



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**GİZLİ NESNE TESPİTİ İÇİN MİLMETRE
DALGA T/SAR İLE 3B GÖRÜNTÜLEMENİN
İYİLEŞTİRİLMESİ**

Hüseyin DUYSAK

DOKTORA TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Hüseyin Duysak tarafından hazırlanan “Gizli Nesne Tespiti İçin Milimetre Dalga T/SAR İle 3B Görüntülemenin İyileştirilmesi” adlı tez çalışması 25/11/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ercan YALDIZ

.....

Danışman

Doç. Dr. Levent SEYFİ

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi M. Fahri ÜNLERŞEN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim ŞEFLEK

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Yunus Emre ACAR

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Hüseyin DUYSAK

Tarih:

ÖZET

DOKTORA TEZİ

GİZLİ NESNE TESPİTİ İÇİN MİLİMETRE DALGA T/SAR İLE 3B GÖRÜNTÜLEMENİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Hüseyin DUYSAK

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Levent SEYFİ
İkinci Danışman: Doç. Dr. Enes YİĞİT

2022, 79 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ercan YALDIZ
Doç. Dr. Levent SEYFİ
Dr. Öğr. Üyesi M. Fahri ÜNLERŞEN
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim ŞEFLEK
Dr. Öğr. Üyesi Yunus Emre ACAR

Görüntüleme sistemleri son zamanlarda artan güvenlik endişeleri nedeniyle önemli bir konuma gelmiştir. Havaalanları, gümrükler gibi alanların güvenliğinin sağlanması için görüntüleme sistemleri tercih edilmektedir. Bu kapsamda milimetre dalga tabanlı görüntüleme sistemleri ön plana çıkmıştır. Milimetre dalga kıyafet, ambalaj gibi ortamlara nüfuz edebilmesi, yüksek çözünürlüklü görüntüler sunması ve donanım avantajları sağlamasından dolayı tercih edilmektedir. Milimetre dalga ve sentetik açıklık tabanlı görüntüleme sistemleri hedeflerin iki farklı sentetik açıklıkta taramasını gerçekleştirerek hedeflerin üç boyutlu veya diğer bir ifadeyle hologram görüntülerini elde etmektedir. Böylece taranan alandaki, gizlenmiş nesnelerin tespiti için imkân sağlamaktadır. Bu çalışmada milimetre dalga hologram görüntüleme sistemlerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Oluşturulan silindirik tarama düzeneğiyle hedeflerin taraması gerçekleştirilerek yansıyan sinyaller toplanmıştır. Hedeflerin görüntülerinin oluşturulmasında geri izdüşüm algoritması kullanılmıştır. Geri izdüşüm algoritmasının interpolasyon aşaması için daha az interpolasyon nokta sayısı kullanılan konik yapıda bir farksal menzil önerilmiştir. Önerilen algoritma ve geleneksel geri izdüşüm algoritmasının sonuçları benzetim ve deneysel çalışmalarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Önerilen algoritmayla, daha az veri kullanılarak görüntüdeki gürültüyü azalttığı ve görüntü kalitesini iyileştirdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Üç boyutlu görüntüleme, hologram görüntüleme, geri izdüşüm algoritması, milimetre dalga, radar görüntüleme

ABSTRACT

PhD THESIS

IMPROVEMENT OF 3D IMAGING WITH MILLIMETER WAVE I/SAR FOR CONCEALED OBJECT DETECTION

Hüseyin DUYSAK

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical Electronics Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Levent SEYFİ
2nd Advisor: Assoc. Prof. Dr. Enes YİĞİT

2022, 79 Pages

Jury

Prof. Dr. Ercan YALDIZ
Assoc. Prof. Dr. Levent SEYFİ
Asst. Prof. Dr. M. Fahri ÜNLERŞEN
Asst. Prof. Dr. Üyesi İbrahim ŞEFLEK
Asst. Prof. Dr. Yunus Emre ACAR

Imaging systems have recently come to an important position due to increasing security concerns. Imaging systems are preferred to ensure the security of areas such as airports and customs. In this context, millimetre-wave based imaging systems have become popular. Millimeter-wave is preferred because it can penetrate into environments such as clothing and packaging, and it provides high-resolution images and hardware advantages. Millimeter-wave and synthetic aperture-based imaging systems can obtain hologram images of targets by scanning the imaging area along two different synthetic apertures. Thus, it provides the opportunity to detect concealed objects on the target. In this study, it is aimed to develop millimeter-wave hologram imaging systems. The reflected signals were collected by scanning the targets with the constituted cylindrical scanning experimental system. The back-projection algorithm was used to reconstruct the images of the targets. For the interpolation stage of the back-projection algorithm, a conical differential range using less interpolation point number is proposed. The results of proposed algorithm and the traditional back-projection algorithm are given with simulation and experimental studies. It has been seen that the proposed algorithm reduces noise in the image, uses less data and improves image quality.

Keywords: Three dimensional imaging, holographic imaging, back-projection algorithm, millimeter-wave, radar imaging

ÖNSÖZ

Bu çalışma süresince değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren danışmanlarım, Doç. Dr. Levent SEYFİ ve Doç. Dr. Enes YİĞİT'e, Tez İzleme Komitesi üyeleri Prof. Dr. Ercan YALDIZ ve Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Fahri ÜNLERŞEN hocalarıma ve değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu çalışma süresince desteklerinden ve sabırlarından dolayı eşime, oğluma ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hüseyin DUYSAK
KONYA-2022



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	8
3.1. Adım Frekanslı Sürekli Dalga Radarı.....	8
3.2. Menzil Profili	9
3.3. Tarama Teknikleri.....	9
3.3.1. A tarama.....	9
3.3.2. B tarama	10
3.1.2. C tarama.....	11
3.4. Görüntüleme Algoritmaları.....	11
3.4.1. İki boyutlu görüntüleme için geri izdüşüm algoritması.....	13
3.4.2. Üç boyutlu görüntüleme için geri izdüşüm algoritması.....	16
3.4.3. Üç boyutlu görüntüleme için önerilen geri izdüşüm algoritması	19
3.5. Değerlendirme Metrikleri	21
3.5.1. Tümlşik yan lob oranı	21
3.5.2. Hesaplama yükü.....	22
3.6. Saçılma Parametreleri	22
3.7. Görüntü Çözünürlüğü	24
3.8. Vektör Network Analizör	24
3.9. Computer Simulation Technology Yazılımı	26
3.10. Horn Anten	26
3.11. Döner Tabla	28
3.12. Yankısız Oda.....	29
3.13. MATLAB.....	30
3.14. Maksimum Yoğunluk Projeksiyonu	30
3.15. Benzetim Verisinin Oluşturulması.....	31
3.16. Verinin Toplanması	32
3.17. Deney Sistemi	32
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	34
4.1. A Tarama Deneyleri.....	34

4.2. B Tarama Deneyleri.....	36
4.2.1. Sentetik açıklık deneyi.....	36
4.2.2. Ters sentetik açıklık deneyleri	43
4.3. C Tarama Deneyleri.....	53
4.3.1. Benzetim çalışmaları.....	53
4.3.2. Deneysel çalışmalar	61
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	73
5.1 Sonuçlar	73
5.2 Öneriler	74
KAYNAKLAR	75



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Genlik
a	: Antenin z konumu indisi
b	: Gelen dalga gerilimi
B	: Bant genişliği
c	: Işık hızı (3×10^8 m/s)
dc	: TSAR çapraz menzil çözünürlüğü
dr	: Menzil çözünürlüğü
f	: Frekans
f_0	: Başlangıç frekansı
i	: Azimut açısı indisi
j	: Sanal birim
f_n	: n. frekans
f_N	: Bitiş frekansı
k	: Uzamsal frekans
L	: Kapı sayısı
M	: Toplam açı sayısı
n	: Frekans indisi
N	: Toplam frekans sayısı
p	: Hedefin indisi
R	: Menzil
R_{max}	: Radarın maksimum anlamlı menzili
$R_{p,i}$: 2B düzlemde p . hedefin antene olan uzaklığı
$R_{p,i,a}$: 3B düzlemde p . hedefin antene olan uzaklığı
s	: Menzil profili
t	: Zaman
T	: İletim katsayısı
x_p	: p . hedefin x'deki konumu
y_p	: p . hedefin y'deki konumu
z_p	: p . hedefin z'deki konumu
Z	: Antenin Z eksenindeki toplam adım sayısı

α	: Giren dalga gerilimi
Γ	: Yansıma katsayısı
δ	: Dirac delta fonksiyonu
Δf	: Frekans artış miktarı
θ	: Azimut açısı
ρ	: Hedefin yansıma katsayısı
λ_c	: Merkez frekansın dalga boyu

Kısaltmalar

1B	: Tek boyutlu
2B	: İki boyutlu
3B	: Üç boyutlu
AFSDR	: Adım frekanslı sürekli dalga radarı
DR	: Farksal menzil
Gİ	: Geri izdüşüm
ISLR	: Tümeleşik yan lob oranı
mmD	: Milimetre-dalga
MIMO	: Çok girişli çok çıkışlı (Multiple input multiple output)
SAR	: Sentetik açıklık radarı
TFD	: Ters Fourier dönüşümü
TSAR	: Ters sentetik açıklık radarı
VNA	: Vektör network analizörü
YT	: Yer tabanlı

1. GİRİŞ

Milimetre dalga (mmD) elektromanyetik-tayfta genel olarak 30-300 GHz frekans bölgesine karşılık gelmektedir. Uzaktan algılama, medikal ve güvenlik gibi farklı alanlarda bu frekans bandı tercih edilmektedir (Meaney ve ark., 1996; Appleby ve Anderton, 2007; Yiğit ve ark., 2017). mmD'nın önemli bir uygulama alanı ise sentetik açıklık radarı (SAR) tabanlı görüntüleme sistemleridir. SAR, hedeflerin iki boyutlu (2B) veya üç boyutlu (3B) görüntüsünü oluşturmak için kullanılan bir görüntüleme tekniğidir. SAR sistemlerinin radar antenleri bir platform üzerinde belirli bir rota boyunca hareket ettirilir ve hedeften yansıyan elektromanyetik dalgalar hareket boyunca toplanır. Toplanan bu veri, görüntüleme algoritmaları kullanılarak görüntüye dönüştürülür. Benzer biçimde, hedef hareket ettirilerek sentetik açıklığın oluşturulduğu görüntüleme sistemleri ise ters SAR (TSAR) olarak bilinir (Yiğit, 2020). C ve X bandı gibi daha düşük frekans bantlarında çalışan SAR tabanlı görüntüleme sistemleri uydu veya uçak üzerine monte edilerek yeryüzünün gözlemlenmesi amacıyla da kullanılmaktadır (Rajah ve ark., 2018; Kulkarni ve Rege, 2020). SAR/TSAR sistemleri yer tabanlı (YT) bir zemin platformuna yerleştirilerek farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadır (Focşa ve ark., 2017; Kulkarni ve Rege, 2020; Duysak ve Yiğit, 2022). YT-SAR / TSAR sistemleri, dengesiz eğim izleme (Pieraccini ve ark., 2006), duvar arkası radar görüntüleme (Engin ve ark., 2007), gizli silah algılama (Jaeger ve ark., 2007) ve yabancı cisim tespiti (Demirci ve ark., 2012) gibi birçok özel uygulamada kullanılmıştır. Ayrıca, SAR tabanlı ve milimetre dalga tabanlı görüntüleme sistemleri sahip olduğu donanım avantajları ve sunduğu yüksek çözünürlüklü görüntülerden dolayı geniş bir kullanım alanına yayılmıştır.

mmD ve SAR tabanlı görüntüleme sistemlerinin önemli bir uygulama alanı ise hedeflerin üç boyutlu hologram görüntüsünün elde edildiği çalışmalardır. Bu sistemler 3B-SAR veya mmD hologram olarak da adlandırılmaktadır. Aktif mmD hologram sistemleri, tahribatsız muayene (Zhuge ve Yarovoy, 2012), medikal hastalık teşhisi (Klemm ve ark., 2010) ve yere nüfuz eden radar (Liu ve ark., 2016) gibi önemli uygulamalarda tercih edilmektedir. mmD'nın geniş frekans bandına sahip olması ve yüksek çözünürlüklü görüntüleri elde edebilmesi en önemli tercih nedenlerinden birisidir. Diğer bir tercih nedeni ise giysi, ambalaj gibi malzemelere nüfuz edebilme kabiliyetidir (Sheen ve ark., 2000; Sheen ve ark., 2001). Son yıllarda yüksek güvenlik gerektiren alışveriş merkezleri, gümrük noktaları, tren garları, havaalanları, hastalık

tanısı, duvar arkası görüntüleme, arama ve kurtarma gibi kritik alanlarda tahribatsız görüntüleme sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle havaalanları ve alışveriş merkezleri gibi insanların güvenliğinin ön plana çıktığı alanlarda kıyafet altı gizli nesne tespitine yönelik sistemler vazgeçilmez olmuştur. X-ray tabanlı görüntüleme sistemleri bunu gerçekleştirme kabiliyetine sahiptir fakat bu sistemlerin insan sağlığına verdiği yan etkiler özellikle halka açık alanlarda kullanılmasını engellemiştir (Appleby ve Anderton, 2007; Gao ve ark., 2017). Bu yüzden, mmD frekans bandında görüntüleme sistemlerinin kullanılması önemli bir konuma gelmiştir. Bu sistemlerin sunduğu görüntüler ile kıyafet içerisine gizlenmiş nesne tespiti daha hassas bir şekilde gerçekleştirilebilir. Dünyada artan bireysel silahlanma, terörizm gibi meselelerden dolayı bu sistemlerin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. mmD hologram sistemleri hedef bölgeden veriyi 2 farklı sentetik açıklık boyunca toplayarak görüntüyü oluşturmaktadır. Bu bağlamda, sistemler donanımsal, farklı sentetik açıklık geometrilerinin oluşturulması ve görüntüleme algoritmalarının geliştirilmesi kapsamında geliştirmeye açıktır. Donanımsal gelişim sistemlerin anten ve mikrodalga eleman yapılarının ve veri toplama yapılarının iyileştirilmesi kapsamında gerçekleştirilirken (Gumbmann ve Schmidt, 2011a), Sentetik açıklıkta ise, farklı görüntüleme geometrilerinin oluşturulması kapsamında gerçekleştirilmektedir (Nan ve ark., 2022). Görüntüleme algoritmalarının performansının iyileştirilmesi algoritmaların hesaplama yükünün azaltılması ve görüntünün kalitesinin iyileştirilmesi kapsamında gerçekleştirilmektedir (Gao ve ark., 2018). Geri izdüşüm (Gİ), menzil göç ettirme ve menzil-Doppler algoritmaları görüntüyü odaklamak için kullanılan en popüler algoritmalarıdır.

Bu tez çalışmasında aktif mmD SAR görüntüleme düzeneği oluşturularak hedeflerin hologram görüntülerinin elde edilmesi ve kıyafet veya ambalaj gibi malzemelerin içerisine gizlenmiş nesnelere tespitinin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Silindirik geometri düzeneği oluşturularak hedeflerin üç boyutlu taraması gerçekleştirilmiştir. Görüntünün odaklanması için Gİ algoritması tabanlı yeni bir algoritma önerilmiştir. Geleneksel Gİ ve önerilen Gİ algoritmasının sonuçları benzetim ve deneysel çalışmalarla gösterilmiştir.

Bu tez çalışması beş ana bölümde organize edilmiştir. Bir sonraki bölümde, bilimsel çalışmalar özetlenmiştir. Üçüncü bölümde kullanılan materyaller ve yöntem ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Dördüncü bölümde gerçekleştirilen benzetim ve

deneysel çalışmaların sonuçları verilmiştir. Son bölümde ise sonuçlar ve öneriler ile çalışma tamamlanmıştır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde mmD ve 3B görüntüleme ile gerçekleştirilen literatürdeki çalışmalar özetlenerek sunulmuştur. Çalışmalar genel olarak odaklama algoritmalarının geliştirilmesi, farklı frekans bantlarında sistemlerin geliştirilmesi, anten tasarımları ve farklı görüntüleme geometrilerinin geliştirilmesi kapsamında gerçekleştirilmektedir.

2.1. Literatür Taraması

Sheen ve ark. tarafından yapılan çalışmada 24-40 GHz frekanslarında gizli nesne tespiti için görüntüleme yapılmıştır. Dizi anten kullanılarak oluşturulan tarama düzeneğinde insan üzerindeki tabanca görüntülenmiştir (Sheen ve ark., 2000).

Sheen ve ark. tarafından yapılan çalışmada 27-33 GHz frekans bandında ölçümler yapılmıştır ve kıyafet içerisine gizlenmiş silah tespit edilmiştir. Çalışmada dizi anten yapısı kullanılmıştır (Sheen ve ark., 2001).

Klemm ve ark. tarafından sunulan çalışmada aktif mmD sistemiyle göğüs kanserinin tanısı için 3-B görüntüleme sistemi tasarımı anlatılmıştır. 31 eleman içeren anten dizisi kullanılan sistemle deneyler yapılarak kanser hücreleri görüntülenmiştir (Klemm ve ark., 2010).

Zhuge ve ark tarafından MIMO sistemler için Kirchoff göç algoritması modifiye edilmiştir. Geliştirilen algoritmanın sonuçları benzetim ve deneysel çalışmalar ile gösterilmiştir. Ayrıca deneysel çalışmalarda yere nüfuz eden radar deneyi de gerçekleştirilerek sonuçları verilmiştir (Zhuge ve ark., 2010a).

Gumbmann ve ark. tarafından sunulan makalede 75-90 GHz cihazlarında görüntüleme için periyodik dizi anten yapısı optimize edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarında anten sayısının 5 kata kadar düşürülebileceği vurgulanmıştır (Gumbmann ve Schmidt, 2011b).

Zhuge ve Yarovoy tarafından oluşturulan 3B görüntüleme sisteminde bir silahın radar görüntüsü elde edilmiştir. Deney sisteminde 25 anten kullanılmıştır. Farklı bir dizi anten yapısı oluşturularak görüntüleme yapılmıştır. Ölçümler 3-19.5 GHz frekanslarında gerçekleştirilmiştir (Zhuge ve Yarovoy, 2012).

Yiğit tarafından yapılan çalışmada oluşturulan deney sistemi ile mmD frekanslarında 2B YT-TSAR görüntüleme yapılmıştır. Tabanca içeren bir kıyafetin taraması yapılmıştır ve elde edilen TSAR görüntüsünde tabanca tespit edilmiştir (Yiğit, 2014).

Ghasr ve ark. tarafından tahribatsız muayene uygulamaları için dizi anten tabanlı 3-B bir görüntüleme sistemi önerilmiştir. 256 eleman içeren dizi anten yapısı ile 20-30 GHz frekanslarında görüntüleme yapılmıştır. Bir blok malzeme içerisindeki boşluklar görüntülenmiştir (Ghasr ve ark., 2017).

Tan ve ark. tarafından sunulan makalede 3-B dizi anten görüntüleme sistemleri için antenlerin konumları optimize edilmiştir. Simülasyon üzerinden optimum anten konumları belirlenmiştir. 20 ve 24 adet anten içeren iki farklı dizi anten topolojisi önerilmiştir. Bu topolojiler dikkate alınarak deney sistemi oluşturulmuş ve farklı metal nesnelere üzerinde 2-11 GHz frekans aralığında deneysel ölçümler yapılmıştır (Tan ve ark., 2017).

Zhu ve ark. tarafından yapılan çalışmada 3B menzil göç ettirme algoritması MIMO hologram sistemleri için önerilmiştir. Algoritma düzlem dalga yaklaşımı yerine küresel dalga yaklaşımı referans alınarak ortaya atılmıştır. Algoritmanın, hızlı Fourier dönüşümü sayesinde görüntüyü verimli bir şekilde odakladığı vurgulanmıştır. Algoritmanın performansı hem benzetim hem de deneysel çalışmalarla gösterilmiştir (Zhu ve ark., 2017).

Yigit ve ark. tarafından yapılan çalışmada mmD TSAR görüntüleme gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sıkıştırılmış algılama algoritması kullanılarak tüm veri yerine daha az veriyle görüntü oluşturulmuştur. Deneysel olarak az veriyle elde edilen görüntüler tüm veriyle elde edilen görüntüye göre karşılaştırılarak verilmiştir (Yigit ve ark., 2017).

Kai Tan ve ark. tarafından yapılan çalışmada omega-k algoritması MIMO sistemler için modifiye edilerek sunulmuştur. Algoritmanın interpolasyon aşamasında değişiklik yapılarak hesaplama veri sayısı azaltılmıştır. Uygulamanın detayları anlatılarak bir düzlemsel MIMO dizi anten sistemiyle gerçekleştirilen deneysel çalışmalar üzerinden algoritmanın sonuçları verilmiştir (Tan ve ark., 2018).

Cheng ve ark. tarafından sunulan makalede 340 GHz frekansında bir insan üzerine gizlenmiş silahın tespitine yönelik 3-B görüntülemesi anlatılmıştır. Deneylerde frekans modüleli sürekli dalga radarı kullanılarak 4 verici ve 16 alıcı eleman içeren bir dizi anten yapısı ile çalışma yapılmıştır (Cheng ve ark., 2018).

Gao ve ark. tarafından yapılan çalışmada, MIMO silindirik mmD hologram sistemleri için yeni bir görüntüleme algoritması önerilmiştir. Algoritma menzil göç ettirme algoritmasından esinlenilerek geliştirilmiştir. Algoritmanın performansı, benzetim ve deneysel sonuçlarla Gİ algoritması ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Noktasal hedef için algoritmaların tümleşik yan lob oranları (ISLR) verilmiştir. Gİ algoritmasının ISLR değeri yatayda -3.40 dB, önerilen algoritmanın ISLR değeri ise -3.90 dB olarak hesaplanmıştır. Gİ algoritmasının ve önerilen algoritmanın dikeyde ISLR değerleri sırasıyla-14.81 dB ve -13.88 dB olarak hesaplanmıştır. (Gao ve ark., 2018).

Meng ve ark. tarafından yapılan çalışmada lineer frekans modülasyonlu radarlar için holografik görüntüleme algoritmasının genel teorisi sunulmuştur. Çalışma 29.5 GHz merkez frekansında ve 5.8 GHz frekans bant genişliğine sahip sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarla algoritmanın performansı gösterilmiştir (Meng ve ark., 2020).

Wu ve ark. tarafından yapılan çalışmada metal olmayan boruların tahribatsız muayenesi için holografik görüntüleme tabanlı yöntem önerilmiştir. Çalışma mikrodalga frekans bantlarında gerçekleştirilmiştir. Benzetim ve deneysel çalışmalarla sistemin performansı sunulmuştur (Wu ve ark., 2020b).

Wu ve ark tarafından yapılan çalışmada holografik görüntüleme için 3 farklı görüntüleme yöntemi önerilmiştir. Dizi antenlerle silindirik geometri tabanlı bir deneysel sistem oluşturulmuştur. Mikrodalga frekans bandında benzetim ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yöntemlerin sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Wu ve ark., 2020a).

Zhang ve ark tarafından yapılan çalışmada hologram görüntüleme için “efficient interpolation-free” algoritması önerilmiştir. Silindirik görüntüleme geometrisi kullanılarak simülasyon ve deneysel sonuçlarla algoritmanın performansı sunulmuştur (Zhang ve ark., 2021).

Tan ve Chen tarafından yapılan MIMO dairesel SAR için odaklama algoritması önerilmiştir. Algoritma dalga teorisi ve menzil göç ettirme algoritmasına dayanmaktadır. Algoritmanın performansı deneysel ve benzetim çalışmaları ile gösterilerek verilmiştir (Tan ve Chen, 2021).

Bi ve ark tarafından yapılan çalışmada mmD görüntüleme için seyrek tabanlı tarama yöntemi önerilmiştir. Sıkıştırılmış algılama operatörü kullanılan algoritmada uzamsal nokta sayısının düşürülmesiyle birlikte hedefi tarama zamanı da düşmüştür. Ayrıca toplam frekans nokta sayısı da azalmıştır. %6.25 örnekleme oranı görüntü odaklaması gerçekleştirilmiştir. Algoritmanın sonuçları, %100 verinin kullanılarak elde edildiği görüntüyle karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Bi ve ark., 2021).

Tian ve ark tarafından yapılan çalışmada mmD görüntüleme için dizi anten yapılı sistemlerde sinyalin faz hatalarından dolayı oluşan görüntüdeki bozulmaların giderilmesi için bir kalibrasyon yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemin performansı, deneysel ve nümerik çalışmalarla gösterilmiştir (Tian ve ark., 2022).

Wang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 3B görüntüleme için seyrek gösterim tabanlı bir görüntüleme algoritması önerilmiştir. Mevcut seyrek gösterim tabanlı algoritmalar ile kıyaslandığı zaman görüntü kalitesi tatmin edici seviyede elde edilmiş ve görüntüyü oluşturma süresi de azalmıştır. Algoritmanın benzetim ve deneysel çalışmalarla sonuçları verilmiştir (Wang ve ark., 2022b).

Nan ve ark. tarafından yazılan makalede, silindirik geometri üzerine sarmal tipte alıcı ve verici antenlerin yerleştirildiği düşük maliyetli 3B mmD holografik silindirik tarama geometrili görüntüleme sistemi ve algoritma önerilmiştir. Sistem geometrisi, önerilen algoritma ve geri izdüşümü algoritması (Gİ) açıklanmıştır. Önerilen algoritmanın verimliliğini ve doğruluğunu göstermek için benzetim ve deneysel sonuçlar verilmiştir. Önerilen algoritma için elde edilen sonuçlar Gİ algoritması ile karşılaştırılmıştır. Gİ algoritması -1.25 dB ISLR değerine sahipken, önerilen algoritmanın ise farklı parametreler için -1.22 dB ile -1.25 dB arasında değişen ISLR değerlerine sahip olduğu görülmüştür (Nan ve ark., 2022).

Rostami ve ark., Wang ve ark., Zhou ve ark., tarafından yapılan çalışmalarda ise 3B mmD T/SAR görüntülerin iyileştirilmesi ve yeniden oluşturulmasında derin öğrenme kombinasyonu ile oluşturulan yöntemler kullanılmıştır. (Rostami ve ark., 2022; Wang ve ark., 2022a; Zhou ve ark., 2022)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde ilk olarak tez kapsamında kullanılan radar tipi anlatılmıştır. Daha sonra radar tarama çeşitleri açıklanmıştır. Kullanılan görüntüleme algoritmaları hem teorik hem de uygulama açısından ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Ayrıca, oluşturulan deney sistemi ve kullanılan materyaller de açıklanmıştır.

3.1. Adım Frekanslı Sürekli Dalga Radarı

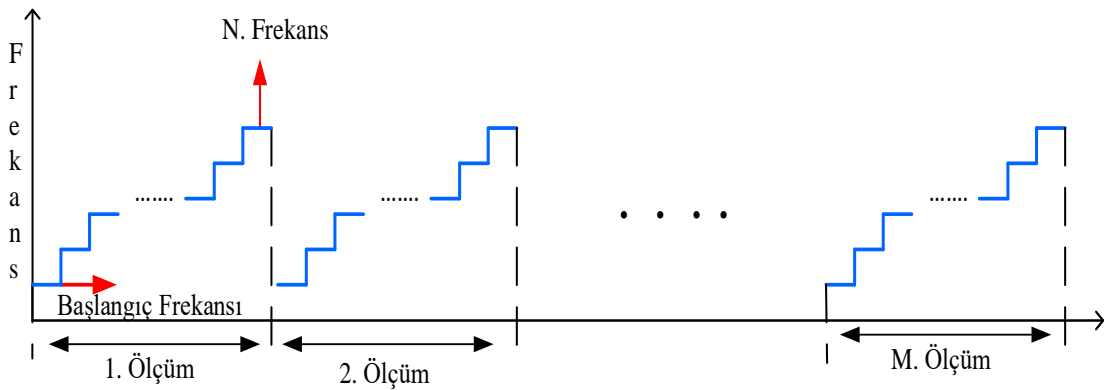
Radar, hedeflerden geri saçılan elektromanyetik sinyalleri toplayarak hedefler hakkında bilgiler çıkarmak için kullanılan cihazdır. Radarların verici dalga sinyalinin frekansları farklı formlarda bulunmaktadır. En yaygın kullanılanlardan birisi ise adım frekanslı sürekli dalga radarıdır (AFSDR). AFSDR, verici dalga sinyalinin tek bir frekans yerine bir dizi frekansa sahip olduğu hedef bölgeye sürekli dalga gönderen radar çeşididir. Hedef bölgeye gönderilen sinyalin frekansı bir başlangıç değerinden başlar ve adım adım artarak bitiş değerine ulaşır. Sinyal her bir frekans adımında belirli bir süre hedef bölgeye gönderilir. Bitiş frekans değerine ulaşan sinyal tekrar başlangıç frekans değerine döner ve bu bir döngü olarak devam eder (Şekil 3.1). Frekansın değişim fonksiyonu şu şekildedir,

$$f_i = f_0 + n\Delta f, \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3.1)$$

burada f_0 başlangıç frekansına, Δf ise her bir adımdaki frekans artışına karşılık gelir.

AFSDR sinyalinin bant genişliği B , şu şekilde hesaplanır,

$$B = f_N - f_0 \quad (3.2)$$



Şekil 3.1. AFSDR frekans değişimi

R uzaklığında bir noktasal hedeften yansıyan sinyal $k = \frac{4\pi f}{c}$ iki yönlü uzamsal frekans boyunca şu şekilde ifade edilebilir,

$$S(k) = \rho A e^{-jkR} \quad (3.3)$$

burada ρ hedefin yansıma katsayısını, A iletilen sinyalin genliğini ifade eder.

3.2. Menzil Profili

Eşitlik 3.5'e ters Fourier dönüşümü (TFD) uygulanırsa şu denkleme ulaşılabilir,

$$s(t) = \frac{\rho A}{\sqrt{2\pi}} \delta\left(t - 2\frac{R}{c}\right) \quad (3.4)$$

burada t zamanı, c ışık hızını ve δ dirac delta fonksiyonunu ifade eder.

Yukarıdaki denklemi menzil düzlemine aktarmak için $x = \frac{ct}{2}$ dönüşümü yapılırsa böylece $s(x)$ menzil profili denklemine ulaşılır ve şu şekilde ifade edilebilir,

$$s(x) = \frac{\rho A}{\sqrt{2\pi}} \delta\left(\frac{2}{c}(x - R)\right) \quad (3.5)$$

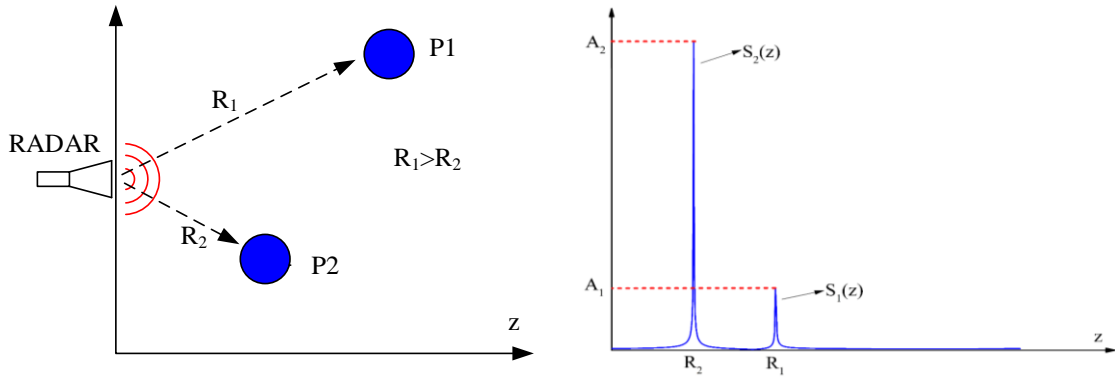
Denklemin 3.7 ifadesine AFSDR için bir frekans dizini için ölçüm yapıldığı zaman ulaşılabilir. Menzil profilinin elde edildiği tek boyutlu (1B) A tarama deneyleri bölüm 4'te verilmiştir.

3.3. Tarama Teknikleri

Bu bölümde A, B ve C olmak üzere üç tarama tekniği açıklanmıştır.

3.3.1. A tarama

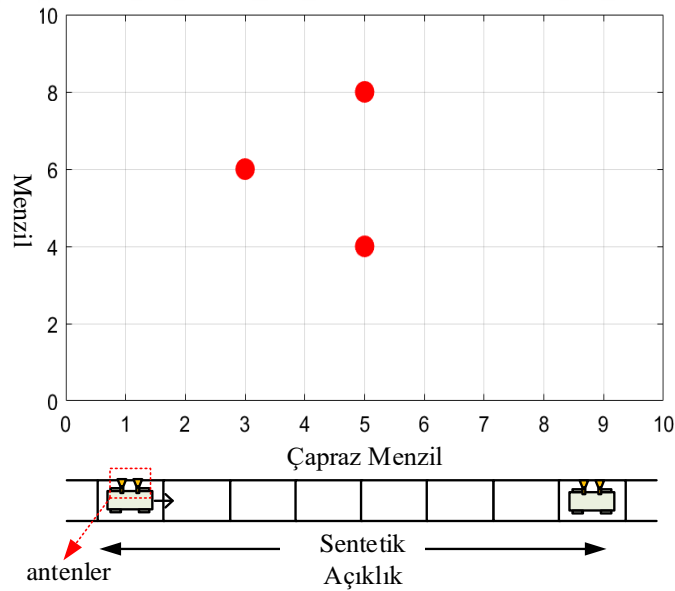
Bu tarama tekniğinde radar sistemi ve hedef sabittir. Tek noktadan verici anten ile gönderilen sinyal hedeften yansıdıktan sonra alıcı anten ile toplanır. R_1 ve R_2 uzaklığına yerleştirilmiş iki hedef için elde edilen A tarama ve menzil profilinin grafiksel gösterimi Şekil 3.2'de verilmiştir.



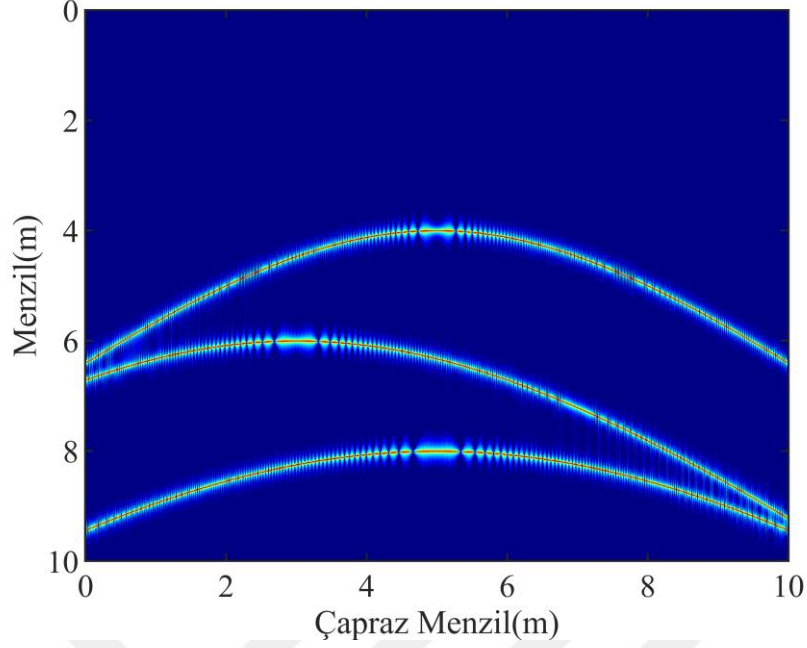
Şekil 3.2. İki ayrı hedef için A tarama ve menzil profili

3.3.2. B tarama

B tarama kısaca A taramaların ardı ardına eklenmesi şeklinde ifade edilebilir. Şekil 3.3'de gösterildiği gibi bir rota boyunca, her bir yapay aralıkta A-tarama verileri toplanır. Bu toplanan veriler karşımıza 2-B görüntü olarak çıkar. 2-B bir uzayda yerleştirilmiş üç adet noktasal hedef için, B-tarama sonrası elde edilen görüntü Şekil 3.4'teki gibi olur. Burada menzil antenden olan uzaklığı gösterirken, çapraz-menzil ise antenin hareket menzildir.



Şekil 3.3. Üç noktasal hedef için B tarama



Şekil 3.4. Üç noktasal hedef için B tarama menzil profili

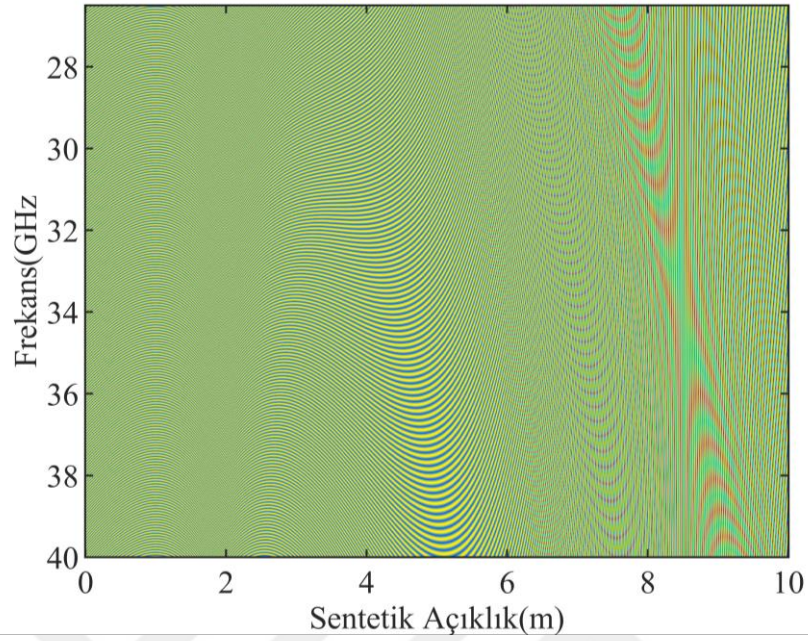
3.1.2. C tarama

C tarama hedef bölgenin üç boyutlu tarama verisinin elde edildiği tarama tekniğidir. C taramada B tarama için olduğu gibi hedef bölgenin sentetik açıklık boyunca veriler toplanır fakat iki farklı sentetik açıklık kullanılır. Bu bağlamda B-tarama verilerinin ardı ardına toplanması olarak ifade edilebilir. Bu tarama çeşidi silindirik, küresel veya dikdörtgen geometriler ile oluşturulabilir. Bu çalışmada silindirik tarama geometrisi oluşturularak C tarama deneyleri gerçekleştirilmiştir.

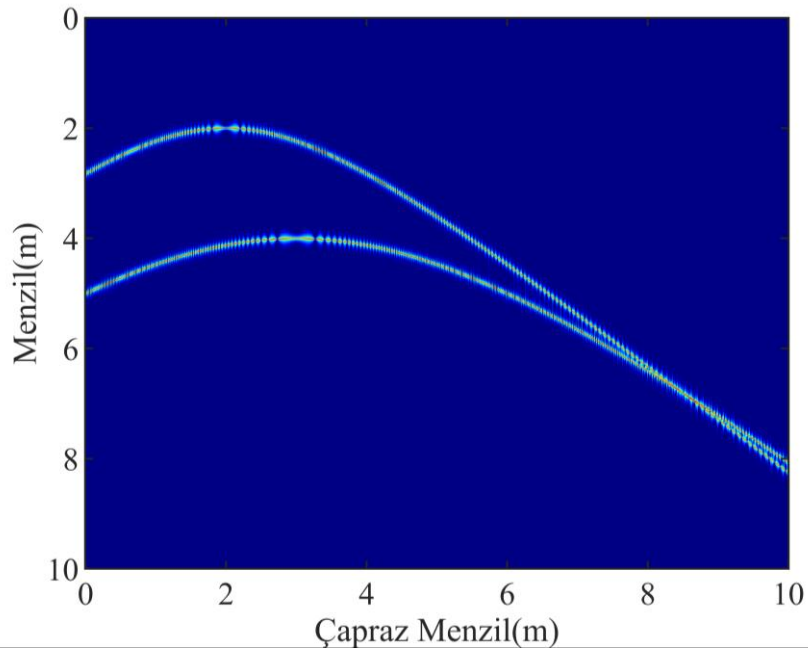
3.4. Görüntüleme Algoritmaları

Görüntüleme algoritmaları, hedeften toplanan sinyal verilerinden hedefin görüntüsünün yeniden oluşturulması için kullanılmaktadır. İki adet noktasal hedef için elde edilen ham sinyal ve TFD dönüşümü uygulanarak elde edilen görüntüler Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da verilmiştir. İki noktasal hedefin görüntüsünün bir parabol şeklinde olduğu görülmektedir. Görüntüdeki bu problem görüntüleme algoritmasının uygulanmasıyla giderilebilir. Şekil 3.7'de ise bir görüntüleme algoritmasının kullanılması ile elde edilen görüntü verilmiştir. Elde edilen görüntüde noktasal hedefler odaklanmış bir şekilde görülmektedir. Menzil göç ettirme algoritması (Zhu ve ark., 2017; Wang ve ark., 2020), Gİ (Yigit ve ark., 2013; Özdemir ve ark., 2014) ve Kirchoff

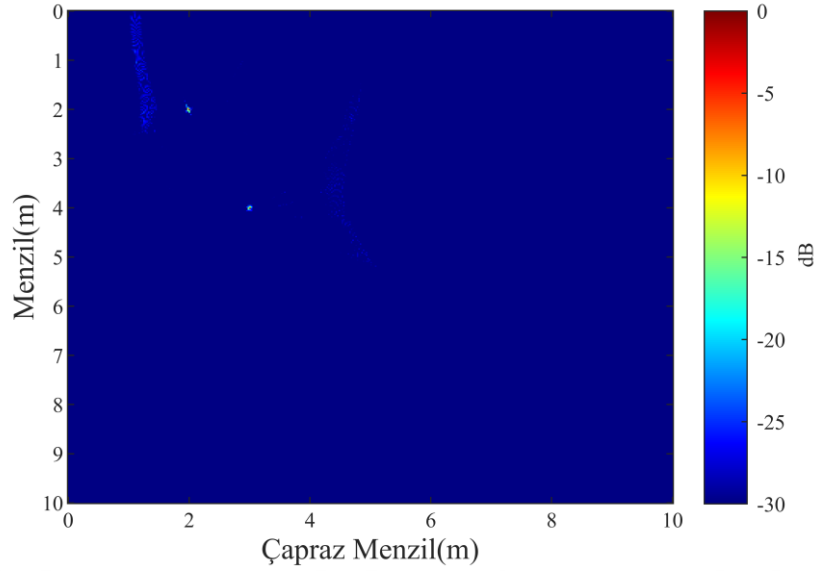
göç ettirme (Zhuge ve ark., 2010b) algoritmaları en popüler görüntüleme algoritmaları arasındadır. Bu tez çalışmasında görüntüleme algoritması olarak Gİ kullanılmıştır.



Şekil 3.5. İki noktasal hedefe ait SAR ham verisi



Şekil 3.6. SAR ham verisine TFD uygulanarak elde edilen SAR görüntüsü



Şekil 3.7. Görüntüleme algoritması uygulanarak elde edilmiş SAR görüntüsü

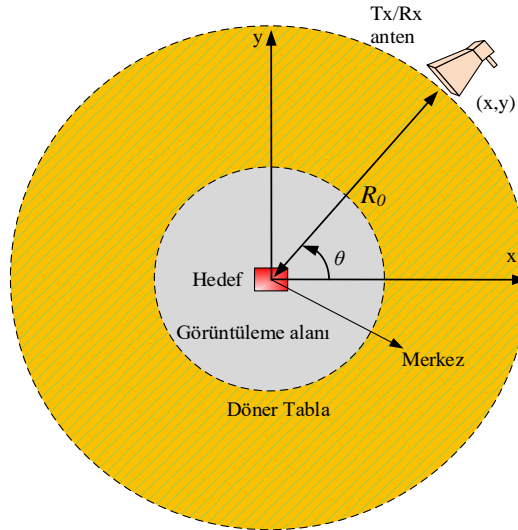
3.4.1. İki boyutlu görüntüleme için geri izdüşüm algoritması

TSAR görüntüleme geometrisi Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Adım frekanslı sürekli dalga radarı için (x, y, z) konumundaki hedeften yansıyan radar sinyali, $S(k)$ aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Demirci ve ark., 2012),

$$S_{\theta_i}(k_r) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x, y) e^{-jk_r R_{p,i}} dx dy \quad (3.6)$$

$$R_{p,i} = \sqrt{(R_0 \times \cos(\theta_i) - Rhx_p)^2 + (R_0 \times \sin(\theta_i) - Rhy_p)^2} \quad (3.7)$$

Burada k_r iki yönlü dalga yayılım sabitini, $\rho(x, y)$ hedefin yansıtırlık fonksiyonunu, p hedefin indisini, i antenin azimut açısı indisini, R_0 antenden görüntüleme alanının merkezine olan uzaklığı, $R_{p,i}$ p . hedefin antene olan uzaklığını, Rhx_p p . hedefin x eksenindeki konumunu, Rhy_p p . hedefin y eksenindeki konumunu ve θ azimut açısını değerlerini ifade eder.



Şekil 3.8. TSAR görüntüleme geometrisi

SAR görüntülerinin odaklanmasında kullanılan başlıca algoritmalarından birisi geri izdüşüm (Gİ) algoritmasıdır. Gİ algoritması temel olarak menzil profilleri üzerinden işlem yapılarak uygulanmaktadır (Mersereau ve Oppenheim, 1974; Demirci ve ark., 2012). Her bir açıklıktaki menzil profili toplanan sinyalin ters Fourier dönüşümü (TFD) alınarak elde edilebilir. Menzil profili $s_{\theta_a}(r)$ şu şekilde ifade edilebilir (Demirci ve ark., 2012),

$$s_{\theta_i}(r) = TFD\{S_{\theta_i}(k_r)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x, y) \delta(R_p - r) dx dy \quad (3.9)$$

Aynı şekilde hedefin yansıtıcılık fonksiyonunun ise ifadesi şu şekilde yazılabilir,

$$\rho(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\theta_i}(k_r) e^{jk_r R_p} dx dy \quad (3.10)$$

Polar koordinatlar için tekrar yazılırsa şu şekilde olur,

$$\rho(x, y) = \int_{-\pi}^{+\pi} \int_0^{+\infty} S_{\theta_i}(k_r) e^{jk_r R_p} k_r dk_r d\theta_a \quad (3.11)$$

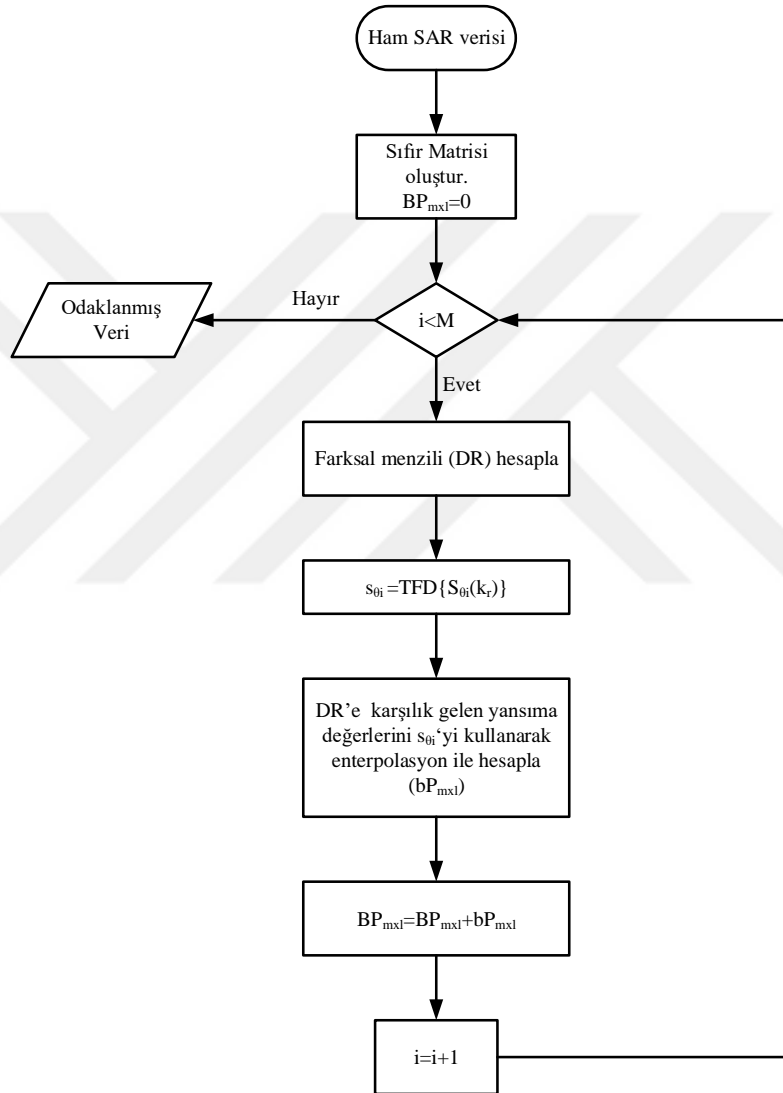
Bu denklemde içerdeki integral şu şekilde tanımlanabilir,

$$q_{\theta_i}(R_p) = TFD\{S_{\theta_i}(k_r) k_r\} = \int_0^{+\infty} S_{\theta_a}(k_r) e^{jk_r R_p} k_r dk_r \quad (3.12)$$

Böylece $\rho(x, y)$ son ifadesi şu şekilde olur (Demirci ve ark., 2012),

$$\rho(x, y) = \int_{-\pi}^{+\pi} q_{\theta_i}(R_{p,i}) d\theta_i \quad (3.13)$$

Algoritmanın akış diyagramı Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. 2B tarama için Gİ algoritması akış diyagramı

3.4.2. Üç boyutlu görüntüleme için geri izdüşüm algoritması

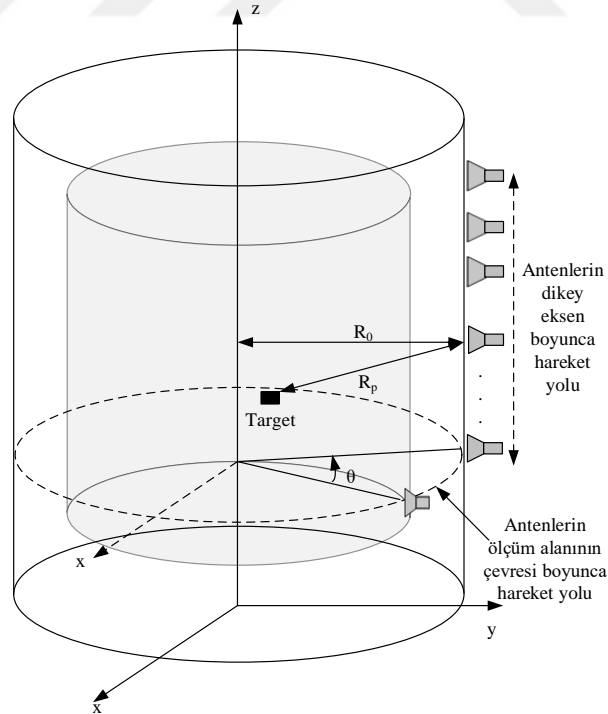
Silindirik tarama için görüntüleme geometrisi Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Adım frekanslı sürekli dalga radarı için hedeften yansıyan radar sinyali, $Es_a(k_r)$ aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Demirci ve ark., 2012; Özdemir ve ark., 2014; Gao ve ark., 2018),

$$Es_a(k_r) = \int \int \int \rho(x, y, z) e^{-jkR_{p,i,a}} dx dy dz \quad (3.14)$$

Burada $R_{p,i,a}$ (x_p, y_p, z_p) koordinatlarında bulunan hedeften $(x_i = R_0 \cos(\theta_i), y_i = R_0 \sin(\theta_i), z_a)$ koordinatlarındaki antene olan uzaklıktır. $R_{p,i,a}$ şu şekilde ifade edilebilir,

$$R_{p,i,a} = \sqrt{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + (z_p - z_a)^2} \quad (3.15)$$

Burada $k = \frac{4\pi f}{c}$ iki yönlü uzamsal frekans, $\theta \in \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M\}$ azimut açısı, $i \in [1 M]$ azimut açısı indisi, p hedefin indisi, $a \in [1 Z]$ antenin dikey konumundaki koordinatının indisi (z_a) ifade eder.



Şekil 3.10. Silindirik tarama geometrisi

Menzil profili $es_{i,a}$, hedeften geri yansıyan sinyale TFD uygulanarak elde edilebilir ve şu şekilde yazılabilir,

$$es_{i,a} = \iiint \rho(x, y, z) \delta(R - r) dx dy dz \quad (3.16)$$

Hedefin yansıtma fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir,

$$\rho(x, y, z) = \int_{-z/2}^{z/2} \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} ES_a(k_r) e^{jk_r R_{p,i,a}} dx dy dz \quad (3.17)$$

Denklem 3.18 silindirik koordinatlar için tekrar yazılırsa şu şekilde olur,

$$\rho(x, y, z) = \int_{-z/2}^{+z/2} \int_{-\pi}^{+\pi} \int_0^{\infty} ES_a(k_r) e^{jk_r R_{p,i,a}} k_r dk_r d\theta dz \quad (3.18)$$

Denklem 3.19 içindeki $ES_a(k_r)k_r$ ifadesi şu şekilde tekrar ifade edilebilir,

$$q_a(R_{p,i,a}) = TFD\{ES_a(k_r)k_r\} = \int_0^{+\infty} ES_a(k_r) e^{jk_r R_{p,i,a}} k_r dk_r \quad (3.19)$$

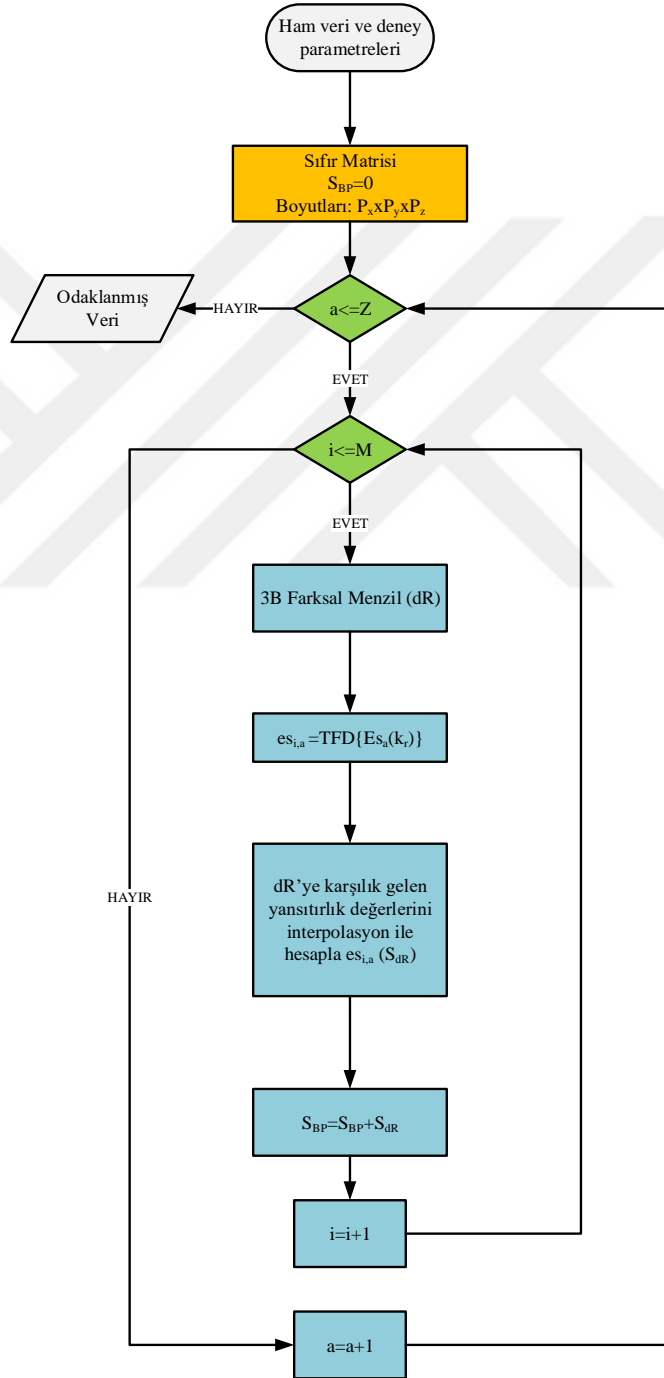
Böylece hedefin son yansıtma fonksiyonu şu şekilde ifade edilebilir,

$$\rho(x, y, z) = \int_{-z/2}^{z/2} \int_{-\pi}^{+\pi} q_a(R_{p,i,a}) d\theta dz \quad (3.20)$$

Denklem 3.21 z_a konumunda bulunan anten için geleneksel Gİ algoritmasının son ifadesidir. Algoritmanın akış döngüsü Şekil 3.11'de verilmiştir. Algoritmanın uygulanması şu adımlarla özetlenebilir,

- 1) Algoritma deney parametrelerinin tanımlanmasıyla başlar ve 3B S_{BP} sıfır matrisi oluşturulur ve bu aşamada $i = a = 1$ değerlerine sahiptir.
- 2) Algoritmanın ana aşaması z_a için başlar.
- 3) Algoritmanın ana aşamasında menzil profili hedeften alınan sinyale TFD uygulanarak θ_i açısı için elde edilir.
- 4) Olası hedef noktaların $(R_{p,i,a})$ uzaklıklarını içeren, farksal menzil (DR) matrisi antenin mevcut konumuna (θ_i ve z_a) bağlı olarak hesaplanır.
- 5) DR matrisindeki tüm $R_{p,i,a}$ değerlerine karşılık gelen yansıma değerleri menzil profili kullanılarak interpolasyon ile hesaplanır.

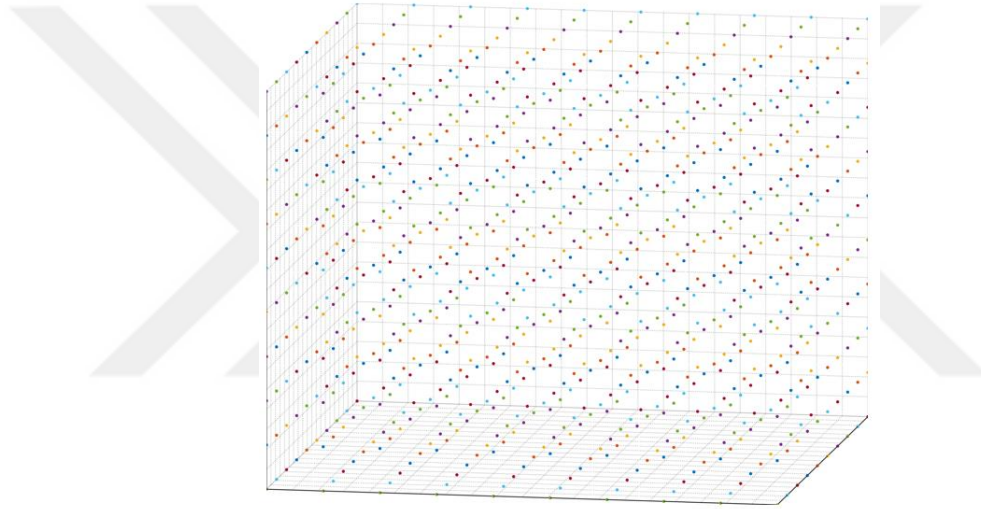
- 6) Elde edilen yansıma değerleri S_{BP} matrisi ile toplanır.
- 7) i değeri bir artırılır ve eğer i değeri M 'den küçükse, algoritma 3. Adıma giderek devam eder.
- 8) a değeri 1 artırılır ve eğer a değeri Z 'den küçükse algoritma 2. Adıma giderek devam eder. Aksi takdirde, algoritma durdurulur ve odaklanmış görüntü verisi elde edilmiş olur.



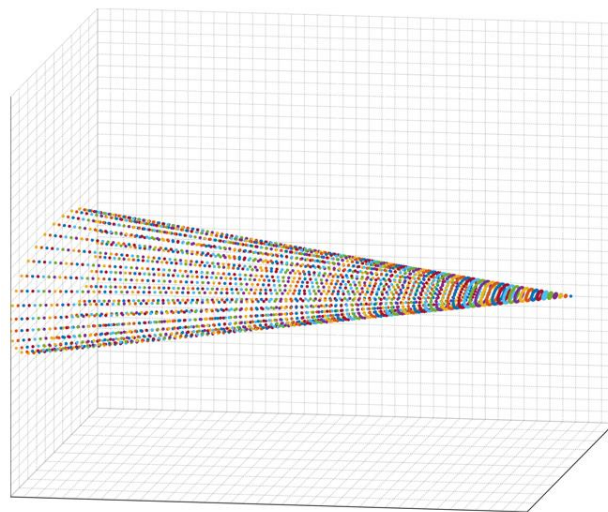
Şekil 3.11 3B-Gİ algoritması akış döngüsü

3.4.3. Üç boyutlu görüntüleme için önerilen geri izdüşüm algoritması

Geleneksel Gİ algoritmasında, Şekil 3.12’de görüldüğü gibi DR tüm görüntüleme alanı için belirlenir ve bu noktalara karşılık gelen yansıma değerleri hesaplanır. Fakat tüm noktalara karşılık gelen yansıma değerleri sürekli hesaplanarak S_{BP} matrisi ile toplandığı zaman görüntüde istenmeyen yankılar oluşabilir. Bu yüzden tüm noktalar yerine horn antenin ışınma paterniyle uyumlu bir şekilde konik bir bölge içerisinde kalan noktalar kullanılabilir. Böylece, Şekil 3.13’de gösterildiği gibi konik bir alan içerisinde kalan bölgedeki olası hedef noktalar antenin ışınma paterni içerisine karşılık gelen olası noktalar olacaktır.



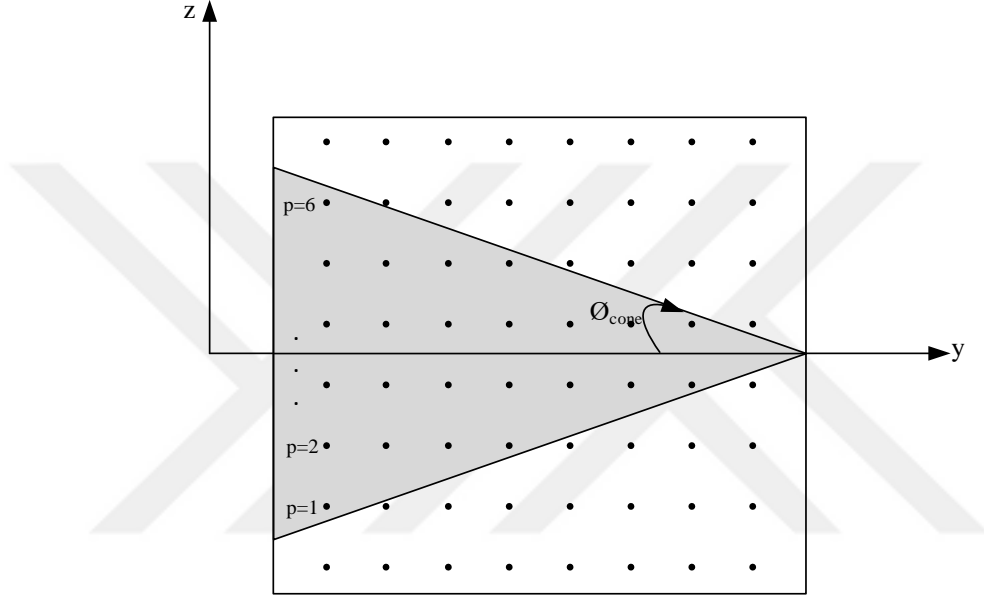
Şekil 3.12. Tüm görüntüleme alanı için piksel noktaları



Şekil 3.13. Konik bölge için piksel noktaları

Şekil 3.14'te konik bölge içerisindeki hedefin olası konum noktaları y-z düzlemi üzerinde gösterilmiştir. Konik bölge içerisindeki noktalar koninin tepe noktasının konumuna bağlı olarak bulunabilir. Bu noktalar ve koninin tepe noktası arasındaki açı şu şekilde hesaplanabilir,

$$\phi_p = \cos^{-1} \frac{\sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2}}{\sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_a - z_p)^2}} \quad (3.21)$$



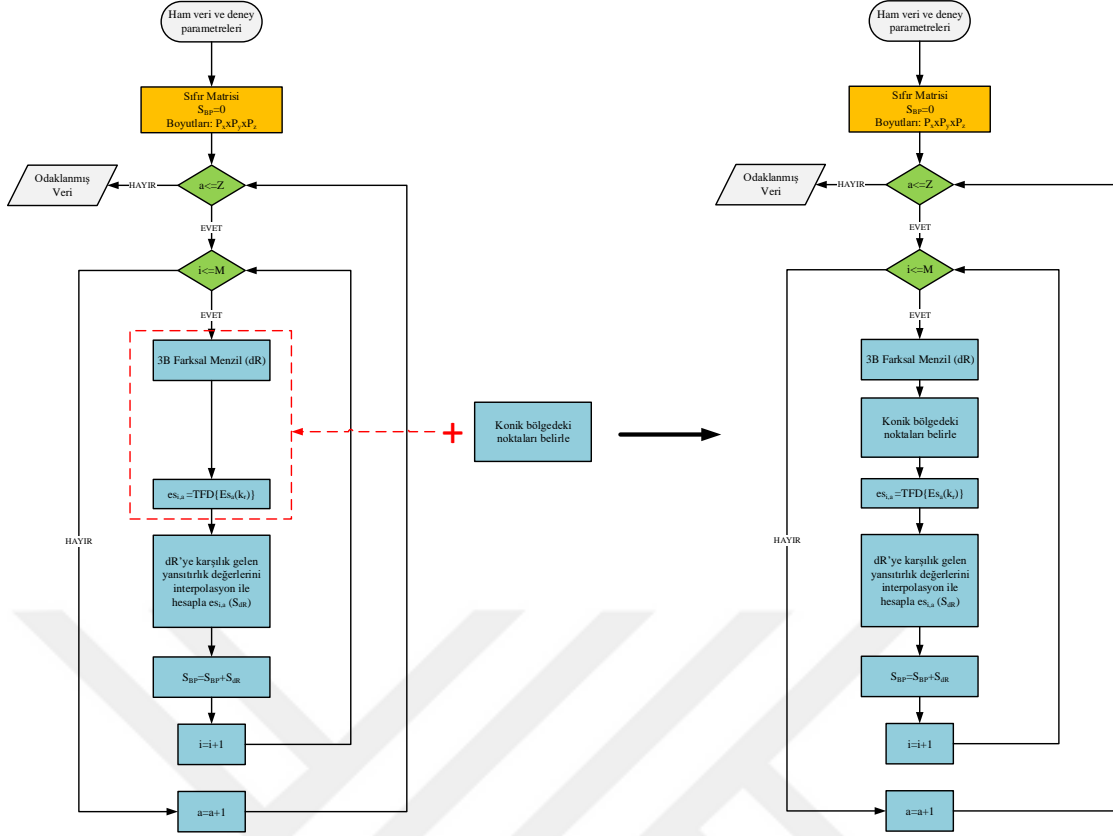
Şekil 3.14. Konik bölge içerisindeki noktaların y-z düzlemi üzerinde gösterimi

Eğer ϕ_p koninin katı açısından (ϕ_{cone}) küçükse bu nokta konik bölge içerisinde. Böylece Eşitlik 3.21 şu şekilde tekrar ifade edilebilir,

$$\rho(x, y, z) = \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^M q_a(R_{p,i,a}) \quad (3.22)$$

burada P konik bölge içerisindeki hedef noktanın son indis değeridir.

Önerilen yöntemde toplam interpolasyon nokta sayısı azaldığı için algoritmanın çalışma süresi de azalmaktadır. Önerilen algoritmanın akış diyagramı Şekil 3.15'de verilmiştir. Önerilen ve geleneksel Gİ algoritmalarının performansı benzetim ve deneysel çalışmalarla Bölüm 4'te verilmiştir.



Şekil 3.15. Önerilen 3B-Gİ algoritması akış döngüsü

3.5. Değerlendirme Metrikleri

mmD 3B görüntüleme için önerilen yöntemin performansını ölçmek için tümleşik yan lob oranı (ISLR) ve hesaplama yükü olmak üzere iki farklı metrik kullanılmıştır. ISLR odaklama algoritmasının hedef dışı yansımalarının bir göstergesi iken, hesaplama karmaşıklığının yeniden yapılandırılması için gereken matris işleme yükünü verir. Bu iki metrik, yüksek çözünürlük ve hızlı sonuçların gerekli olduğu uygulamalar için etkili bir karşılaştırma parametresi olarak kullanılmaktadır (Martinez ve Marchand, 1993).

3.5.1. Tümleşik yan lob oranı

ISLR görüntüleme algoritmalarının performansını değerlendirmek için kullanılan parametrelerden birisidir (Martinez ve Marchand, 1993). ISLR tüm enerjinin -3 dB eşik değerinin altında kalan toplam enerjiye bölünmesiyle hesaplanır. $I'(x, y)$ 2B görüntü fonksiyonu için, ISLR'nin matematiksel ifadesi şu şekildedir,

$$ISLR = \frac{\int_{-3dB} I' dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} I' dx dy - \int_{-3dB} I' dx dy} \quad (3.23)$$

burada $\int_{-3dB} I' dx dy$ ve $\int_{-\infty}^{+\infty} I' dx dy$ sırasıyla $-3 dB$ seviyesine kadar olan toplam enerji ve toplam enerjinin tamamına karşılık gelir.

3.5.2. Hesaplama yükü

Hesaplama yükü algoritmanın görüntüyü odaklama süresini doğrudan etkilemesi nedeniyle algoritmaların değerlendirilmesinde önemli parametrelerden birisidir. Geleneksel Gİ ve konik Gİ algoritması kullandıkları interpolasyon noktaları açısından değerlendirilmiştir. Görüntüleme alanı için P_x , P_y , ve P_z piksel sayılarına sahip bir görüntü odaklanırken geleneksel Gİ algoritması toplam $P_x \times P_y \times P_z$ adet interpolasyon noktası için işlem yapar. Çizelge 3.1'de bazı görüntüleme alanları için ve piksel sayıları için geleneksel ve konik Gİ algoritmalarının karşılaştırmalı olarak sonuçları verilmiştir. Çizelge 3.1.'den görüldüğü gibi interpolasyon nokta sayısı 2 ile 10 kat arasında görüntüleme alanı boyutlarına bağlı olarak azalmıştır. Görüntüleme alanı boyutları küçüldükçe geleneksel Gİ ve konik Gİ interpolasyon noktalarının oranı azalmıştır. Fakat görüntüleme alanı büyüdükçe daha büyük alan daha az nokta kullanılarak görüntü odaklanabilmektedir.

Çizelge 3.1. Geleneksel ve önerilen Gİ algoritmalarının interpolasyon nokta sayıları

\emptyset_{cone}	Voksel	Görüntüleme Alanı Boyutları	İnterpolasyon Nokta Sayısı		Oran (Geleneksel Gİ/Önerilen Gİ)
			Geleneksel Gİ	Önerilen Gİ	
5	$100 \times 100 \times 100$	$1 m \times 1 m \times 1 m$	10^6	102905	9.71
10	$100 \times 100 \times 100$	$1 m \times 1 m \times 1 m$	10^6	207414	4.82
5	$100 \times 100 \times 100$	$0.5 m \times 0.5 m \times 0.5 m$	10^6	180815	5.53
10	$100 \times 100 \times 100$	$0.5 m \times 0.5 m \times 0.5 m$	10^6	352823	2.83

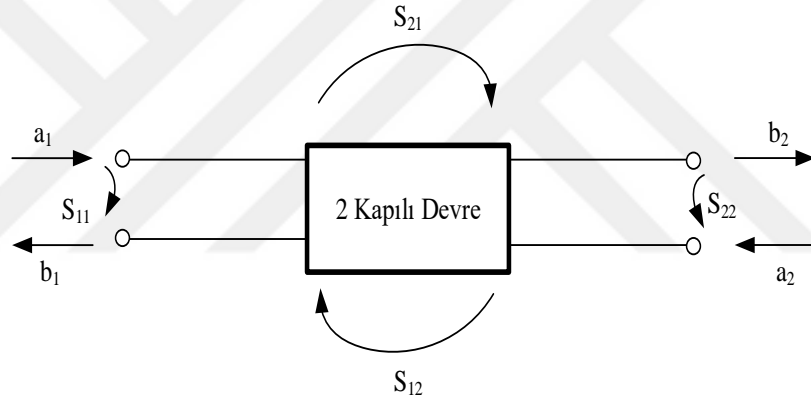
3.6. Saçılma Parametreleri

Saçılma parametreleri, aynı zamanda S parametreleri olarak bilinir ve anten gibi mikrodalga elemanlarının tasarımında ve karakteristiklerinin çıkartılmasında sıkça kullanılmaktadır. L kapılı devre için S matrisi şu şekilde ifade edilir,

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ b_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \dots & S_{1L} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \dots & S_{2L} \\ & & \cdot & & \\ & & \cdot & & \\ & & \cdot & & \\ & & \cdot & & \\ & & \cdot & & \\ S_{L1} & S_{L2} & S_{L3} & \dots & S_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \alpha_L \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

burada 1, 2, 3, ... L kapıları için $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots \alpha_N$ giren dalga gerilimi, $b_1, b_2, b_3 \dots b_N$ gelen dalga gerilimleridir. S parametreleri ise bu gerilimler arasındaki ilişkidir.

Şekil 3.16'da verilen iki kapılı bir devre yapısı gösterilmiştir. Bu iki kapılı devre yapısı iki tane antenin kullanıldığı bir sistem olarak da düşünülebilir.



Şekil 3.16. İki kapılı devre ve S parametreleri

Bu bağlamda, bu sistem için S parametreleri şu şekilde yazılabilir,

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} = \Gamma_1 \quad \text{Birinci kapı için yansımaya katsayısı (} a_2 = 0 \text{)} \quad (3.25)$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} = T_{21} \quad \text{Birinci kapıdan ikinci kapıya iletim katsayısı (} a_2 = 0 \text{)} \quad (3.26)$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} = \Gamma_2 \quad \text{İkinci kapı için yansımaya katsayısı (} a_1 = 0 \text{)} \quad (3.27)$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_1} = T_{12} \quad \text{İkinci kapıdan birinci kapıya iletim katsayısı (} a_1 = 0 \text{)} \quad (3.28)$$

Burada S_{11} ifadesi birinci antenin yansıma katsayısını yani sinyalin ne kadarının geri yansıdığını gösterirken, aynı şekilde S_{22} de ikinci antenin yansıma katsayısını gösterir. S_{21} birinci antenin ikinci antene olan girişimini ifade ederken, S_{12} ise tam tersi olarak ikinci antenin birinci antene olan girişimini ifade eder.

3.7. Görüntü Çözünürlüğü

Radar görüntüleme de görüntü iki ana görüntü çözünürlüğü üzerinden değerlendirilmektedir. Bunlar menzil ve çapraz menzil çözünürlüğüdür. Menzil çözünürlüğü radarın menzil yönündeki çözünürlüğünü ifade etmek için kullanılırken, çapraz menzil çözünürlüğü ise radarın veya hedefin hareket yönüne bağlı olarak ortaya çıkan çözünürlüğü ifade etmek için kullanılmaktadır (Demirci ve ark., 2012).

Radarın menzil çözünürlüğü ise kullanılan frekansın bant genişliğine bağlıdır. Radarın çözünürlüğü şu şekilde hesaplanır,

$$dr = \frac{c}{2B} \quad (3.29)$$

burada c elektromanyetik dalganın boşlukta yayılma hızı yani ışık hızıdır.

Radarın tarama yapabileceği menzil ise dr ve Şekil 3.1'de gösterilen AFSDR'nin frekans bandının nokta sayısı N 'ye bağlı olarak şu şekilde ifade edilebilir,

$$R_{max} = N \cdot dr \quad (3.30)$$

Çapraz menzil çözünürlüğü TSAR görüntüleme için sırasıyla şu şekilde ifade edilebilir,

$$dc = \frac{\lambda_c}{2\theta_{max}} \quad (3.31)$$

Burada λ_c radarın merkez frekansına karşılık gelen dalga boyu, θ_{max} hedefin taranma açısının maksimum değeridir.

3.8. Vektör Network Analizör

Vektör network analizör (VNA) vektörel olarak S parametrelerini analiz eden cihazdır. VNA genel olarak RF cihazların performansını ölçmek için tercih edilmektedir. Bunun yanında, radar ölçümleri için de kullanılmaktadır. Bu tez

çalışmasında gerekli olan AFSDR sinyali VNA ile üretilerek hedeften yansıyan sinyaller toplanmıştır. Deneysel çalışmalarda VNA olarak, Keysight N5224 PNA kullanılmıştır. Bu VNA 10 MHz'den 43.5 GHz'e kadar çalışma frekansına sahiptir ve 2 adet portu bulunmaktadır. VNA'ya ait bir görüntü Şekil 3.17'de verilmiştir. Cihazın kalibrasyonu için Şekil 3.18'de gösterilen Keysight 85056D DC-50 GHz kalibrasyon kiti kullanılmıştır.



Şekil 3.17. Keysight N5224A VNA



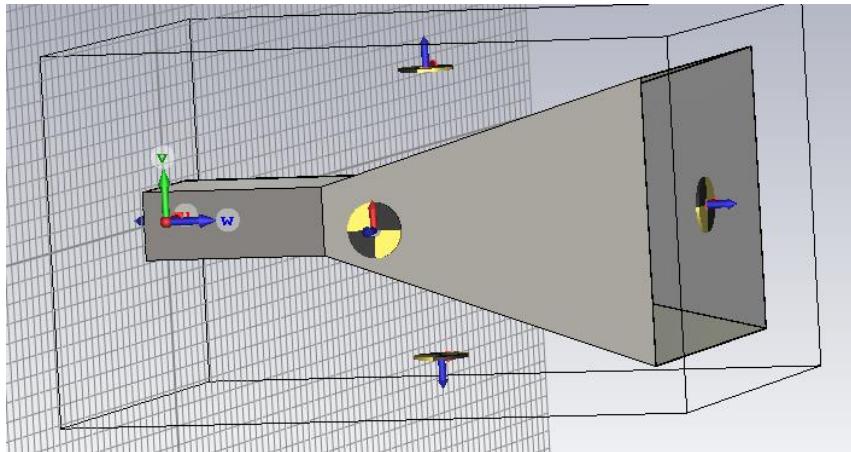
Şekil 3.18. Keysight 85056D kalibrasyon kiti

3.9. Computer Simulation Technology Yazılımı

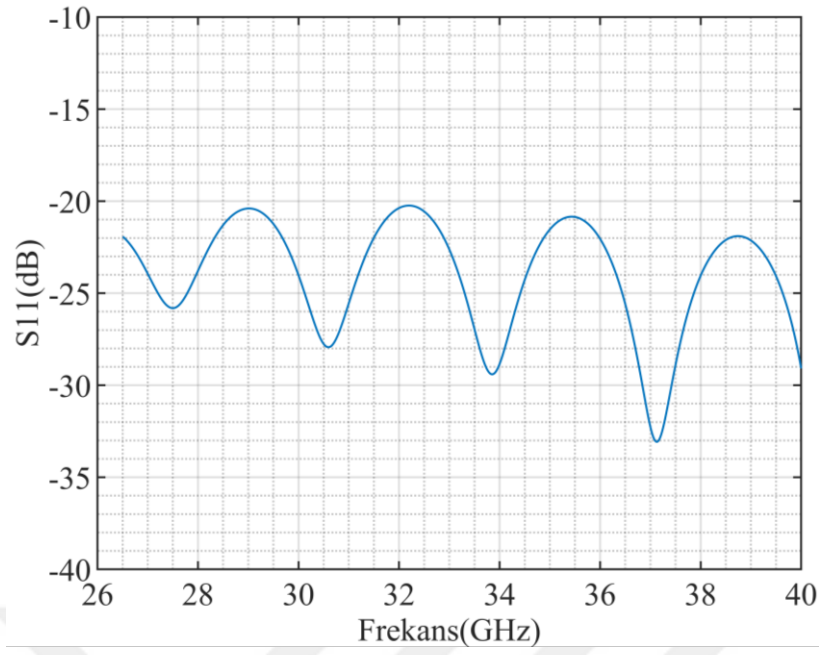
Computer simulation technology (CST) (Studio, 2017) elektromanyetik uygulamaları gerçekleştirmek için kullanılan bir benzetim yazılımıdır. CST anten tasarımı, radar kesit alanı ve frekans seçici yüzey tasarımı gibi uygulamaların gerçekleştirildiği birçok modüle sahiptir (Yigit ve Duysak, 2019). Bu çalışmada, tasarlanan horn antenin benzetim performansı CST ortamında hesaplanmıştır.

3.10. Horn Anten

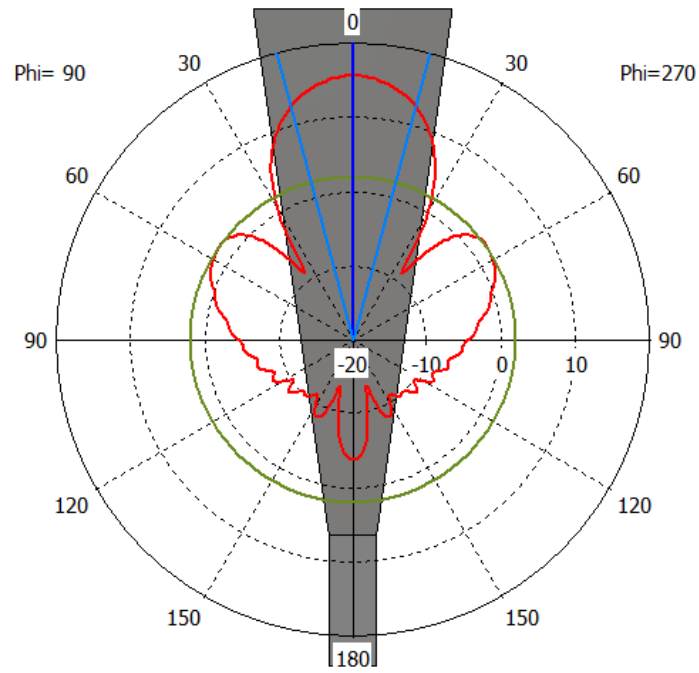
VNA ile üretilen sinyalin hedef bölgeye gönderilmesi ve hedeften yansıyan sinyalin toplanması için horn tipi anten kullanılmıştır. Horn antenler yüksek kazanç, geniş frekans bandı ve yönlülük gibi önemli özelliklere sahiptir. Ayrıca basit yapıda olmaları nedeniyle deney sistemlerine kolayca montajlanabilmektedir. Bu antenler besleme ve açıklık (flare) olmak üzere iki yapıdan oluşur. Beslemeleri dalga kılavuzu ile gerçekleştirilmektedir. Dalga kılavuzunun boyutları frekans bandına göre değişir ve önceden belirlenmiş standart boyutlarda üretilmektedir. CST ortamında tasarlanan horn antenin görüntüsü Şekil 3.19’da verilmiştir. Anten üretilmeden önce CST ortamında S_{11} parametresi (Şekil 3.20) ve ışınma örüntüsü (Şekil 3.21) gözlemlenmiştir. Daha sonra antenin üretimi gerçekleştirilmiştir. Antenin flare kısmı lazer sinterleme yöntemi ile alüminyum malzemeden üretilmiştir. Bu çalışmada Ka bandı için tasarlanan (26.5-40 GHz) ve WR-28 olarak adlandırılan dalga kılavuzu beslemesi kullanılmıştır. Üretilen horn antenin görüntüsü Şekil 3.22’de verilmiştir. Antenin S_{11} saçılma parametresi VNA ile ölçülmüştür. S_{11} grafiği Şekil 3.23’te verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi tüm frekans bandı için S_{11} değeri -10 dB’nin altındadır.



Şekil 3.19. CST ortamında tasarlanan antenin görüntüsü



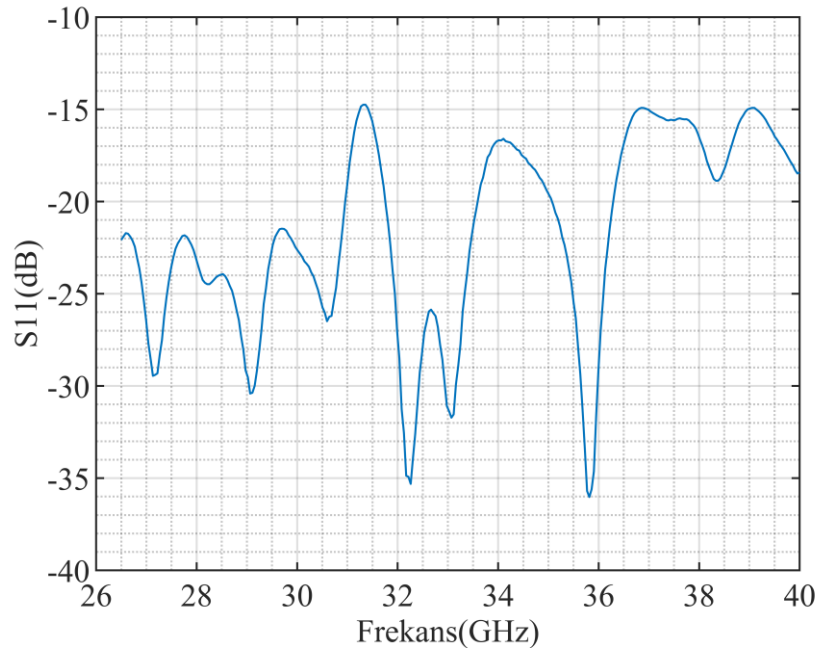
Şekil 3.20. CST ortamında elde edilen S_{11} saçılma parametresi grafiği



Şekil 3.21. CST ortamında horn antenin ışıma örüntüsü



Şekil 3.22. Horn antenin montajlanmış görüntüsü



Şekil 3.23. Horn antenin S_{11} ölçüm grafiği

3.11. Döner Tabla

Döner tabla bir motor yardımıyla istenilen açıya göre dönen bir platformdur. Anten ışınma örüntüsü, radar kesit alanı ve TSAR gibi uygulama alanlarının

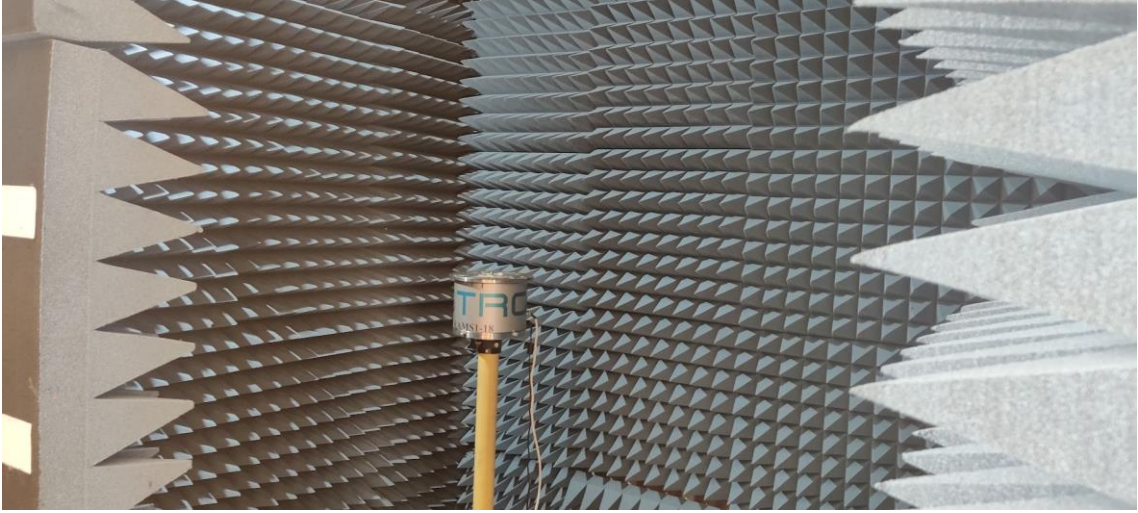
ölçümlerinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada hedefin döndürülmesi için kullanılmıştır. Kullanılan EBTRO EAMS döner tabla Şekil 3.24’de verilmiştir.



Şekil 3.24. EBTRO döner tabla

3.12. Yankısız Oda

Yankısız oda, ölçüm ortamının elektromanyetik dalgalardan izole edilmesi için tasarlanmıştır. Ses ve elektromanyetik dalgalarının kullanıldığı çalışmalarda bu odalara ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece, çevreden ölçüm ortamına gelen sinyaller veya ölçüm ortamından çevreye yayılacak sinyaller izole edilmiş olur. Bu odalar, sadece soğurucu malzemeler kullanılarak inşa edilirse yarı yankısız oda olarak adlandırılır. Odanın dışarıyı iyi iletken plakalar ile kaplanırsa tam yankısız oda elde edilir. Ayrıca, bu odayla uyumlu kameralar ölçümleri gerçekleştirirken takip için kullanılabilir. Bu çalışmada, Şekil 3.25’te verilen sadece soğurucu malzemeden oluşan yarı yankısız odada deneyler gerçekleştirilmiştir. Böylece, duvarlardan veya yerden gelecek yansımaların etkisi yok edilmiştir.



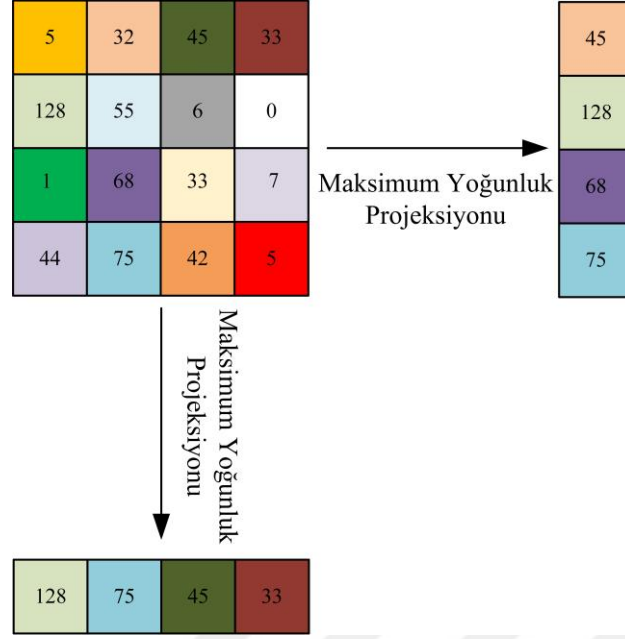
Şekil 3.25. Deneylerde kullanılan yarı yankısız oda

3.13. MATLAB

MATLAB mühendislik alanlarında sayısal hesaplama yazılımlarının geliştirildiği bir programdır. MATLAB, öncelikli olarak sahip olduğu gelişmiş matematiksel altyapısı nedeniyle sayısal hesaplamalar için kullanılır. Bunun haricinde, sinyal işleme, kontrol sistemleri, makine öğrenmesi, bulanık mantık, görüntü işleme, optimizasyon, istatistik ve daha birçok alanda kullanılan araç kutularına sahiptir. Bu çalışmada, geliştirilen yazılımlar MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir.

3.14. Maksimum Yoğunluk Projeksiyonu

Maksimum yoğunluk projeksiyonu bir veri içerisindeki belirlenen bir yön doğrultusunda maksimum verilerin alınarak alt bir veri oluşturulmasına olanak verir. 2B boyutlu bir sinyalin bir doğrultuda yani satır veya sütun boyunca maksimum değerleri alınarak 1B veriye dönüştürülebilir. Aynı şekilde, üç boyutlu bir görüntü verisi de x-y, x-z veya y-z düzlemleri boyunca maksimum değerleri alınarak 2B görüntü verilerine dönüştürülebilir. Böylece 3B görüntüdeki anlamlı veriler 2B görüntü üzerinde daha kolay bir şekilde analiz edilebilir. Bu çalışmada, üç boyutlu görüntüler üzerine maksimum yoğunluk projeksiyonu uygulanarak 2B görüntüler elde edilmiştir. Maksimum yoğunluk projeksiyonun 2B veri üzerinde bir örnek gösterimi Şekil 3.26'da verilmiştir. Örnekte iki yönde elde edilen bir boyutlu maksimum yoğunluk projeksiyon verileri görülmektedir.



Şekil 3.26. Maksimum yoğunluk projeksiyonu örnek gösterimi

3.15. Benzetim Verisinin Oluşturulması

Bu çalışmada benzetim verileri MATLAB ortamında oluşturulmuştur. B ve C tarama tipleri için belirlenen parametreler doğrultusunda noktasal hedeflere ait saçılma verileri elde edilmiştir. Geri saçılım sinyali AFSDR tipine göre hesaplanmıştır.

B tarama verisini elde etmek için, P adet hedefe ait geri yansıyan sinyal N adet AFSDR frekansı ve M adet sentetik açıklık noktası için şu şekilde tanımlanmıştır,

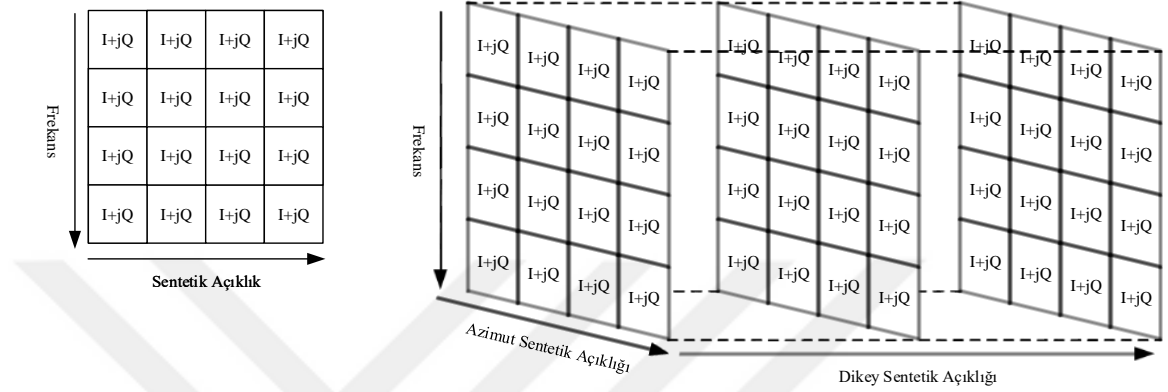
$$S_{2B} = \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^M \sum_{n=1}^N A e^{\frac{-j2\pi f_n 2R_{p,i}}{c}} \quad (3.32)$$

C tarama verisini elde etmek için, P adet hedefe ait geri yansıyan sinyal N adet AFSDR frekansı, M adet yatay sentetik açıklık noktası ve Z adet dikey sentetik açıklık noktası için şu şekilde tanımlanmıştır,

$$S_{3B} = \sum_{a=1}^Z \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^M \sum_{n=1}^N A e^{\frac{-j2\pi f_n 2R_{p,i,a}}{c}} \quad (3.33)$$

3.16. Verinin Toplanması

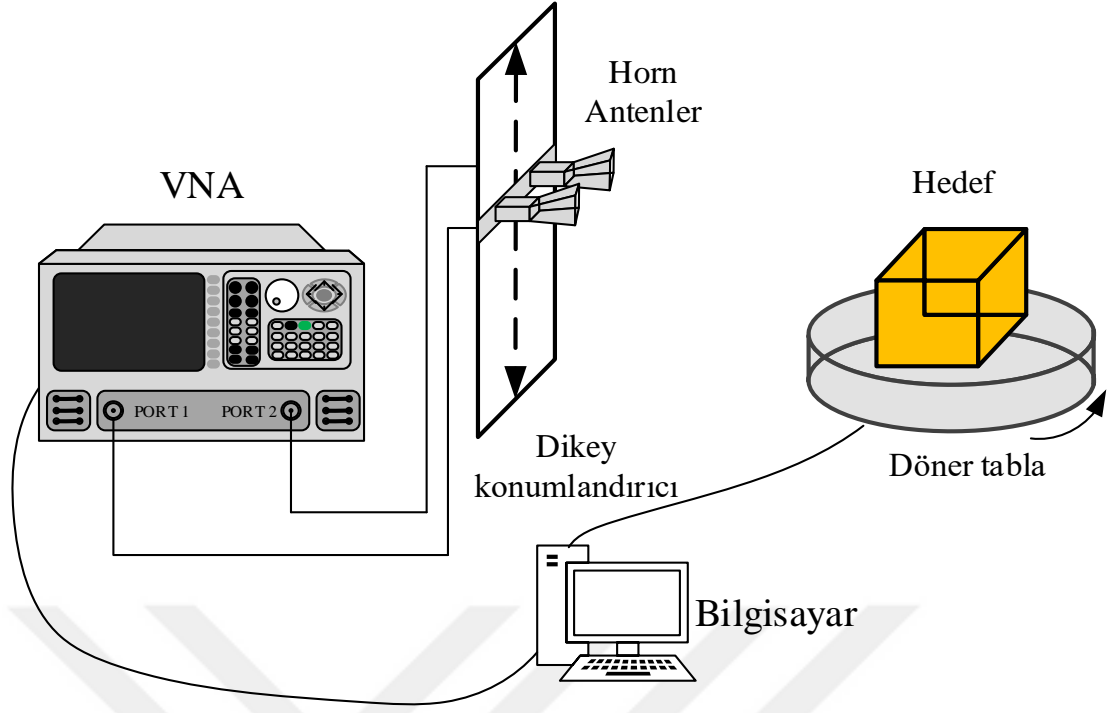
Veriler MATLAB ortamında VNA ile bağlantı kurularak bilgisayar ile toplanmıştır. Her bir sentetik açıklıkta her bir frekansa karşılık gelen karmaşık sinyal değeri, $I + jQ$ formatında kaydedilmiştir. Şekil 3.27’de B tarama ve C tarama için kayıt örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Veri kayıt matrisinin gösterimi

3.17. Deney Sistemi

Deney sisteminin geometrisi Şekil 3.28’de verilmiştir. Deney sistemi EBTR0 EAMS döner tabla, 26.5-40 GHz frekanslarında çalışan horn antenler, dikey konumlandırıcı ve Keysight 5224A VNA ve bilgisayardan oluşmaktadır. VNA ile gerekli olan AFDSR işareti üretilmiştir. Antenler, VNA ile üretilen sinyalin hedef bölgeye gönderilmesi ve hedeften geri yansıyan sinyalleri toplamak için kullanılmıştır. Silindirik tarama geometrisi döner tabla ve dikey konumlandırıcı ile sağlanmıştır. Antenlerin herbir dikey konumunda, hedef döner tabla ile döndürülmüştür. Hedefin herbir azimut ve z eksenini açıklığı için geri yansıyan sinyaller (S_{21}) bilgisayar ile kayıt edilmiştir. Böylece hedefe ait 3B tarama verisi elde edilmiştir.



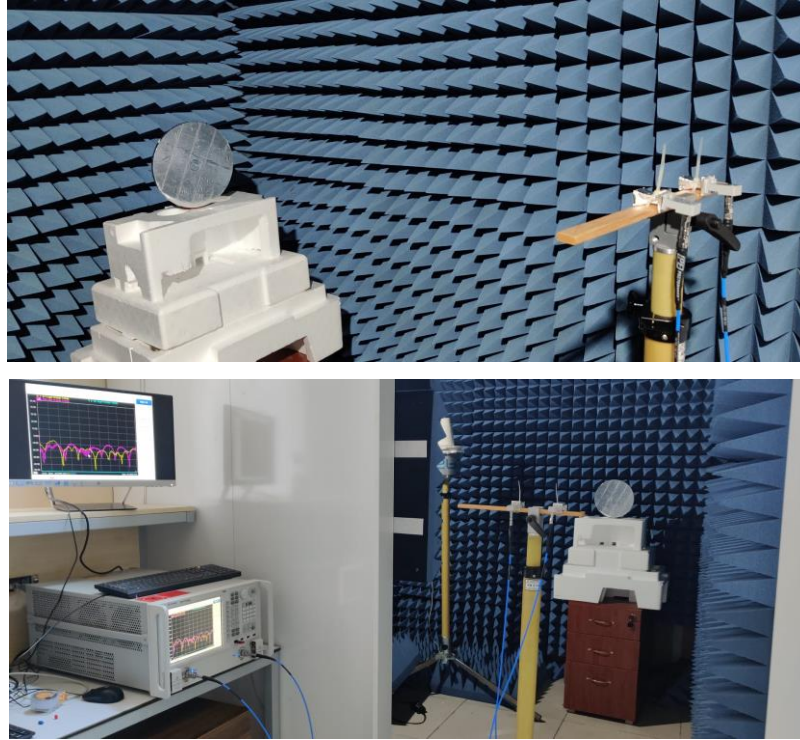
Şekil 3.28. Deney Sistemi

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

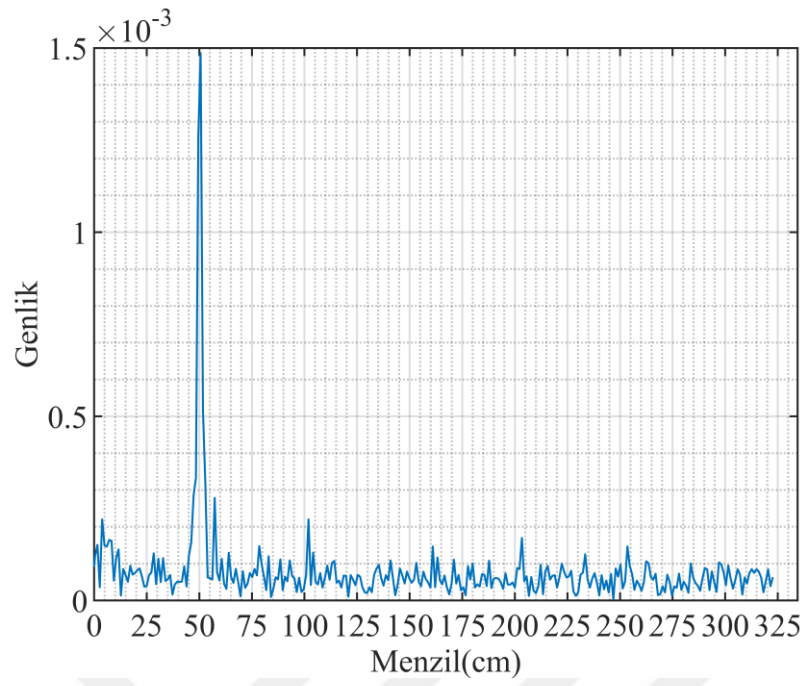
Bu bölümde gerçekleştirilen benzetim ve deneysel çalışmalardan bahsedilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek verilmiştir.

4.1. A Tarama Deneyleri

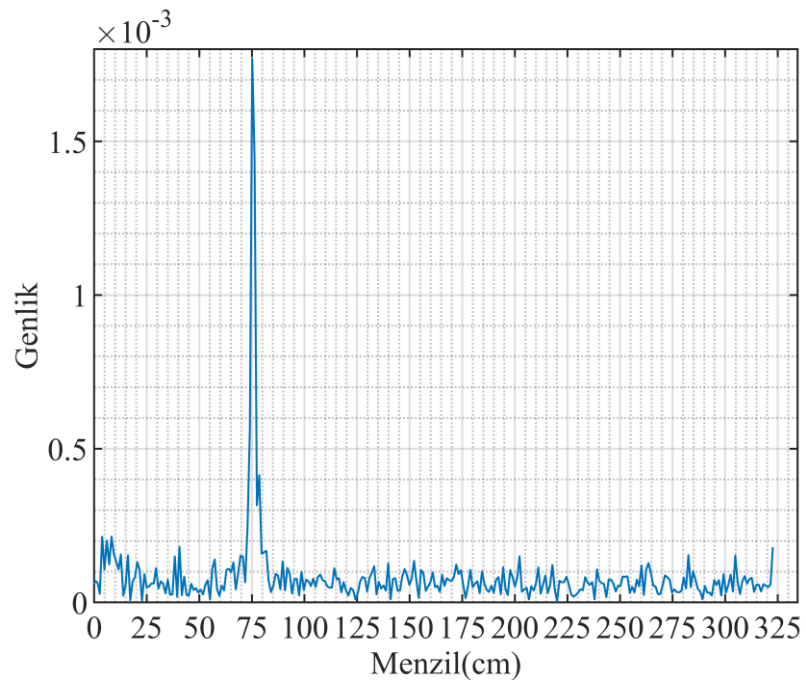
2B ve 3B deneysel çalışmalardan önce deney sisteminin hassaslığını gözlemek için bir hedefin uzaklığının tespiti için deneyler yapılmıştır. Şekil 4.1’de deney anından görüntüler verilmiştir. Hedef sırasıyla antenden 50, 75 ve 100 cm uzaklığa yerleştirilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 26.5-40 GHz bandında toplam 301 frekans noktası için toplanmıştır. Elde edilen sinyallere TFD uygulanarak menzil profilleri elde edilmiştir. Menzil profilleri Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te hedefin konumuna göre sırasıyla verilmiştir. Hedef antenden 50 cm uzaklıktayken, menzil profilinde 50.63 cm olarak tespit edilmiştir. Hedef antenden 75 cm uzaklığa yerleştirildiğinde, menzil profilinde hedefin menzili 75.16 cm olarak belirlenmiştir. 100 cm yerleştirildiği zaman, hedefin menzili 99.68 cm olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan ve menzil profillerinden görüldüğü gibi hedefin antene olan uzaklığı hassas bir şekilde tespit edilmiştir.



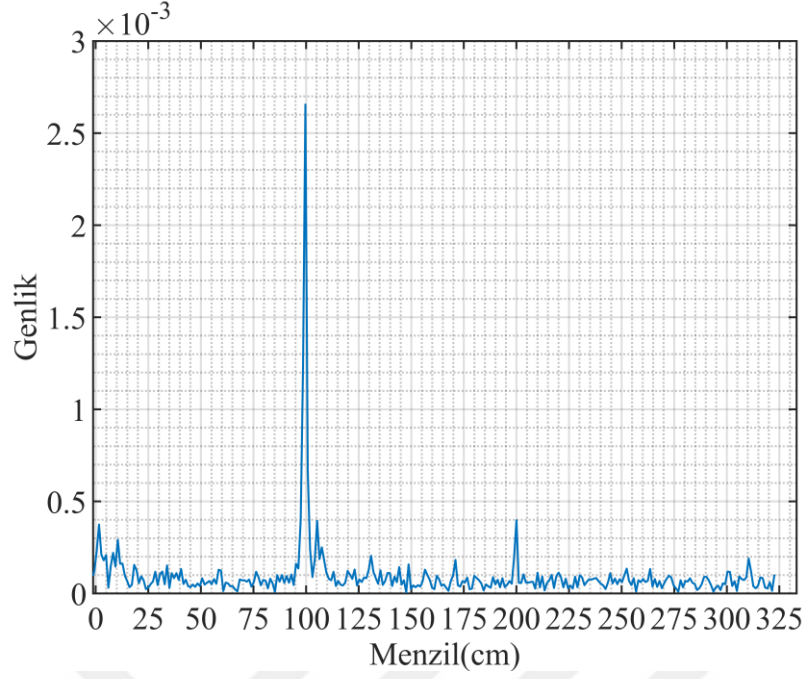
Şekil 4.1. Deney anından görüntüler



Şekil 4.2. 50cm uzaklıktaki hedefe ait menzil profili



Şekil 4.3. 75cm uzaklıktaki hedefe ait menzil profili



Şekil 4.4. 100cm uzaklıktaki hedefe ait menzil profili

4.2. B Tarama Deneyleri

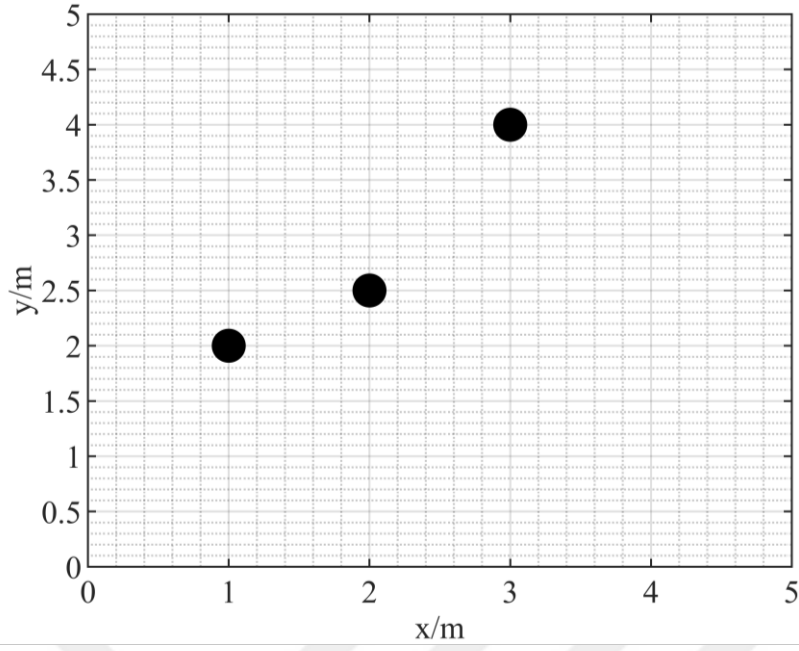
Bu bölümde B tarama tipi kapsamında, önce Gİ algoritması bir SAR benzetim çalışması ile algoritmanın aşamaları gösterilerek verilmiştir. Daha sonra gerçekleştirilen TSAR deneyleri anlatılmıştır.

4.2.1. Sentetik açıklık deneyi

Bu bölümde bir benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Gİ algoritmasının aşamaları bir SAR uygulamasıyla gösterilmiştir.

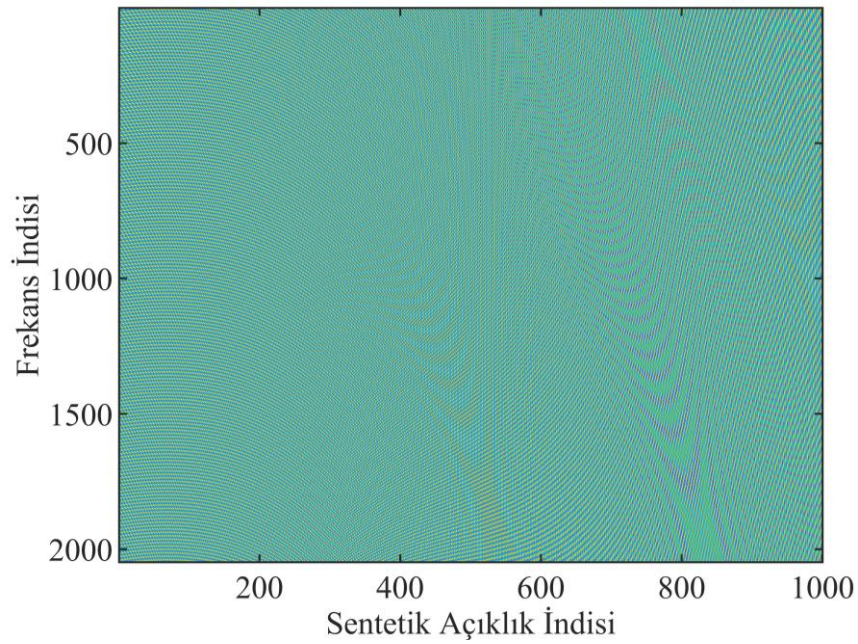
4.2.1.1. Benzetim Çalışması

Benzetim çalışmasında Şekil 4.5'te konumları verilen üç noktasal hedef kullanılmıştır. Hedefler $x=0$ m'den $x=5$ m'ye kadar toplam 1000 kesikli nokta boyunca taranmıştır. Frekans aralığı toplam 301 adım noktası için 26.5-40 GHz'dir. Böylece üç noktasal hedefe ait geri saçılma verisi 1000 sentetik açıklık ve 301 frekans noktası için Eşitlik 3.32 kullanılarak MATLAB ortamında oluşturulmuştur.

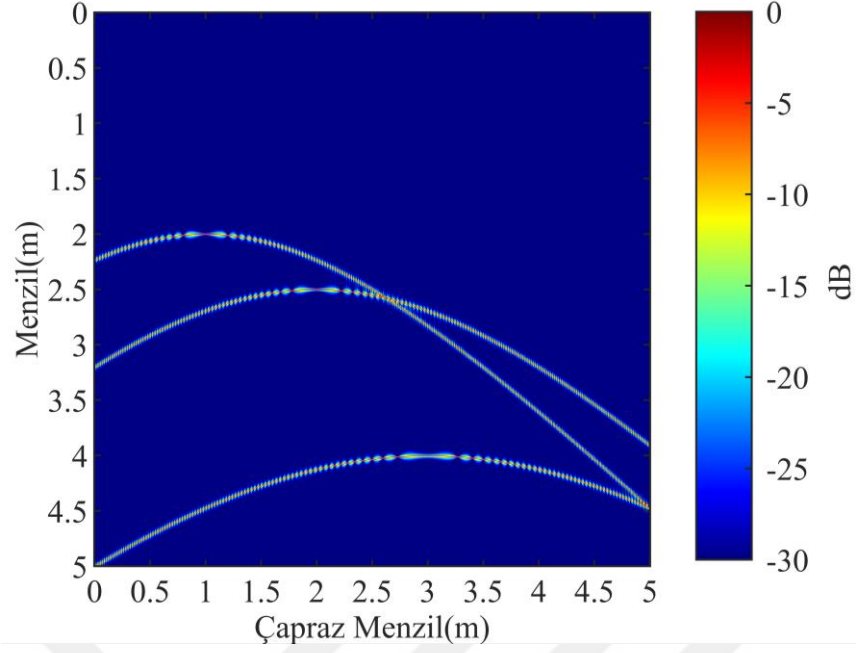


Şekil 4.5. Noktasal hedeflerin konumları

Elde edilen ham verinin görüntüsü Şekil 4.6'da verilmiştir. Ham veriye TFD uygulanarak elde edilen görüntü Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Şekil 4.7'de hedeflerin görüntüsü odaklanmamış ve hiperbolik eğriler olarak görülmektedir.

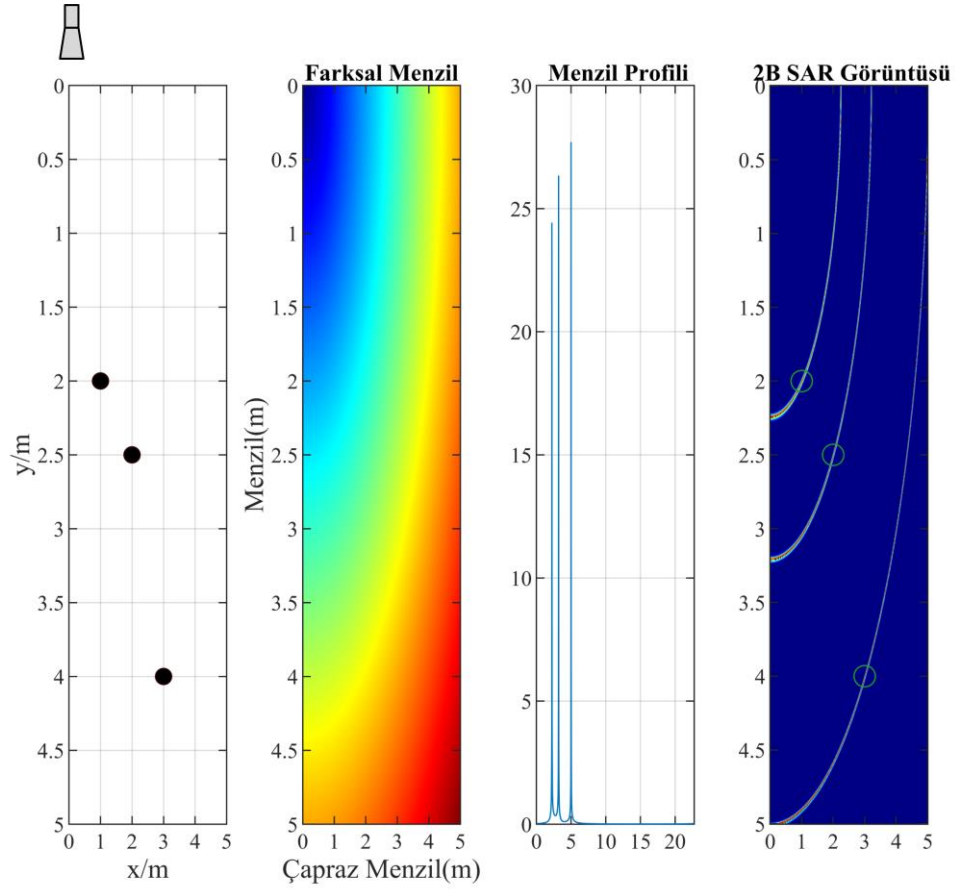


Şekil 4.6. SAR ham verisi

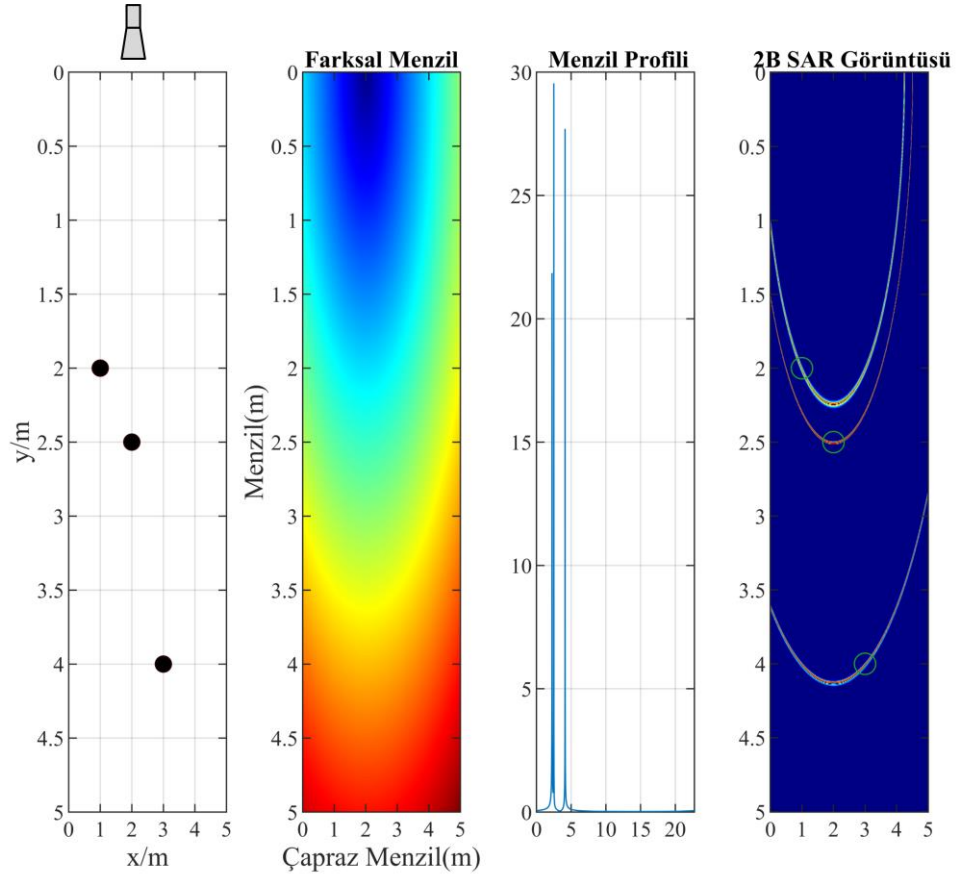


Şekil 4.7. TFD uygulanmış SAR ham verisi

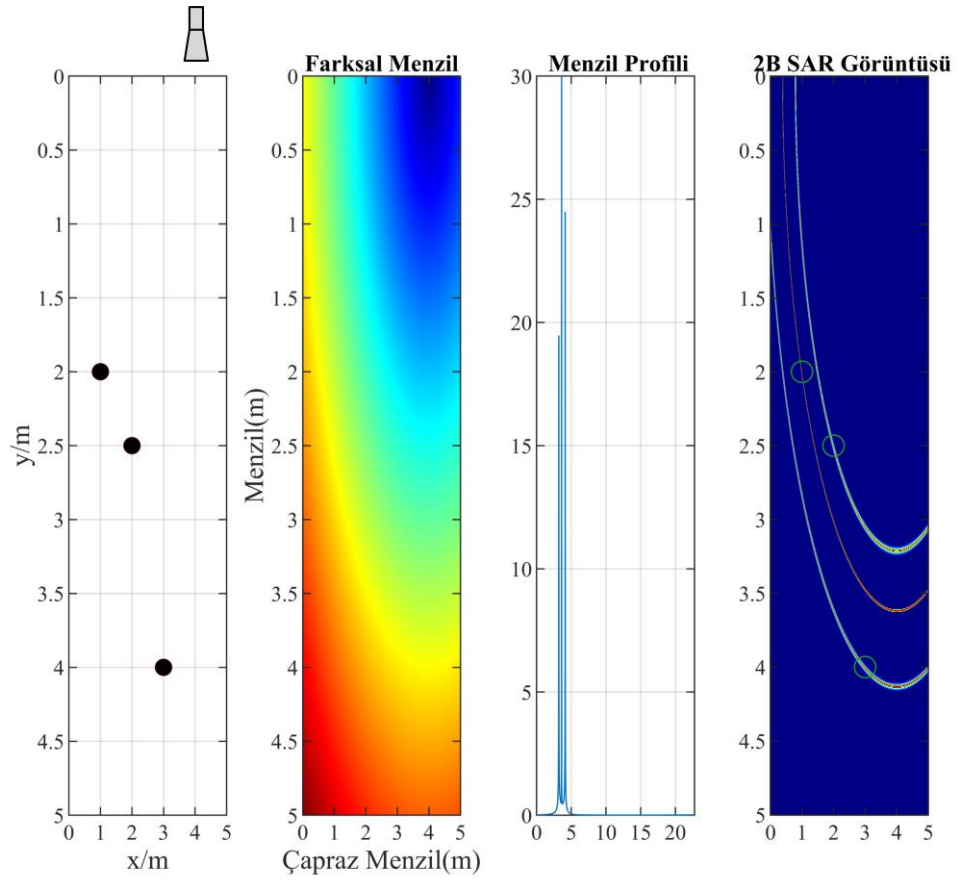
Odaklanmış SAR görüntüsünü oluşturmak için Gİ algoritması uygulanmıştır. Algoritmanın ara aşamalarında kullanılan farksal menzili ve menzil profili 4 farklı sentetik açıklık noktası için Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Ayrıca, interpolasyon sonucunda elde edilen SAR görüntüleri de verilmiştir. Şekiller incelendiği zaman, interpolasyon çizgilerinin hedeflerin bulunduğu konumlarda geçtiği görülmektedir. Algoritma interpolasyon işlemleri sonrasında oluşturulan bu görüntü verilerini toplayarak odaklanmış görüntüyü elde eder. Odaklanmış görüntü Şekil 4.12’de verilmiştir.



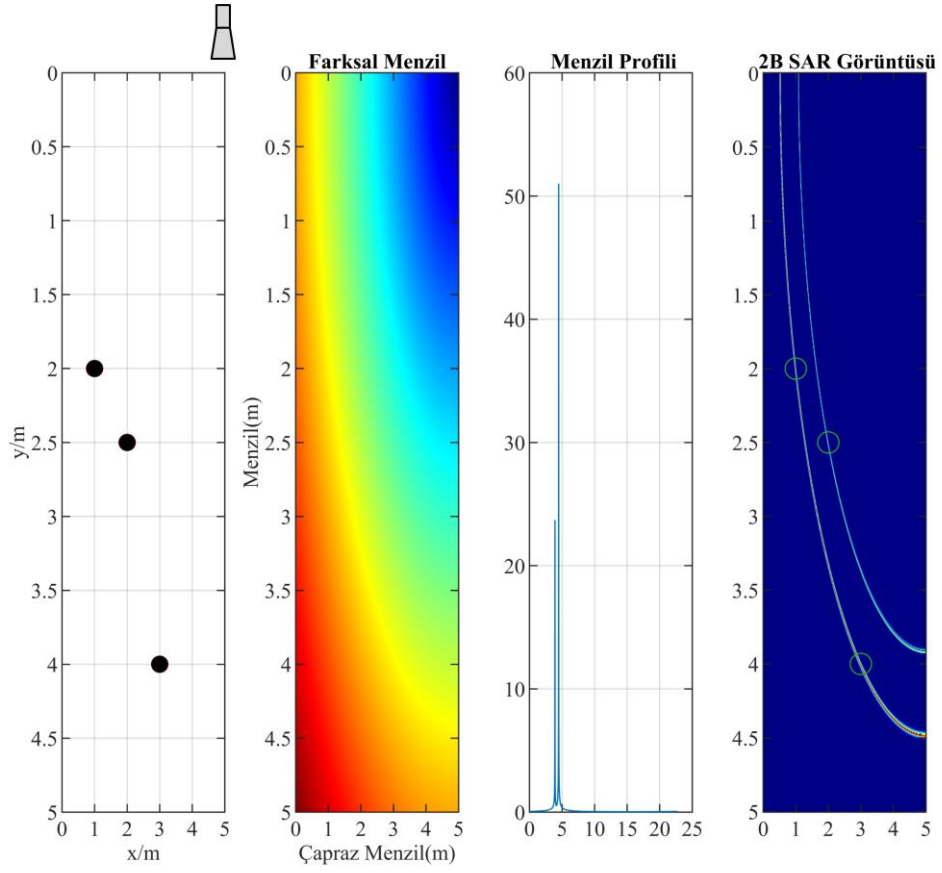
Şekil 4.8. Anten 0 konumundayken farksal menzil, menzil profili ve SAR görüntüsü



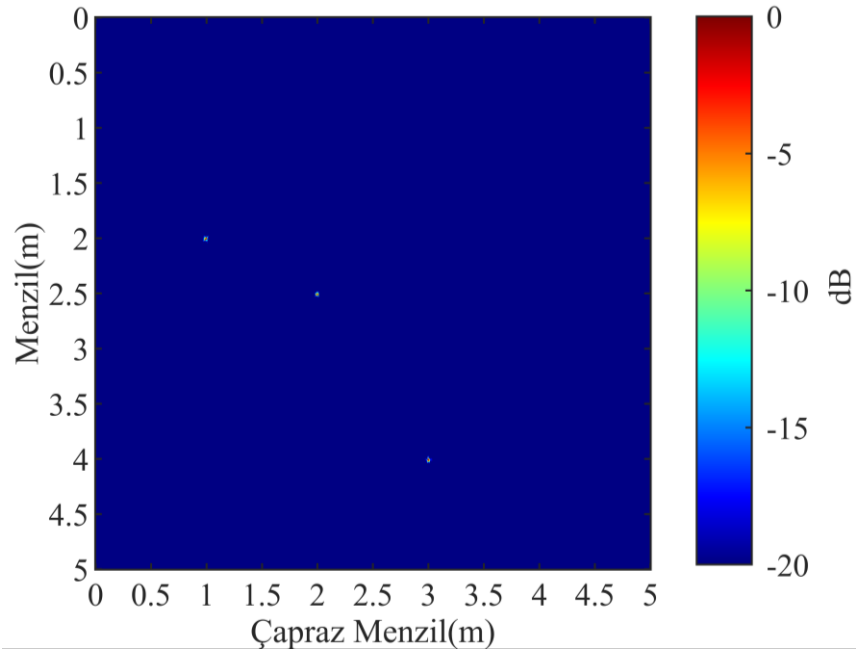
Şekil 4.9. Anten sentetik açıklıkta 2m'ye geldiği zaman elde edilen farksal menzil, menzil profili ve SAR görüntüsü



Şekil 4.10. Anten sentetik açıklıkta 4m'ye geldiği zaman elde edilen farksal menzil, menzil profili ve SAR görüntüsü



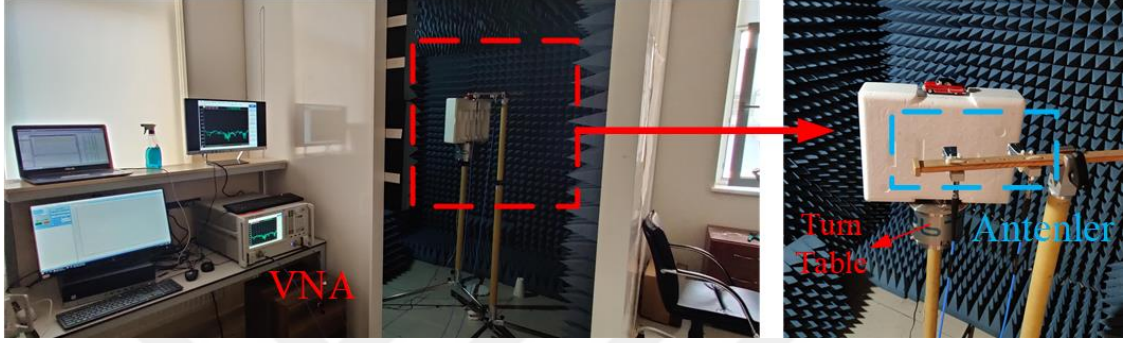
Şekil 4.11. Anten sentetik açıklıkta 5m'ye geldiği zaman elde edilen farksal menzil, menzil profili ve SAR görüntüsü



Şekil 4.12. Gİ algoritması ile odaklanmış SAR görüntüsü

4.2.2. Ters sentetik açıklık deneyleri

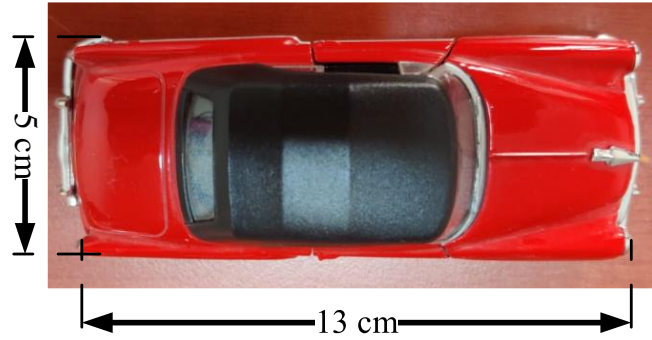
TSAR deneyleri için oluşturulan deney düzeneği Şekil 4.13'te verilmiştir. Deney düzeneği VNA, horn antenler, döner tabla ve bilgisayardan oluşmaktadır. Döner tabla ile hedef döndürülmüş ve hedeften geri yansıyan sinyaller toplanmıştır. Metal model araba, metal kutu ve tekstil örtülmüş metal kutuya ait TSAR görüntüleri aşağıda verilmiştir.



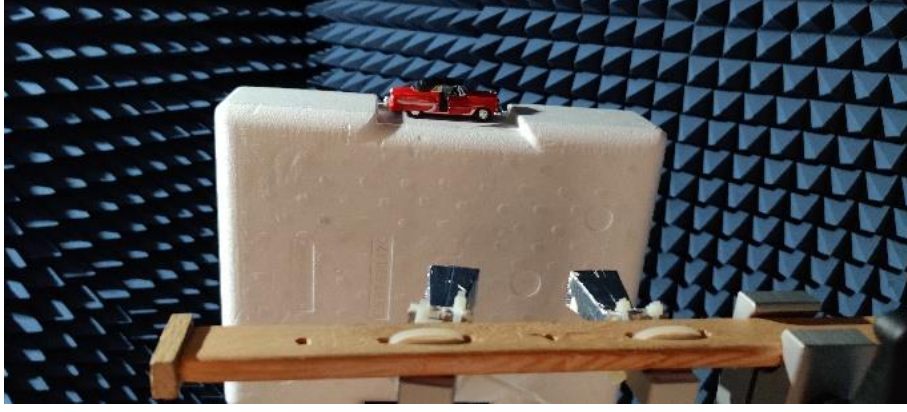
Şekil 4.13. Deney düzeneğinden görüntüler

4.2.2.1. Deneysel çalışma-1 metal model araba deneyi

Bu deneyde metal model bir araba deney düzeneğine yerleştirilerek veriler toplanmıştır. Hedefin görüntüleri Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te verilmiştir.

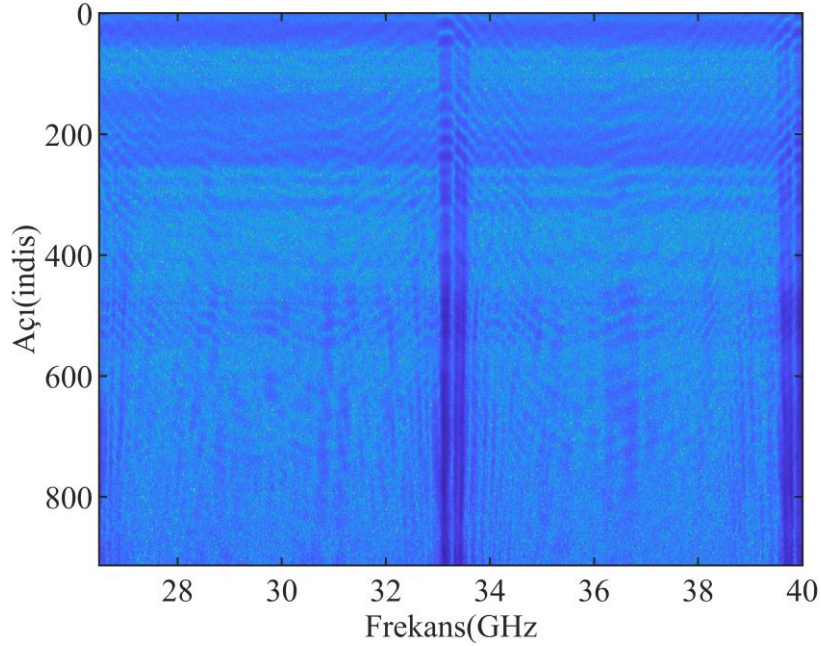


Şekil 4.14. Model arabanın görüntüsü ve boyutları

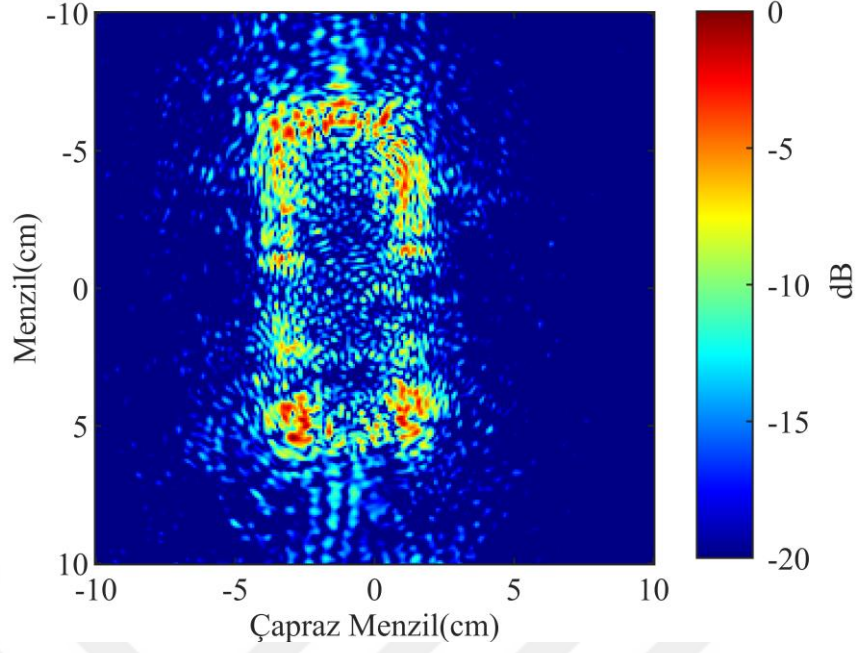


Şekil 4.15. Deney anından bir görüntü

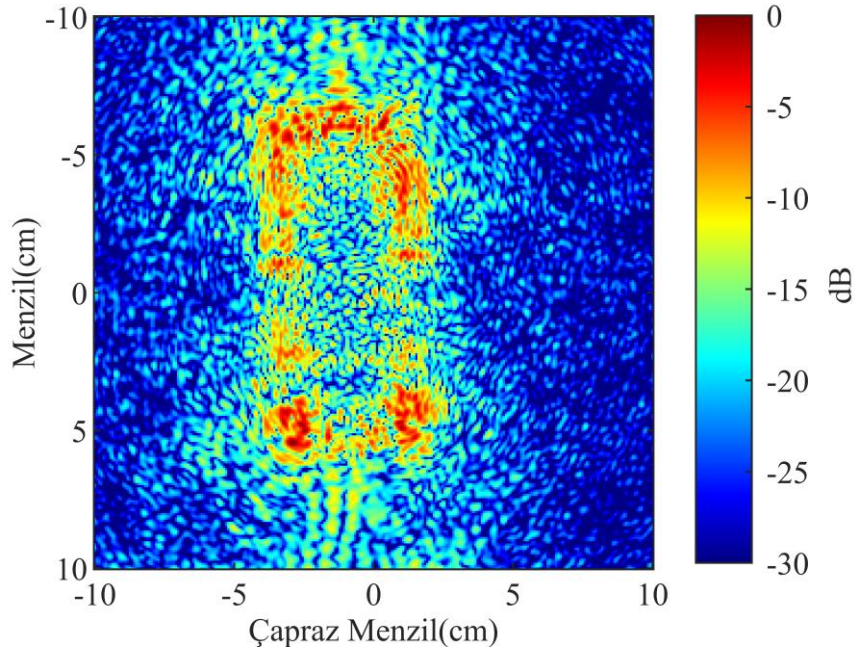
Hedef, 360° boyunca toplam 915 noktada taranarak yansıyan sinyaller toplanmıştır. Toplanan ham sinyalin görüntüsü Şekil 4.16'da verilmiştir. Hedefin görüntüsünü oluşturmak için ham veriye Gİ algoritması uygulanmıştır. Gİ sonrası elde edilen model arabanın TSAR görüntüsü -20, -30 ve -40 dB eşik seviyelerine karşılık gelen görüntüleri Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'de verilmiştir. Model arabanın kapıları açık olarak ölçümler tekrarlanmış ve toplanan verinin ham görüntüsü Şekil 4.20'de verilmiştir. Gİ algoritması uygulandıktan sonra elde edilen görüntüler farklı eşik seviyeleri için Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te verilmiştir.



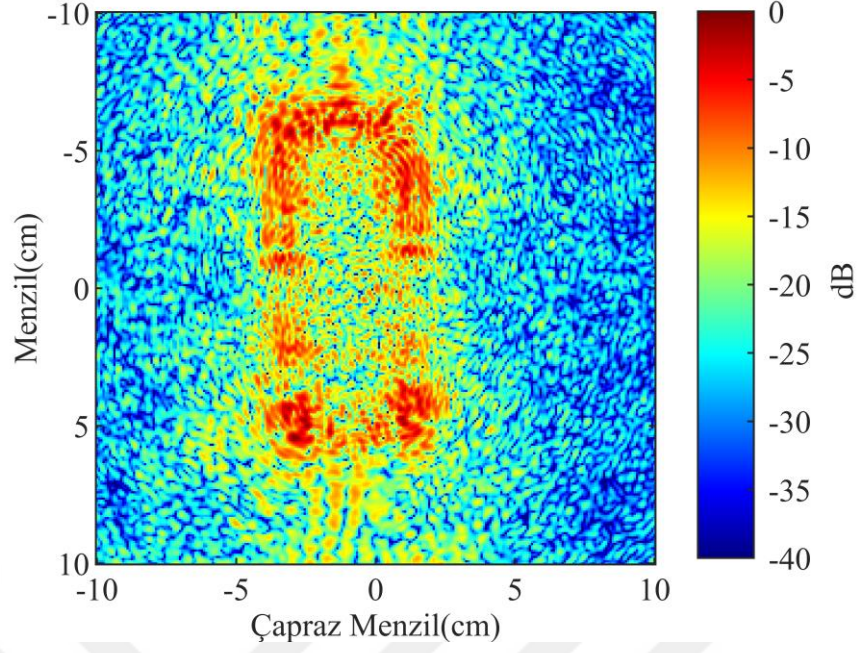
Şekil 4.16. Model Arabanın (kapılar kapalı) ham sinyalin görüntüsü



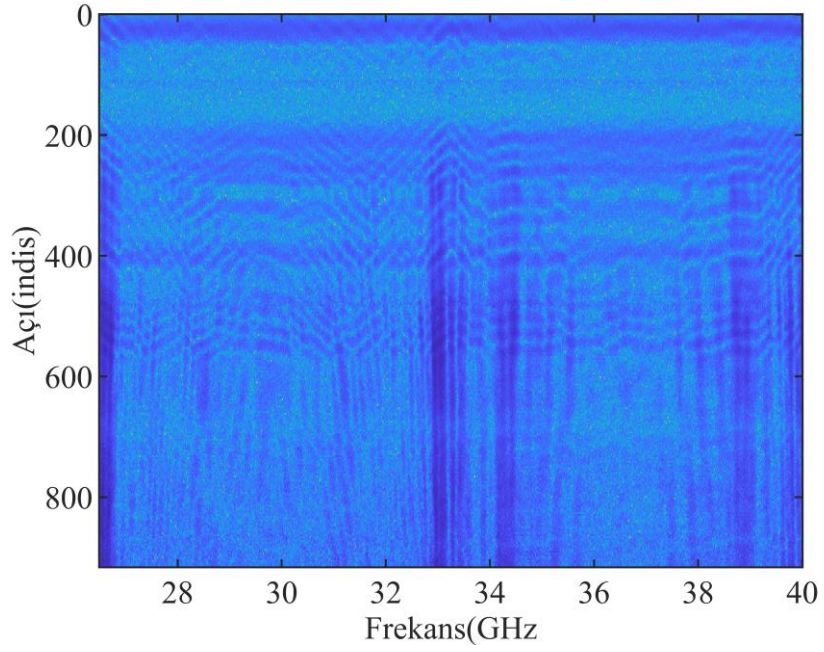
Şekil 4.17. Model arabanın (kapılar kapalı) -20 dB eşik seviyesinde TSAR görüntüsü



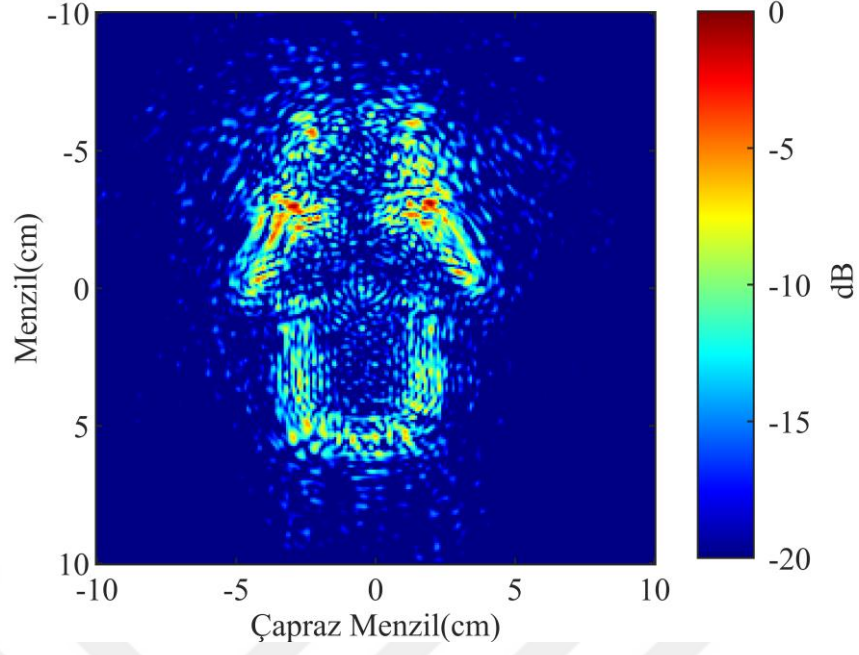
Şekil 4.18. Model arabanın (kapılar kapalı) -30 dB eşik seviyesinde TSAR görüntüsü



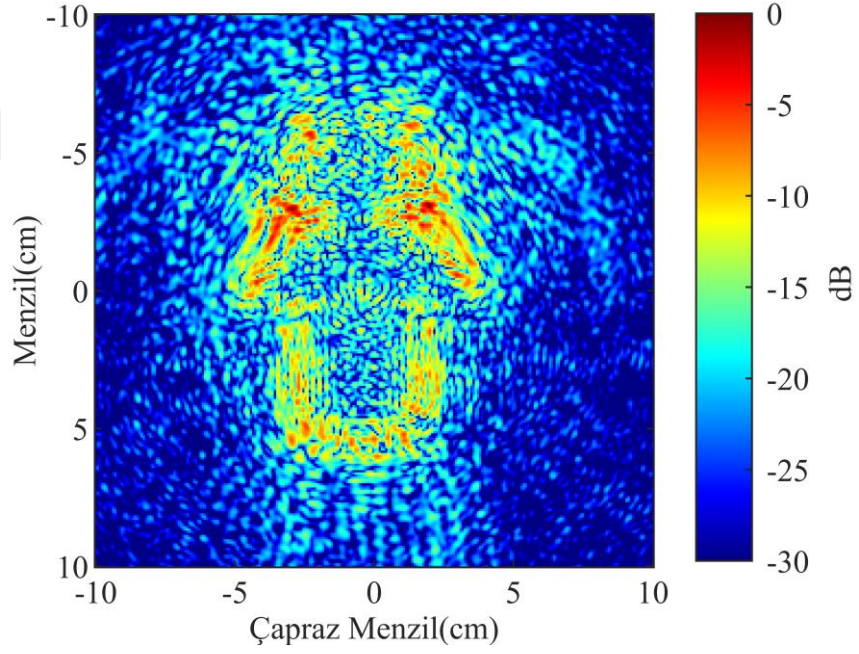
Şekil 4.19. Model arabanın (kapılar kapalı) -40 dB eşik seviyesinde TSAR görüntüsü



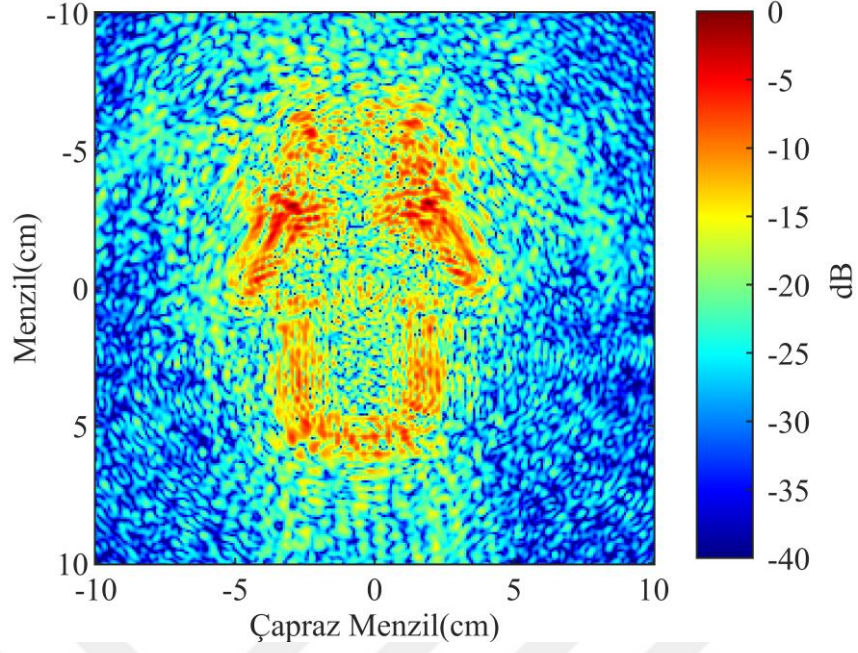
Şekil 4.20. Model Arabanın (kapılar açık) ham sinyalin görüntüsü



Şekil 4.21. Model arabanın (kapılar açık) 20 dB seviyesinde TSAR görüntüsü



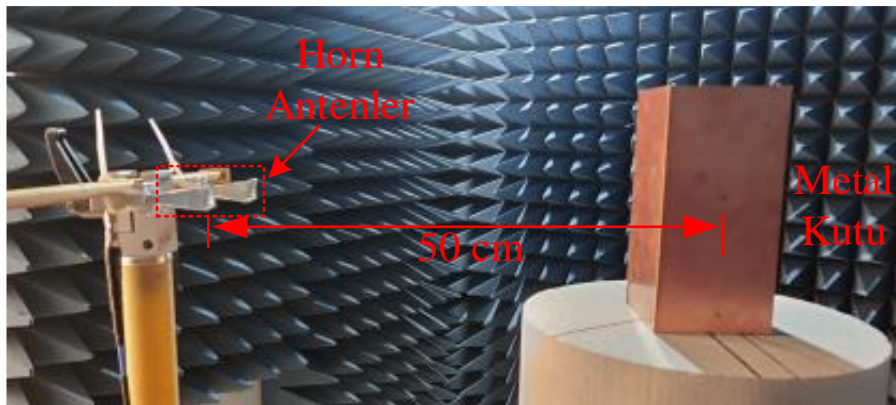
Şekil 4.22. Model arabanın (kapılar açık) 30 dB seviyesinde TSAR görüntüsü



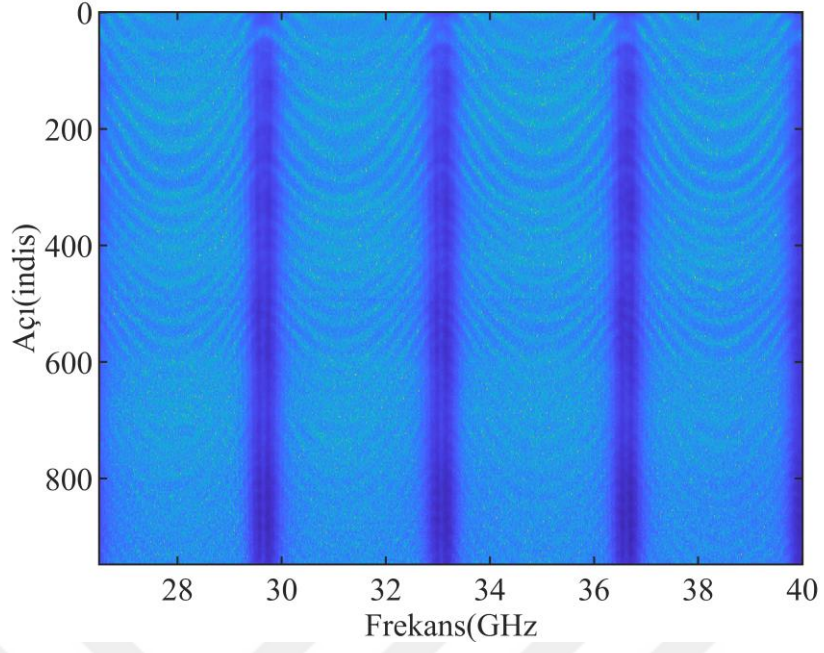
Şekil 4.23. Model arabanın (kapılar açık) 40 dB seviyesinde TSAR görüntüsü

4.2.2.2. Deneysel çalışma-2 metal kutu deneyi

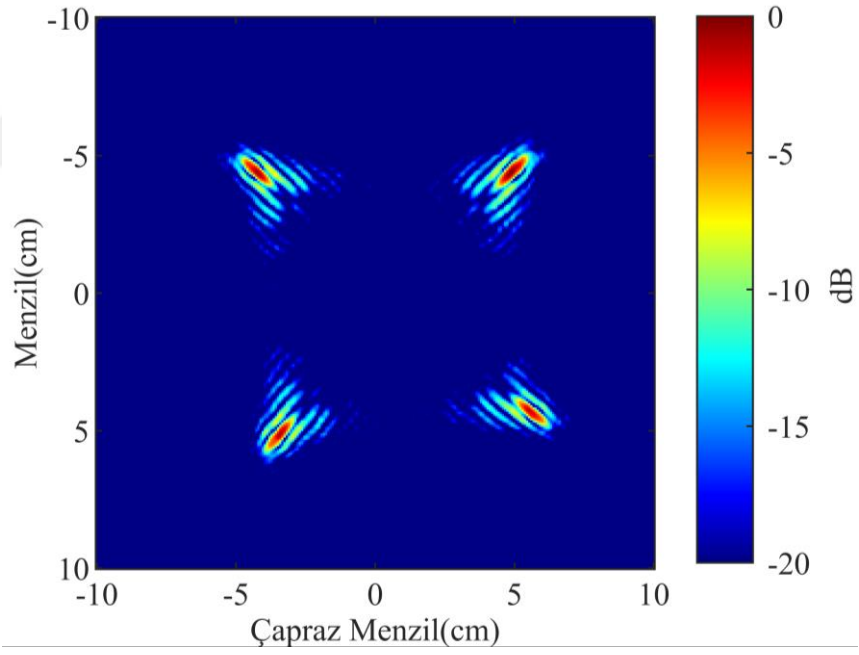
Bu çalışmada $9\text{cm} \times 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ boyutlarında metal bir kutu hedef olarak kullanılmıştır. Şekil 4.24'te deney anından bir görüntü verilmiştir. Hedefin ham sinyal görüntüsü Şekil 4.25'te verilmiştir. Hedefin Gİ algoritması uygulanarak elde edilen görüntüsü Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de farklı eşik seviyeleri için gösterilmiştir.



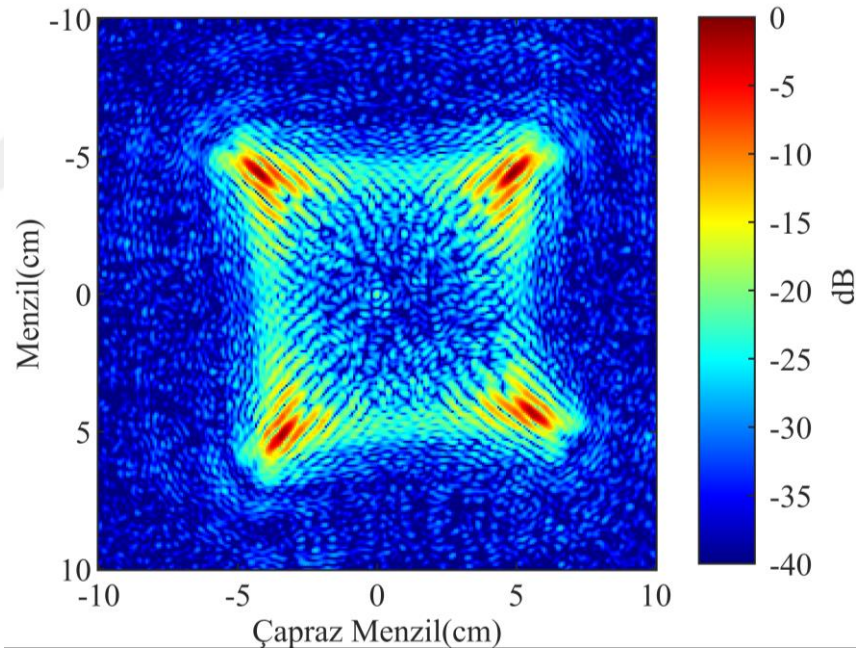
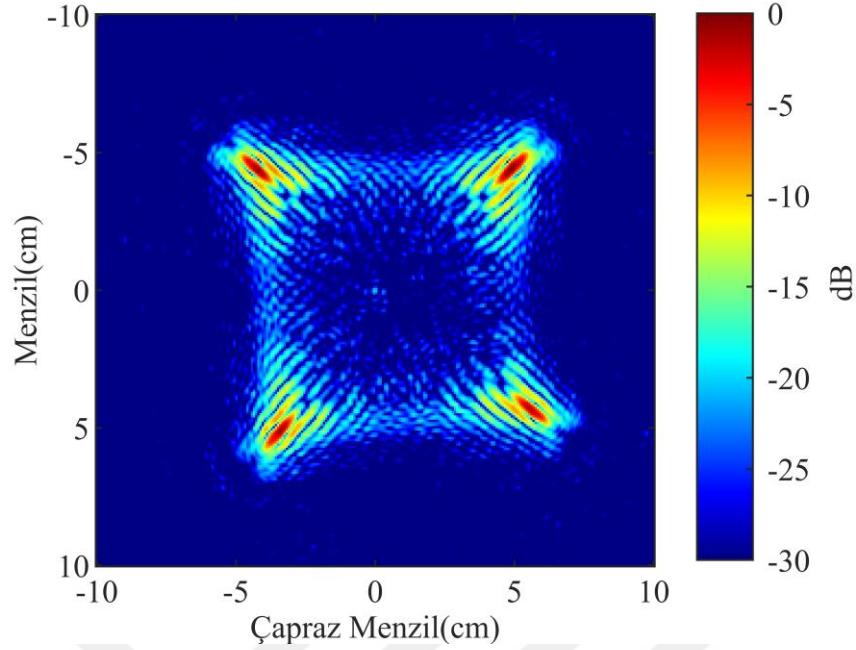
Şekil 4.24. Deney-2 anından bir görüntü



Şekil 4.25. Ham sinyalin görüntüsü



Şekil 4.26. Metal kutunun 20 dB seviyesinde TSAR görüntüsü



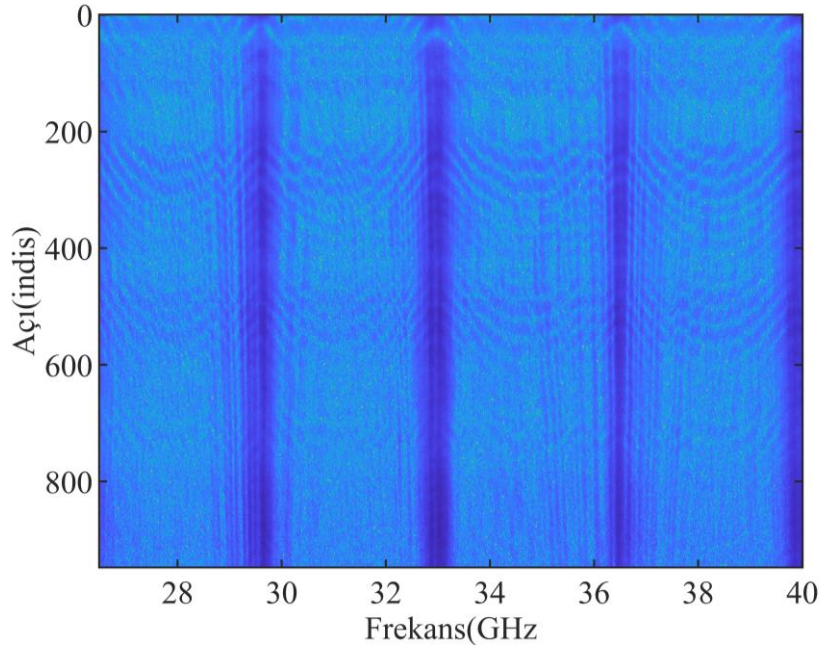
4.2.2.3. Deneysel çalışma-3 tekstille kaplanmış metal kutu

Bu çalışmada Şekil 4.24'te verilen metal kutu bir tekstil malzemesi ile kaplanmıştır. Tekstille kaplanmış hedefin görüntüsü Şekil 4.29'da verilmiştir. Toplanan sinyalin ham görüntüsü Şekil 4.30'da verilmiştir. Ham sinyal verisine Gİ algoritması uygulanarak hedefin TSAR görüntüsü elde edilmiştir. Hedefin farklı sinyal

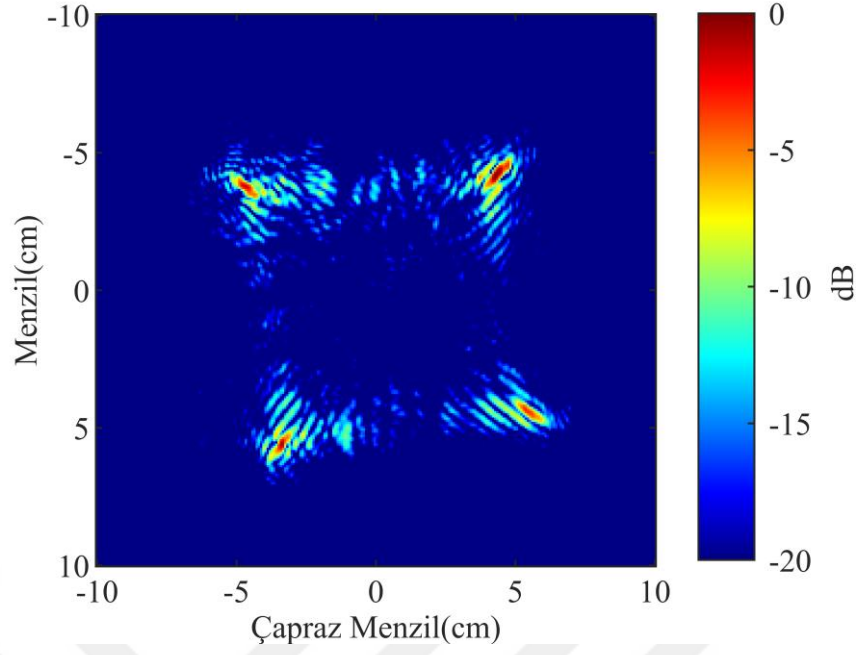
seviyelerindeki görüntüsü Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te verilmiştir. Şekil 4.26 ve Şekil 4.31'de verilen görüntüler karşılaştırıldığı zaman tekstil ile kaplı hedefin görüntüsünde bozulmalar olmasına rağmen metal kutu fark edilmektedir.



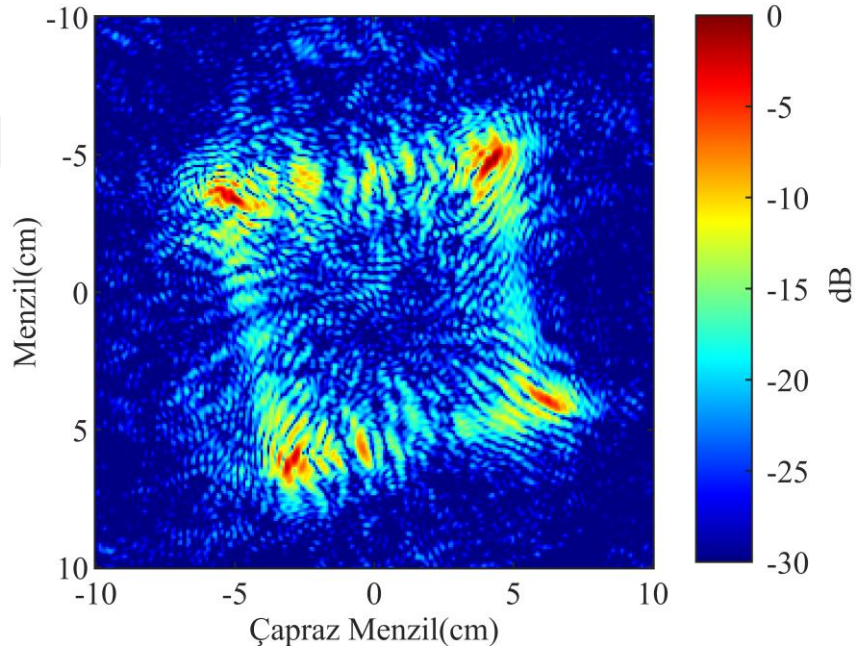
Şekil 4.29. Deney-3 anından bir görüntü



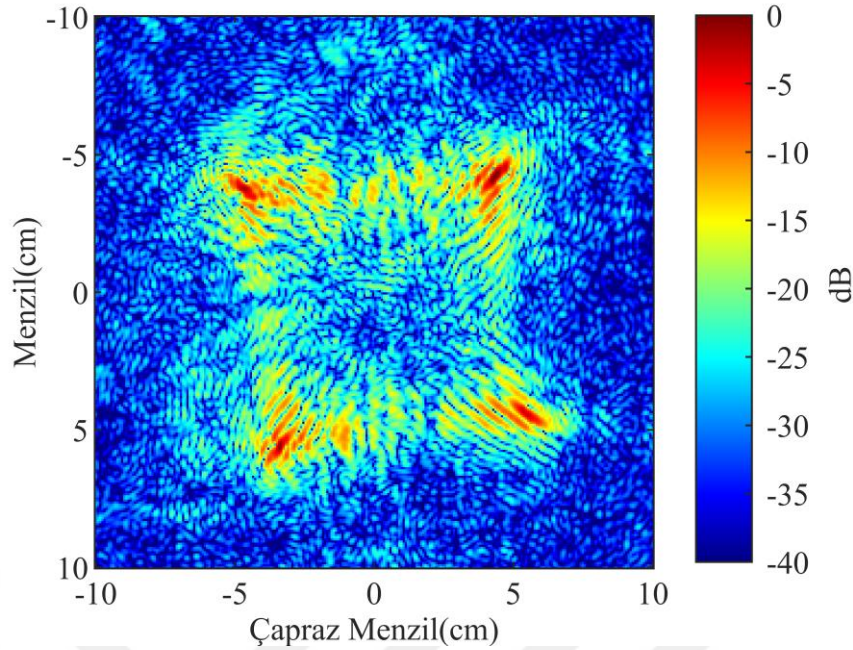
Şekil 4.30. Ham sinyalin görüntüsü



Şekil 4.31. Tekstil kaplı metal kutunun 20 dB seviyesinde TSAR görüntüleri



Şekil 4.32. Tekstil kaplı metal kutunun 30 dB seviyesinde TSAR görüntüleri



Şekil 4.33. Tekstil kaplı metal kutunun 40 dB seviyesinde TSAR görüntüleri

4.3. C Tarama Deneyleri

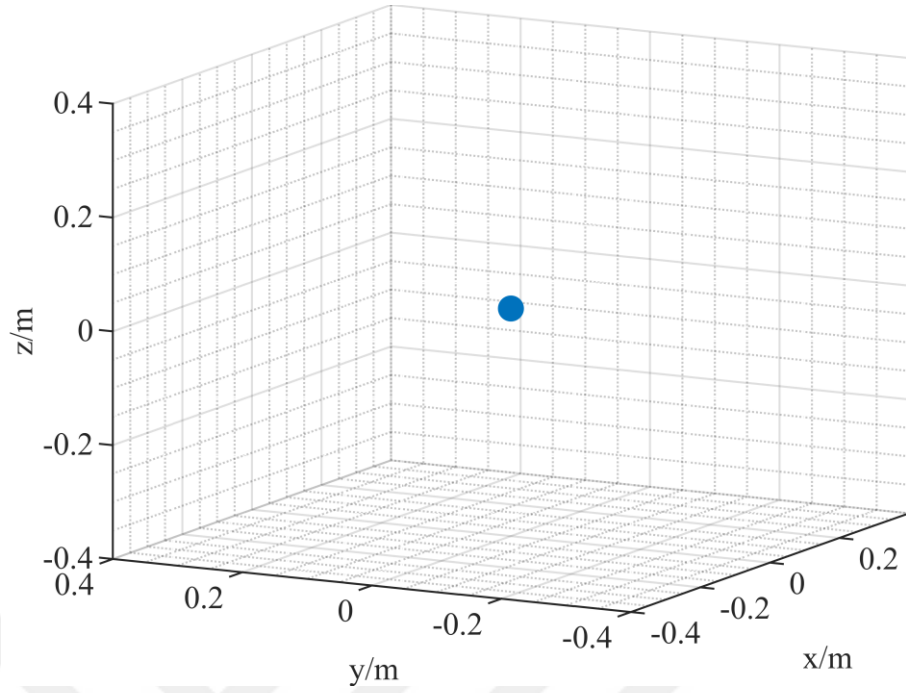
Bu bölümde, silindirik tarama geometrisi kullanılarak gerçekleştirilen benzetim ve deneysel çalışmalar verilmiştir.

4.3.1. Benzetim çalışmaları

Benzetim çalışmalarında ilk olarak tek noktasal hedef için silindirik tarama gerçekleştirilmiştir.

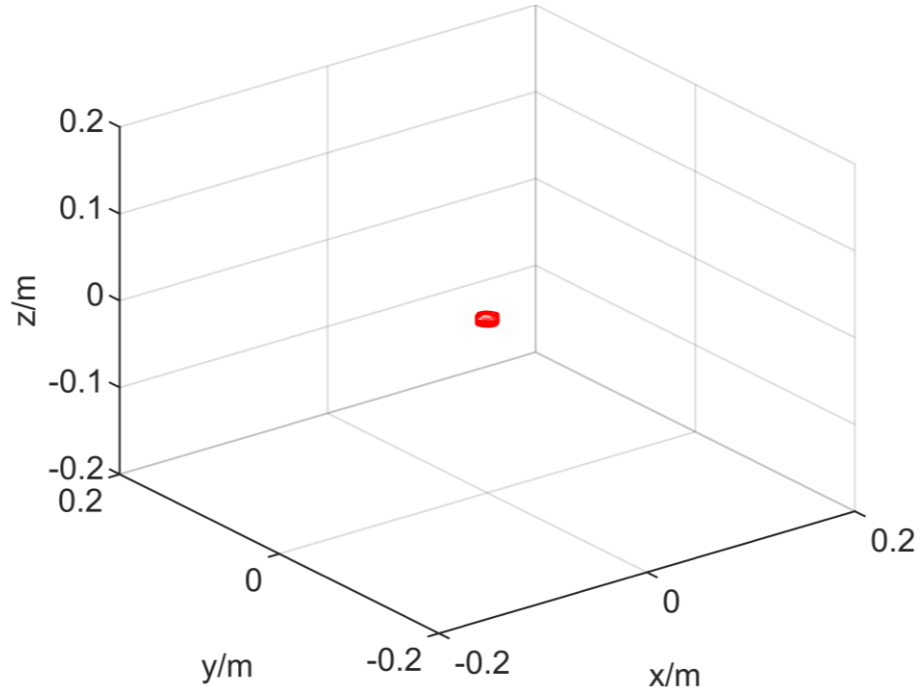
4.3.1.1. Benzetim çalışması-1

Önerilen yöntemin performansı benzetim verileri ile ortaya koyulduğundan bu bölümde bir mükemmel saçıcı hedef olarak kullanılmıştır. Hedef, Şekil 4.34'te gösterildiği gibi orijine yerleştirilmiştir. 301 noktada örneklenen 26.5 - 40 GHz frekans aralığı için veriler toplanmıştır. Silindirik sentetik açıklıklar yarıçap ve z eksenini için sırasıyla 0.5 m ve 0.8 m'dir. Hedef, toplam z eksenini boyunca 100 nokta için 360 derece boyunca toplam 721 açı noktası için taranmıştır. Görüntüleme alanı boyutları, $128 \times 128 \times 128$ voksel ve $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 'dir. Bu parametreleri Eşitlik 3.33'de kullanarak, geri saçılım verisi MATLAB ortamında elde edilmiştir.

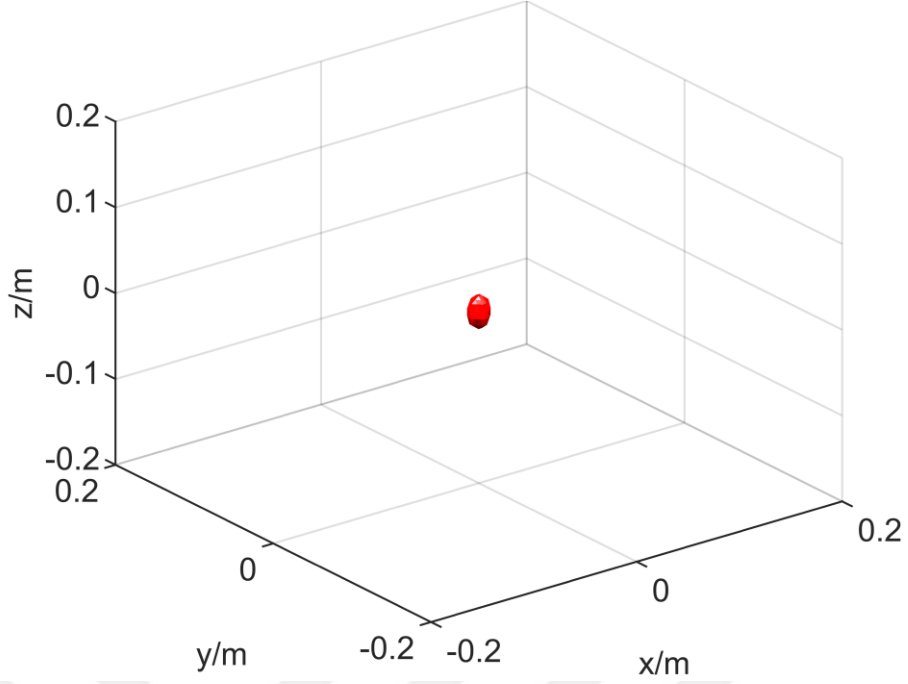


Şekil 4.34. Orijine konumlandırılmış noktasal hedef

Hedefin geleneksel Gİ ve önerilen Gİ algoritmaları ($\emptyset_{\text{cone}}=5^\circ$) ile elde edilen 3B görüntüleri Şekil.4.35 ve Şekil 4.36’da verilmiştir. Her iki algoritma da başarılı bir şekilde hedefin 3B görüntüsünü oluşturmuştur.

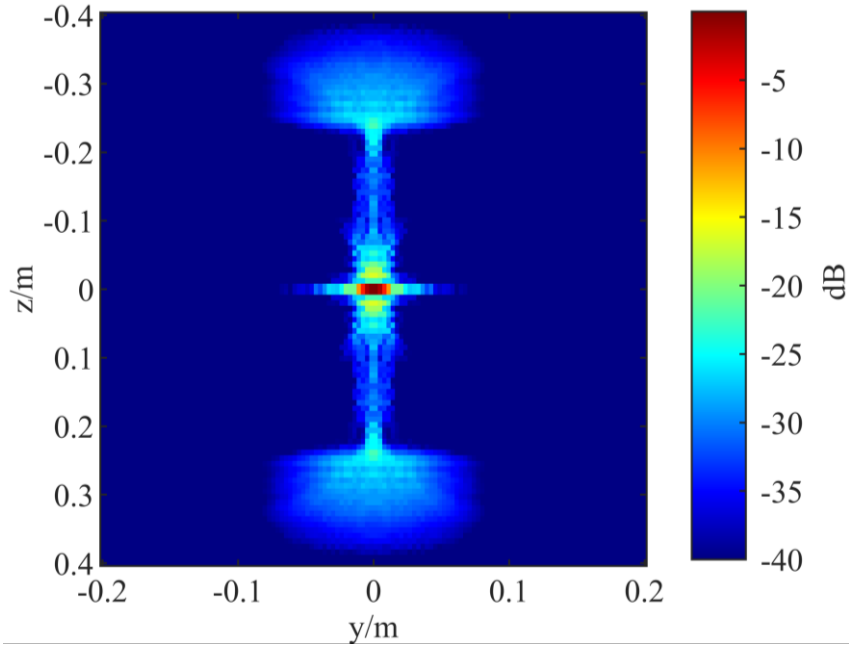


Şekil 4.35. Hedefin geleneksel Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntüsü

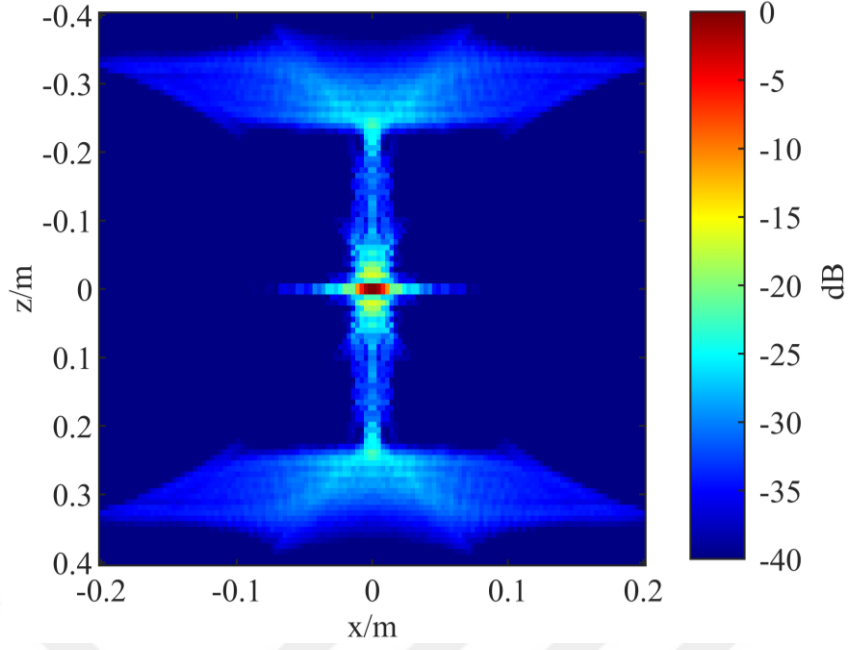


Şekil 4.36. Hedefin geleneksel önerilen Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntüsü

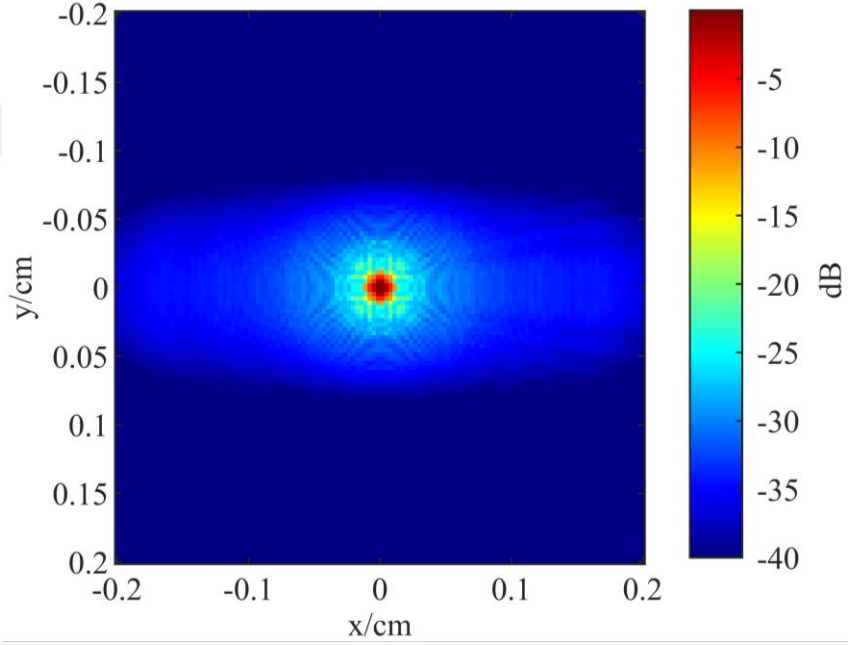
Hedefin y-z, x-z ve x-y düzlemlerine maksimum projeksiyon görüntüleri Şekil 4.37, Şekil 4.38, Şekil 4.39, Şekil 4.40, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’de her iki algoritma için sırasıyla verilmiştir. Görüntüler karşılaştırıldığında zaman önerilen algoritmanın daha az gürültü içerdiği görülmektedir. Ayrıca algoritmaların performansları değerlendirme metrikleri hesaplanarak da ölçülmüştür.



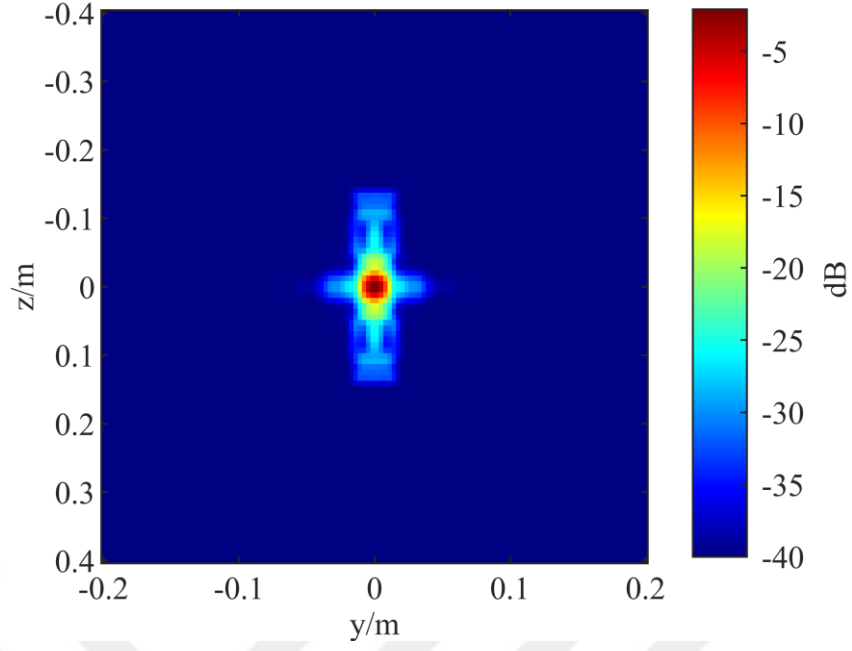
Şekil 4.37. Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntünün y-z düzlemine maksimum yoğunluk projeksiyonu



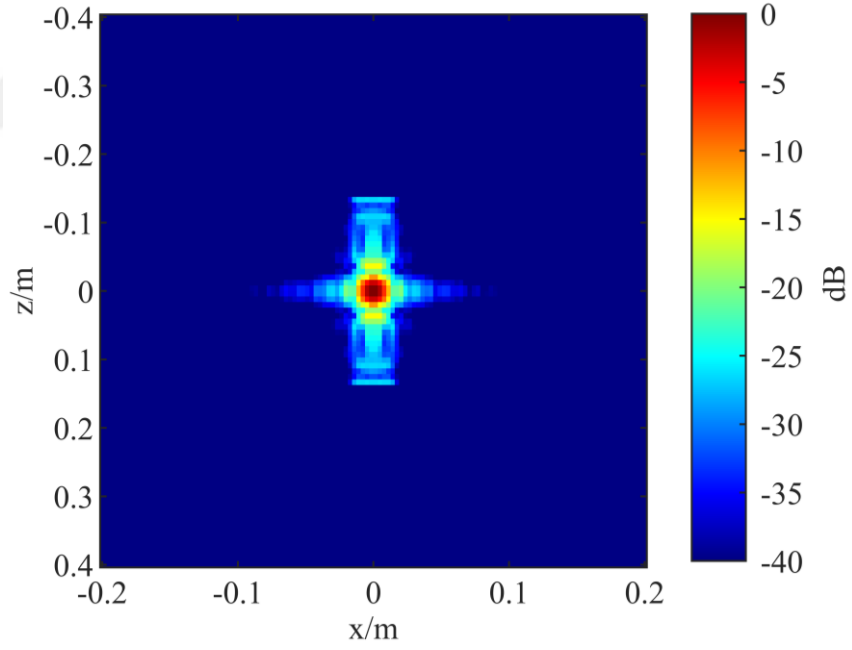
Şekil 4.38. Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntünün x-z düzlemine maksimum yoğunluk projeksiyonu



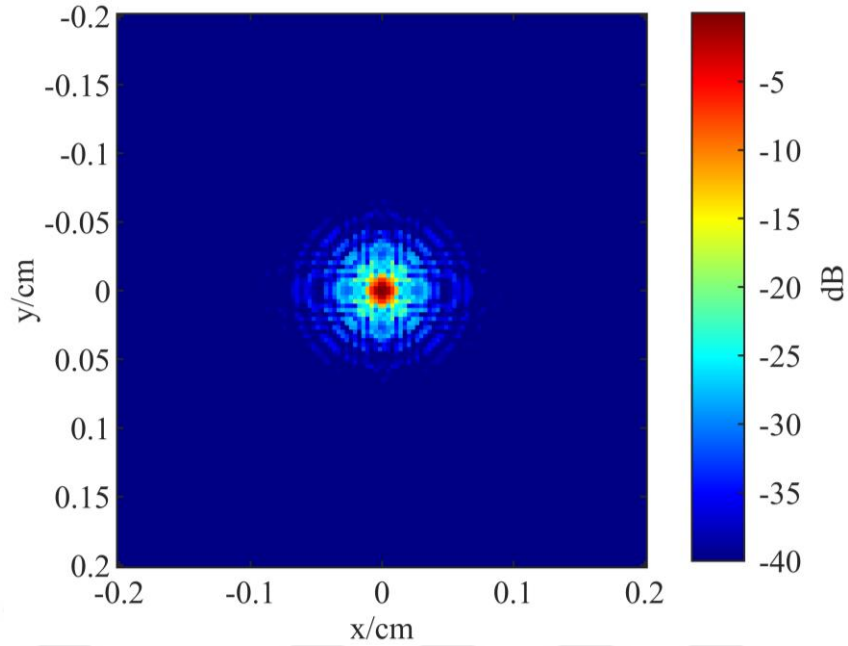
Şekil 4.39. Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntünün x-y düzlemine maksimum yoğunluk projeksiyonu



Şekil 4.40. Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntünün y-z düzlemine maksimum yoğunluk projeksiyonu



Şekil 4.41. Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntünün x-z düzlemine maksimum yoğunluk projeksiyonu



Şekil 4.42. Önerilen Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntünün x-y düzlemine maksimum yoğunluk projeksiyonu

Algoritmaların performans sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Geleneksel Gİ algoritmasının ISLR değerleri -14.24 dB ile -38.33 dB arasında değişirken, önerilen Gİ algoritmasının ISLR değerleri -9.53 dB ile -13.38 dB arasında değişmektedir. Bu sonuçlar önerilen algoritmanın tüm düzlemler için daha iyi bir yan lob baskılama kabiliyetine sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, önerilen algoritma ile %88 daha az interpolasyon noktası kullanılarak görüntü oluşturulmuştur.

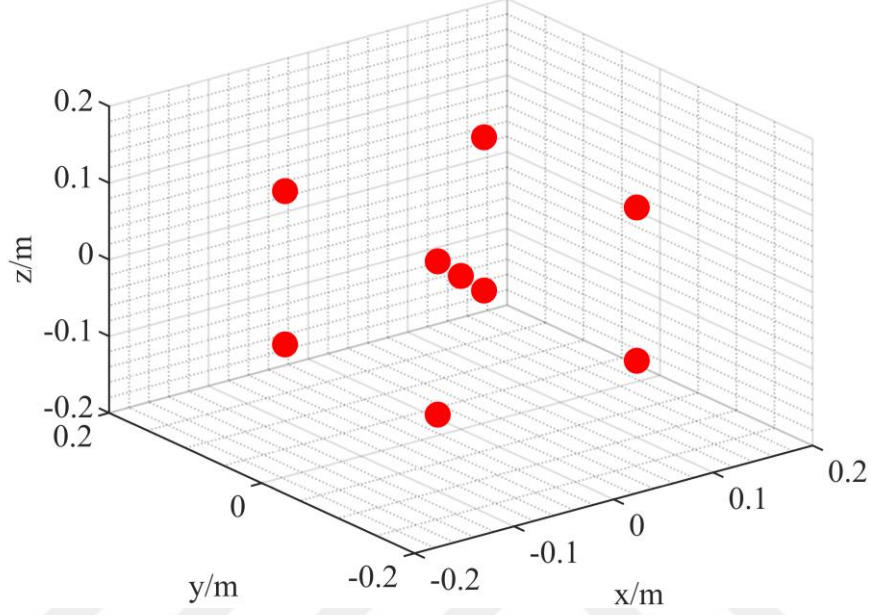
Çizelge 4.1. Algoritmaların ISLR ve interpolasyon nokta sayısı açısından performans değerleri

Algoritma	ISLR (dB)			İnterpolasyon nokta sayısı	
	Düzlem	y-z	x-z		x-y
Geleneksel Gİ		-14.24	-38.33	-20.56	2097152
Önerilen Gİ		-9.53	-9.53	-13.38	233873

4.3.1.2. Benzetim çalışması -2

İkinci benzetim çalışmasında 9 adet noktasal hedef kullanılmıştır. Hedeflerin konumları Şekil 4.43’de gösterilmiştir. Benzetim çalışması parametreleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Şekil 3.10’da gösterilen silindirik tarama geometrisinde olduğu gibi silindirik tarama gerçekleştirilerek noktasal hedeflerden radar geri saçılma verileri MATLAB ortamında Eşitlik 3.33 ile elde edilmiştir. Oluşturulan üç boyutlu veriye

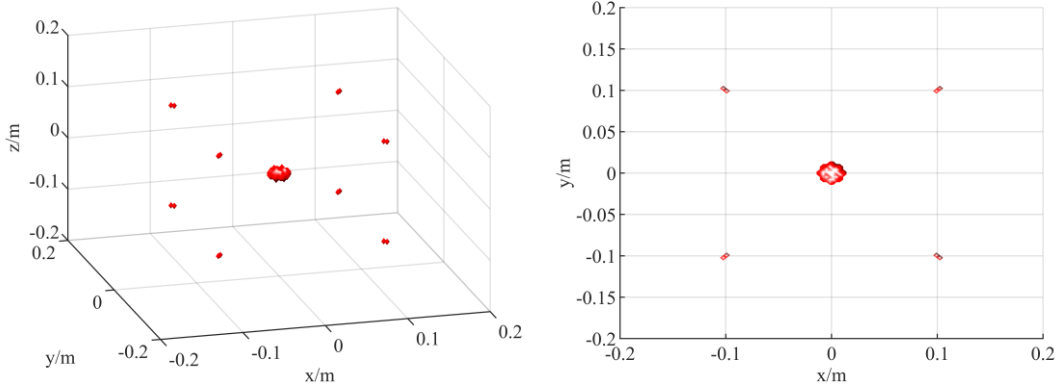
önerilen Gİ algoritması uygulanarak hedeflerin görüntüsü elde edilmiştir. Farklı açılardan hedeflerin görüntüsü Şekil 4.44 ve Şekil 4.45’de verilmiştir. Hedefin x-y ve y-z düzlemine ait maksimum projeksiyon görüntüleri ise Şekil 4.46 ve Şekil 4.47’de sırasıyla verilmiştir.



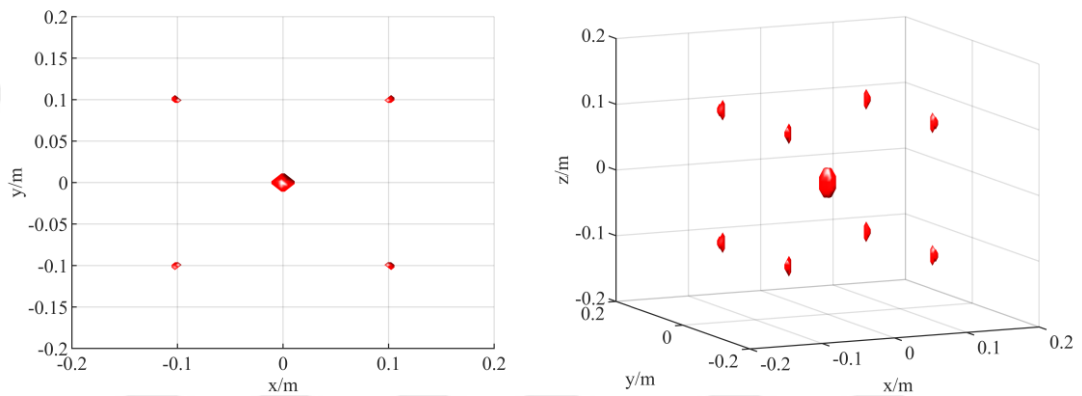
Şekil 4.43. Dokuz noktasal hedeflerin konumları

Çizelge 4.2. Benzetim parametreleri

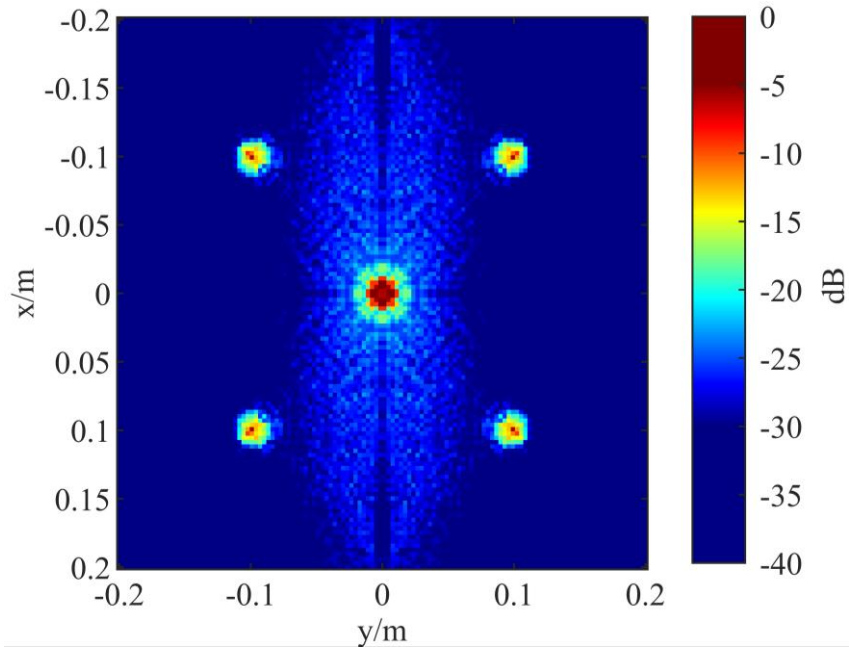
Parametre	İnterpolasyon nokta sayısı
Frekans	26.5-40 GHz
Frekans sayısı (N)	301
R_0	0.5 m
Dikey açıklık	20 cm
Dikey açıklık aralığı	0.4 cm
Tarama açısı (θ_{max})	360°
Açı sayısı (M)	1138
Menzil çözünürlüğü	11.11 mm
Çapraz menzil çözünürlüğü	17.95 mm



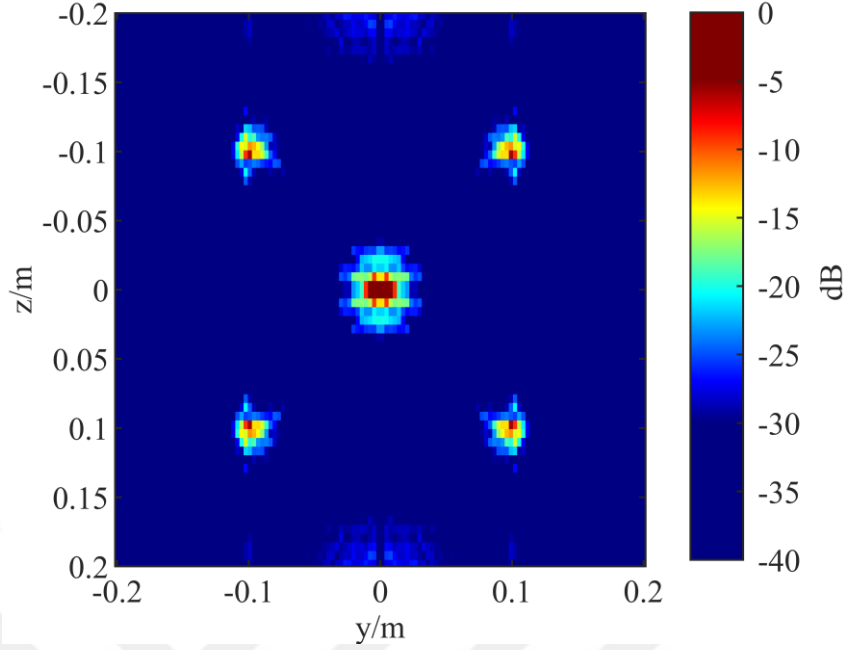
Şekil 4.44. Noktasal hedeflerin geleneksel 3B- Gİ algoritması ile elde edilen farklı açılardan görüntüleri



Şekil 4.45. Noktasal hedeflerin önerilen 3B- Gİ algoritması ile elde edilen görüntüsü



Şekil 4.46. Önerilen Gİ ile elde edilen 3B görüntünün x-y düzlemi üzerine maksimum projeksiyon görüntüsü



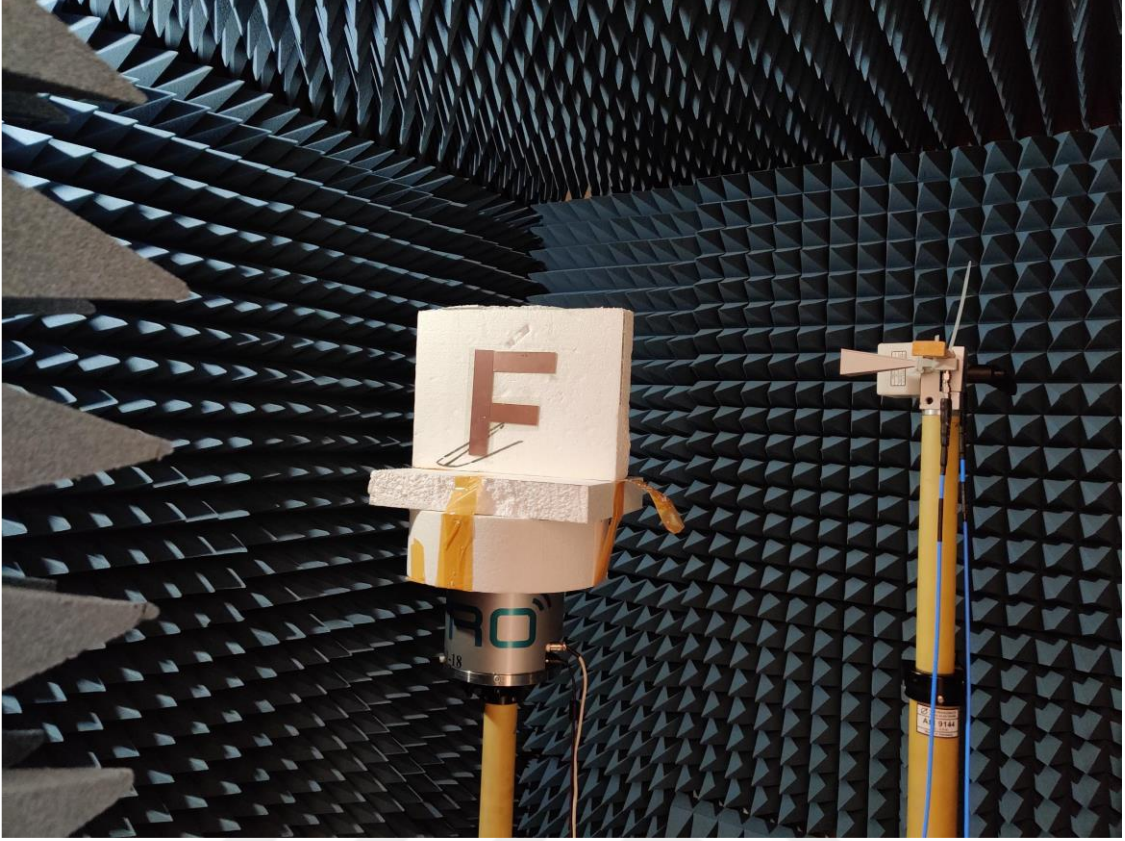
Şekil 4.47. Önerilen Gİ ile 3B görüntünün y-z düzlemi üzerine maksimum projeksiyon görüntüsü

4.3.2. Deneysel çalışmalar

Bu bölümde gerçekleştirilen iki deneysel çalışmadan bahsedilmiştir. Deneylerde elde edilen hedeflerin görüntüleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek verilmiştir.

4.3.2.1. Deneysel Çalışma-1 metal F harfi

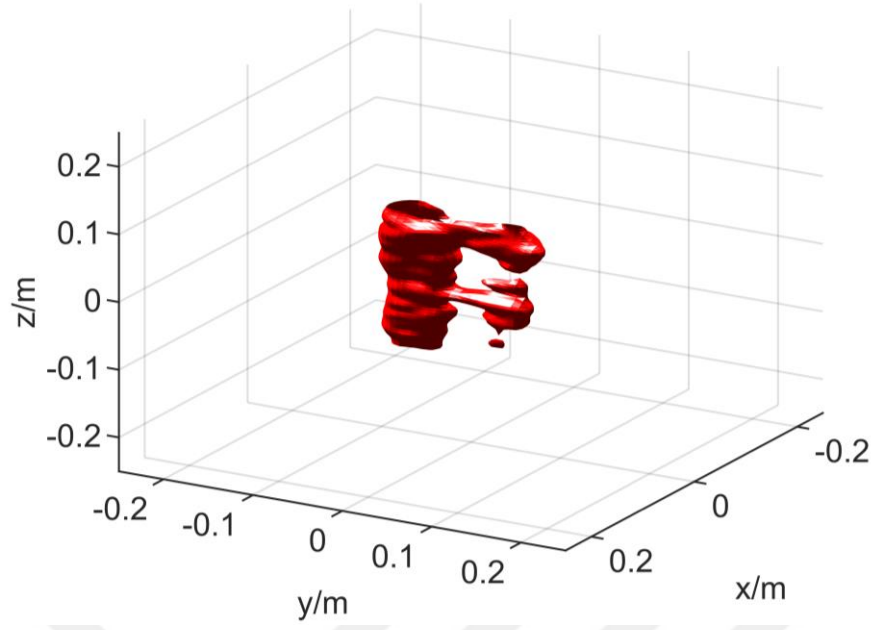
Bu deneysel çalışmada metal bir F harfine silindirik tarama gerçekleştirilmiştir. Deney anından bir görüntü Şekil 4.48’de verilirken, deney parametreleri Çizelge 4.3’te verilmiştir. Toplanan ham veriye önerilen 3B-Gİ algoritması uygulanarak hedefin görüntüsü elde edilmiştir. MATLAB ortamında görüntülenen veri Şekil 4.49’da verilmiştir. Daha sonra önerilen 3B-Gİ uygulanarak elde edilen görüntü ise Şekil 4.50’de verilmiştir. Hedefin geleneksel 3B-Gİ algoritması elde edilen 3B görüntüsünün x-y, x-z ve y-z düzlemlerine maksimum projeksiyon görüntüleri Şekil 4.51, Şekil 4.52 ve Şekil 4.53’de sırasıyla verilmiştir. Ayrıca, önerilen 3B-Gİ algoritmasıyla maksimum yoğunluk projeksiyon görüntüleri Şekil 4.54, Şekil 4.55 ve Şekil 4.56’da verilmiştir. Görüntüler incelendiği zaman, F harfinin önerilen algoritma ile daha iyi odaklandığı gözlemlenmektedir.



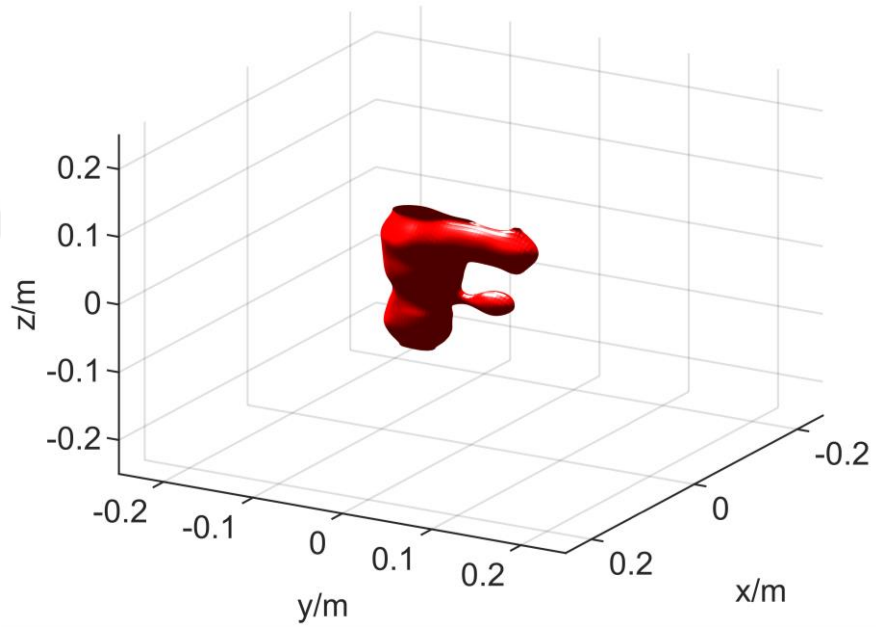
Şekil 4.48. Deney-1 anından görüntü

Çizelge 4.3. Deney parametreleri

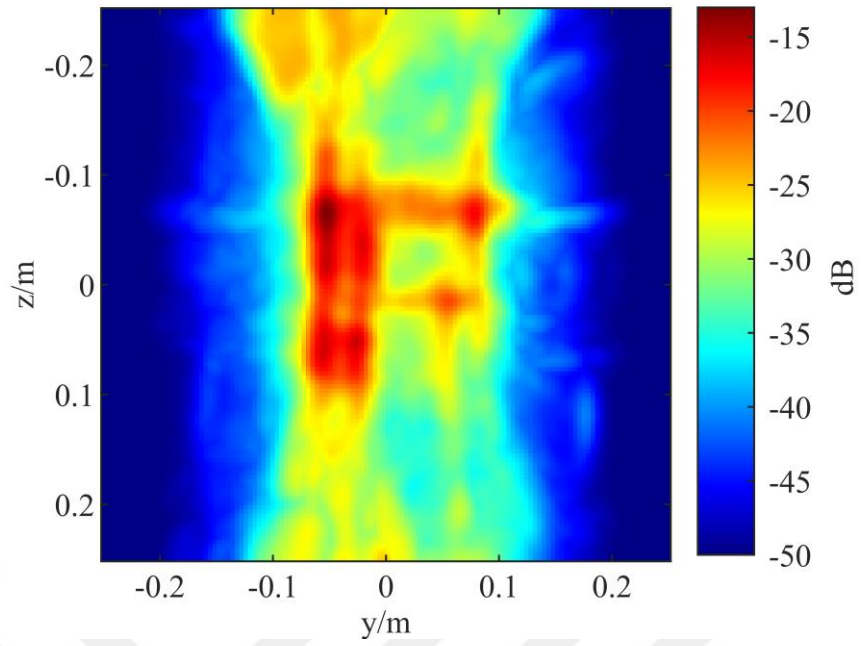
Parametre	İnterpolasyon nokta sayısı
Frekans	26.5-40 GHz
Frekans sayısı (N)	301
R_0	0.68 m
Dikey açıklık	26 cm
Dikey açıklık aralığı	1 cm
Tarama açısı (θ_{max})	360°
Açı sayısı (M)	450
Menzil çözünürlüğü	11.11 mm
Çapraz menzil çözünürlüğü	17.95 mm



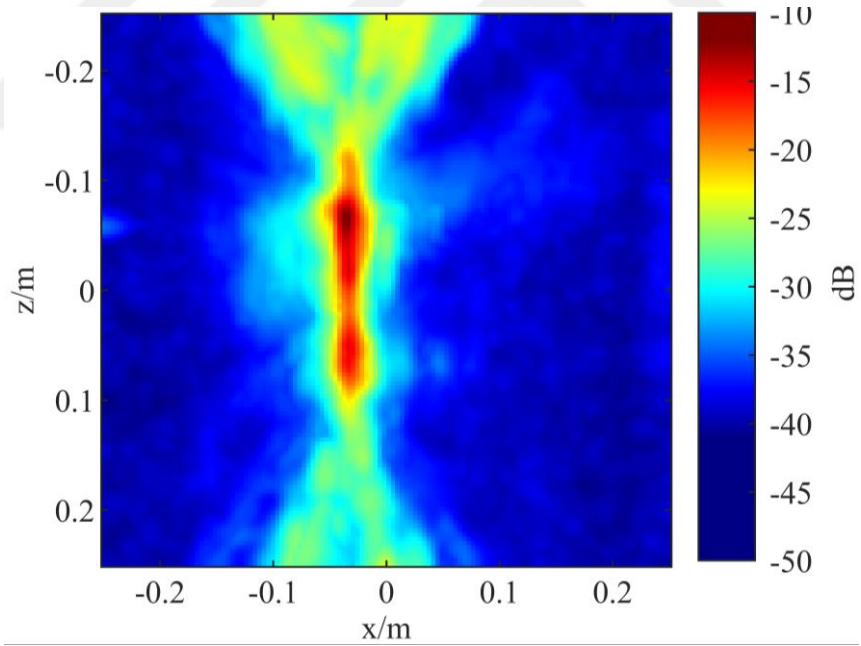
Şekil 4.49. Hedefin 3B- Gİ algoritması ile elde edilen hologram görüntüsü



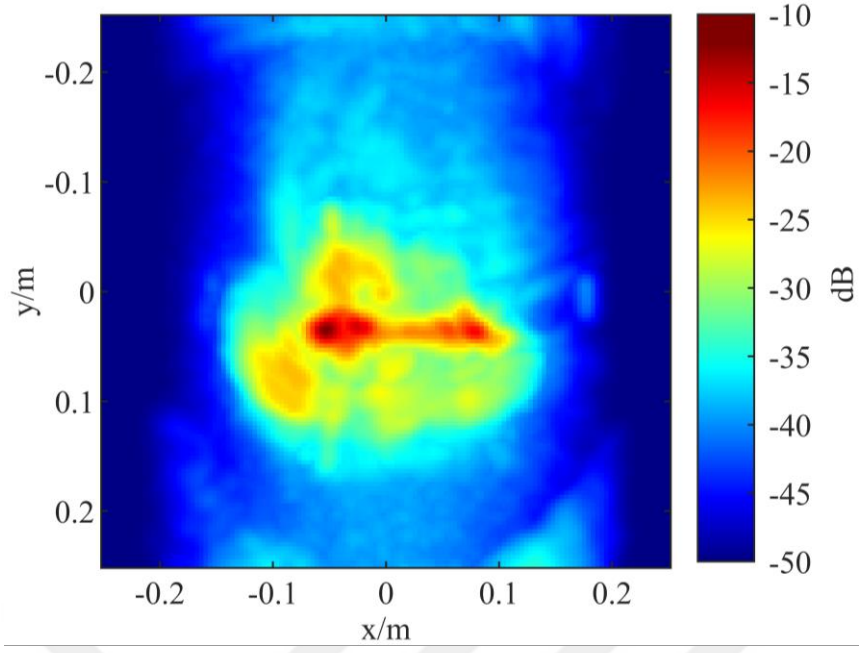
Şekil 4.50. Hedefin önerilen 3B- Gİ algoritması ile elde edilen hologram görüntüsü



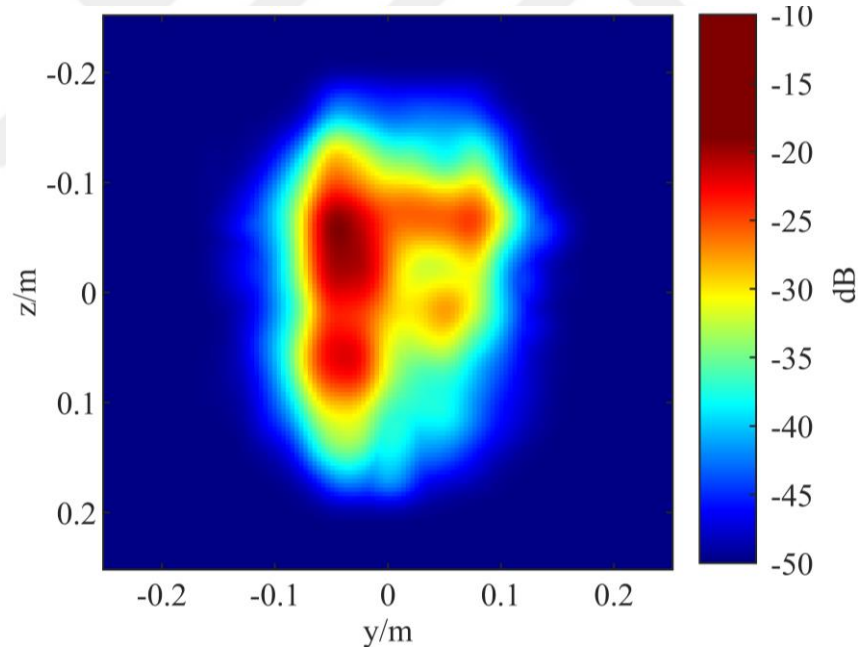
Şekil 4.51. Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntünün y-z düzlemine maksimum yoğunluk projeksiyonu



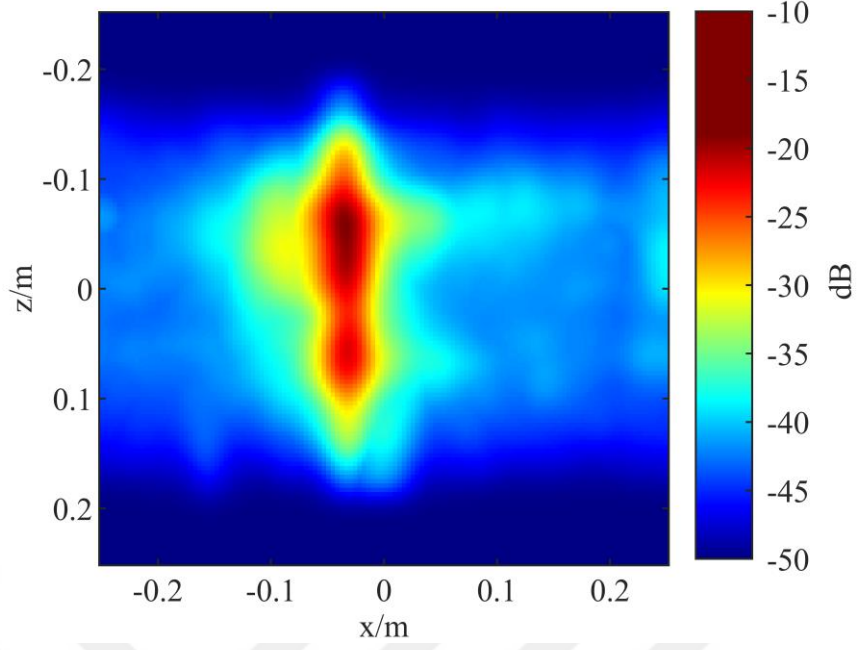
Şekil 4.52. Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntünün x-z düzlemine maksimum yoğunluk projeksiyonu



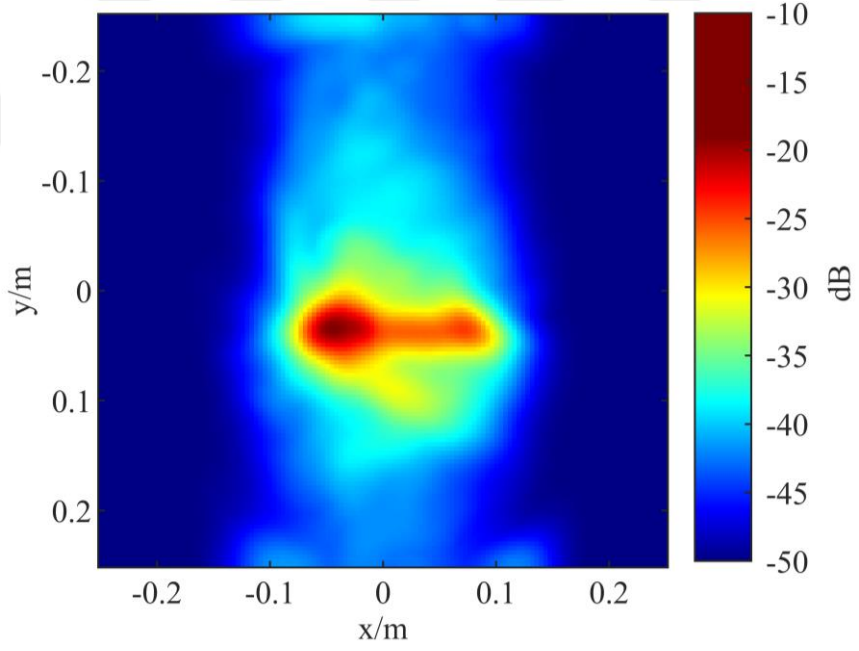
Şekil 4.53. Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntünün x-y düzlemine maksimum yoğunluk projeksiyonu



Şekil 4.54. Önerilen Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntünün y-z düzlemine maksimum yoğunluk projeksiyonu



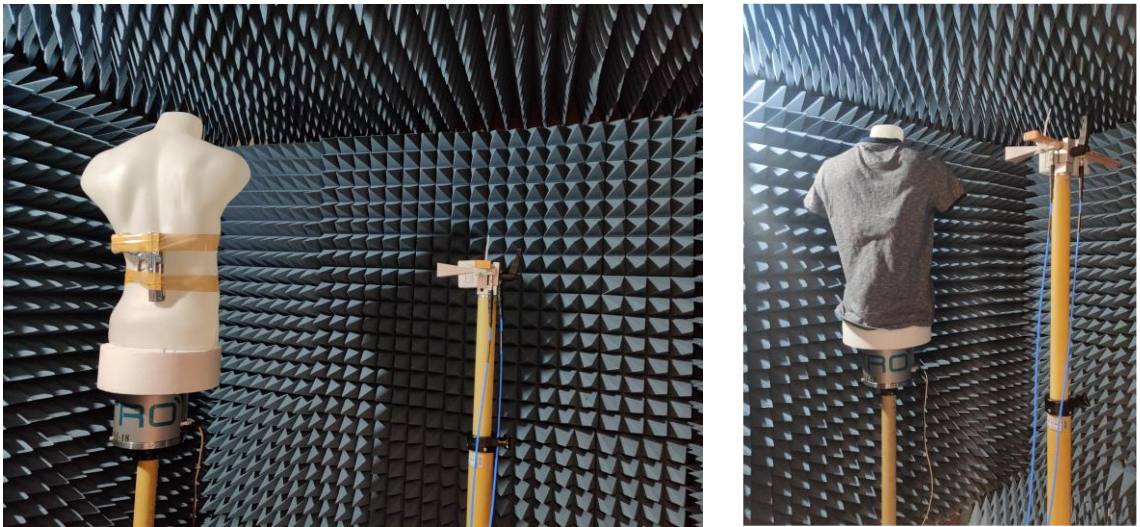
Şekil 4.55. Önerilen Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntünün x-z düzlemine maksimum yoğunluk projeksiyonu



Şekil 4.56. Önerilen Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntünün x-y düzlemine maksimum yoğunluk projeksiyonu

4.3.2.1. Deneysel çalışma-2 gizlenmiş metal tabanca

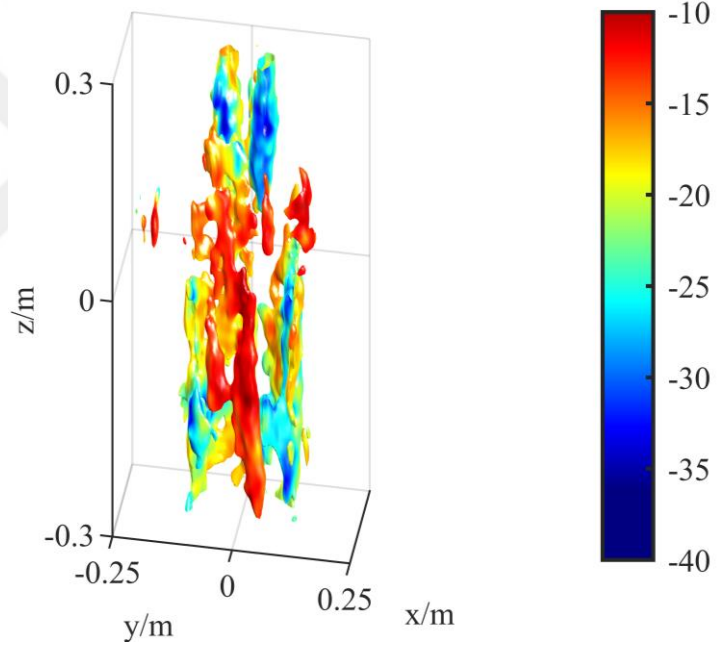
Bu deneysel çalışmada metal bir tabanca cansız bir manken üzerine yerleştirilmiştir. Mankene sıradan bir kıyafet giydirilerek tabanca gizlenmiştir. Deney anından görüntüler Şekil 4.57’de verilmiştir. Antenler döner tablanın merkezinden 68 cm uzaklığa yerleştirilmiştir. Silindirik tarama gerçekleştirilerek hedeften yansıyan veriler toplanmıştır. Ölçümler 26.5-40 GHz frekans bandında toplam 301 frekans noktası için gerçekleştirilmiştir. Döner tablo üzerine yerleştirilen hedef toplam 1144 noktada 360° her bir dikey açıklık noktası için taranmıştır. Dikey açıklık ise 0.5 cm aralıkla 60 cm’dir. Deney parametreleri Çizelge 4.4’te özetlenmiştir. Elde edilen ham veriye 3B-Gİ algoritması uygulanarak hedefin 3B görüntüsü Şekil 4.58’de görüldüğü gibi yeniden oluşturulmuştur. Daha sonra ham veriden önerilen 3B-Gİ kullanılarak odaklanmış 3B görüntüsü Şekil 4.59’daki gibi elde edilmiştir. Şekil 4.60’ta hedefin geleneksel Gİ 3B görüntüden elde edilen maksimum yoğunluk projeksiyon görüntüsü verilirken, Şekil 4.61’de 3B görüntüsünün x-y düzlemi üzerine maksimum yoğunluk projeksiyonu verilmiştir. Hedefe ait bir kesit görüntü Şekil 4.62’de gösterilmiştir. Hedefin önerilen 3B-Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntüsünün y-z ve x-y düzlemlerine maksimum projeksiyon görüntüleri Şekil 4.63 ve Şekil 4.64’te sırasıyla verilmiştir. Ayrıca, hedefin bir kesit görüntüsü Şekil 4.65’te verilmiştir. Görüntüler karşılaştırıldığı zaman önerilen algoritma ile elde edilen silahın görüntüsünün iyileştiği gözlemlenmektedir.



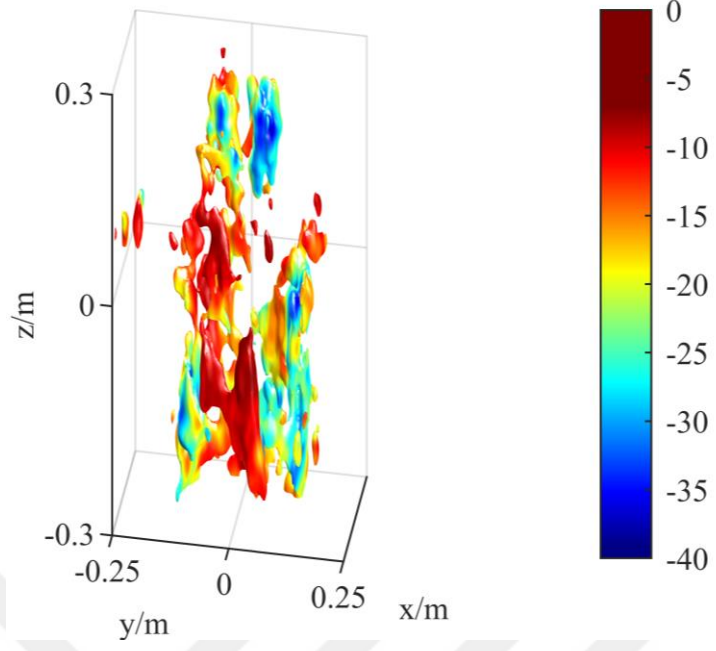
Şekil 4.57. Deney-2 anından görüntü

Çizelge 4.4. Deney parametreleri

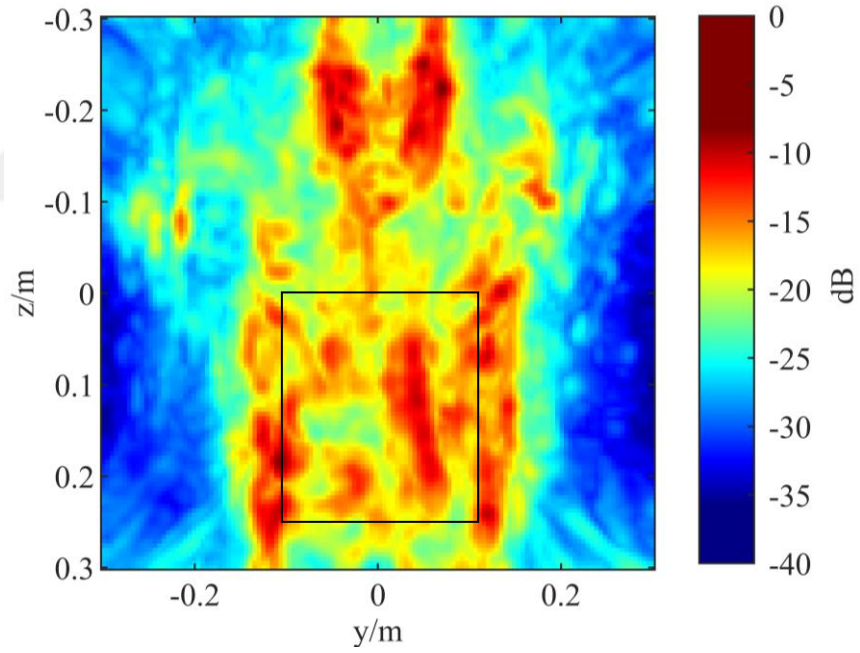
Parametre	İnterpolasyon nokta sayısı
Frekans	26.5-40 GHz
Frekans sayısı (N)	301
R_0	0.68 m
Dikey açıklık	60 cm
Dikey açıklık aralığı	0.5 cm
Tarama açısı (θ_{max})	360°
Açı sayısı (M)	1144
Menzil çözünürlüğü	11.11 mm
Çapraz menzil çözünürlüğü	17.95 mm



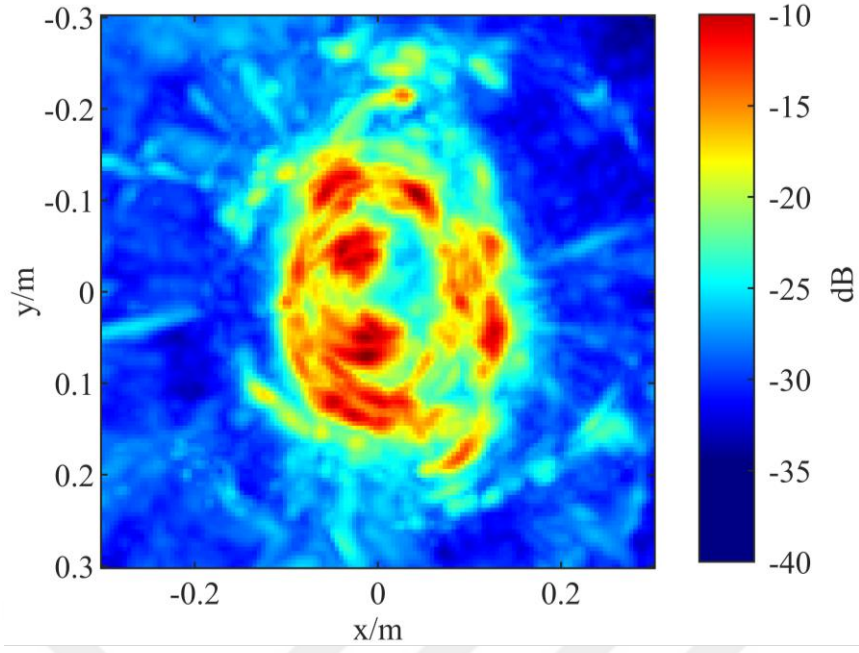
Şekil 4.58. Hedefin 3B-Gİ algoritması ile elde edilen hologram görüntüsü



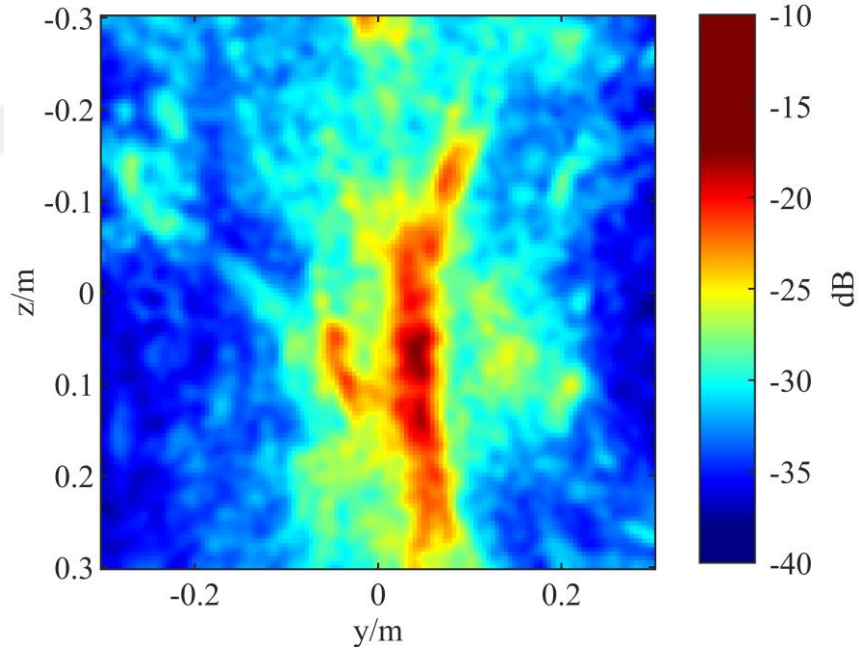
Şekil 4.59. Hedefin önerilen 3B-Gİ algoritması ile elde edilen hologram görüntüsü



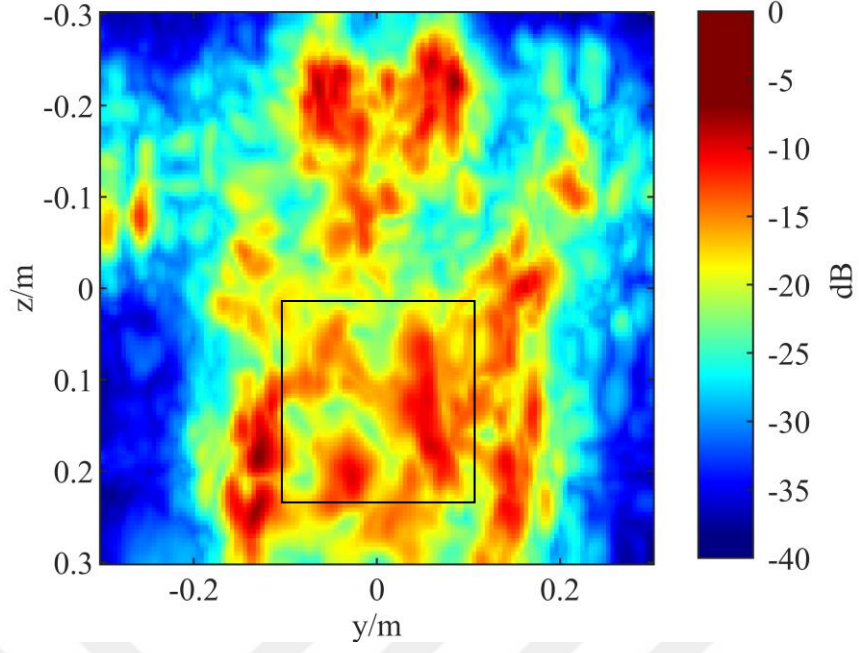
Şekil 4.60. Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntünün y-z düzlemine maksimum yoğunluk projeksiyonu



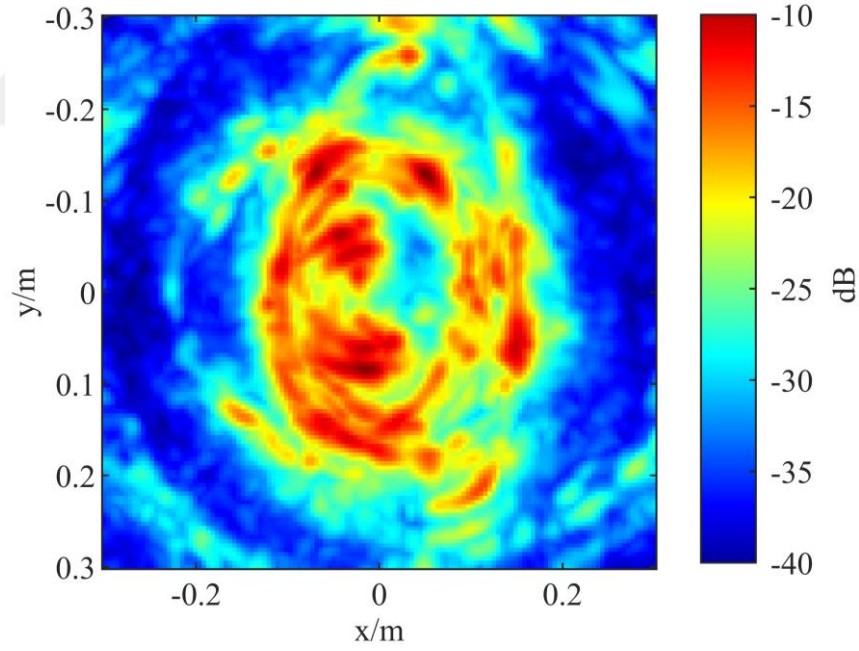
Şekil 4.61. 3B-Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntünün x-y düzlemine maksimum yoğunluk projeksiyonu



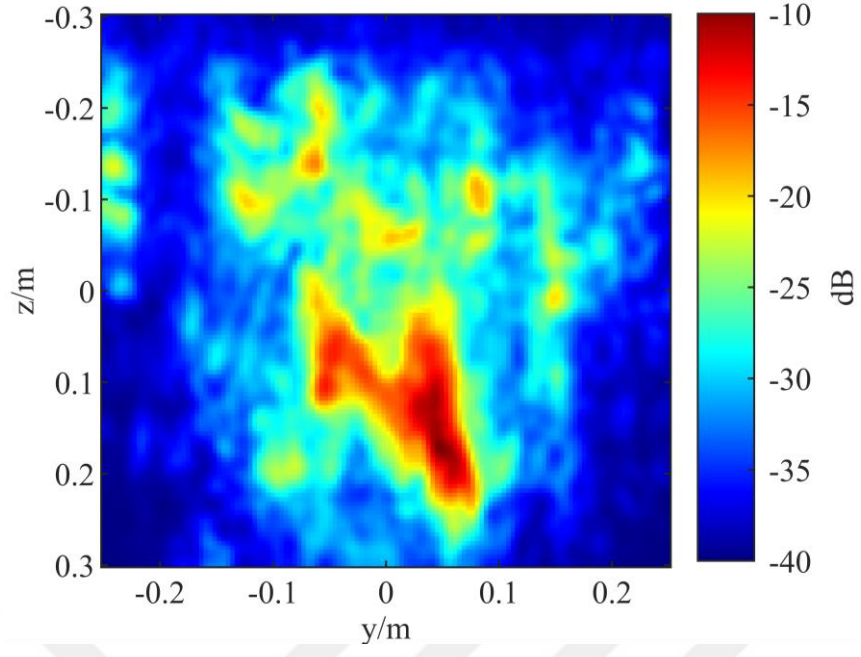
Şekil 4.62. Hedefin y-z düzlemi üzerinde 3B-Gİ algoritmasıyla odaklanmış 3B görüntüsünden elde edilen kesit görüntüsü



Şekil 4.63. Önerilen Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntünün y-z düzlemine maksimum yoğunluk projeksiyonu



Şekil 4.64. Önerilen 3B-Gİ algoritması ile elde edilen 3B görüntünün x-y düzlemine maksimum yoğunluk projeksiyonu



Şekil 4.65. Hedefin y-z düzlemi üzerinde önerilen 3B-Gİ algoritmasıyla odaklanmış 3B görüntüsünden elde edilen kesit görüntüsü

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında mmD hologram görüntüleme sistemlerinin geliştirilmesi kapsamında Gİ tabanlı yeni bir algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritmanın performansı benzetim ve deneysel çalışmalar ile ortaya koyulmuştur. Deneylein gerçekleştirilmesi için A, B ve C taramalarını kapsayan bir deney sistemi oluşturulmuştur. A ve B tarama deneyleriyle sistemin kalibrasyonu sağlanmıştır.

A tarama deneyleriyle hedefe ait menzil profili hedefin farklı konumları için gerçekleştirilmiştir. Hedefin menzili hassas bir şekilde tespit edilmiştir.

B tarama tipi benzetim ve deneysel çalışmalar SAR ve TSAR geometrileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önce bir SAR benzetim çalışmasıyla üç noktasal hedef için radar geri saçılım verisi elde edilmiştir. Daha sonra Gİ algoritması uygulanarak SAR görüntüsü oluşturulmuştur. Ayrıca, bu benzetim çalışmasında Gİ algoritmasının SAR görüntüsünü oluşturma aşamaları açık bir şekilde gösterilmiştir. TSAR deneylerinde ise bir metal model araba, bir metal kutu ve tekstil örtülmüş metal kutu hedef olarak kullanılmıştır. Hedefler bir döner tabla ile döndürülerek 26.5-40 GHz frekans bandında hedeften geri saçılan sinyaller toplanmıştır. Elde edilen ham veriye Gİ algoritması uygulanarak hedeflerin TSAR görüntüleri elde edilmiştir. Metal model araba kapıları kapalı ve açık olarak elde edilen iki TSAR görüntüleri karşılaştırıldığı zaman kapıların kapalı ve açık olma durumu ayırt edilebilmektedir. Metal kutu ve tekstille örtülmüş metal kutunun TSAR görüntüleri incelendiği zaman, tekstille örtülmüş metal kutunun görüntüsünde tekstilden kaynaklı bozulmalar olmasına rağmen metal kutu görülmektedir. Gerçekleştirilen A ve B tarama deneylerinde, elde edilen menzil profili ve TSAR görüntüleriyle sistemin doğruluğu gösterilmiştir.

C tarama için silindirik tarama geometrisi tabanlı deney sistemi uyarlanmıştır. Deney sisteminde bir döner tabla yardımıyla hedefler döndürülmüş ve her bir dikey konumu için hedeften yansıyan sinyaller toplanarak 3B sinyal verisi elde edilmiştir. Hedefin 3B görüntüsü geleneksel Gİ ve önerilen Gİ algoritmaları uygulanarak elde edilmiştir. 3B görüntülere maksimum yoğunluk projeksiyonu uygulanarak görüntüler 2B düzleme aktarılmıştır. Benzetim ve deneysel sonuçlarla önerilen yeni algoritmanın etkisi geleneksel Gİ algoritmasıyla karşılaştırılarak verilmiştir. Benzetim çalışmasında ilk olarak bir noktasal hedef için silindirik tarama verisi elde edilmiştir. Ham veriye geleneksel Gİ ve önerilen Gİ algoritması uygulanarak 3B ve maksimum yoğunluk projeksiyon görüntüleri

elde edilmiştir. Görüntüler karşılaştırıldığı zaman önerilen algoritmayla elde edilen görüntünün gürültüsünün azaldığı görülmektedir. Ayrıca, görüntülerin ISLR değerleri ve algoritmaların kullandığı interpolasyon nokta sayıları verilmiştir. Geleneksel Gİ algoritması için düzlemlere göre ISLR değerleri -14.24 dB ile -38.33 dB arasında değişirken, önerilen Gİ algoritmasının ISLR değerleri -9.53 dB ile -13.38 dB arasında değişmektedir. Algoritmaların interpolasyon nokta sayıları ise $128 \times 128 \times 128$ voksel için sırasıyla 2097152 ve 233873'tür. Önerilen algoritmanın interpolasyon nokta sayısı azalmasına rağmen, gürültü oranı azalmış ve görüntü kalitesi iyileşmiştir. Ayrıca, iki adet hedef için deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Birinci deneyde, metal bir F harfi silindirik olarak taranmış ve geri saçılan veriler 26.5-40 GHz frekans bandı için toplanmıştır. Ham veriye geleneksel Gİ ve önerilen Gİ algoritması uygulanarak 3B görüntüleri elde edilmiştir. Ayrıca, maksimum yoğunluk projeksiyonu uygulanarak 2B görüntüleri de elde edilmiştir. Görüntüler karşılaştırıldığı zaman önerilen algoritmayla elde edilen görüntüde metal F harfinin daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. İkinci deneyde, bir plastik manken üzerine tabanca yerleştirilmiş ve mankene kıyafet giydirilmiştir. Mankene silindirik tarama gerçekleştirilerek geri saçılım verileri toplanmıştır. Hedefin 3B görüntüsü Gİ ve önerilen Gİ algoritmalarıyla elde edilmiştir. Görüntüler karşılaştırıldığı zaman önerilen algoritmayla tabancanın görüntüsünün daha iyi olduğu görülmüştür.

5.2 Öneriler

mmD hologram görüntüleme kapsamında yapılan araştırmalar sonucunda bu sistemlerin gerçekleştirilmesi büyük bir önem arz etmektedir. Bu bağlamda, öneriler şu başlıklar altında özetlenebilir,

- 1) Görüntüleme algoritmalarının görüntü kalitesinin artırılmasıyla birlikte hesaplama yükünün azaltılması gerekir. Böylece sistemler daha hızlı ve düzgün görüntüler sağlayacaktır.
- 2) Dizi anten içeren deney sistemlerine yönelik anten tasarımlarının geliştirilmesi ve anten sayısının azaltılması gerekir.
- 3) Diğer bir önemli araştırma alanı ise görüntülerin sınıflandırılmasına yönelik çalışmaların yapılmasıdır. Son zamanlarda gelişen yapay zekâ tekniklerinin bu sistemlere uyarlanarak görüntülerin doğru bir şekilde sınıflandırılarak bu sistemleri kullanacak operatöre destek vermesi önemli bir çalışma alanıdır.

KAYNAKLAR

- Appleby, R. ve Anderton, R. N., 2007, Millimeter-Wave and Submillimeter-Wave Imaging for Security and Surveillance. *Proceedings of the IEEE*. 95: 1683-1690.
- Bi, D., Li, X., Xie, X., Xie, Y. ve Zheng, Y. R., 2021, Compressive sensing operator design and optimization for wideband 3-D millimeter-wave imaging, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 70 (1), 542-555.
- Cheng, B., Cui, Z., Lu, B., Qin, Y., Liu, Q., Chen, P., He, Y., Jiang, J., He, X., Deng, X., Zhang, J. ve Zhu, L., 2018, 340-GHz 3-D Imaging Radar With 4Tx-16Rx MIMO Array. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 8: 509-519.
- Demirci, S., Cetinkaya, H., Yigit, E., Ozdemir, C. ve Vertiy, A. A., 2012, A study on millimeter-wave imaging of concealed objects: Application using back-projection algorithm. *Progress In Electromagnetics Research, EMW Publishing*. 128: 457-477.
- Duysak, H. ve Yiğit, E., 2022, Investigation of the performance of different wavelet-based fusions of SAR and optical images using Sentinel-1 and Sentinel-2 datasets, *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7 (1), 81-90.
- Engin, E., Çiftçioğlu, B., Özcan, M. ve Tekin, İ., 2007, High resolution ultrawideband wall penetrating radar. *Microwave and Optical Technology Letters, Wiley Online Library*. 49: 320-325.
- Focşa, A., Toma, Ş.-A. ve Datcu, M., 2017, Maximum entropy image reconstruction applied to C-band ground based synthetic aperture radar, *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 3437-3440.
- Gao, J., Qin, Y., Deng, B., Wang, H. ve Li, X., 2017, A novel method for 3-D millimeter-wave holographic reconstruction based on frequency interferometry techniques, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66 (3), 1579-1596.
- Gao, J., Deng, B., Qin, Y., Wang, H. ve Li, X., 2018, An Efficient Algorithm for MIMO Cylindrical Millimeter-Wave Holographic 3-D Imaging. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 66: 5065-5074.
- Ghasr, M. T., Horst, M. J., Dvorsky, M. R. ve Zoughi, R., 2017, Wideband Microwave Camera for Real-Time 3-D Imaging. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 65: 258-268.
- Gumbmann, F. ve Schmidt, L.-P., 2011a, Millimeter-wave imaging with optimized sparse periodic array for short-range applications, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49 (10), 3629-3638.

- Gumbmann, F. ve Schmidt, L., 2011b, Millimeter-Wave Imaging With Optimized Sparse Periodic Array for Short-Range Applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 49: 3629-3638.
- Jaeger, I., Zhang, L., Stiens, J., Sahli, H. ve Vounckx, R., 2007, Millimeter wave inspection of concealed objects. *Microwave and Optical Technology Letters*, Wiley Online Library. 49: 2733-2737.
- Klemm, M., Leendertz, J. A., Gibbins, D., Craddock, I. J., Preece, A. ve Benjamin, R., 2010, Microwave radar-based differential breast cancer imaging: Imaging in homogeneous breast phantoms and low contrast scenarios, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 58 (7), 2337-2344.
- Kulkarni, S. C. ve Rege, P. P., 2020, Pixel level fusion techniques for SAR and optical images: A review, *Information Fusion*, 59, 13-29.
- Liu, H., Zhang, Y. X., Long, Z. J., Han, F. ve Liu, Q. H., 2016, Three-dimensional reverse-time migration applied to a MIMO GPR system for subsurface imaging. 2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR): 1-4.
- Martinez, A. ve Marchand, J. L., 1993, SAR image quality assessment, *Revista de Teledeteccion*, 2, 12-18.
- Meaney, P. M., Paulsen, K. D., Hartov, A. ve Crane, R. K., 1996, Microwave imaging for tissue assessment: initial evaluation in multitarget tissue-equivalent phantoms. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 43: 878-890.
- Meng, Y., Lin, C., Zang, J., Qing, A. ve Nikolova, N. K., 2020, General theory of holographic inversion with linear frequency modulation radar and its application to whole-body security scanning, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 68 (11), 4694-4705.
- Mersereau, R. M. ve Oppenheim, A. V., 1974, Digital reconstruction of multidimensional signals from their projections. *Proceedings of the IEEE*. 62: 1319-1338.
- Nan, Y., Huang, X. ve Guo, Y. J., 2022, 3-D Millimeter-Wave Helical Imaging, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 70 (4), 2499-2511.
- Özdemir, C., Demirci, Ş., Yiğit, E. ve Yılmaz, B., 2014, A Review on Migration Methods in B-Scan Ground Penetrating Radar Imaging. *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi Publishing Corporation. 2014: 280738.
- Pieraccini, M., Luzi, G., Mecatti, D., Noferini, L. ve Atzeni, C., 2006, Ground-based SAR for short and long term monitoring of unstable slopes. *Radar Conference, 2006. EuRAD 2006. 3rd European*, IEEE: 92-95.
- Rajah, P., Odindi, J. ve Mutanga, O., 2018, Feature level image fusion of optical imagery and Synthetic Aperture Radar (SAR) for invasive alien plant species

- detection and mapping. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 10: 198-208.
- Rostami, P., Zamani, H., Fakharzadeh, M., Amini, A. ve Marvasti, F., 2022, A Deep Learning Approach for Reconstruction in Millimeter-Wave Imaging Systems, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*.
- Sheen, D. M., McMakin, D. L. ve Hall, T. E., 2000, Combined illumination cylindrical millimeter-wave imaging technique for concealed weapon detection. *Proc.SPIE*. 4032
- Sheen, D. M., McMakin, D. L. ve Hall, T. E., 2001, Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 49: 1581-1592.
- Studio, C. S. T. M., 2017, Electromagnetic Simulation Software. CST Microwave Studio.
- Tan, K., Wu, S., Wang, Y., Ye, S., Chen, J., Liu, X., Fang, G. ve Yan, S., 2017, On Sparse MIMO Planar Array Topology Optimization for UWB Near-Field High-Resolution Imaging. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 65: 989-994.
- Tan, K., Wu, S., Liu, X. ve Fang, G., 2018, A modified omega-K algorithm for near-field MIMO array-based 3-D reconstruction, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15 (10), 1555-1559.
- Tan, K. ve Chen, X., 2021, Precise Near-Range 3-D Image Reconstruction Based on MIMO Circular Synthetic Aperture Radar, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 69 (5), 2651-2661.
- Tian, X., Chang, T. ve Cui, H.-L., 2022, Short-Range Millimeter-Wave Imaging in the Presence of Array Element Position Deviation, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 70 (3), 1910-1919.
- Wang, G., Qi, F., Liu, Z., Liu, C., Xing, C. ve Ning, W., 2020, Comparison between back projection algorithm and range migration algorithm in terahertz imaging, *IEEE Access*, 8, 18772-18777.
- Wang, M., Wei, S., Zhou, Z., Shi, J. ve Zhang, X., 2022a, Efficient ADMM Framework Based on Functional Measurement Model for mmW 3D SAR Imaging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*: 1.
- Wang, Y., He, Z., Zhan, X., Fu, Y. ve Zhou, L., 2022b, Three-Dimensional Sparse SAR Imaging with Generalized L_q Regularization, *Remote Sensing*, 14 (2), 288.
- Wu, H., Ravan, M. ve Amineh, R. K., 2020a, Holographic near-field microwave imaging with antenna arrays in a cylindrical setup, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 69 (1), 418-430.

- Wu, H., Ravan, M., Sharma, R., Patel, J. ve Amineh, R. K., 2020b, Microwave holographic imaging of nonmetallic concentric pipes, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69 (10), 7594-7605.
- Yigit, E., Demirci, S., Ozdemir, C. ve Tekbas, M., 2013, Short-range ground-based synthetic aperture radar imaging: performance comparison between frequency-wavenumber migration and back-projection algorithms. *Journal of Applied Remote Sensing, International Society for Optics and Photonics*. 7: 73483.
- Yigit, E., Kayabaşı, A., Toktaş, A., Sabancı, K., Tekbaş, M. ve Duysak, H., 2017, Millimetre wave ISAR imaging technique based on sparse aperture data collection, *2017 5th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)*, 1-4.
- Yigit, E. ve Duysak, H., 2019, Determination of Optimal Layer Sequence and Thickness for Broadband Multilayer Absorber Design Using Double-Stage Artificial Bee Colony Algorithm. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 67: 3306-3317.
- Yiğit, E., 2014, Compressed Sensing for Millimeter-wave Ground Based SAR/ISAR Imaging. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 35: 932-948.
- Yiğit, E., 2020, A translational motion compensation technique for inverse synthetic aperture radar images using multi-objective particle swarm optimization algorithm. *Microwave and Optical Technology Letters, John Wiley & Sons, Ltd*. 62: 2217-2225.
- Zhang, Y., Jiang, X., Ma, Z., Yang, Q., Zeng, Y., Deng, B. ve Wang, H., 2021, An efficient interpolation-free algorithm for cylindrical millimeter-wave holographic three-dimensional reconstruction, *Microwave and Optical Technology Letters*, 63 (4), 1018-1023.
- Zhou, Z., Wei, S., Zhang, H., Shen, R., Wang, M., Shi, J. ve Zhang, X., 2022, SAF-3DNet: Unsupervised AMP-Inspired Network for 3D MMW SAR Imaging and Autofocusing, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- Zhu, R., Zhou, J., Jiang, G. ve Fu, Q., 2017, Range migration algorithm for near-field MIMO-SAR imaging, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14 (12), 2280-2284.
- Zhuge, X., Yarovoy, A. G., Savelyev, T. ve Ligthart, L., 2010a, Modified Kirchhoff migration for UWB MIMO array-based radar imaging, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48 (6), 2692-2703.
- Zhuge, X., Yarovoy, A. G., Savelyev, T. ve Ligthart, L., 2010b, Modified Kirchhoff Migration for UWB MIMO Array-Based Radar Imaging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 48: 2692-2703.

Zhuge, X. ve Yarovoy, A. G., 2012, Three-Dimensional Near-Field MIMO Array Imaging Using Range Migration Techniques. IEEE Transactions on Image Processing. 21: 3026-3033.

