanlı görüntüleme yönteminin doğruluk, temizlik ve seyreklik açılarından daha iyi olduğu görülmektedir.

Tüm görüntüler kendi maksimumlarına göre oranlanarak 30 dB'lik bir renk ölçeğinde gösterilmiştir. Basamak frekanslı GPR sistemlerinde seyreklik bilgisini kullanan CS tabanlı görüntüleme yönteminin standart yöntemlere göre çok daha az sayıda ölçüm kullanarak seyrek ve daha az parazit yansımali görüntüler oluşturabildiği gösterilmiştir.



Şekil 2.2.: Geriçatma yöntemi ve CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan hedef uzayı görüntüleri. (a) Gerçek hedef uzayı (b) Tüm frekans basamakları kullanıldığında alınacak veri (c) Her uzaysal noktada ölçülen rastgele 20 frekans. Seçilen frekanslar siyah ile gösterilmiştir. (d) Her uzaysal noktada tüm frekans verisi kullanılarak geriçatma ile oluşturulan görüntü, (e) Her uzaysal noktada (c)'de belirtilen frekans ölçümleri kullanılarak geriçatma ile oluşturulan görüntü (f) Her uzaysal noktada 20 tane ölçüm kullanılarak CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan görüntü

2.4. Çıkarımlar

Bu bölümde basamak frekanslı GPR için Sıkıştırılmış Algilama (CS) tabanlı görüntüleme yöntemi anlatılmış ve benzetimler yapılmıştır. Bu yöntem hedef uzayının seyrek olduğu bilgisini kullanmaktadır. Basamak frekanslı GPR tarafından alınan rastgele ve az sayıdaki frekans ölçümü ile ℓ_1 optimizasyon problemi çözdürülerek hedef uzayının görüntüsü oluşturulabilmektedir. Yapılan benzetimler sonucunda CS tabanlı görüntüleme yöntemi standart geriçatma yöntemlerine göre daha net görüntüler oluşturmuştur.

BÖLÜM 3

3. DİK EŞLEME TAKİBİ (OMP) YÖNTEMİ İLE HIZLI YERALTI GÖRÜNTÜLEME

Zaman veya frekans alanında geri çatma yöntemlerine göre SFCW GPR sistemlerinin veri toplama hızını arttırmak ve daha az parazitli hedef uzayı görüntüleri oluşturmak için 2.bölüm'de Sıkıştırılmış Algılama (CS) tabanlı yöntem ile frekans alanında az sayıda ve rastgele seçilen ölçümler kullanılarak görüntüleme yapılabildiği gösterilmiştir. Bu yöntem hedef uzayının seyrek olduğu varsayımına dayanmaktadır ki bu durum pratikte hedeflerin tüm uzayın küçük bir kısmını kapsadığı için geçerli bir kabüldür. [32]'de Sıkıştırılmış Algılama teorisine göre hedef veri modellemesiyle oluşturulan bir sözlük aracılığı ile ölçümler ve hedef uzayı doğrusal olarak ilişkilendirilmiştir. Ölçümlerle uyumlu en seyrek hedef uzayı, ℓ_1 optimizasyon problemi çözülerek elde edilmiştir. [32]'de veri toplama zamanı açısından başarılı sonuçlar gösterilirken görüntü oluşturma yönteminin karmaşıklığı ve harcadığı zaman ele alınmamıştır. Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntülemeye hedef uzayındaki ayrıklaştırılmış toplam hedef noktası N 'e bağlı olarak hesaplama yükü N^3 şeklinde artmaktadır [30, 31, 71]. Yani sıkıştırılmış görüntüleme GPR'ın veri toplama zamanını azaltmasına rağmen, görüntüyü geri oluşturmada çok vakit harcamaktadır. Bu da, gerçek zamanlı uygulamalarda yada 3 boyutlu görüntülemeye sıkıştırılmış görüntüleme yöntemini kullanışsız hale getirmektedir.

Temel olarak [32]'deki yöntem, ölçülen verinin geliştirilen sözlükten en uygun seçim problemi olarak düşünülebilir. Sözlük elemanları cinsinden en iyi temsili sağlayacak birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlere genel olarak taban takibi¹ denilmektedir [72, 73]. Taban Takibi sınıfındaki yöntemler, küresel bir çözüm yerine ardışık olarak çalışan ve her basamakta sözlükten veriye en uygun olanının seçildiği *greedy* yöntemler olarak özetlenebilir. Genel olarak taban takibi yöntemleri seyrek sinyalleri geri oluşturabilmekte ancak ℓ_1 mimimizasyonu gibi küresel bir çözüm sağlamayı garanti etmemektedir. Buna karşın hesaplama yükü ℓ_1 minimizasyona göre çok düşüktür.

Bu bölümde taban takibi sınıfında bulunan ve gürbüz bir yöntem olan Dik Eşleme

¹ing: Basis Pursuit

Takibi² (OMP) yöntemi [37, 38] kullanılmıştır. OMP ile Sıkıştırılmış Algılamaya dayalı görüntüleme yönteminin performansları karşılaştırılmış ve OMP'nin sıkıştırılmış görüntüleme yöntemine iyi bir alternatif olabileceği gösterilmiştir. Ayrıca, OMP yöntemine menzil kazancı eklenerek hedeflerin doğru radar kesit alan değerleriyle bulunması sağlanmıştır. Böylece, sıkıştırılmış algılama ile tespit edilemeyen derindeki hedeflerin OMP ile tespit edilebildiği gösterilmiştir.

İki yöntemi karşılaştırmak amacı ile basamak frekanslı GPR'da tüm frekans ölçümlerini almak yerine az sayıda ve rastgele ölçümler kullanılmıştır. Kullanılan ölçüm sayısı toplam frekans ölçümü sayısının 1/10'nundan fazlayken CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile OMP'nin benzer başarı ile sonuçlar çıkardığı gösterilmiştir.

Sinyal gürültü oranının CS tabanlı görüntüleme ile OMP'ye etkisi incelenmiş ve sinyal gürültü oranı 10 dB'den büyük olduğu durumlarda her iki yöntemde benzer performanslar sergilediği gösterilmiştir.

Aynı bilgisayarda 20 farklı veri setine CS tabanlı görüntüleme ve OMP yöntemleri uygulanmıştır. Yeraltı görüntüsünü geri oluşturmak için CS tabanlı görüntüleme yöntemi ortalama 497.341 saniye harcarken, OMP yöntemi sadece ortalama 0.897 saniye harcamıştır. Yani CS tabanlı görüntüleme yöntemi gerçek uygulamalar, geniş hedef uzayını görüntüleme yada 3 boyutlu görüntüleme için hesaplama yükü fazlayken OMP tüm bu uygulamalar için uygun bir yöntemdir. Kısaca bu çalışmada OMP yöntemi CS tabanlı görüntüleme yönteminden daha hızlı çalışmasına rağmen görüntüleme performanslarının benzer olduğu gösterilmiştir. Yani gerçek uygulamalar için OMP yöntemi CS tabanlı görüntüleme yöntemine göre daha uygulanabilir. OMP yöntemi ile az sayıda ölçüm alınarak sistemin veri toplama zamanı azaltılırken, ℓ_1 optimizasyonu ile görüntüleme yöntemine göre performans kaybı olmadan daha hızlı görüntüleme işlemi yapılabildiği gösterilmiştir.

3.1. Dik Eşleme Takibi (OMP)

Bölüm 2'de β ölçümleri kullanılarak denklem (2.16) çözdürülmüş ve görüntü vektörü \mathbf{b} elde edilmiştir. Denklem (2.16)'yı eniyilemek için hesaplama yükü; hedef uzayındaki N tane ayrıklaştırılmış hedef noktası (ızgara sayısı) ile ilişkili olarak N^3 şeklinde artmaktadır [29–31]. Yani, CS tabanlı görüntüleme yöntemi veri toplama zamanını azaltmasına rağmen, konveks optimizasyon işlemi yaptığı için görüntüyü geri oluşturmada çok zaman harcamaktadır. Bu durum, görüntülenecek

²ing: Orthogonal Matching Pursuit

alan ve kullanılan N sayısı arttıkça büyük bir hesaplamasal yük getirmektedir. Geniş alanlarda görüntüleme, 3 boyutlu görüntüleme yada hedef uzayının fazla sayıda ızgaraya bölüdüğü görüntüleme durumlarında CS tabanlı görüntüleme yönteminin çok zaman harcaması bu yöntemi kullanışsız hale getirmektedir. Daha az verinin kullanılmasından kaynaklanan veri toplamadaki zaman kazancı CS tabanlı görüntülemede harcanmaktadır. Bunun için hesaplama yükünü azaltmak ve hızlı yeraltı görüntülemede daha uygulanabilir bir algoritmadan yararlanmak için Dik Eşleme Takibi (OMP) yöntemi kullanılmıştır [37,38]. Bu algoritma en optimal çözümü garanti etmese de hesaplamada büyük kolaylık sağlamaktadır. Seyrek sinyalleri gürbüz şekilde geri oluşturabildiği gösterilmiştir. $y = Ax + n$ şeklinde bir sistem için OMP algoritması aşağıdaki gibi çalışmaktadır:

Çizelge 3.1. Dik Eşleme Takibi'nin (OMP) algoritması

-
1. İndeks kümesi başlatılır $\Lambda_0 = \emptyset$. Kalan $r_0 = y$ ve döngü indeksi $t = 1$ 'dir.
 2. $\lambda_t \in \arg \max_w |\langle r_{t-1}, A_w \rangle|$ şartına uyan bir λ_t indeksi belirlenir, A_w ; A matrisinin sütunlarıdır.
 3. İndeks kümesi güncellenir $\Lambda_t \leftarrow \Lambda_{t-1} \cup \lambda_t$.
 4. $\min \|y - \sum_{k=1}^t c(\lambda_k) A_{\lambda_k}\|_2$ en küçük kareler probleminin ağırlıkları c bulunur.
 5. c ağırlıkları kullanılarak yeni kalan hesaplanır: $r_t = y - \sum_{k=1}^t c(\lambda_k) \varphi_{\lambda_k}$
 6. Döngü sayıcısı artırılır: $t \leftarrow t + 1$
 7. Durma kriteri sağlanıncaya kadar 2. adıma dönülür, durma kriteri sağlanıyorsa döngüden çıkılır.
-

İterasyonu durdurmak için denklem (2.16)'dakine benzer koşullar seçilebilir. Durma kriteri için, kestirilen gürültü seviyesine yada $0.1 \|y\|_2$ gibi gerçek verinin normuna bağlı olarak bir eşik seviyesi ayarlanabilir. Kalan r 'nin normu belirlenen eşik seviyesinin altına düşerse, iterasyon durdurulabilir. Ayrıca durdurma kriteri için benzer yöntemler [37, 38]'de gösterilmiştir.

3.2. Benzetim Sonuçları

Basamak frekanslı GPR ile yeraltını görüntülemek için, bu bölümde farklı benzetimler yapılmıştır. Belirli bir aralık içinden rastgele ve az sayıda alınan ölçümle

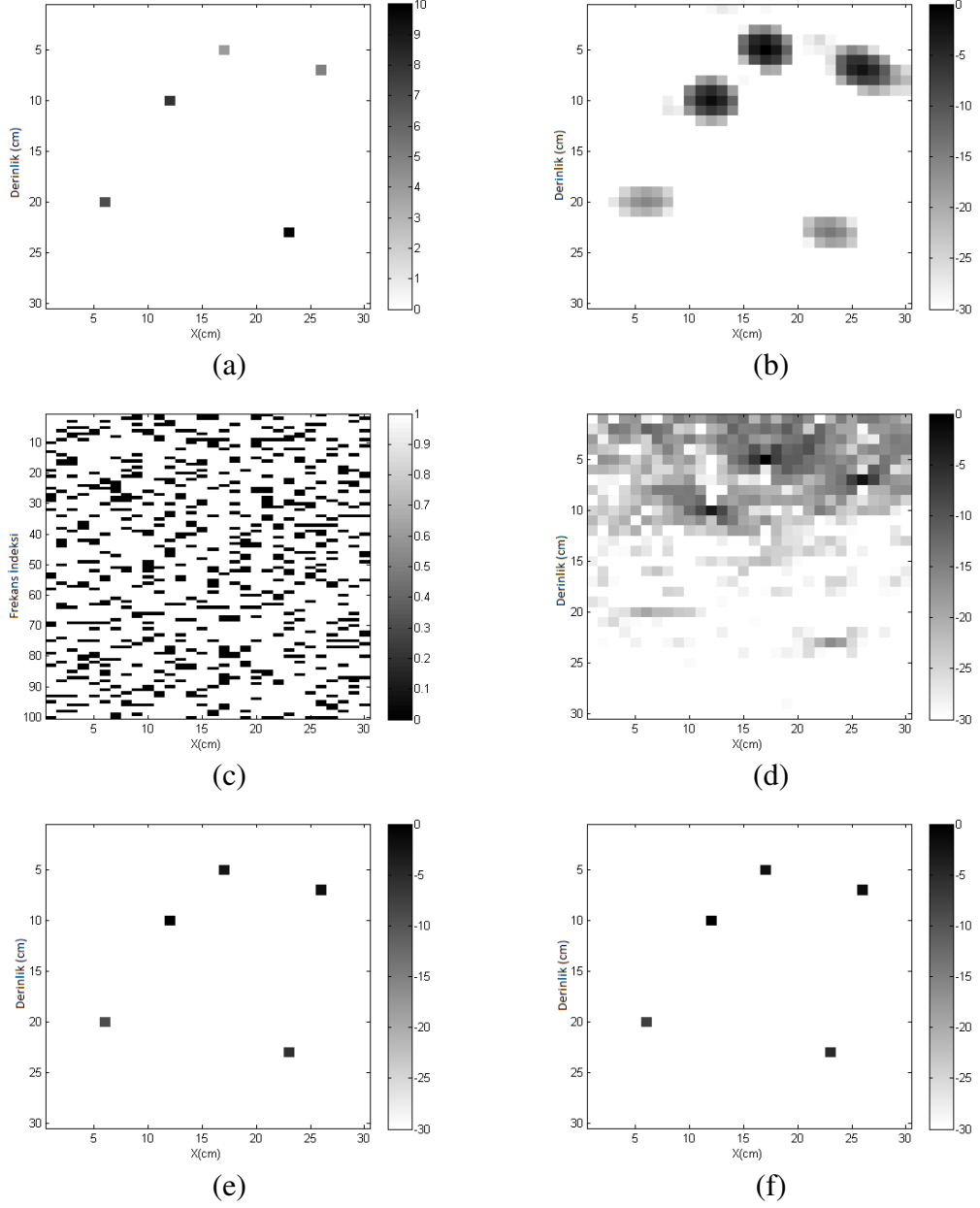
görüntülemeye örnek için 2 boyutlu, homojen ve 30 cm x 30 cm'lik bir hedef uzayı oluşturulmuştur. Verici ve alıcı anten aralığı 5 cm olan bir sistem ele alınıp yerden 10 cm yükseklikten; 100 MHz'den 10 GHz'e kadar 100 MHz'lik aralıklar ile alınan frekans ölçümleri benzetilmiştir. Eğer tüm ölçümler kullanılsaydı, her tarama noktasında 100 frekans ölçümü alınacaktı. Yapılan benzetimde anten huzme açıklığı 40° kabul edilmiştir. Ayrıca verici tarafından gönderilen gücün anten huzme açıklığı içinde her yerde aynı olduğu kabul edilmiş ve anten huzme açıklığı dışında güç olmadığı varsayılmıştır. rastgele konumlandırılmış 5 tane noktasal hedef bulunan gerçek hedef uzayı Şekil 3.1.(a)'da gösterilmiştir. Benzetimde sinyal gürültü oranı 10 dB'dir.

Tüm frekans ölçümleri alındığında ve frekans alanında geri çatma [21,22,56] yöntemi uygulandığında, rastgele konumlandırılmış 5 hedefin pozisyonlarının doğru olarak bulunduğu Şekil 3.1.(b)'de gösterilmiştir.

Bölüm 2'de özetlenen CS tabanlı görüntüleme yöntemi için her tarama noktasında 100 frekans ölçümü almak yerine bunlardan rastgele seçilen 20 tanesi alınmış ve alınan bu ölçümler Şekil 3.1.(c)'de gösterilmiştir. Az ve rastgele alınan bu ölçümler frekans alanında geriçatma yönteminde kullanıldığında, düşük görüntüleme performansına sahip Şekil 3.1.(d) elde edilmiştir. CS tabanlı görüntüleme için, Şekil 3.1.(c)'de seçilmiş ölçümler kullanılarak denklem (2.16) çözdürülmüş ve Şekil 3.1.(e)'deki görüntü oluşturulmuştur. Sonuç olarak, CS tabanlı görüntüleme yöntemi; tüm frekans ölçümlerini kullanan yada az sayıdaki ölçümü kullanan geriçatma yöntemine göre daha az parazit yansımaları görüntüler oluşturmuştur. Az sayıda seçilmiş aynı ölçümler OMP yöntemine uygulandığında Şekil 3.1.(f) elde edilmiştir. OMP ve CS tabanlı görüntüleme yöntemleri, benzer sonuçlar elde etmekte ve doğru hedef pozisyonlarını geriçatma yöntemine göre daha az parazit yansımaları olarak bulmaktadır. Ayrıca menzil kazancı görüntü oluşturma yöntemine eklenerek CS tabanlı görüntüleme ve OMP yöntemleri ile derinlerdeki hedeflerin radar kesit alan değerleri daha doğru bulunmuştur. Genel olarak bu benzetim OMP'nin CS tabanlı görüntüleme yöntemine iyi bir alternatif olabileceğini göstermektedir. Buna rağmen her iki yöntemin görüntüleme performansları ve hesaplama yükleri detaylı olarak incelenmelidir.

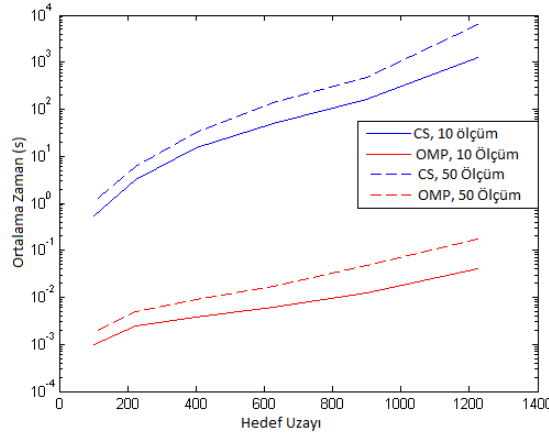
3.2.1. Hesaplama Yükü Karşılaştırması

Şekil 3.1.'de OMP ve CS tabanlı görüntüleme yöntemleri benzer performanslarla hedef uzayı görüntülerini oluşturmuştur. Bu bölümde iki yöntemin hesaplama performansları arasındaki farkı görebilmek için daha detaylı benzetimler yapılmıştır. İlk olarak her iki



Şekil 3.1.: Geriçatma yöntemi, CS tabanlı görüntüleme yöntemi ve OMP ile oluşturulan hedef uzayı görüntüleri. (a) Gerçek hedef uzayı (b) Her uzaysal noktada tüm frekans verisi kullanılarak geriçatma ile oluşturulan görüntü (c) Tüm ölçümleri almak yerine her uzaysal noktada rastgele seçilen frekans ölçümleri. Seçilen frekanslar siyah ile gösterilmiştir. Rastgele seçilen az ölçümler kullanılarak (d) Geriçatma ile oluşturulan görüntü (e) CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan görüntü (f) OMP yöntemi ile oluşturulan görüntü

yönteminde görüntüyü geri oluşturabilmek için harcadığı zamanlar karşılaştırılmıştır. Bu amaçla hedef uzayında kullanılan ızgara sayısı belirli aralıklar ile 100'den 1225'ye arttırılmıştır. Birbirinden bağımsız olarak rastgele seçilmiş 10 ve 50 tane frekans ölçümü CS tabanlı görüntüleme ve OMP yöntemlerine uygulanarak görüntüler 20 sefer oluşturulmuştur. Her görüntü oluşturmada hedeflerin yerleri rastgele değiştirilmiş ve bağımsız yeni ölçümler kullanılmıştır. Sonuç olarak değişen ızgara sayısına göre her iki yöntemde harcadığı ortalama zamanlar logaritmik ölçekte Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.

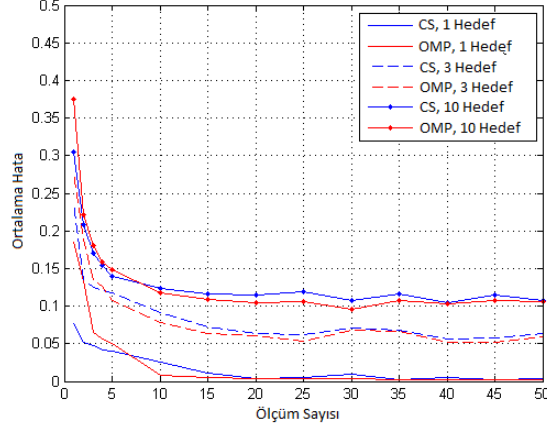


Şekil 3.2.: OMP ve CS Tabanlı görüntüleme yöntemlerinin hedef uzayı görüntülerini oluşturmak için harcadıkları ortalama süreler

Görüldüğü gibi OMP yönteminin görüntüyü geri oluşturmak için harcadığı hesaplama zamanı, CS tabanlı görüntüleme yöntemine göre çok daha azdır. Hedef uzayının boyutu büyüdükçe her iki yöntemde hesaplama zamanlarında artma olduğu gözlemlenmiştir. Hedef uzayının boyutu ile her iki yöntemde görüntü oluşturmada harcadığı zamanların ilişkisini anlayabilmek için Şekil 3.2.'deki sonuçlara 1.dereceden polinomlar çizdirilmiş, CS tabanlı görüntüleme yönteminin ızgara sayısı (N) ile artış oranı $O(N^{3.17})$ 'ken OMP yönteminin sadece $O(N^{1.6})$ olduğu bulunmuştur. Yani hedef uzayının boyutu arttıkça her iki yöntem arasındaki hesaplama zamanları farkının etkisi fazlasıyla artmaktadır. Bu, geniş alanları görüntülemek veya 3 boyutlu görüntüleme yapmak için OMP yöntemini daha uygun bir algoritma yapmaktadır. Şekil 3.2.'den çıkartılabilecek bir diğer sonuç ise görüntüleme için harcanan zamanın her tarama noktasında alınan ölçüm sayısından ziyade hedef uzayının boyutuna bağlı olduğudur. Ölçüm sayısının artması harcanan zamanı arttırmasına rağmen hedef uzayı boyutunun harcanan zamana etkisi ile

karşılaştırıldığında çok azdır.

3.2.2. Ölçüm ve Seyreklik Seviyesi Analizi

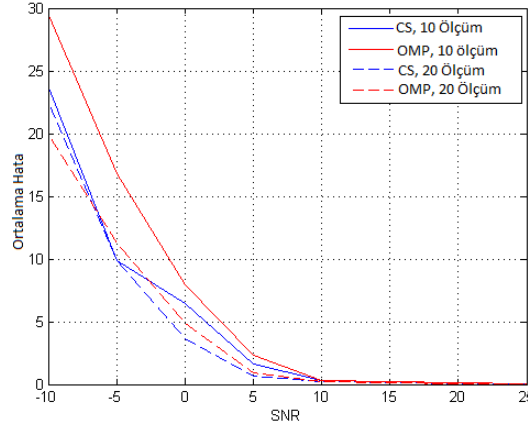


Şekil 3.3.: OMP ve CS tabanlı yöntemler ile hedef uzayını görüntülemeye oluşan hataya ölçüm sayısının etkisi

OMP yöntemi görüntüyü geri oluşturmak için daha az zaman harcamasına rağmen global bir çözümü garanti etmemektedir. Bu yüzden OMP ve CS tabanlı görüntüleme yöntemlerinin görüntüleme performanslarını karşılaştırmak için benzetimler yapılmıştır. Birbirinden bağımsız 1, 3 ve 10 hedefin rastgele konumlandırıldığı 20 cm x 20 cm'lik alanlar ölçüm sayısı 1'den 50'ye belirli aralıklarla artırılarak taranmıştır. Bu işlem 100 defa tekrarlanmıştır. Her tekrarda hedefler rastgele farklı yerlere konumlandırılmıştır. Doğru hedef uzayı ile oluşturulan görüntüler arasındaki hatalar hesaplanmıştır. Değişik sayıdaki hedeflerin veya değişik sayıda alınan ölçümlerin görüntüleme performansına olan etkilerini karşılaştırabilmek için ortalama hatalar, hedef uzayının normu ile normalize edilmiş ve sonuçlar Şekil 3.3.'de gösterilmiştir. Ölçüm sayısı 10'dan büyükken OMP ve CS tabanlı görüntüleme yöntemleri benzer hata değerleriyle görüntüleri oluşturmuşlardır. Eğer tüm ölçümler alınmış olsaydı her tarama noktasında 100 tane ölçüm alınması gerekiyordu. Alınan 10 ölçüm, bu sayının sadece 1/10'nudur. Ayrıca hedef sayısı arttıkça her iki yöntemde görüntüleme performansları benzer şekilde düşmüştür. Çok az sayıda ölçüm alındığı zaman, iki yöntemde doğru görüntüyü oluşturmakta başarısız olmuştur.

3.2.3. Gürültü Analizi

Son olarak gürültünün OMP ve CS tabanlı görüntüleme yöntemlerinin performanslarına etkisi analiz edilmiştir. Bu amaçla, 10 ve 20 ölçüm kullanılarak

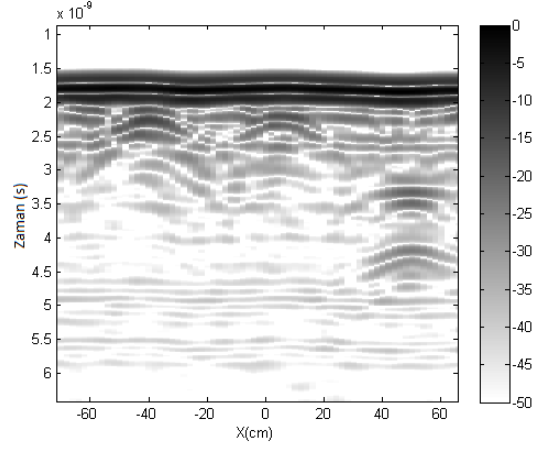


Şekil 3.4.: OMP ve CS tabanlı yöntemler ile hedef uzayını görüntüleme hataya gürültünün etkisi

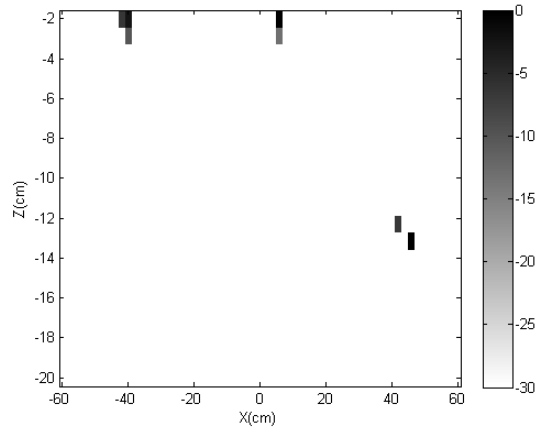
rastgele konumlandırılmış 3 tane hedefi içeren 20 cm x 20 cm'lik alan taramıştır. Bu benzetimler birbirinden bağımsız olarak 100 defa tekrarlanmıştır. Normalize edilmiş ortalama hata ve sinyal gürültü oranı grafiği Şekil 3.4.'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi sinyal gürültü oranı 10 dB'den büyükken OMP ile CS tabanlı görüntüleme yöntemi benzer performanslar göstermektedir. Çok düşük sinyal gürültü oranlarında CS tabanlı görüntüleme yöntemi, OMP yöntemine göre daha az hatalı görüntüler oluşturabilmektedir. Benzetim sonuçlarına göre OMP, CS tabanlı görüntüleme yöntemine göre çok daha az zamanda görüntüleme yapabilirken benzer görüntüleme performansı sergilemektedir. Bu yüzden de OMP yöntemi gerçek GPR uygulamaları, geniş alanların görüntülenmesi veya 3 boyutlu yeraltı görüntüleri çıkarılması gibi uygulamalar için daha uygulanabiliridir.

3.3. Deneysel Sonuçlar

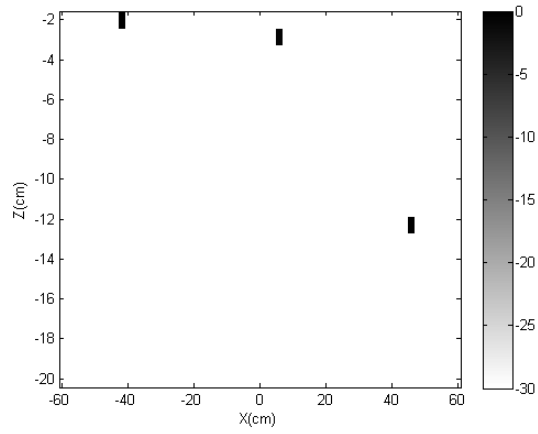
OMP ve CS tabanlı görüntüleme yöntemleri [35,36,82]'den elde edilen deneysel GPR verilerine uygulanmıştır. GPR yerden 27.8 cm yükseklikteki anten ile 1.8 m x 1.8 m'lik kuru kum alanını x ve y boyutlarında taramıştır. 60 MHz ile 8.06 GHz arasında 401 tane frekans ölçümü alınmıştır. [35,36,82]'den elde edilen 3 boyutlu SF GPR verisinin sadece tek boyutu kullanılmıştır. Verinin zaman alanındaki görüntüsü Şekil 3.5.(a)'da gösterilmiştir. Zaman alanındaki veri grafiğinde görüldüğü gibi, $x=-40$, $x=5$ ve $x=50$ cm konumlarında 2 tane sığda, 1 tane derinde hedef vardır. Seyrek görüntüleme için her tarama noktasında alınan 401 tane ölçümü kullanmak yerine bu ölçümlerden rastgele 200 ölçüm seçilmiş ve bunlar OMP ve CS tabanlı görüntüleme yöntemlerine uygulanmıştır. Her iki yöntemin oluşturduğu görüntüler Şekil 3.5.(b) ve Şekil



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.5.: Deneysel GPR verileri kullanılarak OMP ve CS tabanlı yöntem ile oluşturulan görüntüler (a) Deneysel GPR verisinin tüm ölçümler kullanıldığında zaman alanındaki gösterimi. Az ve rastgele seçilen ölçümler kullanıldığında; (b) CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan görüntü (c) OMP yöntemi ile oluşturulan görüntü

3.5.(c)'de gösterilmiştir. OMP yöntemi gerçek GPR verilerinden yeraltı görüntülerini CS tabanlı görüntüleme yöntemi gibi doğru olarak oluşturabilmektedir. Sonuçları elde edebilmek için CS tabanlı görüntüleme yöntemi 24.411 saniye harcarken OMP sadece 0.156 saniye harcamıştır. CS tabanlı görüntüleme yöntemi, OMP'ye göre hedef uzayı görüntüsünü daha detaylı olarak oluşturmuş olsada her iki yöntemde hedefleri başarı ile bulabilmiştir.

3.4. Çıkarımlar

2. bölümde anlatılan Sıkıştırılmış Algılama (CS) tabanlı görüntüleme yöntemi veri toplama zamanını fazlasıyla düşürürken görüntülen hedef uzayının büyüklüğüne bağlı olarak ℓ_1 optimizasyon probleminin çözümü kısmında çok süre harcamaktadır. Bu bölümde taban takibi sınıfında bulunan Dik Eşleme Takibi (OMP) yöntemi ile yeraltı görüntüsü daha hızlı şekilde oluşturulmuştur. ℓ_1 optimizasyon probleminin sonuçlarına göre çok daha hızlı bir şekilde benzer performanslarda görüntüler elde edilebilmiştir. Ayrıca yapılan benzetimlerden OMP ve Sıkıştırılmış Algılama (CS) tabanlı görüntüleme yönteminin ölçüm sayısı, seyreklik ve gürültüye karşı performanslarının benzer olmasına rağmen OMP'nin hesaplama yükünün çok daha az olduğu gösterilmiştir. Son olarakta OMP ile CS tabanlı görüntüleme yöntemi deneysel veriye uygulanmıştır. Gerçek GPR verileri kullanıldığında da OMP'nin CS tabanlı görüntüleme yöntemine benzer görüntüler oluşturabildiği gösterilmiştir. Gerçek veriler kullanıldığında, görüntüleri oluşturmak için harcanan zamanlar karşılaştırılmış ve OMP'nin CS tabanlı görüntüleme yöntemine göre çok daha hızlı çalıştığı anlaşılmıştır. Yani gerçek GPR uygulamaları, geniş hedef uzaylarının görüntülenmesi veya 3 boyutlu yeraltı görüntülerinin oluşturulması gibi uygulamalar için OMP yöntemi CS tabanlı görüntüleme yöntemine göre daha uygulanabilir. Bu bölümde elde edilen sonuçlar [86, 87]'de yayınlanmıştır.

BÖLÜM 4

4. SIKIŞTIRILMIŞ ALGILAMALI GPR İÇİN YÜZEY YANSIMALARININ ÇIKARTILMASI VE SEYREK YERALTI GÖRÜNTÜLEME

SFCW GPR sistemlerinin veri toplama hızını arttırabilmek için 2. bölümde Sıkıştırılmış Algılama (CS) ile frekans alanında az sayıda ve rastgele seçilen ölçümler kullanılarak görüntüleme yapılabildiği gösterilmiştir. Veri modeli ile oluşturulan bir sözlük aracılığı ile ölçümler ve hedef uzayı ilişkilendirilmiş; ölçümlerle uyumlu en seyrek hedef uzayı, ℓ_1 minimizasyonunu gerçekleştiren bir optimizasyon problemi çözülerek elde edilmiştir. Bu yöntemlerde yer yüzünden yansıyan sinyaller toplanan veriden çıkartılmamıştır. Bunun yerine hedef uzayı ve karşılık gelen veri sözlüğü yüzey yansımalarını kapsamayacak şekilde belirli bir derinliğin altında alınmış, sığ hedef uzayı modelin içine katılmamıştır. Bu yüzden hedef uzayının çıkarılan sığ kısmında hedef varsa tespit edilemeyecektir. Yer yüzünden yansıyan sinyal, hedeflerden yansıyan sinyale göre çok daha büyük olacağı için bu kısım hedef uzayından çıkarılmasa bile sığ yerlerdeki hedeflerin tespit edilmesinde zorluklar yaşanmaktadır. Sonuç olarak sığ yerlerdeki hedefleri tespit edebilmek için yer yüzünden yansıyan sinyaller toplanan veriden çıkartılmalıdır. Bu bölümde az ve rastgele ölçüm alındığı zaman yeryüzünden yansıyan sinyalleri frekans alanında GPR verisinden çıkartabilen bir yöntem geliştirilmiş ve bazı bilinen yöntemlerle performansı karşılaştırılmıştır.

4.1. Yüzey Yansımalarını Çıkartan Standart Yöntemler

Yeryüzünden yansıyan sinyalleri GPR verisinden çıkartmak için Yürüyen Ortalama (MA-BS), Yürüyen Medyan (MM-BS) [75], Zaman Alanında Kaydırma ve Genlik Ölçeklendirme (aSaS-BS) [76], Üstel Ortalama (EA-BS), Yüksek Geçirgen Filtre (HP FIR-BS) gibi bir çok yöntem kullanılmaktadır [74–81]. Bu bölümde Yürüyen Ortalama (MA-BS) ile Zaman Alanında Kaydırma ve Genlik Ölçeklendirme (aSaS-BS) yöntemi özetlenmiştir.

4.1.1. Yürüyen Ortalama Yöntemi (MA-BS)

Yürüyen Ortalama yönteminde pencereleme kullanılır. Her tarama noktasında toplanan GPR verisinden, pencere içinde kalan verilerin ortalaması çıkartılır. Her

tarama noktasında toplanan veri, oluşturulan pencerenin tam orta noktasında yer alır. Bu yüzden pencere uzunluğu her zaman tek sayıdır.

$$b_n(t) = \frac{\sum_{k=1}^N A_k(t)}{N}, \quad n = \frac{N-1}{2} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de $b_n(t)$ yeryüzünden yansıyan sinyal, $A_k(t)$ tarama noktalarında toplanan GPR verisi, N ise kullanılan pencerenin uzunluğudur. Her tarama noktasında $b_n(t)$ hesaplanır ve GPR verisinden çıkartılır. Böylece yeryüzü yansımaları Yürüyen Ortalama yöntemi ile veriden çıkartılmış olur.

4.1.2. Zaman Alanında Kaydırma Ve Genlik Ölçeklendirme Yöntemi (aSaS-BS)

aSaS-BS'de ilk N tane GPR verisinden referans sinyali b_{ref} oluşturulur. Toplanan GPR verisi ile referans sinyali b_{ref} arasında genlik ölçekleme ve zamanda kaydırma işlemleri ile b_n oluşturulur. Her tarama noktasındaki GPR verisinden, b_n çıkartılarak yeryüzünden yansıyan sinyaller yok edilebilir.

$$b_n(t) = \alpha_{n,ref} b(t - t_{n,ref}) \quad (4.2)$$

$\alpha_{n,ref}$ ölçekleme katsayısı, $t_{n,ref}$ ise zaman gecikmesidir.

Tüm bu yöntemler, zaman alanında çalışmakta ve frekans alanında tüm ölçümler alındığı zaman iyi performans gösterebilmektedirler. Az ölçüm alınarak toplanan GPR verisinin zaman alanına çevrilirken oluşturacağı hatalar yüzünden bu yöntemler iyi sonuçlar vermemektedir. Sonraki kısımda Sıkıştırılmış Algılama (CS) ile az ve rastgele ölçüm alınarak yapılan görüntüleme yer yüzünden yansıyan sinyallerin zaman alanına çevrilmeden frekans alanında çıkartılabileceği bir yöntem geliştirilmiştir. Bu sayede görüntülenecek hedef uzayında bir kısıtlamaya gidilmeden sığ derinliklerdeki hedeflerinde seyreklik tabanlı yöntemlerle görüntülenebildiği gösterilmiştir.

4.2. Yer Yüzünden Yansıyan Sinyallerin Sıkıştırılmış Veriden Çıkartılması

Basamak frekanslı GPR ile rastgele seçilen $w_\ell, \ell = 1, 2, 3, 4 \dots L$, frekansında L tane ölçüm alındığı varsayılırsa, GPR'ın i . tarama noktasındayken ℓ . basamak frekansında topladığı veri;

$$\beta_i(w_\ell) = t_i(w_\ell) + g_i(w_\ell) + n_i(w_\ell) \quad (4.3)$$

şeklinde yazılabilir. $t_i(w_\ell)$ hedeften yansıyan sinyal, $g_i(w_\ell)$ yer yüzünden yansıyan sinyal, $n_i(w_\ell)$ ise sistem gürültüsüdür [74]. GPR verisi ile yer yüzünden yansıyan sinyal, frekans düzleminde $\beta_i=[\beta_i(w_1)\beta_i(w_2)\dots\beta_i(w_M)]^T$ ve $g_i=[g_i(w_1)g_i(w_2)\dots g_i(w_M)]^T$ şeklinde gösterilebilir. Burada L tane frekans ölçümü almak yerine her bir ölçüm noktasında farklı ve rastgele M ölçüm alınmıştır. $M < L$ 'dir.

GPR sensörünün yeryüzünden ortalama yüksekliği d varsayılarak, w_ℓ frekansındaki referans sinyali aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$g_r(w_\ell) = e^{-jw_\ell\tau_0} \quad (4.4)$$

$\tau_0 = 2d/c$ 'dir. Burada c dalga hızıdır. GPR i . tarama noktasındayken engebeli bir yüzeyden alınan yeryüzü sinyali $g_i(w_\ell)$, denklem (4.4)'deki referans sinyali $g_r(w_\ell)$ 'nin genlikte ölçeklenmiş ve fazda kaymış hali olarak modellenir:

$$g_i(w_\ell) = \alpha_\ell g_r(w_\ell) e^{jw_\ell\Delta\tau_i} \quad (4.5)$$

Denklem (4.5)'de α_ℓ ölçekleme katsayısıdır. $\Delta\tau_i$ ise her w_ℓ frekansında ortalama zaman gecikmesi τ_0 'ya bağlı olarak değişen zaman kaymasıdır. Amaç, GPR i . tarama noktasındayken M tane ölçüm alındığı durumda $\hat{\tau}_i$ ve $\hat{\alpha}_\ell$ 'nin kestirilmesidir. $\hat{\tau}_i$ 'nin en büyük olabilirlik kestirimi¹ denklem (4.6) ile hesaplanabilir:

$$\hat{\tau}_i = \arg \max \left| \sum_{\ell=1}^M g_i(w_\ell) \beta_i(w_\ell) \right|, \quad \tau_0 - \Delta\tau < \hat{\tau}_i < \tau_0 + \Delta\tau \quad (4.6)$$

Denklem (4.6) hesaplanırken $\alpha_\ell = 1$ alınmıştır. Kestirilecek $\hat{\tau}_i$ değeri, denklem (4.6)'da belirtilen zaman gecikmesinin limitleri içinde ölçülen veri ile model verisinin en iyi korelasyonunu veren değerdir. Zaman gecikmesinin limitlerini ifade eden $\Delta\tau$, yeryüzünün engebelik derecesine göre seçilebilir. Daha sonra, zaman gecikmesindeki kestirilen kayma $\Delta\hat{\tau}_i = \hat{\tau}_i - \tau_0$ şeklinde gösterilebilir. i . tarama noktasında ve ℓ . frekansta ölçekleme katsayısı:

$$\hat{\alpha}_{i,\ell} = \frac{|\beta_i(w_\ell)|}{|g_i(w_\ell)|} \quad (4.7)$$

şeklinde kestirilebilir. Denklem (4.7)'de ölçekleme katsayısı hesaplanırken

¹ing: Maximum Likelihood Estimate

Denklem (4.6)'da hesaplanan zaman gecikmesi kullanılır. Hesaplanan $\hat{\tau}_i$ ve $\hat{\alpha}_{i,\ell}$ ile yüzey yansımaları:

$$\hat{g}_i(w_\ell) = \hat{\alpha}_{i,\ell} g_r(w_\ell) e^{jw_\ell \Delta \hat{\tau}_i} \quad (4.8)$$

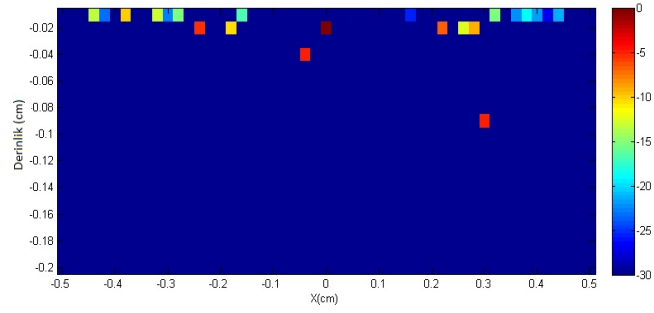
şeklinde modellenebilir. Denklem (4.8) ile hesaplanan yüzey yansımalarının kestirimi $\hat{g}_i(w_\ell)$, GPR verisi $\beta_i(w_\ell)$ 'den çıkartılır. Böylece yer yüzünden yansıyan sinyaller frekans alanında GPR verisinden çıkartılmış olur.

4.3. Benzetim Sonuçları

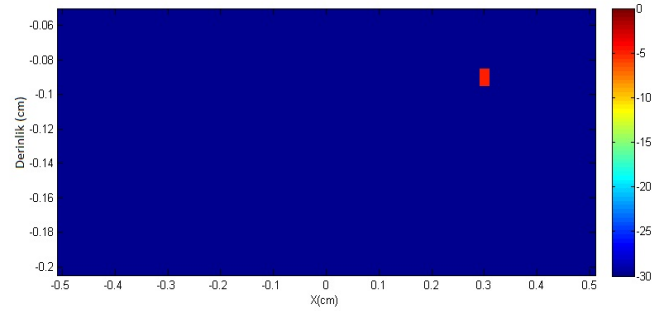
Bu bölümde, SF-GPR ile az ölçüm alındığında (CS teorisi ile) yer yüzünden yansıyan sinyallerin GPR verisinden çıkartılarak sığ yerlerdeki hedeflerinde tespiti amacıyla benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, verici alıcı aralığı 5 cm olan bi-statik bir sistem ele alınıp yerden 20 cm yükseklikten her tarama noktasında 500MHz'den 5.5GHz'e kadar alınması gereken 501 frekans ölçümünden rastgele seçilmiş 101 tanesi benzetilmiştir. Engebeli yeryüzünü modelleyebilmek için her tarama noktasında, belirlenen varyans ile normal dağılım kullanılarak yeryüzü seviyeleri rastgele belirlenmiştir. Modellenen yeryüzü seviyelerine polinom uydurularak yeryüzü modeli oluşturulmuştur. 2 cm ve 9 cm derinliklerinde iki noktasal hedef kullanılmıştır. Görüntülenecek hedef uzayı x ekseninde $[-0.5, 0.5]$ m ve $[0, -0.2]$ m derinlikte seçilmiştir.

Hedef uzayı standart CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile görüntülendiğinde Şekil 4.1.(a) elde edilmiştir. 2 cm derinlikteki hedef, engebeli yeryüzünden yansıyan sinyallerden dolayı tespit edilememektedir. Ayrıca yüzey yansımalarından dolayı pek çok noktasal hedef görüntüde yer almaktadır. Yüzey yansımalarını ekarte edebilmek için hedef uzayı x ekseninde $[-0.5, 0.5]$ metre ve $[-0.04, -0.2]$ m derinlikte seçildiğinde derinde bulunan hedef doğru olarak bulunabilmiş ve görüntü seyrek bir şekilde oluşturulabilmiştir. Fakat 2 cm derinliğindeki hedef Şekil 4.1.(b)'de görüldüğü gibi görüntülenememiştir. Geliştirilen yöntemle yer yüzünden yansıyan sinyaller GPR verisinden çıkartılıp tüm hedef alanı için görüntüleme yapıldığında her iki hedef de net şekilde tespit edilebilmiştir (Şekil 4.1.(c)).

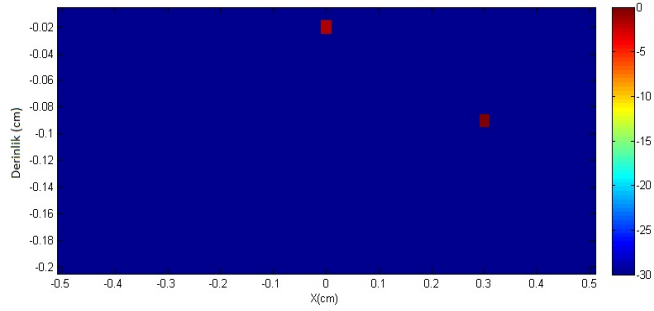
Daha detaylı bir gösterim için benzer benzetim koşullarında 3 noktasal hedef; (0,-10) cm, (20,-2) cm ve (-30,-15) cm'ye yerleştirilmiştir. 20 dB beyaz Gaussian gürültüsü benzetim verisine eklenmiştir. Her tarama noktasında tüm ölçümlerin (501 ölçüm) alındığı durumda Şekil 4.2.(a)'da gösterilen frekans tepkisi elde



(a)

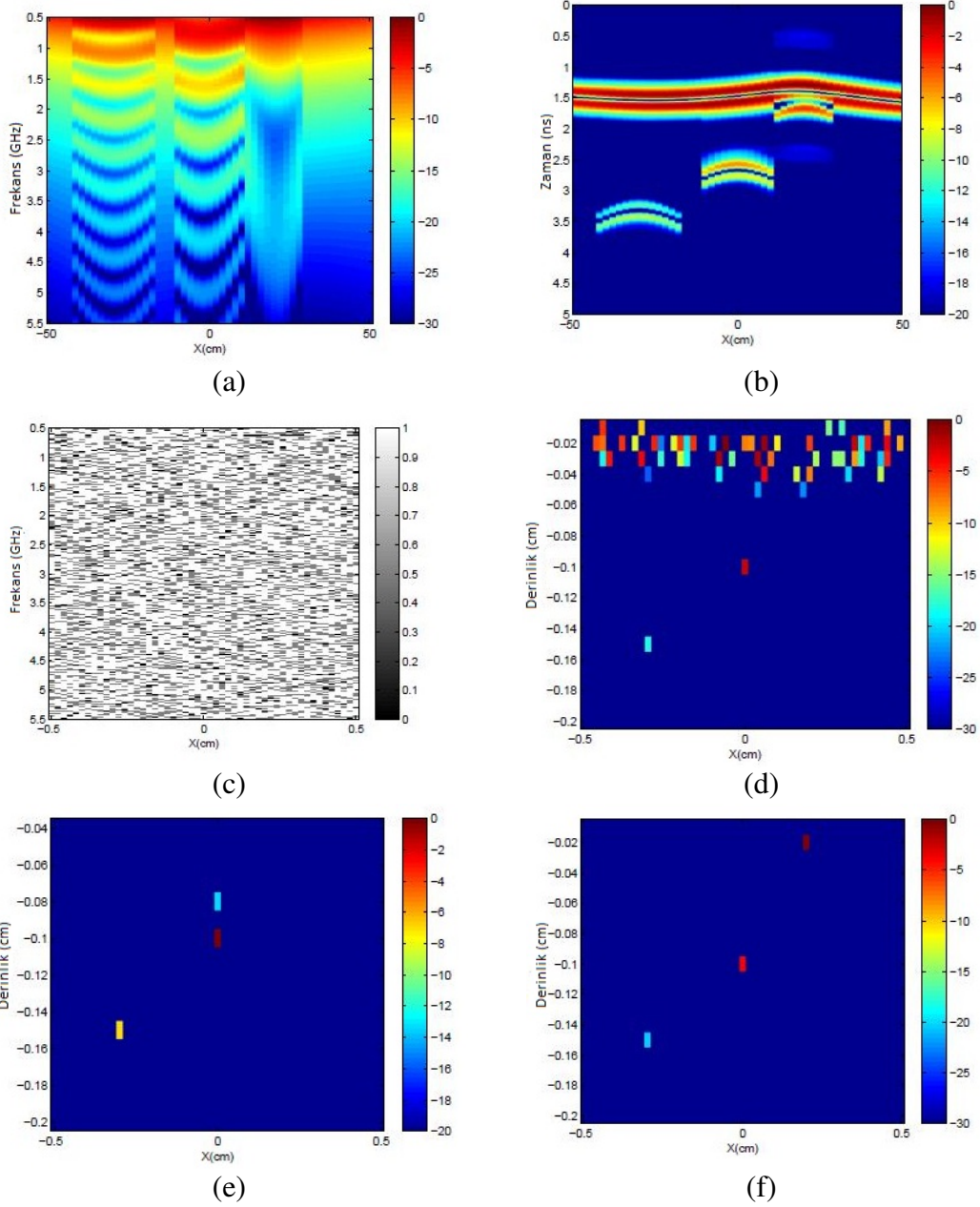


(b)



(c)

Şekil 4.1.: Yüzey yansımalarının geliştirilen yöntem ile çıkartılması. Sıkıştırılmış algılama tabanlı yöntem ile (a) Yüzey yansımaları varken tüm hedef uzayının görüntülenmesi (b) Yüzey yansımaları varken ilk 4 cm'lik derinlik dışındaki hedef uzayının görüntülenmesi (c) Yüzey yansımaları geliştirilen yöntemle çıkarıldıktan sonra tüm hedef uzayının görüntülenmesi.



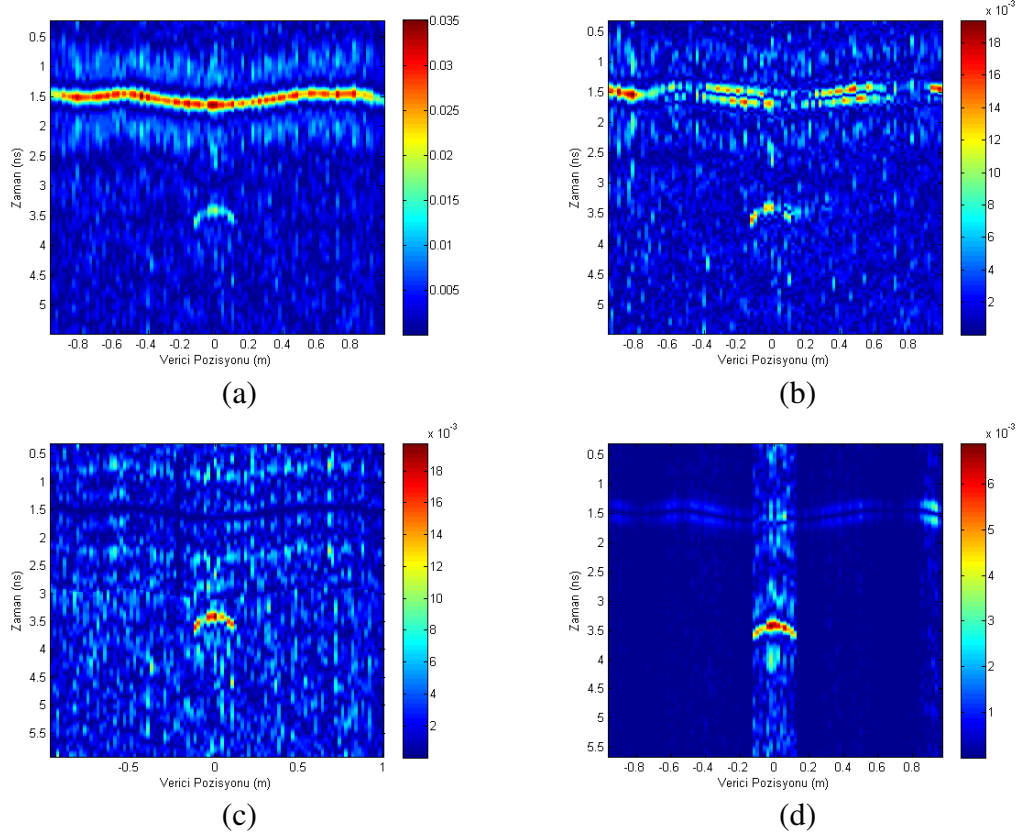
Şekil 4.2.: Yüzey yansımalarının geliştirilen yöntem ile çıkartılması. (a) Tüm ölçümler alındığında frekans verisinin büyüklüğü (b) Tüm ölçümler alındığında hedef uzayın zaman alanında gösterimi (c) Tüm ölçümleri almak yerine her uzaysal noktada rastgele seçilen frekans ölçümleri. Seçilen frekanslar siyah ile gösterilmiştir. Rastgele seçilen az ölçümler kullanılarak; (d) Yeryüzü yansımaları çıkartılmadan CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan hedef uzayı görüntüsü (e) Hedef uzayının yeryüzü yansımalarından etkilenen sığ kısmının çıkartıldığı CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan hedef uzayı görüntüsü (f) Geliştirilen yöntem ile yeryüzü yansımaları çıkartıldıktan sonra CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan hedef uzayı görüntüsü

edilmiştir. Burada sadece alınan frekans tepkilerinin genlikleri gösterilmiştir. Bu durumda frekans alanında alınan ölçümler zaman alanına çevrilerek Şekil 4.2.(b) elde edilmiştir. Rastgele modellenen engebeli yeryüzü Şekil 4.2.(b)'de görülebilmektedir. Bu sonuçlar tüm ölçümler alındığı zaman elde edilmiştir. CS tabanlı görüntüleme yöntemi tüm ölçümleri kullanmak yerine rastgele ve daha az ölçümle görüntüleme yapabilmektedir. 501 ölçüm yerine alınan ölçümlerden rastgele 101 tane frekans ölçümü seçilmiştir. Frekans spektrumunun $1/5$ 'ini ölçmek, veri toplama zamanında kazanç sağlamaktadır. Şekil 4.2.(c)'de siyah noktalar rastgele alınmış az sayıdaki ölçümleri göstermektedir. Hedef uzayı x ekseninde $[50, 50]$ cm ve $[-1, -20]$ cm derinlikte varsayılmıştır. Bölüm 2'de özetlenen Seyreklik Tabanlı yeraltı görüntüleme yöntemi alınan az sayıdaki frekans ölçümüne uygulanmış ve Şekil 4.2.(d) elde edilmiştir. Engebeli yeryüzünden yansıyan güçlü sinyaller yüzünden seyrek hedef uzayındaki hedefler doğru yerlerde tespit edilememiştir. Hedef uzayının görüntüsü bozulmuştur. Yeryüzü yansımalarından dolayı gerçekte olmayan yanlış hedefler hedef uzayında varmış gibi görüntülenmiştir. Güçlü yeryüzü yansımalarının etkilerinden kurtulabilmek için hedef uzayının derinliği $[-4, -20]$ cm olarak yeniden tanımlandığında Şekil 4.2.(e) elde edilmiştir. Bu durumda oluşturulan görüntü seyrek ve derindeki hedeflerin konumları doğru olarak bulunabilmiştir. Fakat yeryüzü yansımalarının etkilerinden kurtulabilmek için hedef uzayının sığ derinlikleri $[-1, -4]$ cm çıkartıldığı için, -2 cm derinlikteki hedef görüntülenememiştir. Bu soruna çözüm olarak tez çalışmasında geliştirilen ve bir önceki bölümde bahsedilen yöntem rastgele ve az sayıda alınan ölçümlere uygulanmıştır. Hedef uzayı derinliği yeniden $[-1, -20]$ cm olarak seçilmiştir. Geliştirilen yöntem ile yeryüzü yansımaları frekans alanında GPR verisinden çıkartıldıktan sonra CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile elde edilen görüntü Şekil 4.2.(f)'de gösterilmiştir. Görüntüleme yöntemi aynı hedef uzayından benzetilen verilere uygulanmasına rağmen sığ derinlikteki hedefte dahil tüm hedefler görüntülenebilmiş ve hedef uzayında sahte hedefler oluşmamıştır.

4.3.1. Geliştirilen Yöntemin Standart Yöntemlerle Karşılaştırılması

Bu bölümde geliştirilen yöntemin standart yöntemlerle karşılaştırılması için benzetimler yapılmıştır. Önceki benzetimde kullanılan benzer bir engebeli yeryüzü modellenerek $[0, -15]$ cm konumuna bir tane noktasal hedef konulmuştur.

Bu benzetimde kullanılan sistem parametreleri bir önceki benzetimde kullanılanlar ile aynıdır. Yeniden tüm ölçümlerin sadece $1/5$ 'i rastgele seçilerek alınmıştır. Frekans alanında az ve rastgele alınan ölçüm zaman alanına çevrilip görüntülendiğinde Şekil



Şekil 4.3.: (a) Sıkıştırılmış frekans verisinin zaman alanında gösterimi, Yer yüzünden yansıyan sinyallerin (b) MA-BS yöntemi ile çıkartılıp zaman alanında gösterimi (c) AsAs-BS yöntemi ile çıkartılıp zaman alanında gösterimi (d) Önerilen yöntem ile frekans alanında GPR verisinden çıkartılıp zaman alanında gösterimi

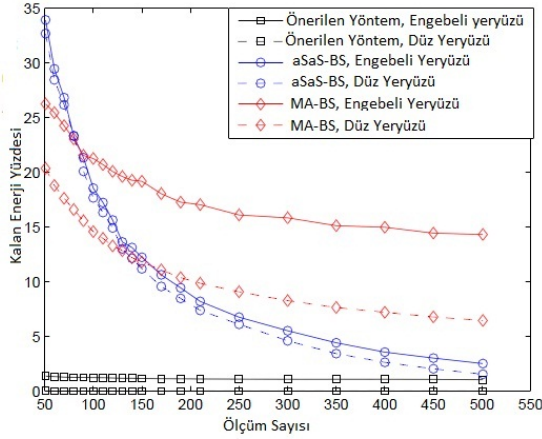
4.3.(a) elde edilmiştir. Az sayıda ölçüm kullanıldığı için Şekil 4.3.(a), tüm ölçümlerin kullanıldığı durumda elde edilecek görüntü kadar keskin değildir. Zaman alanında çalışan MA-BS ve aSaS-BS yöntemlerinin Şekil 4.3.(a)'da gösterilen veriye uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 4.3.(b) ve Şekil 4.3.(c)'de gösterilmiştir. aSaS-BS yönteminin yeryüzü yansımalarını MA-BS yönteminden daha iyi çıkarabildiği görülmektedir. Daha sonra, geliştirilen yöntem frekans alanında uygulanarak yüzey yansımaları çıkartılmıştır. Diğer yöntemlerle performans karşılaştırması yapabilmek için yeryüzü yansımalarının çıkartıldığı frekans alanındaki veri, zaman alanına çevrilmiş ve Şekil 4.3.(d) elde edilmiştir. Seyrek hedef uzayı için geliştirilen yöntem, karşılaştırılan diğer yöntemlere göre yüzey yansımalarını GPR verisinden daha başarılı çıkartabilmektedir. Bu yöntemlerin performansları farklı koşullarda da karşılaştırılmıştır. Rastgele oluşturulmuş 100 değişik engebeli yüzeyden gelen yansılardan oluşan GPR verisi benzetilmiştir. Karşılaştırılan

bu yöntemler benzetilen veriye uygulandıktan sonra GPR verisinden çıkartılamayan yeryüzü yansımalarının ortalama enerjileri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

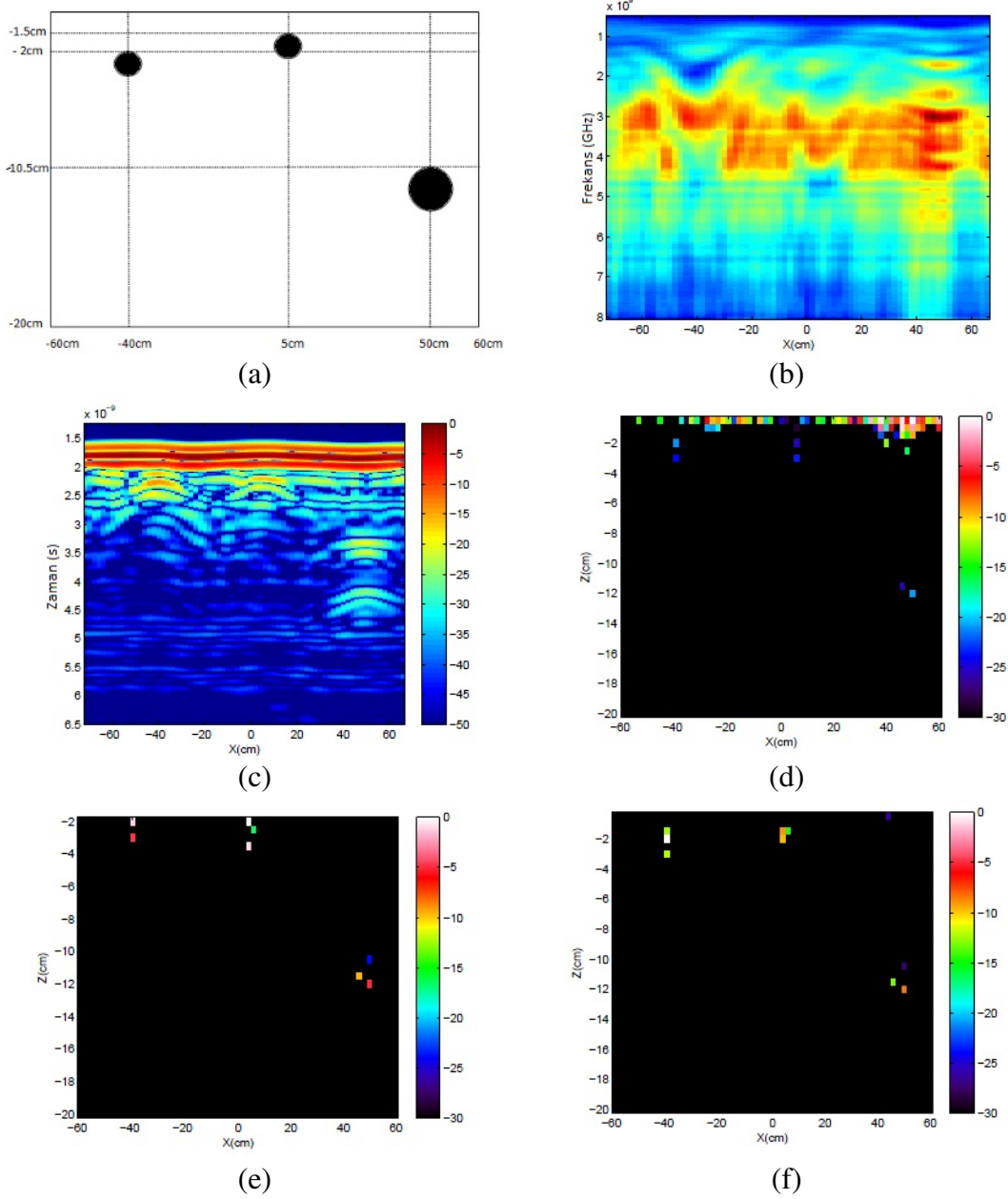
Çizelge 4.1. Yöntemlerin Performans Karşılaştırmaları

Yöntem	Enerji
Yeryüzü yansımaları varken	≈ 1.3456
Geliştirilen Yöntem	≈ 0.0051
AsAs-BS	≈ 0.2030
EA-BS	≈ 0.2763

Çizelge 4.1’e göre en iyi performansı geliştirilen yöntem vermektedir. Daha detaylı bir sayısal performans karşılaştırması için, 100 tane farklı düz ve engebeli yeryüzü oluşturulmuştur. Farklı ölçüm sayıları kullanılarak, önceden oluşturulan farklı yüzeylerden gelen yansımalar aynı 3 yöntem ile çıkarılmış, geri kalan yüzey yansımalarının ortalama enerji yüzdeleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 4.4.’de gösterilmiştir. Daha önceki benzetim sonuçlarındaki gibi geliştirilen yöntem, MA-BS ve aSaS-BS yöntemlerinden daha başarılı çalışmaktadır. Ayrıca geliştirilen yöntem, düz ve engebeli yeryüzü modellerinden yansıyan sinyalleri başarılı şekilde çıkartabilmektedir. Ölçüm sayısı arttıkça, aSaS-BS yönteminin performansı, geliştirilen yöntemin performansına yaklaşmaktadır.



Şekil 4.4. GPR verisinden çıkartılamayan yeryüzü yansımalarının enerji yüzdeleri



Şekil 4.5.: Gerçek veriden yüzey yansımalarının çıkartılması. (a) Hedeflerin doğru pozisyonları (b) Frekans verisinin büyüklüğü (c) Tüm ölçümler alındığında hedef uzayının zaman alanındaki gösterimi (d) Yeryüzü yansımaları çıkartılmadan CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan hedef uzayı görüntüsü (e) Hedef uzayının yeryüzü yansımalarından etkilenen sığ kısmının çıkartıldığı CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan hedef uzayı görüntüsü (f) Geliştirilen yöntem ile yeryüzü yansımaları çıkartıldıktan sonra CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan hedef uzayı görüntüsü

4.4. Deneysel Sonuçlar

Geliştirilen yöntem ile gerçek GPR verisinden yeryüzü yansımalarını çıkartmak için [35, 36, 82]'den elde edilen deneysel veri kullanılmıştır. GPR, yerden 27.8 cm yükseklikteki anten ile 1.8 m x 1.8 m'lik homojen sayılabilecek kuru kum alanını x ve y boyutlarında taramıştır. 60 MHz ile 8.06 GHz arasında 401 tane frekans ölçümü alınmıştır. Doğru hedef pozisyonları Şekil 4.5.(a)'da gösterilmiştir. Şekil 4.5.(b) alınan tüm frekans ölçümlerinin genliklerini göstermektedir. Ayrıca, deneysel verinin zaman alanında gösterimi Şekil 4.5.(c)'de verilmiştir. Yeryüzünden ve hedeften yansıyan sinyaller net şekilde görülebilmektedir. Seyrek görüntüleme için, tüm ölçümleri (401 ölçüm) kullanmak yerine sadece rastgele seçilmiş 200 frekans ölçümü kullanılmıştır. Hedef uzayı x ekseninde $[-60, 60]$ cm ve $[-0.5, -20]$ cm derinlikte seçilmiştir. Seyrek görüntüleme yöntemi deneysel veriye uygulandığı zaman Şekil 4.5.(d) elde edilmiştir. Yeryüzü olabildiğince düz olmasına rağmen görüntü, yeryüzünden yansıyan sinyallerden fazlasıyla etkilenmiştir. Gerçek hedeflerin dışında, yeryüzünden yansıyan sinyallerden dolayı birçok yüksek güçte görüntü noktaları oluşmuştur. CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile görüntülenen alanda, yeryüzünden yansıyan sinyallerin etkisini yok edebilmek için hedef uzayının ilk 2 cm'e kadarki derinliği hedef uzayından çıkartılmıştır. Bu durumda CS tabanlı görüntüleme yönteminin oluşturduğu görüntü Şekil 4.5.(e)'de verilmiştir Hedef uzayında sadece 3 hedef görülmektedir. Hedefler doğru pozisyonlarında görüntülenmiştir. Eğer hedef uzayından çıkarılan 2 cm'lik kısımda noktasal bir hedef olsaydı hedef görüntülenemeyecekti.

Tüm hedef uzayı kullanılarak yeryüzünden yansıyan sinyaller deneysel veriden geliştirilen yöntemle çıkartılmıştır. Daha sonra CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile görüntüleme yapılarak Şekil 4.5.(f) elde edilmiştir. Hedef uzayı doğru görüntülenmiştir. Ayrıca, yeryüzüne yakın sığ derinliklerde yanlış hedef görüntüleri oluşmamıştır. Yani yeryüzünden yansıyan sinyaller geliştirilen yöntem ile az sayıda rastgele alınan sıkıştırılmış deneysel veriden başarı ile çıkartılabilmektedir.

4.5. Çıkarımlar

Basamak frekanslı sürekli dalga radarlar (SF GPR) için geliştirilen CS tabanlı yer altı görüntüleme yöntemi, yeryüzünden yansıyan sinyalleri toplanan GPR verisinden çıkartmamaktadır. Yeryüzü engebeli ve sığ yerlerde hedef varsa, yeryüzünden yansıyan sinyallerden dolayı bu hedefler tespit edilememektedir. Ayrıca, frekans düzleminde az ve rastgele ölçüm alındığı için yeryüzünden yansıyan sinyallerin

toplanan GPR verisinden çıkartılması için kullanılan standart yöntemler direkt uygulanamamaktadır. Bu bölümde, az ve rastgele ölçüm alındığı zaman yeryüzünden yansıyan sinyalleri frekans alanında GPR verisinden çıkartabilen bir yöntem geliştirilmiş, Yürüyen Ortalama (MA-BS) ile Zaman Alanında Kaydırma ve Genlik leklendirme (aSaS-BS) gibi bilinen standart yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen benzetim ve deneysel veri sonuçları geliştirilen yöntemin, standart yöntemlere göre daha başarılı şekilde yüzey yansımalarını sıkıştırılmış veriden çıkartabildiğini göstermiştir. Böylece sığ derinliklerdeki hedefler de seyreklik tabanlı yöntemlerle görüntülenebilmektedir. Bu bölümde elde edilen sonuçlar [88,90]'da yayınlanmıştır.

BÖLÜM 5

5. CS TABANLI GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMİNDE BİLİNMEYEN DALGA HIZI VE HEDEFİN IZGARA NOKTALARINDA OLMAMASI PROBLEMLERİNE ÇÖZÜMLER

Veri toplama zamanını azaltmak için Sıkıştırılmış Algılama (CS) teorisi çerçevesinde hedef uzayının seyrekliği kullanılarak yeraltının görüntülenebildiği önceki bölümlerde gösterilmiştir. Sıkıştırılmış Algılama (CS) tabanlı görüntüleme yönteminde, etkilerinin araştırılması gereken iki önemli nokta vardır. Bunlardan ilki CS tabanlı yöntem ile hedef uzayını görüntüleyebilmek için model verisinin gerçeğe en yakın şekilde oluşturulmasıdır. Model verisi yada bir diğer deyişle veri sözlüğü oluşturulurken, noktasal hedef her bir ızgara¹ noktasına konularak GPR'ın alacağı olası frekans ölçümleri hesaplanır. Frekans verilerinin doğru hesaplanmasında gönderilen dalganın hedeften yansıyıp geri dönmesi için geçen zaman büyük önem taşımaktadır. Bunun için elektromanyetik dalganın yeraltındaki yayılım hızının tam olarak bilinmesi gerekmektedir [83–85]. GPR sistemlerinde, yeraltındaki dalga hızı kestirilebilir yada yakınsanabilir olmasına rağmen önceden tam ve kesin olarak bilinemez [1, 2]. Bu yüzden, dalganın yeraltındaki gerçek hızı ile sözlük oluşturulurken varsayılan dalga hızı arasındaki uyumsuzluğun görüntüleme performansına etkisinin anlaşılması önemlidir.

Diğer araştırılması gereken önemli nokta ise hedeflerin hedef uzayındaki bölünmüş ızgara noktalarında olmaması durumudur. Veri sözlüğü oluşturulurken hedeflerin ızgara noktalarında oldukları varsayılır [33]. Hedef uzayının ayrıklaştırma² yoğunluğuna bağlı olarak gerçek hedef pozisyonları, ızgara noktaları üzerinde olmayabilirler. Bu yüzden ızgara ve ızgara büyüklüğünün görüntüleme performansına etkisinin analiz edilmesi önemlidir. Bu bölümde yukarıda bahsedilen iki önemli noktanın etkileri araştırılmış ve bazı olası çözümler önerilmiştir.

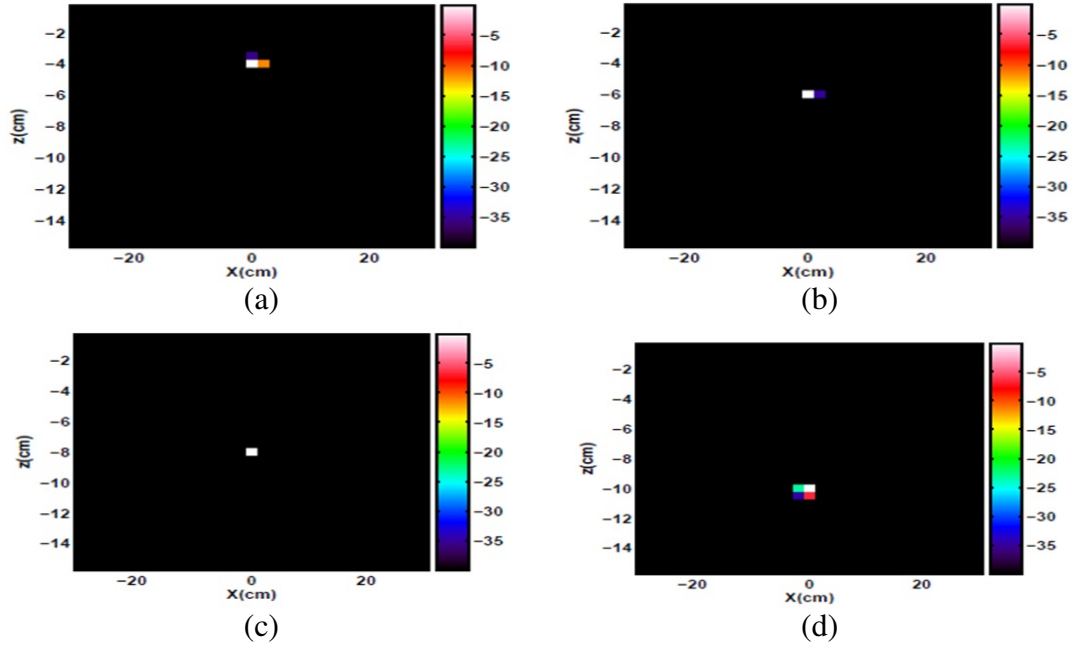
5.1. Bilinmeyen Hız Problemi

CS tabanlı görüntüleme yönteminde en önemli problemlerden biri sözlük verisi oluşturulurken varsayılan dalga hızının gerçek dalga hızından farklı olmasıdır. Bu

¹ing: Grid

²ing: Discretization

uyuşmazlığın görüntüleme performansına etkilerinin anlaşılması önemlidir. Bunun için dalganın gerçek hızının $v = 2 \times 10^{10}$ cm/s olduğu hedef uzayına $(x,z) = (0, -8)$ cm pozisyonunda noktasal bir hedef konulmuş ve benzetim verisi oluşturulmuştur. Daha sonra $v = 1 \times 10^{10}$ cm/s ile $v = 3 \times 10^{10}$ cm/s arasında varsayılan hızlarla oluşturulan model verileri hedef uzayını görüntülemek için kullanılmıştır. Varsayılan her hız için farklı rastgele seyrek ölçümler alınarak 100 farklı görüntü hesaplanmıştır. Her görüntü için ayrı gürültü durumları kullanılmıştır. Sinyal gürültü oranı ise 10 dB alınmıştır. Şekil 5.1. varsayılan her hız için yapılan 100 denemenin sonucunda hesaplanan ortalama görüntüleri göstermektedir.

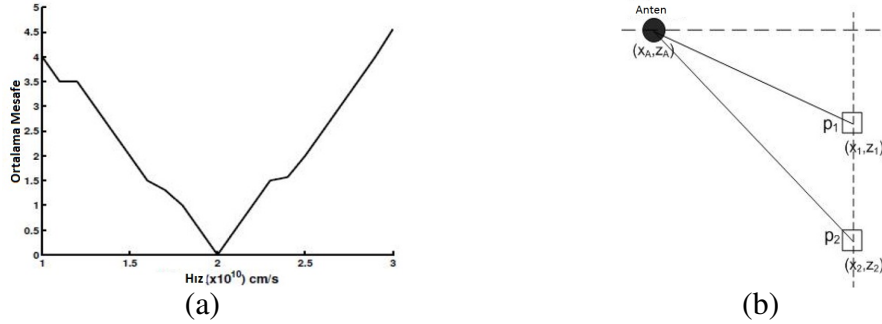


Şekil 5.1.: Yeraltındaki gerçek dalga hızı $v=2 \times 10^{10}$ cm/s'ken varsayılan her dalga hızı ile yapılan 100 denemenin sonucunda elde edilen ortalama görüntüler. Varsayılan dalga hızı (a) 1×10^{10} cm/s'ken (b) 1.5×10^{10} cm/s'ken (c) 2×10^{10} cm/s'ken (d) 2.5×10^{10} cm/s'ken

Bu bölümde sadece hız uyuşmazlığının³ görüntüleme performansına etkileri analiz edileceği için hedef uzayına konulan noktasal hedefin pozisyonu ızgara noktasında kabul edilmiştir. Model verisi yeraltındaki dalga hızı $v = 2 \times 10^{10}$ cm/s varsayılarak oluşturulduğunda hedef uzayı doğru olarak görüntülenebilmiştir. Bu durumda gerçek hız ile varsayılan hız arasında uyuşmazlık yoktur. CS tabanlı görüntüleme yöntemi önce seyrek sonuçlar oluşturmaya çalışır. Fakat model verisi ile gerçek veri arasında hız uyuşmazlığı olduğu için farklı pozisyondaki hedeften oluşturulan sözlük verisi ile

³ing: Velocity mismatch

farklı pozisyondaki hedeften ölçülen veri benzerlik gösterir. Bunun nedeni yeraltındaki varsayılan dalga hızı ile gerçek dalga hızı arasındaki uyumsuzluktur. Dolayısıyla hız uyumsuzluğu varken CS tabanlı görüntüleme yöntemi hedefleri net şekilde fakat yanlış derinliklerde görüntüler. Gerçek hedef pozisyonu ile CS tabanlı görüntüleme yöntemi sonucunda bulunan hedef pozisyonu arasındaki ortalama farkın hız uyumsuzluğundan nasıl etkilendiği Şekil 5.2.(a)'da gösterilmiştir.



Şekil 5.2.: (a) Hedefin gerçek konumu ile Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi sonucunda bulunan hedef pozisyonu arasındaki ortalama farkın hız uyumsuzluğuna göre değişimi. (b) Derinlik kaymasının gösterimi için aynı homojen ortamda bulunan iki noktasal hedef

Veri modeli oluşturulurken yeraltındaki elektromanyetik dalganın varsayılan hızı ile gerçek hızı arasında fark olmadığı zaman noktasal hedefin konumunun doğru bulunduğu Şekil 5.1.(c)'de gösterilmiştir. Hız uyumsuzluğundaki fark arttıkça; hedefin doğru konumu ile seyreklik tabanlı görüntüleme yöntemi sonucunda bulunan hedef pozisyonları arasındaki farkta artmaktadır(Şekil 5.2.(a)). Hızlar arasında uyumsuzluk olduğu zaman CS tabanlı görüntüleme yöntemi hedeflerin x eksenindeki konumlarını doğru bulurken sadece derinliklerini yanlış bulmaktadır. Bunun nedeni denklem (2.16)'daki optimizasyon işleminin ölçülen veriyi sözlük verisinin en uygun kısmı ile eşlemesidir. Bu yapılırken optimizasyon işlemi için belirlenen sınırlamalar geçerlidir. Hızlar arası uyumsuzluk, farklı derinlikteki bir hedeften oluşturulan sözlük verisi kısmının seçilmesine neden olur. Böylece hedef doğru x ekseninde fakat yanlış derinlikte görüntülenir.

Şekil 5.1.'deki sonuçlar iki katmanlı ortamdan (hava ve toprak ortamları) oluşturulduğu için derinlik kaymasının nedeni gözlenememektedir. Derinlikteki kaymanın⁴ nedenini daha net anlayabilmek için Şekil 5.2.(b)'deki gibi anten ve hedeflerin aynı ortamda olduğu homojen bir ortam varsayılmıştır. Şekil 5.2.(b)'deki

⁴ing: Depth shift

p_1 noktasal hedefi için zaman gecikmesi τ_1 ; p_2 noktasal hedefi için τ_2 'dir. Zaman gecikmelerinin denklemi aşağıda gösterilmiştir;

$$\tau_1 = \frac{\sqrt{(x_A - x_1)^2 + (z_A - z_1)^2}}{v_1} \quad (5.1)$$

$$\tau_2 = \frac{\sqrt{(x_A - x_2)^2 + (z_A - z_2)^2}}{v_2} \quad (5.2)$$

Hız uyumsuzluğundan dolayı hedeflerin yanlış derinliklerde bulunmasının nedenini anlayabilmek için $x_1=x_2$ alınmıştır. Bu durumda $\tau_1=\tau_2$ olabilmesi için denklem (5.3) sağlanmalıdır:

$$|z_A - z_2| = \frac{v_2}{v_1} |z_A - z_1| \quad (5.3)$$

Denklem (5.3)'e göre, gerçek dalga hızı v_1 'ken bilinmeyen v_2 hızı ile model verisi oluşturulur ve CS tabanlı görüntüleme yapılırsa hedef uzayında doğru hedef pozisyonu p_1 yerine p_2 görüntülenir çünkü ölçülen veri ile veri sözlüğünün p_2 noktasal hedefinden oluşturulan kısmı tam olarak uyuşur. Dolayısıyla p_1 pozisyonundaki hedef, p_2 noktasında görüntülenir. Tüm bu hesaplamalarda hedef uzayı homojen varsayılmıştır.

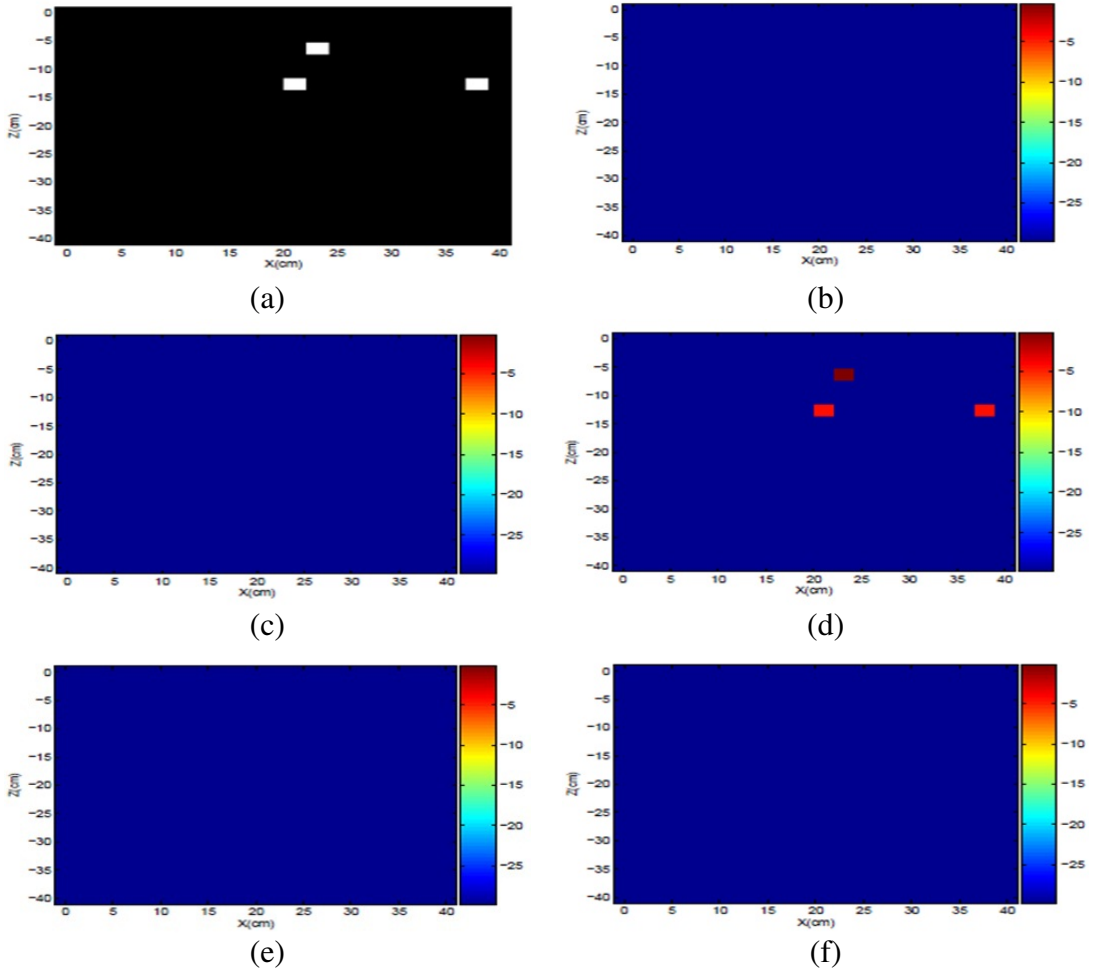
5.1.1. Genişletilmiş Sözlük

Hedeflerin yanlış derinliklerde görüntülenmesini engellemek için yeraltındaki dalga hızının tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Hızın tam olarak bilinmediği fakat belirli bir aralıkta tahmin edilebildiği durumlarda Genişletilmiş Sözlük⁵ kullanılabilir. Tahmin edilen aralıkta olası dalga hızları ile sözlükler oluşturulur. Daha sonra oluşturulan sözlükler birleştirilerek Genişletilmiş Sözlük elde edilir. Genişletilmiş Sözlük ile denklem (2.16)'daki optimizasyon problemi çözdürülerek hedef uzayı görüntüsü oluşturulabilir.

Bilinmeyen dalga hızı problemine çözüm olarak önerilen Genişletilmiş Sözlük yönteminin sonuçlarını analiz edebilmek için benzetim yapılmıştır. 3 tane hedef bulunan bir uzay varsayılmış ve Şekil 5.3.(a)'da gösterilmiştir. Alanı $40 \times 40 \text{ cm}^2$ olan hedef uzayı x ve z boyutlarında 2 cm 'lik ızgaralara ayrıştırılmıştır. Dolayısıyla hedef uzayında toplam 400 tane ızgara noktası oluşturulmuştur. Ayrıca tüm hedefler ızgara noktalarında varsayılmıştır. Yeraltındaki dalganın gerçek hızı $v = 2 \times 10^{10} \text{ cm/s}$ olarak kabul edilmiştir. Verici ve alıcı anten aralığı 5

⁵ing: Extended Dictionary

cm olan bir sistem ele alınmıştır. Antenin yerden yüksekliği 10 cm'dir. Yeraltındaki dalga hızının bilinmediği varsayılmıştır. Genişletilmiş Sözlük; 1.8×10^{10} cm/s, 1.9×10^{10} cm/s, 2×10^{10} cm/s, 2.1×10^{10} cm/s ve 2.2×10^{10} cm/s dalga hızları ile oluşturulmuştur. Bundan dolayı Genişletilmiş Sözlüğün boyutu CS tabanlı görüntüleme yönteminde kullanılan standart sözlüğün boyutundan 5 kat fazladır. Varsayılan hızlarla oluşturulan Genişletilmiş Sözlük kullanılarak görüntüleme yapıldığında Şekil 5.3. elde edilmiştir. Tüm görüntüler kendi maksimum değerlerine göre oranlanarak 30 dB'lik bir renk ölçeğinde gösterilmiştir.



Şekil 5.3.: Genişletilmiş Sözlük kullanılarak oluşturulan hedef uzayı görüntüleri. (a) Doğru hedef uzayı. Hedef uzayı görüntüleri; (b) $v = 1.8 \times 10^{10}$ cm/s'ken (c) $v=1.9 \times 10^{10}$ cm/s'ken (d) $v=2 \times 10^{10}$ cm/s'ken (e) $v=2.1 \times 10^{10}$ cm/s'ken (f) $v=2.2 \times 10^{10}$ cm/s'ken

Şekil 5.3.'de görüldüğü gibi noktasal 3 hedef, sadece Genişletilmiş Sözlüğün gerçek dalga hızı ile oluşturulan kısmında görüntülenmiştir. 30 dB'lik renk ölçeğinde

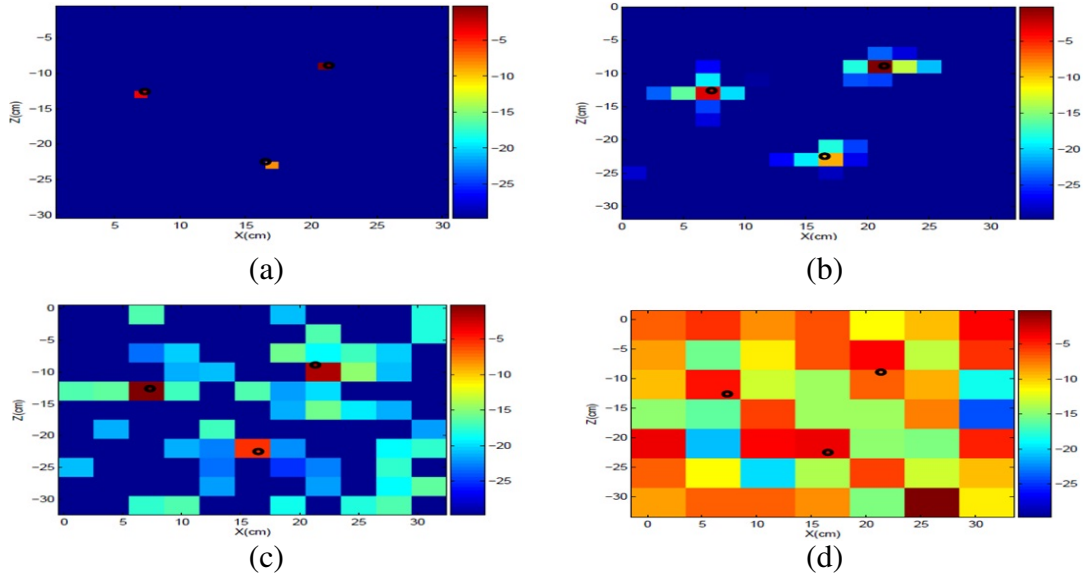
oluşturulan görüntüde yanlış hedefler oluşmamıştır.

Sonuç olarak dalga hızının tam olarak bilinmediği fakat belirli bir aralıkta tahmin edilebildiği durumlarda genişletilmiş sözlük ile doğru radar görüntülerinin oluşturulabileceği gösterilmiştir. Şekil 5.3.'deki sonuçlar başarılı olsada çeşitli koşullar için bu yöntemin avantajları ile dezavantajları araştırılmalıdır. Örneğin V tane olası dalga hızı kullanılarak oluşturulan Genişletilmiş Sözlüğün boyutu önceki bölümlerde anlatılan sözlükten V kere daha büyük olacaktır. Her olası dalga hızı için boyutu N olan görüntü vektörü b 'nin boyutu ise Genişletilmiş Sözlük kullanıldığı zaman $V \times N$ olur. Genişletilmiş Sözlük ile CS tabanlı görüntüleme yöntemini kullanmak hafızayı ve hesaplama yükünü arttırmaktadır. Buna çözüm olarak *greedy* yöntemler [37, 38] kullanılabilir. Ayrıca bu yöntemin gürültüye ve varsayılan hızların gerçek hızlar olmaması gibi durumlara karşı gürbüzlüğü analiz edilmelidir. Sıkıştırılmış ölçümlerden hız kestirimi yapabilen farklı algoritmalar da geliştirilebilir.

5.2. Hedefin Izgara Noktalarında Olmaması Problemi

Sözlük seçimi algoritmasındaki bir diğer önemli problem hedeflerin ayrıklaştırılmış ızgara noktalarında olmamalarıdır. Bu durumda veri sözlüğünün sütunları ölçülen veriyi tam olarak temsil edememektedir. Bu bölümde gerçek dalga hızının bilindiği varsayılarak ızgara büyüklüğünün oluşturulan görüntüye olan etkisi analiz edilmiştir. Izgara büyüklüğü x ve z boyutlarında 1 cm olan $30 \times 30 \text{ cm}^2$ 'lik hedef uzayı ile benzetim yapılmıştır. Hedef uzayı; $(7.3, -12.6) \text{ cm}$, $(21.34, -8.9) \text{ cm}$ ve $(16.5, -22.5) \text{ cm}$ konumlarında 3 tane noktasal hedef içermektedir. Hedefler ızgara noktalarında değildirler. Sinyal gürültü oranı 10 dB'dir.

Benzetim verisinden oluşturulan görüntü Şekil 5.4.(a)'da gösterilmiştir. Hedefler ızgara noktalarında olmamasına rağmen görüntüleme yöntemi hedefleri net şekilde görüntüleyebilmiştir. Hedef uzayındaki ayrıklaştırma seviyesi (ızgara büyüklüğü) yeterli olduğu için optimizasyon algoritması belirlenen kısıtlamalar çerçevesinde veriyi en uygun sözlük sütunu ile doğru eşleyebilmiştir. Hedeflerin doğru pozisyonları Şekil 5.4.'te daire içine alınarak işaretlenmiştir. Daha sonra ızgara büyüklüğü x ve z boyutlarında 2 cm'e çıkarılmıştır. Hedef uzayının görüntüsünü oluşturabilmek için aynı veri yeniden kullanılmıştır. Elde edilen görüntü Şekil 5.4.(b)'de gösterilmiştir. Izgaranın boyutu büyüdüğü için ölçülen veriyi sözlüğün lineer kombinasyonları şeklinde temsil edebilmek daha zorlaşmıştır. Yinede ızgara büyüklüğü x ve z boyutlarında 2 cm'ken hedeflerin nerede oldukları seçilebilmektedir. Fakat hedef uzayının seyrekliği azalmıştır. Izgara büyüklüğü her iki boyutta 3 cm'e



Şekil 5.4.: Hedefler ızgara noktalarında değilken oluşturulan görüntüler. Izgara büyüklüğü (a) 1 cm'ken (b) 2 cm'ken(c) 3 cm'ken (d) 5 cm'ken

çıkarıldığı zaman görüntüdeki bulanıklıklar artmıştır. Buna rağmen gerçek hedef pozisyonlarına yakın yerlerde noktasal hedefler ayırt edilebilmektedir. Izgara büyüklüğü 5 cm'e çıkarıldığında tamamen yanlış bir hedef uzayı görüntüsü elde edilmiştir.

Izgarayı büyütme hedef uzayındaki toplam ızgara sayısı N 'yi azaltır. Bu daha az hesaplama yükü demektir. Ancak, ızgara boyutu büyüdüğü için optimizasyon algoritması artık ölçülen veriyi sözlük verisinin lineer kombinasyonları şeklinde temsil edememektedir. Diğer yandan, yapılan benzetimde ızgara boyutu 3 cm civarında seçildiğinde doğru görüntüleme yapılabilmektedir. Yani ayırıklaştırma belirli bir ızgara büyüklüğüne kadar problem yaratmamaktadır. Bu çoklu-çözünürlük yöntemi ile görüntülemeye olanak sağlamaktadır. Görüntülenen hedefleri kapsayan ızgara alanları seçilerek o alanlar daha küçük boyutlu ızgaralara ayırıklaştırılabilir. Ayırıklaştırılan bu alan için model verisi yeniden oluşturulup optimizasyon algoritması çözdürülürse daha net görüntüler elde edilebilir. Böylece geniş hedef uzaylarını görüntüleme hesaplaması azaltılırken daha net görüntüler elde edilebilir.

5.3. Geliştirilen OMP Tabanlı Görüntüleme Yöntemi

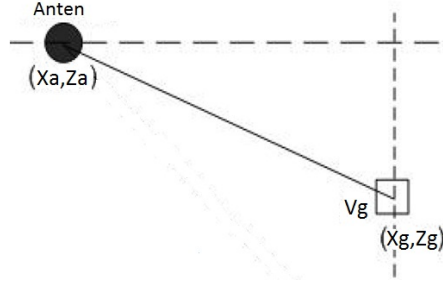
Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemindeki temel konu; model verisini gerçeğe en uygun şekilde oluşturabilmektir. Fakat gerçek radar uygulamalarında hedef uzayı olabildiğince küçük ızgaralara ayırıklaştırılrsa da hedefler ızgara noktalarında

olmayabilir. Bu durumun görüntüleme performansına etkileri önceki bölümde analiz edilmiştir. Izgara boyutu yeterli büyüklükteyse optimizasyon algoritması veriyi en uygun sözlük sütunu ile eşleyerek ızgara noktalarında olmayan hedefleri tespit edebilir. Buna rağmen tespit edilebilen bu hedefler ızgara noktalarında görüntülenir. Örneğin Şekil 5.4.'de, hedeflerin gerçek pozisyonları ızgara noktalarında değildir. Izgara boyutu yeterli büyüklükteyken Şekil 5.4.(a),(b) ve(c)'de hedefler net şekilde görüntülenebilmektedir. Fakat Şekil 5.4.'de, bulunan hedef pozisyonları ile hedeflerin gerçek pozisyonları farklıdır. Daire içine alınarak işaretlenmiş gerçek hedef pozisyonları, ızgara alanlarının ortasında olmamasına rağmen seyreklik tabanlı yöntem ile görüntüleme sonucunda hedefler ızgara noktalarında bulunmuştur. Bu bölümde OMP tabanlı yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem ile hedefin ızgara noktaları üzerinde olmadığı durumda dahi hedef pozisyonlarının hassas şekilde belirlenebildiği gösterilmiştir.

5.3.1. Izgara Seçimi

Bu bölümde, geliştirilen yöntemin ortaya çıkış fikri özetlenmiştir. Bunun için $x = -0.5:0.5$ cm, $z = 0:-20$ cm'lik hedef uzayı varsayılmıştır. Izgara büyüklükleri x ve z boyutlarında 2 cm'dir. Izgara noktalarında olmayacak şekilde $x = -0.1151$ cm, $z = -0.0456$ cm konumlarına noktasal bir hedef konulmuştur. Varsayılan hedef uzayı için oluşturulan model verisi ile hedef uzayından ölçülen veri arasındaki korelasyonun en yüksek olduğu ızgara alanı seçilmiştir. Seçilen alan 0.1 cm'lik daha küçük ızgaralara bölünmüş, o alan için yeniden model verisi oluşturulmuştur. Ölçülen veri ile yeni oluşturulan model verisinin izdüşümleri⁶ sonucunda Şekil 5.6.(a) ve Şekil 5.6.(d)'deki eğriler elde edilmiştir. Şekil 5.6.(a) ve Şekil 5.6.(d), sırasıyla x ve z (derinlik) boyutlarında çizdirilmiş korelasyon eğrileridir. Standart optimizasyon yöntemleri kullanıldığında hedef pozisyonları Şekil 5.6.(b) ve Şekil 5.6.(e)'de doğruların eğriye teğet geçtiği noktalarda hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi hedef ızgara noktalarında bulunmuştur. Bir diğer yandan, ölçülen veri ile model verisi arasındaki en yüksek korelasyon değeri eğrinin tepe noktasıdır. Yani eğri üzerinden alınacak türev bu noktada 0'dır. Dolayısıyla oluşturulan eğri üzerinde türevin sıfır olduğu nokta bulunabilirse, o nokta hedefin gerçek pozisyonu olacaktır. Bu amaçla Şekil 5.5.'deki gibi anten ve hedefin aynı homojen ortamda bulunduğu bir senaryo varsayılırsa veri ile sözlüğün izdüşümü denklem (5.4)'deki gibi modellenebilir.

⁶ing: Projection



Şekil 5.5. Anten ve hedefin aynı homojen ortamda bulunduğu senaryo

$$J = \sum_{i=1}^N y_i^* e^{-jw\sqrt{(x_a-x_g)^2+(z_a-z_g)^2}/v_g} = \sum_{i=1}^N y_i^* e^{-jw t_d} \quad (5.4)$$

J , GPR tarafından alınan ölçüm ile sözlüğün korelasyonudur. x_a ve z_a antenin konumunu, x_g ve z_g hedefin bulunduğu ızgarayı, v_g ise ortamdaki dalga hızını belirtmektedir. Korelasyon eğrisinin tepe noktasını bulabilmek amacı ile x ve z eksenlerine göre korelasyonun türevi alınırsa denklem (5.5) ve denklem (5.6)'daki ifadeler elde edilir.

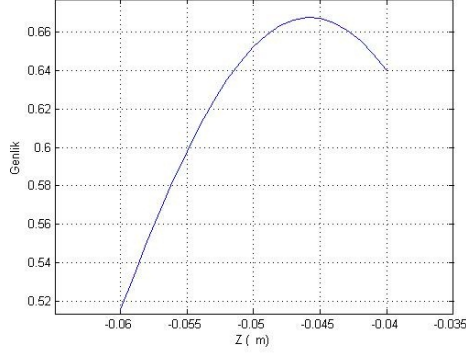
$$\frac{\partial J}{\partial \Delta x} = \sum_{i=1}^N y_i^* e^{-jw t_d} j \frac{w}{v_g} \frac{(x_a - x_g)}{\sqrt{(x_a - x_g)^2 + (z_a - z_g)^2}} \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta z} = \sum_{i=1}^N y_i^* e^{-jw t_d} j \frac{w}{v_g} \frac{(z_a - z_g)}{\sqrt{(x_a - x_g)^2 + (z_a - z_g)^2}} \quad (5.6)$$

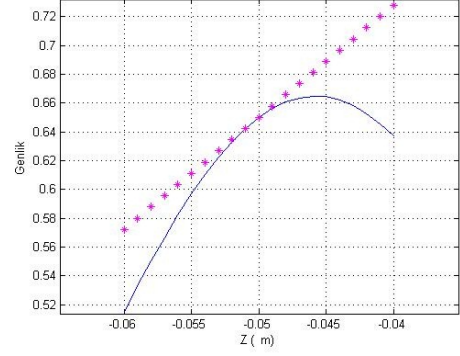
$t_d = \sqrt{(x_a - x_g)^2 + (z_a - z_g)^2}/v_g$ 'dir. Türev denklemleri kullanılarak eğri üzerindeki noktalar için türevler hesaplanmış, x ve z boyutu için türevin 0 olduğu noktaya teğet geçen doğrular çizdirilerek Şekil 5.6.(c) ve Şekil 5.6.(f) elde edilmiştir. Doğruların teğet geçtiği noktaların hedefin x ve z eksenlerindeki gerçek pozisyonları olduğu görülmektedir.

5.3.2. Teori

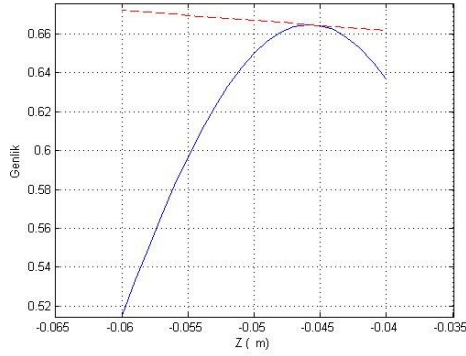
Şekil 5.6.'de görüldüğü gibi, GPR tarafından alınan ölçümler ile model verisi arasındaki korelasyon eğrisinin tepe noktası yani türevin sıfır olduğu nokta hedefin gerçek pozisyonlarını vermektedir. Bu fikirden yola çıkarak 3. bölümde bahsedilen Dik Eşleme Takibi (OMP) yönteminin algoritmasına önceki bölümde bahsedilen türev hesaplama işlemi eklenerek korelasyon eğrisi üzerindeki türevler hesaplanmıştır.



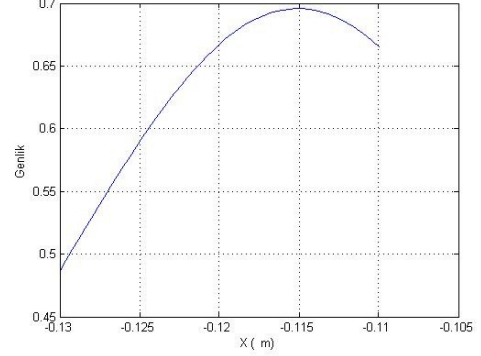
(a)



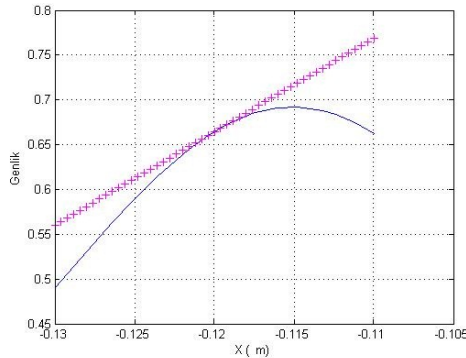
(b)



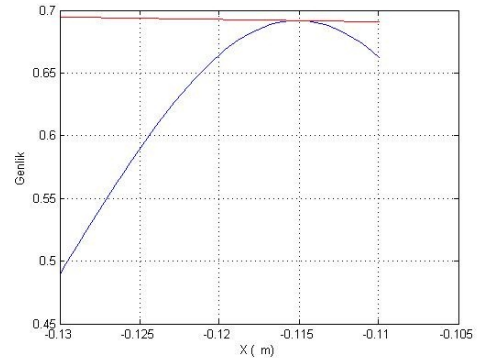
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 5.6.: Ölçülen veri ile sözlüğün korelasyon grafikleri. (a) Ölçülen veri ile sözlüğün Z uzayında korelasyon grafiği. Z uzayında, (b) Standart seyreklik tabanlı görüntüleme yöntemleri ile bulunan ızgara noktasına teğet geçen doğru (c) Tepe noktasına teğet geçen doğru (d) Ölçülen veri ile sözlüğün X uzayında korelasyon grafiği. X uzayında, (e) Standart görüntüleme yöntemleri ile bulunan ızgara noktasına teğet geçen doğru (f) Tepe noktasına teğet geçen doğru

Böylece az ölçüm alındığında hedefler ızgara noktalarında olmasalar dahi hedeflerin gerçek pozisyonlarının bulunabileceği bir yöntem geliştirilmiştir.

Çizelge 5.1. Geliştirilen OMP Tabanlı Yöntemin Algoritması

-
-
1. İndeks kümesi başlatılır $\Lambda_0 = \emptyset$. Kalan $r_0 = y$ ve döngü indeksi $t = 1$ 'dir.
 2. $\lambda_t \in \arg \max_w |\langle r_{t-1}, A_w \rangle|$ şartına uyan bir λ_t indeksi belirlenir, A_w ; A matrisinin sütunlarıdır.
 3. λ_t indeksinin karşılık geldiği ızgara noktası g_{λ_t} bulunur.
 4. g_{λ_t} 'yi kapsayan ızgarada izdüşümün türevleri hesaplanır.
 5. Türevin sıfır olduğu nokta \hat{g}_{λ_t} bulunur.
 6. \hat{g}_{λ_t} noktası için model verisi oluşturulur.
 7. İndeks kümesi güncellenir $\Lambda_t \leftarrow \Lambda_{t-1} \cup \hat{g}_{\lambda_t}$.
 8. $\min \|y - \sum_{k=1}^t c(\Lambda_t) A_{\lambda_k}\|_2$ en küçük kareler probleminin ağırlıkları c bulunur.
 9. c ağırlıkları kullanılarak yeni kalan hesaplanır: $r_t = y - \sum_{k=1}^t c(\Lambda_t) \varphi_{\lambda_k}$
 10. Döngü sayıcısı artırılır: $t \leftarrow t + 1$
 11. Durma kriteri sağlanıncaya kadar 2. adıma dönülür, durma kriteri sağlanıyorsa döngüden çıkılır.
-
-

Çizelge 5.1.'de iterasyonu durdurmak için 3. bölümde bahsedilen Dik Eşleme Takibi (OMP) yönteminde kullanılan benzer koşullar seçilebilir. OMP ile görüntülemeye, model verisi oluşturulurken hedef uzayının ayrıklaştırılmasından dolayı hedefler ızgara noktalarında olmasalar bile ızgara noktalarında görüntülenmektedir. Geliştirilen yeni yöntem OMP'den farklı olarak türev alma işlemi eklenmiştir. Böylece hedefler gerçek pozisyonlarında bulunabilmiştir. Ayrıca, ızgara boyutu büyüdükçe CS tabanlı görüntüleme ve OMP yöntemleri verinin temsili için en uygun sözlük sütunu seçiminde başarılı olmaya başlarken, yeni geliştirilen OMP tabanlı görüntüleme yöntemi bu durumdan çok daha az etkilenmektedir.

5.3.3. Benzetim Sonuçları

Bu bölümde, geliştirilen OMP tabanlı yöntem için bazı benzetimler yapılmıştır. Öncelikle $x = -0.5:0.5$ cm, $z = 0:-20$ cm'lik hedef uzayı varsayılmıştır. Izgara büyüklükleri x ve z boyutlarında 2 cm seçilmiştir. Izgara noktalarında olmayacak şekilde $(0.23034, -0.04024)$ cm, $(-0.3498, -0.09978)$ cm ve $(0.0234, -0.13248)$ cm konumlarına 3 tane noktasal hedef konulmuştur.

Benzetilen verilere; geliştirilen OMP tabanlı yöntem, OMP ve Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.7.'de gösterilmiştir. Dairesel işaretler hedeflerin gerçek pozisyonlarını göstermektedir. Hedef uzayında toplam 3 tane noktasal hedef olmasına rağmen OMP ve Sıkıştırılmış Algılama tabanlı görüntüleme yöntemi ile oluşturulan görüntülerde, hedeflerin gerçek pozisyonlarının etrafında sahte hedefler ortaya çıkmıştır. Ayrıca hesaplanan hedef pozisyonları; hedefleri kapsayan ızgaraların orta noktaları olarak bulunmuştur. Aslında hedeflerin gerçek pozisyonları Şekil 5.7.(a) ve Şekil 5.7.(b)'de dairesele işaretler ile gösterilen yerlerdir. Aynı benzetim verisi geliştirilen OMP tabanlı yöntem ile kullanıldığında Şekil 5.7.(c) elde edilmiştir. Dairesel işaretler ile gösterilen yerler hedeflerin gerçek konumlarını, artı işareti (+) geliştirilen OMP tabanlı yöntem ile hesaplanan hedef pozisyonlarını, noktalar ise ızgara noktalarını temsil etmektedir. Görüldüğü gibi dairesele işaretler ile artı işaretleri iç içedir yani geliştirilen yöntem hedefleri gerçek konumlarına çok yakın noktalarda bulabilmektedir.

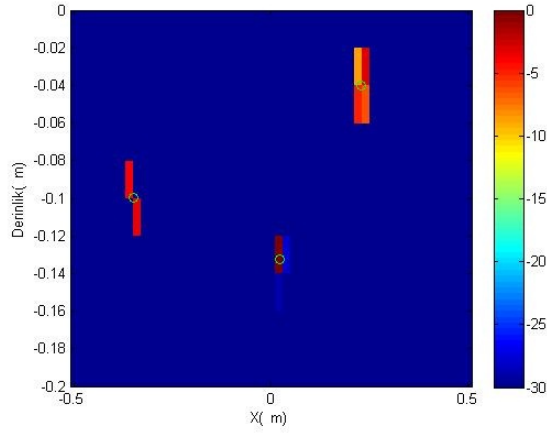
OMP, CS tabanlı görüntüleme yöntemi ve bu bölümde geliştirilen yöntemin ızgara büyüklüğüne göre nasıl performans sergilediklerini anlayabilmek için farklı ızgara boyutları için benzetimler yapılmıştır. $x = -1:1$ m, $z = 0:-1$ m boyutlarında hedef uzayı varsayılmıştır. Oluşturulan hedef uzayına, ızgara noktalarında olmayacak şekilde $(0.8723, -0.04024)$ cm, $(-0.4389, -0.4978)$ cm ve $(0.0234, -0.83248)$ cm konumlarına 3 tane noktasal hedef konulmuştur. Izgara boyutu 5 cm'e çıkarıldığı zaman OMP ve CS tabanlı görüntüleme yöntemlerinin uygulanması sonucu elde edilen görüntüler Şekil 5.8.(a) ve Şekil 5.8.(b)'de gösterilmiştir. Izgara büyüklüğü 2 cm'ken OMP ile benzer performans gösteren CS tabanlı görüntüleme yönteminin ızgara büyüklüğü 5 cm'e çıkarıldığında oluşturduğu hedef uzayı OMP'ye göre daha az seyrekler. Hedefler etrafında bulanıklıklar artmıştır. Geliştirilen yöntem kullanılarak bulunan hedef konumları ile hedeflerin gerçek yerleri Şekil 5.8.(c)'de görüldüğü gibi birbirlerine çok yakındır.

Izgara büyüklüğü 10 cm'e çıkarıldığında Şekil 5.9. elde edilmiştir. Şekil 5.9.(a)'da

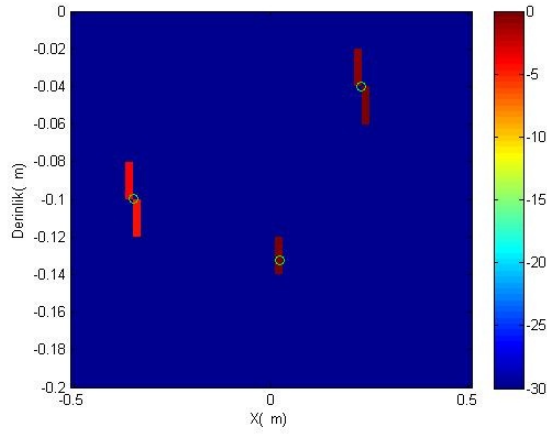
görüldüğü gibi CS tabanlı görüntüleme yöntemi hedef uzayını tamamen yanlış görüntülemiştir. OMP ile oluşturulan görüntüde ise hedefler etrafında bulanıklıklar oluşmuştur (Şekil 5.9.(b)). Önerilen yöntem ile elde edilen sonuç Şekil 5.9.(c)'de gösterilmiştir. Izgara boyutu artmasına rağmen geliştirilen yöntem kullanılarak bulunan hedef pozisyonları ile hedeflerin gerçek konumları hala birbirlerine çok yakındır. Izgara boyutu arttıkça OMP ve CS tabanlı görüntüleme yöntemlerinin performansları kötüleşirken bu bölümde önerilen yöntem hala hedeflerin konumlarını gerçeğe çok yakın olarak bulabilmektedir.

5.4. Çıkarımlar

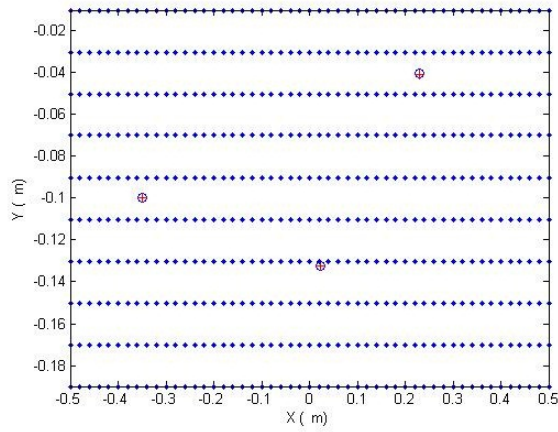
Bu bölümde yeraltındaki gerçek dalga hızı ile varsayılan dalga hızı arasındaki farklılığın CS tabanlı görüntüleme yönteminin hedefleri yanlış derinliklerde görüntülemesine neden olduğu gösterilmiştir. Hız uyumsuzluğuna çözüm olarak dalga hızının belirli bir aralıkta tahmin edilebildiği durumlarda kullanılacak olan Genişletilmiş Sözlük yöntemi önerilmiştir. Hedef pozisyonları ızgara noktalarında değilken, ızgara boyutu büyüdükçe seyrek tabanlı yöntemlerin görüntüleme performanslarının düştüğü gösterilmiştir. Bu probleme çözüm olarak çoklu-çözünürlük yöntemi önerilmiştir. Son olarak, yeni geliştirilen yöntemde OMP'ye türev alma işlemi eklenmiş, hedefler ızgara noktalarında değilken bile gerçek pozisyonlarının doğru şekilde bulunabildiği gösterilmiştir. Bu bölümde yapılan analiz sonuçları [89]'da yayınlanmıştır.



(a)

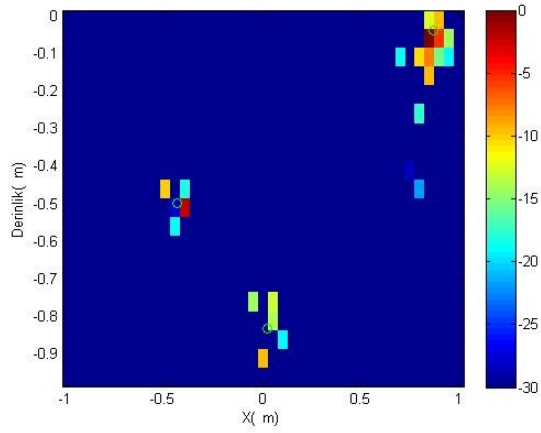


(b)

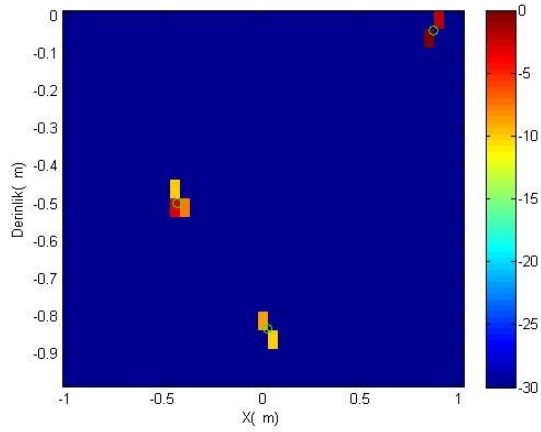


(c)

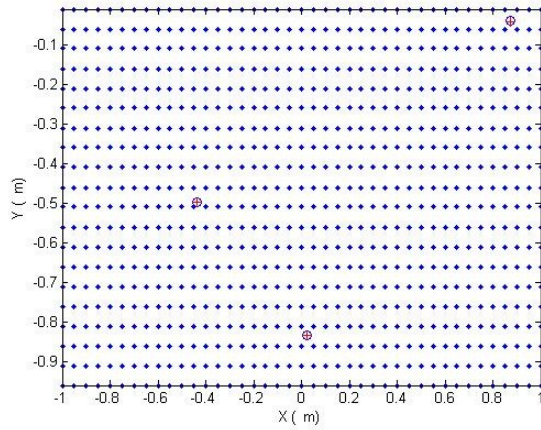
Şekil 5.7.: Hedeflerin ızgara noktalarında olmadığı durum için, ızgara büyüklüğü 2 cm'ken (a) CS tabanlı görüntüleme yöntemi (b) OMP yöntemi (c) Geliştirilen yöntem ile ızgara noktalarında olmayan hedeflerin görüntülenmesi. Dairesel işaretler hedefin gerçek pozisyonlarını; artı işareti (+); bulunan hedef pozisyonlarını; noktalar ise ızgara noktalarını temsil etmektedir



(a)

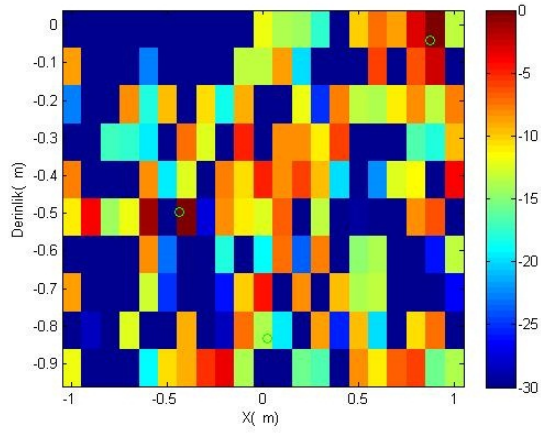


(b)

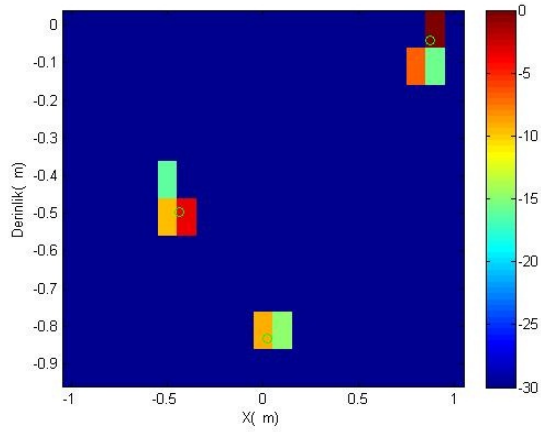


(c)

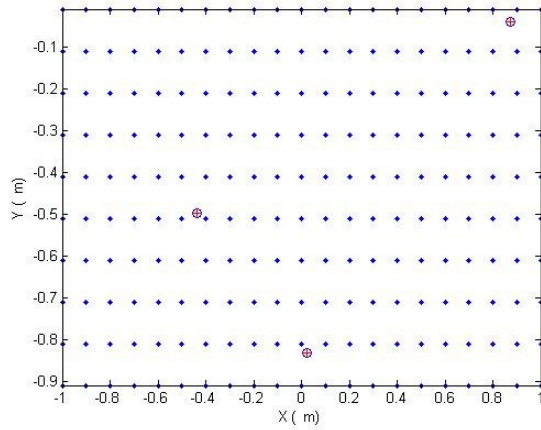
Şekil 5.8.: Hedeflerin ızgara noktaları üzerinde olmadığı durum için, ızgara büyüklüğü 5 cm'ken (a) CS tabanlı görüntüleme yöntemi (b) OMP yöntemi (c) Geliştirilen yöntem ile ızgara noktalarında olmayan hedeflerin görüntülenmesi. Dairesel işaretler ile gösterilen yerler gerçek hedef pozisyonlarını; artı işareti (+); hesaplanan hedef pozisyonlarını; noktalar ise ızgara noktalarını temsil etmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.9.: Hedeflerin ızgara noktaları üzerinde olmadığı durum için, ızgara büyüklüğü 10 cm'ken (a) CS tabanlı görüntüleme yöntemi (b) OMP yöntemi (c) Geliştirilen yöntem ile ızgara noktalarında olmayan hedeflerin görüntülenmesi. Dairesel işaretler ile gösterilen yerler gerçek hedef pozisyonlarını; artı işareti (+); hesaplanan hedef pozisyonlarını; noktalar ise ızgara noktalarını temsil etmektedir.

BÖLÜM 6

6. SONUÇ

6.1. Yorumlar

Bu tezde yere işleyen radar (GPR) ile seyreklik tabanlı yeraltı görüntüleme hızlandırılmış ve yeryüzünden yansıyan sinyallerin çıkarılması, ızgara noktaları üzerinde olmayan hedef konumlarının hassas şekilde tespiti gibi yeni yöntemler eklenerek seyreklik tabanlı görüntüleme geliştirilmiştir.

2. bölümde basamak frekanslı yere işleyen radar (SF-GPR) için seyreklik tabanlı görüntüleme yöntemi anlatılmıştır. Bu yöntemin temelleri Sıkıştırılmış Algılama (CS) teorisine dayanmaktadır. Görüntüleme yapılırken hedef uzayının seyrek olduğu varsayımı kullanılır. Hedefler, hedef uzayının küçük bir kısmını kapsadığı için bu geçerli bir varsayımdır. CS tabanlı görüntüleme yöntemi ile standart yöntemlere göre az ölçüm alınarak daha net görüntüler elde edilebilmektedir. Aynı zamanda az ölçüm alınması SF-GPR'in çoğu uygulamada problem olan veri toplama zamanını azaltabilmektedir.

3. bölümde Sıkıştırılmış Algılama (CS) tabanlı görüntüleme yöntemine alternatif olarak daha Dik Eşleme Takibi (OMP) yöntemi önerilmiştir. CS tabanlı görüntüleme yöntemi az ölçüm kullanarak GPR'in veri toplama zamanını azaltmasına rağmen kullanılan algoritmanın hesaplama yükü fazladır. Buda basamak frekanslı GPR'in veri toplamada kazandığı zamanı hedef uzayının görüntüsünü oluşturmada kaybetmesine neden olmaktadır. Bu durum görüntülenecek hedef uzayı büyüdükçe veya 3 boyutlu görüntülemeye daha da fazla zaman kaybına neden olmaktadır. Bu yüzden CS tabanlı görüntüleme yöntemine taban takibi sınıfından hesaplama yükü çok daha az olan Dik Eşleme Takibi (OMP) yöntemi alternatif olarak önerilmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda OMP'nin CS tabanlı görüntüleme yöntemine benzer performanslarda görüntüleme yapabildiği gösterilmiştir. Ayrıca yapılan benzetimlerden OMP ve Sıkıştırılmış Algılama (CS) tabanlı görüntüleme yönteminin ölçüm sayısı, seyreklik ve gürültüye karşı performanslarının benzer olmasına rağmen OMP'nin hesaplama yükünün çok daha az olduğu gösterilmiştir. Son olarak gerçek GPR uygulamasında OMP'nin CS tabanlı görüntüleme yöntemine göre avantaj ve dezavantajlarını anlayabilmek için OMP ile CS tabanlı görüntüleme yöntemi deneysel

veriye uygulanmıştır. Gerçek GPR verileri kullanıldığında da OMP'nin CS tabanlı görüntüleme yöntemine benzer görüntüler oluşturabildiği gösterilmiş, görüntüyü oluşturmak için harcanan zamanlar karşılaştırılarak OMP'nin gerçek verilerde de CS tabanlı görüntüleme yöntemine göre çok daha hızlı çalıştığı anlaşılmıştır. Yani gerçek GPR uygulamaları, geniş hedef uzaylarının görüntülenmesi veya 3 boyutlu yeraltı görüntüleri çıkarılması gibi uygulamalar için OMP yönteminin CS tabanlı görüntüleme yöntemine göre daha uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Bu bölümde elde edilen sonuçlar [86, 87]'de yayınlanmıştır.

4. bölümde az ve rastgele ölçüm alındığı zaman yeryüzünden yansıyan sinyalleri frekans alanında GPR verisinden çıkartabilen bir yöntem geliştirilmiş ve yürüyen ortalama (MA-BS) ile zaman alanında kaydırma ve genlik ölçeklendirme (aSaS-BS) gibi bilinen bazı yöntemlerle performansı karşılaştırılmıştır. Basamak frekanslı yere işleyen radarlar (SF-GPR) için geliştirilen seyreklik tabanlı yeraltı görüntüleme yöntemi, yer yüzünden yansıyan sinyalleri toplanan GPR verisinden çıkartmamaktadır. Yeryüzü engebeli ve sığ yerlerde hedef varsa, yer yüzünden yansıyan sinyallerden dolayı bu hedefler tespit edilememektedir. Ayrıca, frekans düzleminde az ve rastgele ölçüm alındığı için yeryüzünden yansıyan sinyallerin toplanan GPR verisinden çıkartılması için kullanılan standart yöntemler direkt uygulanamamaktadır. Bu bölümde, az ve rastgele ölçüm alındığı zaman yeryüzünden yansıyan sinyalleri frekans alanında GPR verisinden çıkartabilen bir yöntem geliştirilmiş, yürüyen ortalama (MA-BS) ile zaman alanında kaydırma ve genlik ölçeklendirme (aSaS-BS) gibi bilinen standart yöntemlerle performansı karşılaştırılmıştır. Elde edilen benzetim ve deneysel veri sonuçları, geliştirilen yöntemin standart yöntemlere göre daha başarılı şekilde yüzey yansımalarını veriden çıkartabildiğini göstermiştir. Böylece sığ derinliklerdeki hedefler de seyreklik tabanlı yöntemlerle görüntülenebilmektedir. Bu bölümde elde edilen sonuçlar [88, 90]'da yayınlanmıştır.

5. bölümde dalganın yeraltındaki gerçek dalda hızı ile tahmin edilen dalga hızı arasındaki uyumsuzluğunun ve hedef pozisyonlarının ızgara noktaları üzerinde olmamasının görüntüleme performansına etkileri analiz edilmiş ve bazı olası çözümler önerilmiştir. Ayrıca bu problemlere çözüm sağlayan OMP tabanlı yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Model verisinin doğru oluşturulabilmesi için yeraltındaki dalga hızının tam olarak biliniyor olması gerekmektedir. Ayrıca, gerçek uygulamalarda hedefler genellikle hedef uzayı içinde bölünmüş ızgara noktalarının tam üstünde olmazlar. Bahsedilen bu iki önemli noktanın seyreklik tabanlı yöntemlerin görüntüleme performanslarına etkileri incelenmiştir. Bu gibi durumlar için genişletilmiş sözlük,

çoklu-çözünürlük gibi çözümler önerilmiştir. Ayrıca hedeflerin gerçek pozisyonlarını hassas şekilde bulabilen OMP tabanlı yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Böylece hedefler ızgara noktaları üzerinde olmasalarda hedefin gerçek pozisyonlarının başarılı şekilde bulunabildiği gösterilmiştir. Yeni geliştirilen yöntemde OMP'ye türev alma işlemi eklenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu bölümde yapılan analiz sonuçları [89]'da yayınlanmıştır.

6.2. Gelecek Çalışmalar

OMP'nin performans analizleri yapılmış ve CS tabanlı görüntüleme yöntemine alternatif bir yöntem olabileceği gösterilmiştir. OMP, 3 boyutlu veya geniş hedef uzaylarını görüntülemek için CS tabanlı görüntüleme yöntemine göre daha uygulanabilir. Bu sonuca yapılan performans analizlerinden ve hesaplama yükü karşılaştırmalarından sonra varılmıştır. Gelecek çalışmalarda OMP ve CS tabanlı görüntüleme yöntemi, çok geniş hedef uzaylarını görüntülemek veya 3 boyutlu yeraltı görüntüleri çıkarmak gibi uygulamalarda kullanılarak bazı performans karşılaştırmaları yapılabilir.

Elde edilen benzetim ve deneysel veri sonuçları 4. bölümde geliştirilen yöntemin standart yöntemlere göre daha başarılı şekilde yüzey yansımalarını veriden çıkartabildiğini göstermiştir. Gelecekte yapılabilecek bir çalışma olarak; geliştirilen bu yöntem homojen olmayan veya farklı su-toprak oranlarına sahip ortamlarda test edilebilir.

Yeraltındaki gerçek hız ile varsayılan hız arasındaki uyumsuzluğa çözüm olarak dalga hızının belirli bir aralıkta tahmin edilebildiği durumlarda kullanılabilen Genişletilmiş Sözlük yöntemi önerilmiştir. Gelecekteki çalışmada bu yöntemin gürültüye ve varsayılan hızların arasında doğru hızın olmaması gibi durumlara karşı gürbüzlüğü analiz edilmelidir. Ayrıca belirli bir eşik seviyesindeki ızgara büyüklüğüne kadar hedeflerin ızgara noktaları üzerinde olmamasının problem yaratmadığı gösterilmiştir. Gelecekteki çalışmada hedef uzayı görüntüsünün doğru oluşturulabilmesi için ızgara boyutunun en fazla ne kadar büyük olabileceğinin analizleri yapılabilir. Son olarak, geliştirilen OMP tabanlı yeni yöntem ile ızgara noktalarında olmayan hedefler başarılı şekilde bulunabilmiştir. Gelecekte yapılabilecek bir çalışma olarak; ızgara noktalarında olmayan hedeflerin bulunduğu ve yeraltındaki dalga hızının bilinmediği durumlar için bu yöntem ile görüntüleme yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] D. Daniels, Surface Penetrating Radar, Electron. Commun. Eng. J., vol 8, pp. 165-182, 1996.
- [2] Harry M. Jol, Ground Penetrating Radar: Theory and applications, Elsevier, 2009.
- [3] D. Daniels, Ground Penetrating Radar, 2nd ed. London, U.K., The Inst.Elect.Eng.(IEE), 2004.
- [4] R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, pp.131 1983 :McGraw-Hill
- [5] E. H. Yin, Geological Map of Kuala Lumpur Selangor. Geological Survey Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia No. Sheet 94, 73-76, (1976)..
- [6] R. Nob, J. L. GIMLETT, R. S. VODHANEL and S. TSUJI: 'Polarizationin sensitive, ibid., 25, (1), pp. 4-5, 1989
- [7] M. D. Ageev, AUV-a precise platform for underwater gravity measurement, in In Proceedings of IEEE OCEANS '94., vol. 1., Brest, 1994,
- [8] L. E. Zaffanella, Survey of residential magnetic field sources, EPRI Report TR-102759, Palo Alto, CA, Sept. 1993.
- [9] Zuyin Zhang and Shijie Lin, Microwave Radiometry and Its Application, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1995.
- [10] S. K. Lau, D. P. Almond, P. M Patel, Application of image analysis techniques and numerical modelling to analyse transient thermographic data, Measurements, Modelling and Imaging for Non-Destructive Testing, IEE Colloquium, Page(s): 8/1 - 8/3, 1991 ,
- [11] S. Caorsi, P. Gamba, Electromagnetic detection of dielectric cylinders by a neural network approach, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, On page(s): 820 - 827, Volume: 37 Issue: 2, Mar 1999
- [12] George Stimsoni, Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill International Editions: Electrical Engineering Series,Third Editon
- [13] A. Langman, The design and hardware and signal processing for a stepped frequency continous wave ground penetrating radar, Phd thesis, University of Cape Town, 2002
- [14] Iizuka, K., Freundorfer, A.P., Wu, K.H., Mori, H., Ogura, H., and Nguyen, V-K., 1984, Step-frequency radar. Journal Applied Physics, Vol 56, pp. 2572-2583.

- [15] F. Kong and T.L.By, Performance of a GPR system which uses step frequency signals, *J.Appl. Geophys.*, vol. 33, pp.15-26, 1995
- [16] W. Steinway and C. Barrett, Development status of a stepped frequency ground penetrating radar, *n Proc. SPIE*, 1993, vol. 1942, pp.34-43
- [17] M. Bradley, T. Witten, R. McCummins, M. Crowe, S. Stewart, and M. Duncan, Minde detection with a multi-channel stepped frequency ground penetrating radar, in *Proc. SPIE*, 1999, vol. 3710, pp. 953-960
- [18] E. M.Johansson and J. E. Mast, 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. 205214, 1994.
- [19] X. Feng and M. Sato, Pre-stack migration applied to GPR for landmine detection, *Inverse Prob.*, vol. 20, pp. 99115, 2004.
- [20] S. M. Oh, Iterative space-time domain fast multiresolution SAR imaging algorithms. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 2001.
- [21] J. Gazdag, Wave equation migration with the phase shift method, *Geophysics*, vol. 43, pp. 13421351, 1978.
- [22] R Stolt, Migration by Fourier Transform, *Geophysics*, vol. 43, pp. 2348, 1978.
- [23] F. Hlawatsch ve G. F. Boudreaux-Bartels, Linear and quadratic time-frequency signal representations, *IEEE Signal Processing Magazine*, April 1992, pp.21-69
- [24] N. Osumi ve K. Ueno, Detection of buried plant, *IEE Proc.-F*, August, 1988, 135, (4), pp.330-342
- [25] G. S. O. Odhiambo, Algebraic reconstruction of subsurface radar images, *Conf. on Image Processing and its Applications*, Maastricht, Netherlands, 7th-9th April 1992, ISBN 0852965345, pp.185-188
- [26] A. F. Siggins, Ground penetrating radar in geotechnical applications, *Exploring Geophysics*, Sep-Dec 1990, 21, (34), pp.175-186
- [27] T. Kaneko, Radar image processing for locating underground linear objects, *IEICE Transactions (Japan)*, October 1991, 74, (10), pp.3451-3459
- [28] E. Fisher ve G. A. McMechan, Examples for reverse-time migration of single-channel, ground penetrating radar profiles, *Geophysics (USA)*, April 1992, 57, (4), pp.577-586
- [29] D. Donoho, Compressed sensing, *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289-1306, 2006

- [30] E. Candes, J. Romberg and T. Tao, Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information, *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.52, pp. 489-509, 2006.
- [31] R. Baraniuk, Compressive sensing, *IEEE Signal Process. Mag.*, vol.24, no. 4, pp. 118-121, Jul. 2007
- [32] Ali Cafer Gurbuz, J. H. McClellan, and W. R. Scott, A Compressive Sensing Data Acquisition and Imaging Method for Stepped-Frequency GPRs, *IEEE Tran. On Signal Processing*, Vol. 57(7), July 2009, Pages:2640-2650
- [33] Ali Cafer Gurbuz, J. H. McClellan, and W.R. Scott, Compressive Sensing for Subsurface Imaging using Ground Penetration Radar, *Signal Processing*, Vol. 89(10), October 2009, Pages:1959-1972
- [34] Ali Cafer Gurbuz, James H. McClellan, Waymond R. Scott, Jr., Compressive Sensing for GPR Imaging, 41st Asimolar Conference on Signals, Systems and Computers, November 2007.
- [35] T. Counts and A. C. Gurbuz and W. R. Scott, Jr. and J. H. McClellan and K. Kangwook, Multistatic Ground-Penetrating Radar Experiments, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol.45, no:8 pp.2544–2553, Aug.2007
- [36] Kim K, Gurbuz AC, Scott WR, et al, A multi-static ground-penetrating radar with an array of resistively-loaded vee dipole antennas for landmine detection, *Conference on Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets X*, vol.5794, pp.495-506, MAR 28-APR 01, 2005 Orlando, FL
- [37] J. Tropp and A. Gilbert, Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit, *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 53, no.12, pp.4655-4666 Dec 2007
- [38] Krim, H. and Viberg, M., Signal Recovery From Random Measurements via Orthogonal Matching Pursuit, *IEEE Trans. on Info. Theory* 53(12): 4655- 4666, 2007.
- [39] P. Gader, M. Mystkowski, and Y. Zhao, Landmine detection with ground penetrating radar using hidden Markov models, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39, pp. 1231-1244, 2001.
- [40] X. Feng and M. Sato, Pre-stack migration applied to GPR for landmine detection, *Inverse Prob.*, vol. 20, pp. 99-115, 2004
- [41] J. Groenenboom and A. Yaravoy, Data processing and imaging in GPR system dedicated for landmine detection, *Subsurf. Sens. Technol.*
- [42] E. J. Baranoski, Through-wall imaging: Historical perspective and future directions, *Journal of the Franklin Institue* 345, pp. 556-569, 2008

- [43] 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.
- [44] N. Metje, et.al., Mapping the underworld-state of the art review, *Tunnel. Underground Space Technol.*, vol. 22, pp. 568-586, 2007.
- [45] 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
- [46] 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
- [47] S. Evans, Radio techniques for the measurement of ice thickness, *Polar Record*, 11, pp. 406-410, 1963
- [48] H. Hayakawa, Radar imaging of underground pipes by automated estimation of velocity distribution versus depth, *Journal of Applied Geophysics*, 40(1-3), 37-48, 1998
- [49] K. Iizuka, A. Freundorfer, K. Wu, H. Mori, H. Ogura and V. Nguyen, Step frequency radar, *Journal of Applied Physics*, vol. 56, no. 9, pp. 2572-2583, 1984.
- [50] N. Metje and et. al, Mapping the underworld- state of the art review, *Tunneling and underground space technology*, vol. 22, pp. 568-586, 2007.
- [51] J. Groenenboom and A. Yarovoy, Data processing and imaging in GPR system dedicated for landmine detection, *Subsurf. Sens. Technol. Appl.*, vol. 3, no. 4, pp. 387-402, 2002.
- [52] O. Lopera, E. C. Slob, N. Milisavljevic and S. Lambot, Filtering soil surface and antenna effects from GPR data to enhance landmine detection, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, no. 3, pp. 707-717, 2007.
- [53] F. Kong and T. L. By, Performance of a GPR system which uses step frequency signals, *J. Appl. Geophys.*, vol. 33, pp. 152-6, 1995.
- [54] W. Steinway and C. Barret, Development status of a stepped-frequency ground penetrating radar, in *Proc. SPIE*, 1993, vol. 1942, pp. 34-43
- [55] M. Bradley, T. Witten, R. Mccummins, M. Crowe, S. Stewart, and M. Duncan, Mine detection with a multi-channel stepped-frequency ground penetrating radar, in *Proc. SPIE*, 1999, vol 3710, pp. 953-960.
- [56] W. Schneider, Integral formulation of migration in 2 and 3 dimensions, *Geophys.*, vol. 43, pp. 497-6, 1978

- [57] R. Baraniuk, M. Davenport, R. DeVore, and M. Wakin, A simple proof of the restricted isometry property for random matrices, *Constructive Approximation*, 2008.
- [58] E. Candes, E. J. and T. Tao, Decoding by linear programming, *IEEE Tran. on Information Theory*, vol. 51, pp. 4203-4215, 2005.
- [59] E. Candes, Compressive sampling, in *Proc. of International Congress of Mathematicians, Madrid, Spain 2006*.
- [60] E. Candes, J. Romberg, and T. Tao, Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements, *Comm. Pure Appl. Math.*, vol. 59, no. 8, pp. 1207-1223, 2006.
- [61] E. Candes and T. Tao, The Dantzig selector: Statistical estimation when p is much larger than n , *Ann. Statist.*, vol. 35, no. 6, pp. 2313-2351, 2007
- [62] D. Donoho, M. Elad, and 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
- [63] J. Haupt and R. Nowak, Signal reconstruction from noisy random projections, *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 9, pp. 4036-4048, 2006
- [64] D. T., et. al. A new compressive imaging camera architecture using optical domain compression, in *Proc. Comp. Imaging IV at SPIE Electronic Imaging*, 2006.
- [65] M. Lustig, D. Donoho, and L. M. Pauly, Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging, Preprint, 2007.
- [66] R. Baraniuk, and P. Steeghs, Compressive radar imaging, in *IEEE Radar Conf.*, pp. 1281-33, 2007.
- [67] V. Cevher, A. C. Gürbüz, J. H. McClellan, and R. Chellappa, Compressive wireless arrays for bearing estimation, in *ICASSP 2008, (Las Vegas, Nevada), March 30 April 4 2008*.
- [68] A. C. Gürbüz, V. Cevher, and J. H. McClellan, A compressive beamformer, in *ICASSP 2008, (Las Vegas, Nevada), March 30 April 4 2008*.
- [69] E. Candes, M. Rudelson, T. Tao, and R. Vershynin, Error correction via linear programming, in *Proceedings of the 46th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS)*, pp. 295-308.
- [70] M. Grant, and S. Boyd, CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming (Web Page and Software) 2008 [Online]. Available: <http://stanford.edu/boyd/cvx>

- [71] S. Boyd, and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004
- [72] S. S. Chen, D. L. Donoho, and M. A Saunders, Atomic decomposition by basis pursuit, *SIAM J. Sci. Comput.*, vol 20, pp. 33-61, 1999.
- [73] S. Mallat and Z. Zhang, Matching pursuits with time-frequency dictionaries, *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 41, pp. 3397-3415, Dec. 1993
- [74] T. Li, Q. Gao, R. Wu, J. Liu, H. Li, and B. Zhang, Progress in the research of ground bounce removal for landmine detection with ground penetrating radar, in *Electromagnetics Research Symposium, 2005, Hangzhou, China, August 22-26*.
- [75] M. Picardi, Background subtraction techniques, a review, in *The ARC Centre of Excellence for Autonomous Systems(CAS), Faculty of Engineering, UTS, April 15, 2004*.
- [76] A. M. Mayordomo and A. Yarovoy, Optimal background subtraction in GPR for humanitarian demining, in *5th European Radar Conference, October 2008*.
- [77] V. Kovalenke, A. Yarovoy, and L. P Ligthart, A novel clutter suppression algorithm for landmine detection with GPR, *IEEE Trans. GeoSci. Remote Sensing*, vol. 45, pp. 3740-3751, Nov. 2007.
- [78] R. Wu, J. Liu, T. Li, Q. Gao, H. Li, and B. Zhang, Progress in the research of ground bounce removal for landmine detection with ground penetrating radar, in *Progress In Electromagnetics Research Symposium 2005, Hangzhou, China, August 22-26*.
- [79] A. V. D. Merwe and I. Gupta, A novel signal processing technique for clutter reduction in GPR measurements of small, shallow land mines, *IEEE Tran. on Geoscience and Remote sensing*, vol. 38, no. 6, pp. 2627-2637, November 2000.
- [80] F. Soldovieri, O. Lopera, and S. Lambot, Combination of advanced inversion techniques for an accurate target localization via gpr for demining applications, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 1, pp. 451-461, Jan. 2011.
- [81] O. Lopera, E. C. Slob, N. Milisavljevic, and S. Lambot, Filtering soil surface and antenna effects from gpr data to enhance landmine detection, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 3, pp. 707-717, March. 2007.
- [82] W.R.Scott, <http://users.ece.gatech.edu/wrscott/>
- [83] D. H. Chae Parastoo Sadeghi, and R .A. Kennedy, Effects of basis-mismatch in compressive sampling of continuous sinusoidal signals, in *2nd International Conference on Future Computer and Communication, Wuhan, China, pp. 739-743*.

- [84] Y. Chi, A. Pezeshki, L. Scharf, and R. Calderbank, Sensitivity to basis mismatch in compressed sensing, in Intl. Conf. on Acoustic,Speech,and Signal Processing, Dallas, TX, pp. 739 743.
- [85] Y. Chi, A. Pezeshki, L. Scharf, and R. Calderbank, The sensitivity to basis mismatch of compressed sensing for spectrum analysis and beamforming, in Workshop on Defense Applications of Signal Processing(DASP), Lihue, HI, Oct. 2010.
- [86] Mehmet Ali Çağrı Tuncer, Ali Cafer Gürbüz, Analysis of Orthogonal Matching Pursuit Based Subsurface Imaging for Compressive Ground Penetrating Radars, Accepted, Tubitak Journal of Electrical Engineering and Computer Science
- [87] Mehmet Ali Çağrı Tuncer, Ali Cafer Gürbüz, Basamak Frekanslı GPR için Seyreklik Tabanlı Hızlı Yer Altı Görüntüleme, SIU2010-IEEE 18. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Konferansı, Diyarbakır, 2010, Page(s): 443 446
- [88] Mehmet Ali Çağrı Tuncer, Ali Cafer Gürbüz, Sıkıştırılmış Algılamalı GPR İçin Yüzey Yansımalarının Çıkarılması ve Seyrek Yeraltı Görüntüleme, SIU2011-IEEE 19. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Konferansı, pp:166-169, Kemer-Antalya, 20-22 Nisan 2011
- [89] Mehmet Ali Çağrı Tuncer, Ali Cafer Gürbüz, Analysis of Unknown Velocity and Target Off The Grid Problems In Compressive Sensing Based Subsurface Imaging. Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2011 IEEE International Conference, 22-27 May 2011, pp: 2880-2883, Prague, Cech Republic
- [90] Mehmet Ali Çağrı Tuncer, Ali Cafer Gürbüz, Ground Reflection Removal in Compressive Sensing Ground Penetrating Radars, Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, vol:PP, Issue:99, ISSN:1545-598X, Digital Object Identifier:10.1109/LGRS.2011.2158981

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : TUNCER, Mehmet Ali Çağrı
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum tarihi ve yeri : 09.12.1985 Konya
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 292 56 14
Faks : 0 (312) 292 56 14
e-mail : matuncer@etu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği	2009
Lisans	Anadolu Üniversitesi İşletme Bölümü	2010

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009-2011	TOBB ETÜ	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce
Rusça
Fransızca

Yayımlar

Mehmet Ali Çağrı Tuncer, Ali Cafer Gürbüz, Ground Reflection Removal in Compressive Sensing Ground Penetrating Radars, Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, vol:PP, Issue:99, ISSN:1545-598X, Digital Object Identifier:10.1109/LGRS.2011.2158981

Mehmet Ali Çağrı Tuncer, Ali Cafer Gürbüz, Analysis of Orthogonal Matching Pursuit Based Subsurface Imaging for Compressive Ground Penetrating Radars, Accepted, Tubitak Journal of Electrical Engineering and Computer Science

Mehmet Ali Çağrı Tuncer, Ali Cafer Gürbüz, Analysis of Unknown Velocity and Target Off The Grid Problems In Compressive Sensing Based Subsurface Imaging. Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2011 IEEE International Conference, 22-27 May 2011, pp: 2880-2883, Prague, Cech Republic

Mehmet Ali Çağrı Tuncer, Ali Cafer Gurbüz, Basamak Frekanslı GPR için Seyreklik Tabanlı Hızlı Yer Altı Görüntüleme, SIU2010-IEEE 18. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Konferansı, Diyarbakır, 2010, Page(s): 443 446

Mehmet Ali Çağrı Tuncer, Ali Cafer Gurbüz, Sıkıştırılmış Algılamalı GPR İçin Yüzey Yansımalarının Çıkarılması ve Seyrek Yeraltı Görüntüleme, SIU2011- IEEE 19. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Konferansı, pp:166-169, Kemer-Antalya, 20-22 Nisan 2011