T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZAMAN EVİRME (TIME REVERSAL) GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

HAKKI NAZLI
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2018

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZAMAN EVİRME GÖRÜNTÜLEME (TIME REVERSAL) YÖNTEMLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

HAKKI NAZLI
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
PROF. DR. AHMET ARİF ERGİN

GEBZE
2018

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

APPLICATION OF GENERALIZED PENCIL OF FUNCTION METHOD TO TIME REVERSAL IMAGING

HAKKI NAZLI

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY

DEPARTMENT OF ELECTRONIC ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR

PROF. DR. AHMET ARİF ERGİN

GEBZE

2018

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	**DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 13/06/2018 tarih ve 2018/31 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 12/07/2018 tarihinde tez savunma sınavı yapılan HAKKI NAZLI'nın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. A. Arif ERGIN

ÜYE : PROF. DR. CANER ÖZDEMİR

ÜYE : Prof. Dr. Ali ALKUMRU

ÜYE : Prof. Dr. Serkan AKSOY

ÜYE : Doç. Dr. Serkan TOPALOĞLU

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi ..... Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

ÖZET

Zaman Evirme (TR) (*İng. Time Reversal*) yöntemi, ortamdaki elektromanyetik/akustik dalgaların gerçek ölçüm ortamında toplandıktan sonra sanal ortamda zaman uzayında ters çevrilerek tekrar ortama yayılmasıyla kaynakların bulunduğu bölgelerde odaklanma sağlayan bir tekniktir. Bu teknik ilk olarak optik ve akustik uygulamalarda çalışılmış, ilerleyen yıllarda elektromanyetik olaylarda kullanılmıştır. Zaman evirme yöntemi uzaktan algılama, sualtı akustiği, haberleşme, radar görüntüleme, hedef konum tespiti gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu tez çalışması, çoklu alıcı-verici anten dizisi ile toplanan geniş bantlı elektromanyetik sinyaller ile zaman evirme yöntemlerinin matematiksel iyileştirmesini ve bu sinyallerden elde edilen klasik TR sonuçlarının önerilen yöntem ile karşılaştırmasını içermektedir.

Çoklu alıcı-verici anten dizisinden elde edilen multistatik veri matrisinin $\mathbf{K}(\omega)$ TR operatörü ortamdaki saçıcıların genlik ve hedef konum tespitini yapabilmektedir. Literatürde klasik TR teknikleri Tekil Değer Ayrıklaştırılması (SVD) yöntemine dayanır. Mevcut TR yöntemleri ile yüksek çözünürlüklü görüntüleme yapılabilmesine rağmen, $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin frekansları arasında SVD'den kaynaklanan faz bozulması—$\varphi_{SVD}(\omega)$—nedeniyle saçıcıların lokasyonun tespitinde hatalar meydana gelmektedir.

Çalışma kapsamında, TR tekniklerinde kullanılan SVD yöntemi yerine, $\mathbf{K}(\omega)$ matrisine Genelleştirilmiş Matris Kalem Yöntemi (GPOF) (*İng.* Generalized Pencil of Function Method) uygulanarak noktasal saçıcıların faz ve genlik bilgileri, saçıcıların 2B lokasyonları yüksek hassasiyetle tespit edilmiştir. Geliştirilen yöntem ile İşaret Gürültü Oranı (SNR) değerinin 10 dB'den büyük olduğu durumda, SVD'den kaynaklanan faz bozulmalarının neden olduğu sapmalar giderilmiştir. SVD tabanlı TR yöntemleri ile tespit edilebilen saçıcı sayısı, $\mathbf{K}(\omega)$ matrisini oluşturan anten sayısı ile sınırlı olmasına rağmen TR-GPOF yöntemi ile ortamda belirlenecek saçıcı sayısı $\mathbf{K}(\omega)$ matrisini oluşturan anten sayısından bağımsız olarak hesaplanabilmektedir. Önerilen yöntemin yeterliliği, hem simulasyon verisi hem de ölçüm verisi ile doğrulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Uzaktan Algılama, Zaman Evirme, Genelleştirilmiş Matris Kalem Yöntemi (GPOF).

SUMMARY

Time Reversal (TR) method is an adaptive waveform signal processing technique particularly suited to homogenous and nonhomogeneous media that re-focuses waves on scattering points in space. Early work has been concentrated on optical and acoustic/ultrasonic applications. In the following years this technique has been used for electromagnetic phenomena. The TR method has been used in underwater acoustic, communication, tomography, remote sensing, radar imaging, target localization, direction estimation, and other applications.

This dissertation proposes the mathematical improvement of time reversal techniques and compares traditional time reversal techniques with proposed method for ultra wideband electromagnetic waves using multistatic transceivers.

The TR technique has been used to estimate the locations and amplitudes of point scatterers from multistatic data matrix $\mathbf{K}(\omega)$ collected by a set of transceivers. In the literature, the TR imaging theory is based on the singular value decomposition (SVD) of space-frequency multistatic data. For ultra wideband (UWB) signals, high resolution images can be constructed by using the conventional TR algorithm but a frequency-dependent and uncontrollable phase $\varphi_{SVD}(\omega)$ that comes from SVD adversely affects the locations of the scatterers on the TR image.

In context of this study, estimation of the locations and amplitudes of point scatterers by applying the generalized pencil of function (GPOF) method to the multistatic data matrix is introduced. As our method does not directly rely on SVD, the results are devoid of corruptions induced by $\varphi_{SVD}(\omega)$ and the locations of the point scatters are predicted with high accuracy in both range and cross-range directions above 10 dB SNR value. It should be emphasized that for the homogeneous media, the GPOF yields the locations of the scatterers directly and the number of antennas used in forming $\mathbf{K}(\omega)$ does not restrict the number of scatters that can be detected. The efficacy of the introduced method is verified by both numerical and measurement examples.

Keywords: Remote Sensing, Time Reversal Techniques, Generalized Pencil of Function Method (GPOF).

TEŞEKKÜR

Aklı ve ilmi bahşeden, bu satırların yazılmasını sağlayan Rabbime hamd olsun.

2001 yılında tesadüf ile başlayan bir birliktelik. Bu uzun süre içinde, kısa görüşmelerimizde kendisinden öğrenilen birçok şey. Doktora eğitimi sürecine başladığım günden bugüne kadar geçen sürede çok yoğun mesai programı bulunmasına rağmen tez danışmanlığıma devam ettiği için, öğrettiği herşey için, her daim güleryüzlü olduğu için sayın Prof. Dr. A. Arif ERGİN'e,

Yayın kabul aşamasında akademik desteğini esirgemeyen, tez sürecim boyunca motive olmamı sağlayan ve gösterdiği samimi tavrı için sayın Prof. Dr. Serkan AKSOY'a,

Bu tezin kabulündeki uzun süreçte tez juri üyeliğine sabırla devam eden ve Mersin'den desteğini esirgemeyen sayın Prof. Dr. Caner ÖZDEMİR'e,

Tez çalışmasında ölçüm verilerini sağlayan Başuzman Araştırmacı sayın Kadir DURGUT ve ASEMLAB ekibine,

Yorucu süreçleri birlikte aştığımız kıymetli arkadaşlarım Ersin ÖZKAN ve Nihat KAVAKLI'ya,

Teşekkür ediyorum.

Son olarak;

Kıymetli eşim ve evlatlarıma bu tezin uzamasından dolayı kendilerine zaman ayıramayıp onları ihmal ettiğim için özür diliyor, her daim destekleri için şükranlarımı sunuyorum.

Annem ve Babam, dualarını benden esirgemedikleri için Rabbim onlardan razı olsun.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLOLAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Konusu ve Motivasyon	1
1.2. Zaman Evirme Yöntemi İlgili Temel Kavramlar	6
1.3. Tezin İçeriği	10
2. TR MODELİ VE ALAN FORMULASYONU	11
2.1. Kavramsal Gösterim	11
2.2. TR Gözlem Modeli ve Alan Formulasyonu	14
2.3. K(ω) Matrisinin Ayrıklaştırılması	18
2.4. Değerlendirme	19
3. SVD TABANLI TR YÖNTEMLERİ	21
3.1. TD-DORT Yöntemi ile Seçici Odaklanma	23
3.2. TR-MUSIC Yöntemi ile Seçici Odaklanma	29
3.3. SVD Tabanlı Yöntemlerde Faz Hataları	30
3.4. Değerlendirme	31
4. GPOF METODUNUN ZAMAN EVİRME YÖNTEMİNE UYGULANMASI	37
4.1. GPOF Yöntemi	37
4.2. GPOF Yönteminin Zaman Evirme Tekniğinde Kullanımı	41
4.3. TR-GPOF Yöntemi ile Hedef Üzerine Odaklanma	44
4.4. Değerlendirme	46
5. BENZETİM VE ÖLÇÜM ÇALIŞMALARI	50
5.1. Benzetim ve Ölçüm Senaryosu	50

5.2. TD-DORT, TR-MUSIC ve TR-GPOF Yöntemlerinin Karşılaştırılması 51
5.3. Gürültü Performansı 56
5.4. Ölçüm Sonuçları 60
5.5. Değerlendirme 62
6. SONUÇ VE İLERİ ÇALIŞMALAR 66

KAYNAKLAR 68
ÖZGEÇMİŞ 72

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simge ve Kısaltmalar	**Açıklama**
$\vec{u}(\vec{r},t)$	: Elektromanyetik dalga fonksiyonu
υ	: Herhangi bir ortamdaki elektromanyetik dalga hızı
$\vec{r}$	: Kartezyen koordinat sisteminde *x,y,z* bileşenlerine sahip konum vektörü
μ	: Manyetik geçirgenlik katsayısı
μ_r	: Bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı
ε	: Ortamın dielektrik sabiti
ε_r	: Otamın dielektrik sabiti katsayısı
$\psi(\vec{r},t)$	: Dalga denkleminin çözümü
$\psi(\vec{r},\omega)$	: Dalga denklemi çözümünün frekans cevabı
Δx	: Azimut çözünürlüğü
Δy	: Menzil çözünürlüğü
λ	: Dalgaboyu
R_i	: Saçıcı cisim ile anten arasındaki mesafe
D_A	: Anten açıklığı
R_0	: Hedef ile anten arasındaki mesafe
$\vec{E}^i(\vec{r})$	: *i*'nci saçıcı üzerine düşen elektrik alan değeri
$\hat{p}$	: Birim polarizasyon vektörü
$\vec{J}_i(\vec{r}')$	: Hedef üzerinde indüklenen akım
σ_i	: Saçıcıların yansıma katsayısı
$\mathbf{K}(t)$	: Zaman uzayı çoklu veri matrisi
$\mathrm{I}_p^{\Omega}(\vec{r}_s)$	: TD-DORT yönteminin görüntüleme fonksiyonu
$s_p(\omega)$	: Zamanda evrilmiş besleme işareti
$\mathbf{M}_{\Omega}(\vec{R}_s)$	: TR-MUSIC yönteminin görüntüleme fonksiyonu
*	: Kompleks eşlenik

$\varphi_{SVD}(\omega)$	: SVD'den gelen faz bilgisi
†	: Hermitian eşlenik
1B	: Bir boyutlu
2B	: İki boyutlu
3B	: Üç boyutlu
c	: Basit ortamdaki elektromanyetik dalga hızı
DORT	: Seçici odaklanma yöntemi (*İng. Decomposition of the time reversal*)
$f_i(t)$	*: i*'nci antende toplanan işaret
$G(r)$	: Green fonksiyonu
GPOF	: Genelleştirilmiş Matris Kalem Yöntemi (*İng. Generalized Pencil of Function Method*)
İng.	: İngilizce
k	: Ortamdaki dalga sayısı
$\mathbf{K}(\omega)$	: Frekans uzayı çoklu veri matrisi
$K_{mn}(\omega)$	: $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin *m*'nci satır, *n*'nci sütunu
MDM	: Çoklu veri matrisi (*İng. Multistatic Data Matrix*)
MUSIC	: Çoklu sinyal sınıflama *(İng. Multiple Signal Classification)*
n_k	: Gürültü bileşeni (GPOF yönteminde)
P	: Noktasal saçıcı sayısı
PCM	: Faz eşlenik aynası (*İng. Phase Conjugated Mirror*)
r_i	: Rezidu ya da kompleks genlik (GPOF yönteminde)
RKA	: Radar kesit alanı
r_{mi}	: Saçıcıdan alıcı antene olan mesafe
r_{ni}	: Verici antenden saçıcıya olan mesafe
SFCW	: Adım atlamalı sürekli dalga (*İng. Stepped-Frequency Continous Wave*)
$s_i(t)$	*: i*'nci antendeki darbe üreteci işareti
SVD	:Tekil değer ayrıklaştırılması (*İng. Singular Value Decomposition*)
T	: Transpoz işlemi
$\mathbf{T}(\omega)$	: TR Operatörü
TD	: Zaman uzayı (*İng. time domain*)
TR	: Zaman evirme (*İng. time reversal*)

TRM	: Zaman evirme aynası (*İng. Time Reversal Mirror*)
TRO	: TR operatörü
$\mathbf{U}(\omega)$	: $\mathbf{K}(\omega)\mathbf{K}^{\dagger}(\omega)$ özvektörlerini içeren ortagonal matris
UWB	: Çok geniş bantlı (*İng.UltraWideBand*)
$\mathbf{V}(\omega)$	: $\mathbf{K}^{\dagger}(\omega)\mathbf{K}(\omega)$ özvektörlerini içeren ortagonal matris
Z_1, Z_2	: Vandermonde matrisleri
z_i	: Faz bilgisi (GPOF yönteminde)
δ	: Örnekleme aralığı
δx	: x eksenindeki örnekleme aralığı
δy	: y eksenindeki örnekleme aralığı
$\Lambda(\omega)$	: $\Sigma(\omega)$ matrisinin elemanı
$\Sigma(\omega)$	: $\mathbf{K}(\omega)$'nın tekil değerler matrisi
ω	: Açısal frekans (rad/sn)
Ω	: Bant genişliği

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
1.1:	Zaman Evirme olayı. a) Çoklu alıcı-verici dizisinden hedefe gönderilen dalgalar. b) Saçılan alanların alıcılardan toplanması. c) Alıcı-verici dizisinin yüzeyinde üretilen zamanda evrilmiş alanların ortama tekrar yayılması. d) Saçıcı odaklanması.	2
1.2:	TD-DORT tek frekans analizi. Seçici hedefe odaklanma. a) Anten açıklığı 5m. b) Anten Açıklığı 50m.	4
1.3:	Kaynak ve gözlem noktası geometrisi.	8
2.1:	a) Kısa darbe işaretinin verici anten dizisinden ortama yayılmasıyla saçılan darbelerin alıcı dizilerinden toplanması. b) TR işaretlerinin ortama tekrardan gönderilmesi.	12
2.2:	Zaman uzayındaki darbe genişliğinin frekans uzayındaki bant genişliği ilişkisi.	13
2.3:	7 adet alıcı-verici anten dizisinin TR görüntüleri. Bant Genişlikleri : a) Ω=0.5 GHz. b) Ω =1.5 GHz. c) Ω =2.5 GHz. d) Ω= 3.5 GHz.	14
2.4:	Noktasal saçıcılı model için TR görüntüleme geometrisi.	15
2.5:	3B **K**(ω) MDM matrisi.	17
2.6:	TR yöntemleri akış diyagramı.	20
3.1:	a) TR Ölçüm uzayı. b) Standart TR yöntemi. c) Seçici odaklanma DORT yöntemi.	21
3.2:	$K_{mn}(t)$ matrisinin oluşum senaryosu.	23
3.3:	Seçici odaklanmayı sağlayan özvektör gösterimi.	27
3.4:	TR görüntüleme uzayı.	28
3.5:	a) Verici işaret. b) SVD ile gelen faz bozulması (mavi), olması gereken faz işareti (siyah).	31
3.6:	Senaryo-1 (Referans): a) Ω: 1GHz, Merkez Frekans 1.5 GHz, Saçıcı koordinatları (x,y): (10,-2), (14,2). b) Saçıcıların menzil profili.	32
3.7:	Senaryo-1: Ω: 1 GHz, Merkez Frekans 1.5 GHz, TxRx: 9, Anten Açıklığı: 16m. a) 2B TD-DORT. b) 3B TD-DORT. c) 2B TR-MUSIC. d) 3B TR-MUSIC.	33

3.8: Senaryo-2: Ω: 2 GHz, Merkez Frekans 1.5 GHz, TxRx: 9, Anten açıklığı: 16m. a) 2B TD-DORT. b) 3B TD-DORT. c) 2B TR-MUSIC. d) 3B TR-MUSIC. 34
3.9: Senaryo-3: Ω: 1 GHz, Merkez Frekans 1.5 GHz, TxRx: 15, Anten açıklığı: 16m. a) 2B TD-DORT. b) 3B TD-DORT. c) 2B TR-MUSIC. d) 3B TR-MUSIC. 35
3.10: Senaryo-4: Ω: 1 GHz, Merkez Frekans 1.5 GHz, TxRx: 9, Anten açıklığı: 32m. a) 2B TD-DORT. b) 3B TD-DORT. c) 2B TR-MUSIC. d) 3B TR-MUSIC. 36
4.1: TR dizisinin oluşturduğu elips eğrileri. 45
4.2: a) Ölçüm bölgesi. b) TR-GPOF yöntemi. 46
4.3: TR-GPOF verileri ile elde edilen elips eğrileri. 47
4.4: a) Ölçüm bölgesi. b) Menzil profili. 48
4.5: a) 2B TD-DORT. b) 2B TR-MUSIC. c) 3B TD-DORT. d) 3B TR-MUSIC. 48
4.6: TR-GPOF ile saçıcı üzerine odaklanma eğrileri. 49
5.1: a) Ölçüm bölgesi. b) Menzil profili. 51
5.2: K(ω)'nın SVD paterni (tek frekans). 52
5.3: TD-DORT sonucu. a) 2B gösterim. b) 3B gösterim. 52
5.4: TR-MUSIC sonucu. a) 2B gösterim. b) 3B gösterim. 53
5.5: TR-GPOF sonucu. 54
5.6: TD-DORT sonucu ($N > \Sigma_s$ için). a) 2B gösterim. b) 3B gösterim. 55
5.7: TR-MUSIC sonucu ($N > \Sigma_s$ için). a) 2B gösterim. b) 3B gösterim. 56
5.8: TD-DORT Gürültü performansı. a) Gürültüsüz ortam. b) SNR 20 dB. c) SNR 10 dB. d) SNR 5 dB. 57
5.9: TR-MUSIC Gürültü Performansı. a) Gürültüsüz Ortam. b) SNR 20 dB. c) SNR 10 dB. d) SNR 5 dB. 57
5.10: TR-GPOF Gürültü Performansı. a) Gürültüsüz Ortam. b) SNR 20 dB. c) SNR 10 dB. d) SNR 5 dB. 58
5.11: TR-GPOF yönteminin türettiği SNR değerine göre elips eğrileri. a) SNR 20 dB. b) SNR 10 dB. 59
5.12: ASEMLAB Ölçüm sistemi. a) Anten sistemi. b) Saçıcı hedefler. c) 1 GHz-2 GHz frekans ölçüm verisi. d) (c)'nin menzil profili. 60
5.13: Ölçüm sonuçları: a) TD-DORT. b) TR-MUSIC. c) TR-GPOF. 62

5.14: Özdeğer eğrisi. a) Ölçüm verisi. b) Benzetim verisi. 63
5.15: Ölçüm verilerinin menzil profili. 65
5.16: Benzetim verilerinin menzil profili. 65

TABLOLAR DİZİNİ

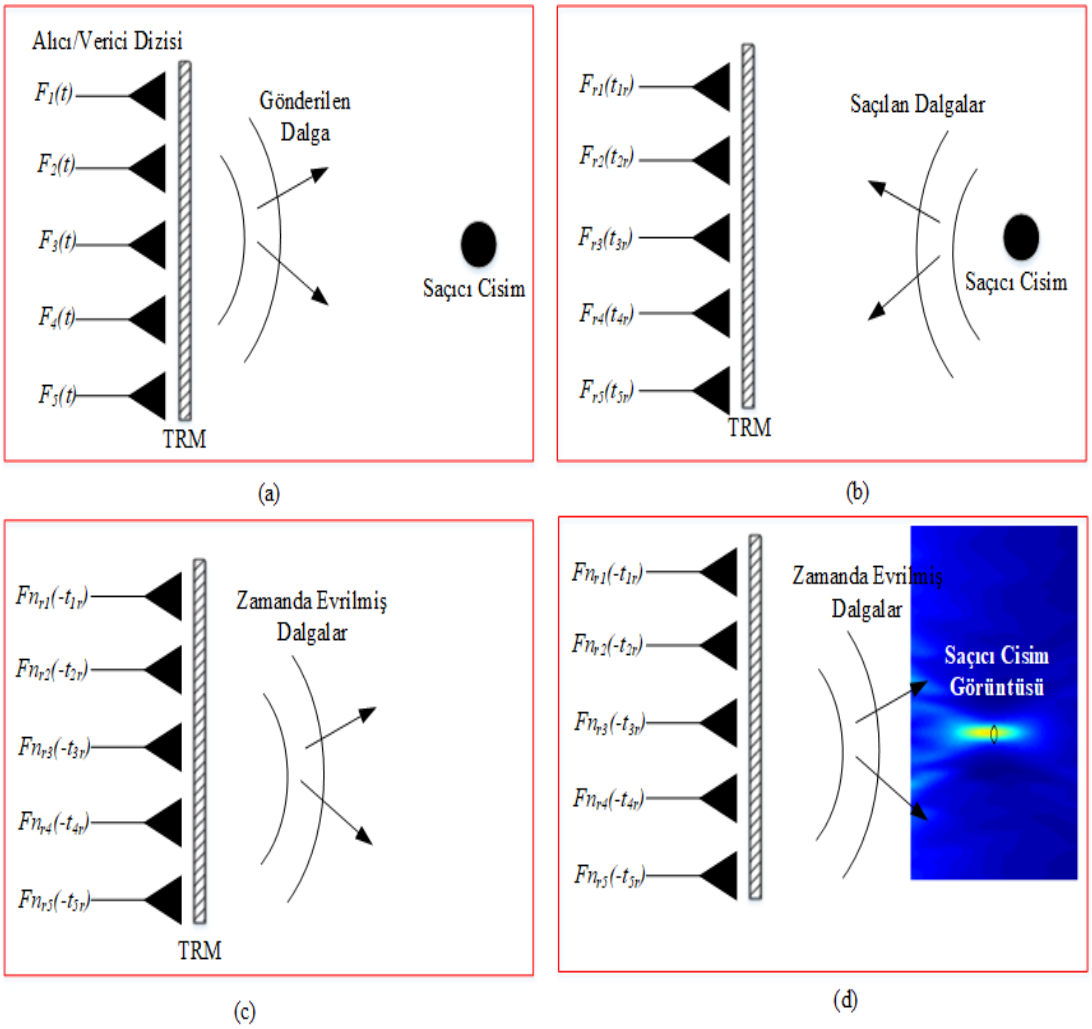
Tablo No :		**Sayfa**
4.1:	Saçıcı konum ve genlikleri.	47
5.1:	Saçıcı konumları ve genlikleri.	51
5.2:	Anten verisinden elde edilen TR-GPOF katsayıları.	55
5.3:	TR-GPOF ile saçıcı konumların belirlenmesi.	55
5.4:	En yüksek genlik değerine göre Sayısal Konum Hatası.	59
5.5:	Ölçüm sonuçları-TR GPOF.	61

1. GİRİŞ

1.1. Tez Konusu ve Motivasyon

Hareketli ya da hareketsiz cisimlerden saçılan elektromanyetik/akustik dalgaların analiziyle bu cisimlerin saçılma merkez noktalarının belirlenmesi birçok alanda kullanılmakta olup, bu elektromanyetik/akustik dalgalardan hedef görüntüsü oluşturma önemli bir ters saçılma problemidir. Elektromanyetik/akustik dalgalarla hedefe odaklanma literatürde birçok farklı tekniklerle yapılabilmektedir. Bu tekniklerden biri olan Zaman Evirme (TR) (*İng. Time Reversal*) yöntemi bir ters saçılma analizi olup, saçıcıların odak noktalarının bulunmasında orijinal bir çözüm sunmaktadır.

TR tekniği temel olarak homojen ve homojen olmayan ortamlarda çoklu alıcı-verici sistemi ile toplanmış çoklu veri matrisi'nin (MDM) (*İng. Multistatic Data Matrix*) işlenmesiyle ortamdaki saçıcıların konumunu belirleyen bir görüntüleme tekniğidir. Bu tekniğin temel çalışma prensibini kısaca tarif edelim. Ortamdaki saçıcı hedeflerin aydınlatılmasıyla oluşan saçılan dalgalar alıcı dizisi ile toplandıktan sonra zamanda ters çevrilir (zamanda evrilme işlemi). Bu evrilmiş dalgalar sanal bir ortamda verici kaynağı gibi kullanılarak ortama tekrar yayıldığında, içinde barındırdığı faz ve genlik bilgileri yardımıyla saçıcıların bulunduğu konum bölgesinde zamanın bir anında tam odaklanma sağlar. Bu olay futbol topuna vurmuş bir sporcunun video kaydına alındıktan sonra, bu kaydın geri oynatılarak topun ilk vurulduğu ana gelmesine benzetilebilir. Teori temelde zaman evirme koşulu altında kayıpsız bir ortamdaki dalga denkleminin değişmezliği prensibine dayanır. Zamanda evrilme işlemiyle ortama tekrar yayılan dalgaların matematiksel yapısı, saçıcılardan gelen dalgaların zamanda simetriğine eşdeğerdir. Şekil 1.1'de zaman evirme olayının temsili gösterimi sunulmuştur.



Şekil 1.1: Zaman Evirme olayı. a) Çoklu alıcı-verici dizisinden hedefe gönderilen dalgalar. b) Saçılan alanların alıcılardan toplanması. c) Alıcı-verici dizisinin yüzeyinde üretilen zamanda evrilmiş alanların ortama tekrar yayılması. d) Saçıcı odaklanması.

Bu teknikte, frekans uzayında monokromatik dalgalar için zamanda evrilme işlemi literatürde bilinen faz eşlenikliği (*İng. Phase conjugation*) prensibi ile gerçekleştirilir [1]. TR görüntülemede PCM (*İng. Phase Conjugated Mirror*) yöntemi tek frekanslı yapılarda başarılı sonuçlar üretmesine karşın, genişbantlı sinyallerde hedef üzerinde odaklanmada birtakım zorluklar göstermiş olup, bu problemin çözümü için iteratif TRM (*İng. Time Reversal Mirror*) yöntemi geliştirilmiştir [2]-[3].

TRM, doğrusal ya da dairesel bir şekilde çoklu alıcı-vericilerin oluşturduğu dizi yapısıyla elde edilen geniş bantlı dalgaları kullanarak saçıcıların konumunu bulmaya imkan sağlar. TRM yöntemi ilk olarak M. Fink tarafından homojen olmayan bir ortamda geniş bantlı akustik dalgalara uyarlanmıştır [4]. Fink ve ekibi ortamda birden çok saçıcı bulunduğunda TRM tekniğini iteratif olarak kullanmış böylece geri yayılan

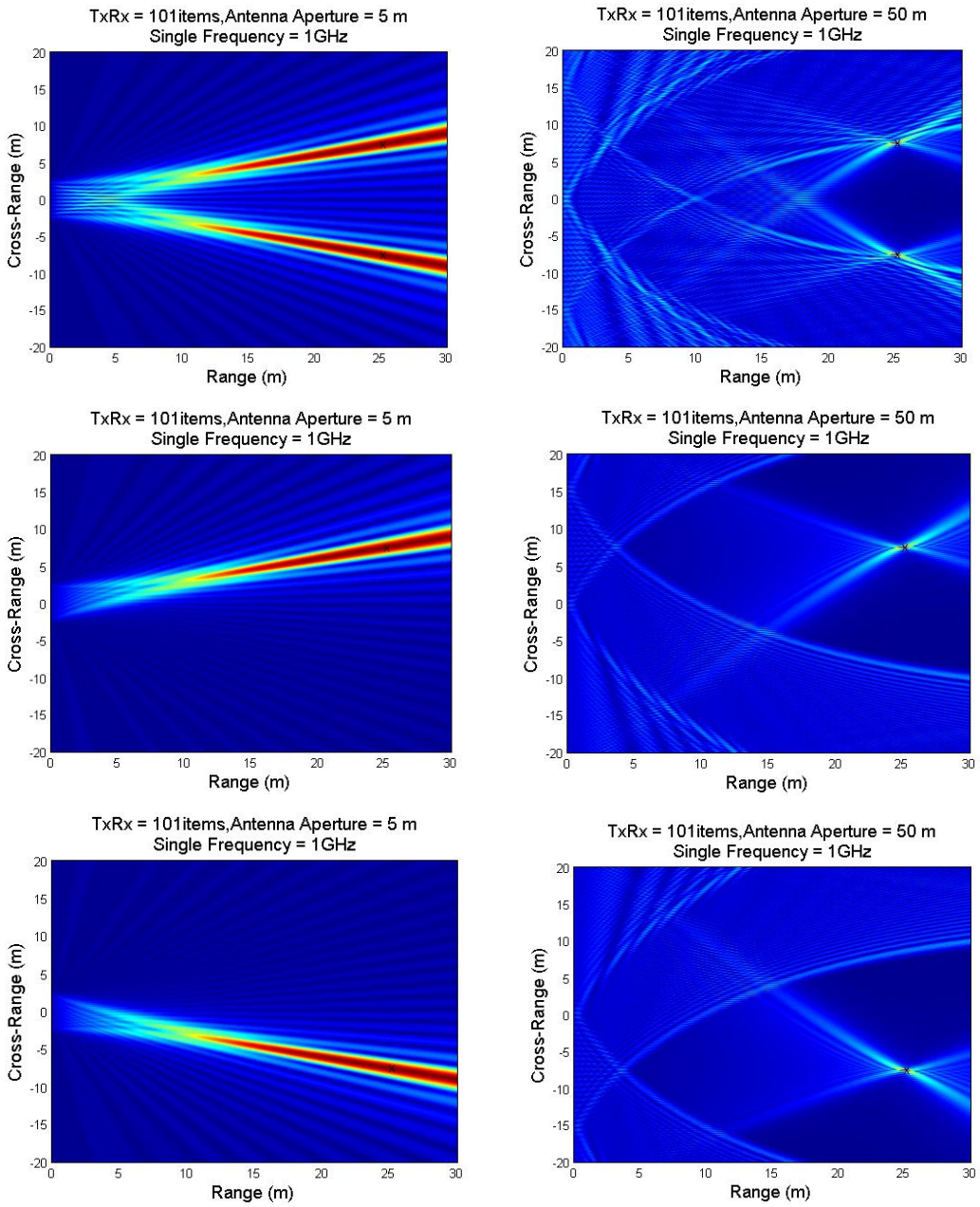
dalgaların saçıcılığı en yüksek olan cisim (saçıcı) üzerinde odaklandığını göstermiştir. TRM tekniği akustik [5]-[7], ters saçılma [8], sualtı haberleşmesi [9], elektromanyetik algılama [10]-[12], ve görüntüleme [13]-[16] gibi birçok alanda uygulanmıştır.

İteratif TRM tekniği ile sadece yüksek saçıcıların bulunduğu bölgeye odaklanma yapılabilmektedir. Saçıcılığı yüksek ya da düşük olan herhangi bir saçıcıya odaklanma DORT yöntemi (*İng. Decomposition of the time reversal*) ile sağlanabilmektedir. Bu DORT yöntemi, istenilen saçıcıya menzilde pencereleme (*İng.range gating*) işlemi kullanmaksızın seçici odaklanma yapabilme yeteneğine sahiptir [17]-[21]. Seçici odaklanmayı sağlayan diğer bir görüntüleme yöntemi TR-MUSIC (*İng. MUltiple SIgnal Classification*) yöntemidir. Devaney tarafından geliştirilen bu yöntem DORT yöntemine benzer özellik göstermekte olup yüksek çözünürlüklü görüntü oluşturur. DORT yöntemi ile TR-MUSIC yöntemi arasındaki temel fark; DORT yöntemi MDM matrisinin büyük değerli özdeğer ve özvektörlerini kullanırken, TR-MUSIC çok küçük değerli (anlamsız) özdeğer ve özvektörlerini kullanır [22], [23].

Yukarıda bahsedilen TR yöntemlerinin veri paketini oluşturan MDM matrisi zaman evirme olayının temel bileşenini oluşturur. MDM matrisi $\mathbf{K}(\omega)$ ω açısal frekansında, çoklu alıcı-verici elemanları arasındaki transfer matrisi olarak tanımlanabilir. Bu MDM matrisi saçılan alanların kompleks genlik ve faz bilgilerini içerir. Kayıpsız bir ortamda zamanda evrilme olayı $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin Hermitian eşleniği $\mathbf{K}^{\dagger}(\omega)$ alınarak elde edilir. Burada † işareti Hermitian eşlenik işlemini sembolize eder. TR görüntüme yönteminde kullanılan TR operatörü (TRO) $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin Hermitian eşleniği ile çarpımıdır. Burada TRO $\mathbf{T}(\omega)$ ile gösterilir. $\mathbf{T}(\omega)$ matrisi $\mathbf{T}(\omega)=\mathbf{K}(\omega)\mathbf{K}^{\dagger}(\omega)$ olarak ifade edilir.

TR teorisi TRO'nun ($\mathbf{T}(\omega)$'nın) özdeğerler (*İng. eigenvalues*) ve özvektörlerine (*İng. eigenvectors*) bağlı olup, bu özdeğer ve özvektörler doğrudan $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin tekil değer ayrışımı (SVD) ile de bağlantılıdır [22]-[26]. $\mathbf{K}(\omega)$ ya da $\mathbf{T}(\omega)$ matrisinin anlamlı her bir özvektörü ortamdaki her bir saçıcının bilgilerini içerir. Bundan dolayı $\mathbf{K}(\omega)$ ya da $\mathbf{T}(\omega)$'nın SVD ayrıklaşmasında elde edilen özdeğerlerin anlamlı sayıları ortamdaki noktasal saçıcıların sayısına eşdeğer olduğu düşünülebilir. $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin SVD'siyle elde edilen özdeğerlerin anlamlı olanlarının sayısı belirli şartlar atında ortamdaki saçıcı sayısına eşit olduğu varsayılır [24]. Birbiriyle ilişkili her bir özvektör ve özdeğer TR dizisinden tekrar ortama yayıldığında her bir saçıcı için ayrı şekilde seçici odaklanma sağlanmaktadır [27]. TD-DORT metodu literatürde hem tek

frekanslı hem de çok frekanslı (geniş bantlı) elektromanyetik dalgalar için analiz edilmiştir [21]. DORT metodu tek bir frekansta uygulandığında sınırlı anten açıklığı koşulunda saçıcının bulunduğu doğrultu hakkında bilgi sağlamaktadır (Şekil 1.2).



(a) (b)

Şekil 1.2: TD-DORT tek frekans analizi. Seçici hedefe odaklanma
a) Anten açıklığı 5m. b) Anten Açıklığı 50m.

Yavuz ve Teixeira zaman uzaylı (TD) (*İng. Time Domain*) TD-DORT algoritmasını geliştirmiştir [28]. Geliştirilen bu TD-DORT yöntemi, sadece merkez frekans verisi yerine bir darbe spektrumunun tüm bant genişliğindeki verilerden elde

edilen TRO özvektörlerinin oluşturduğu zaman sinyallerini kullanarak saçıcı odaklanması sağlamaktadır [28]. TD-DORT yöntemi ile hedef konumlarının menzil (*İng. range*) ve azimut (*İng. cross-range*) eksenlerindeki odaklanması yüksek çözünürlükte sağlanabilmektedir. 2008 yılında Yavuz ve Teixeira TR tabanlı görüntüleme yöntemlerinin hassasiyet eşiğini incelemiş olup, çalışmasında geniş bantlı (UWB) (*İng. ultrawideband*) TD-DORT ve UWB TR-MUSIC algoritmalarını farklı gürültü ve kargaşa seviyelerinde karşılaştırarak bu algoritmalar hakkında performans analizini sunmuştur [29]. Çalışmalar göstermiştir ki, TR görüntüsünün oluşturulmasında kullanılan her bir frekansa ait özvektörlerin frekans geçişlerinde rastgele bir faz bozukluğu oluşmakta bu da zaman sinyallerinin tekrar oluşturulurken bozulmasına sebebiyet vermektedir. Yavuz ve Teixiera çoklu kargaşalı bir ortamda oluşturulan zaman sinyallerindeki uyumluluğu sağlamak için, TD-DORT algoritması yerine Uzay-Frekans (*İng. Space-Frequency*) görüntüleme algoritmasını geliştirmiştir [30].

İlerleyen yıllarda TR görüntüleme yöntemlerinin istatiksel kararlılığı ve TR-MUSIC yöntemlerinin performans analizi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir [32], [33]. Bununla birlikte TR yöntemi son yıllarda toprakaltı görüntüleme, duvar arkası görüntüleme ve sağlık alanında birçok farklı uygulama alanlarında kullanıldığı görülmektedir [34]-[36].

Bu bilgiler ışığında geniş bantlı bir TR görüntüsünün çözünürlüğü temel olarak üç parametreye bağlıdır. Bunlar;

i) Geniş bantlı bir $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin her bir frekans bileşenindeki verinin SVD'sinden elde edilen özvektörlerin arasındaki faz korelasyonu.
ii) Hedeflerin konum hassasiyetinin belirlenmesinde önemi olan ortamın Green fonksiyonunun kestirimi.
iii) Yatay ve dikey çözünürlüğü doğrudan etkileyen anten açıklığı ve bant genişliğinin seçimi.

Bu parametrelerden birinci maddede belirtilen frekanslar arası SVD kaynaklı rastgele faz bozulmasını iyileştirmeye yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bu tez çalışmasında, Genelleştirilmiş Kalem Fonksiyon Metodunun (GPOF) TR tekniğine uygulanmasıyla TR odaklanma tekniklerine farklı bir bakış açısının kazandırılması hedeflenmiştir [37]-[39]. Literatürdeki TR teknikleri, $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin SVD

analizinden elde edilen özdeğer ve özvektör bilgilerini kullanarak hedef odaklanması yapmaktadır. Çalışmada geniş bantlı bir **K**(ω) matrisinin SVD analizinin ürettiği özdeğer ve özvektörler yerine GPOF analizinin ürettiği faz ve genlik vektörleri kullanarak saçıcıların üzerine odaklanmanın yapılması, böylece bu odaklanma işleminde kullanılan zaman uzayı sinyalleri arasındaki faz korelasyonlarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada sunulan TR-GPOF yöntemi uzak alan yaklaşımı koşullarında analiz edilmiş, ölçüm ve benzetim çalışmalarında noktasal saçıcı modelleri kullanılmıştır. Ölçüm çalışmalarında kullanılan noktasal saçıcı modeli trihedral köşe reflektördür. TR-GPOF yöntemi ile hedeflerin menzil eksenindeki uzaklıkları yüksek hassasiyetle bulunmaktadır. Yine SVD analiziyle ortamda tespit edilen saçıcıların sayısı anlamlı özdeğer sayısı ile sınırlı iken, TR-GPOF yöntemiyle tespit edilen saçıcı sayısında bir bağımlılık bulunmamaktadır. Önerilen yöntem ile hedeflerin koordinatları (menzil-azimut ekseninde) yüksek hassasiyetle bulunmaktadır. Frekans geçişlerinde faz uyumsuzluklarının iyileştirilmesiyle saçıcıların konum doğruluk hassasiyeti artmıştır. Bunların dışında, TR-GPOF metodu saçıcıların konum bilgilerine ilave olarak saçıcıların saçılma genlikleri hakkında da bilgi üretmektedir. Bu bilgi ile saçıcıların RKA (Radar Kesit Alanı) değerleri hakkında kestirim yapılabilmektedir [40]-[42]. Sonuç olarak sunulan yöntem, literatürde kullanılan TR tekniğinin zaman korelasyonu iyileştirilmesiyle saçıcı cisimlerin konumlarını yüksek hassasiyetle bulabilmeye ve bu saçıcı cisimlerin RKA değeri hakkında bilgi edinilmesine katkı sağlamaktadır.

1.1. Zaman Evirme Yöntemi İlgili Temel Kavramlar

Kayıpsız basit bir ortam içinde *x, y, z* Kartezyen koordinatlarında u_x, u_y u_z dalga bileşenlerine sahip bir $\vec{u}(\vec{r},t)$ elektromanyetik dalga olduğunu varsayalım. Bu elektromanyetik dalganın her bir bileşeni skaler dalga denklemini sağlamaktadır. Dalga denklemini,

$$\nabla^2\psi\left(\vec{r},t\right)-\frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\psi\left(\vec{r},t\right)=Kaynak \tag{1.1}$$

ile gösterelim. Burada $\psi \in \{u_x, u_y, u_z\}$, $\upsilon = 1/\sqrt{\varepsilon\mu}$ dalga yayılma hızını ve $\vec{r} = \hat{x}x + \hat{y}y + \hat{z}z$ konum vektörünü ifade etmektedir. Burada $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ dielektrik sabitini, ε_r ortamın dielektrik katsayısı, $\varepsilon_0 \cong 8{,}85 \times 10^{-12}$ F/m'dir. Eşitlik (1.1)'de $\mu = \mu_0 \mu_r$ olup ortamın manyetik geçirgenlik katsayısı, μ_r bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı ve $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N/A^2'dir. Eşitlik (1.1)'deki dalga denkleminin $\psi(\vec{r}, t)$ bir çözümü ise $\psi(\vec{r}, -t)$ diğer bir çözümüdür. Bu özellik "zamanda evrilme koşulu altında dalga denkleminin değişmezliği" olarak adlandırılır ve TR görüntüleme yöntemlerinin temel çıkış noktasını oluşturur.

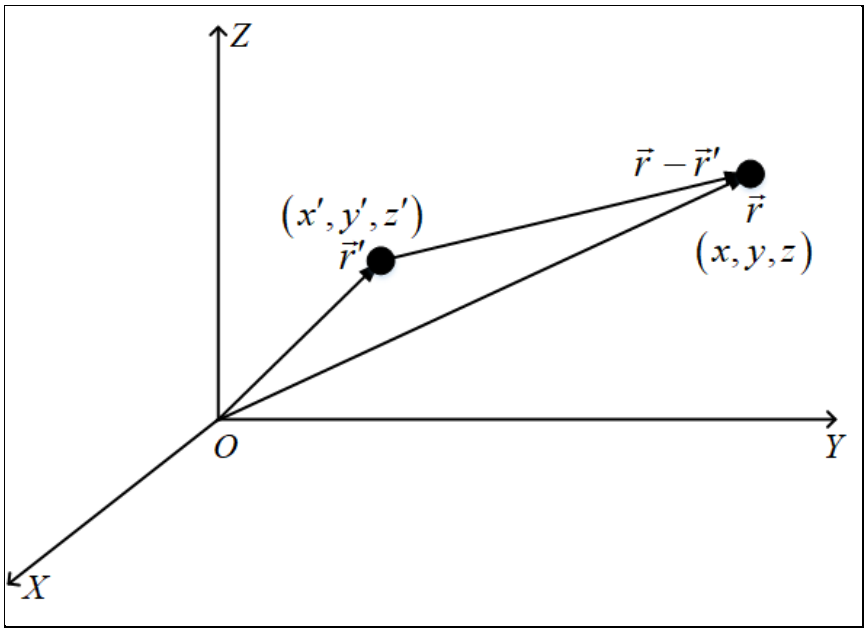
$\psi(\vec{r}, t)$ işaretinin frekans uzayı cevabı Fourier dönüşümü ile elde edilir ve zamanda evrilmiş $\psi(\vec{r}, -t)$ işareti ise $\psi(\vec{r}, t)$ işaretinin Fourier dönüşümünün kompleks eşleniğine karşı gelmektedir. $\psi(\vec{r}, t)$ işaretinin Fourier dönüşümü ve zaman-frekans uzayı ilişkisi Eşitlik (1.2) ve (1.3)'te sunulmuştur.

$$\psi(\vec{r}, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(\vec{r}, t) e^{-j\omega t} dt \tag{1.2}$$

$$\begin{aligned} \psi(\vec{r}, t) &\Leftrightarrow \psi(\vec{r}, \omega) \\ \psi(\vec{r}, -t) &\Leftrightarrow \psi^*(\vec{r}, \omega) \end{aligned} \tag{1.3}$$

Eşitlik (1.2) ve Eşitlik (1.3)'deki ω (*rad/sn*) açısal frekansı ifade etmektedir. $\psi(\vec{r}, -t)$ işaretinin frekans uzayında karşılığı $\psi^*(\vec{r}, \omega)$ ile gösterilir, * kompleks eşlenik işlemini sembolize eder.

TR görüntülemede ortamın dalga modelinin bilinmesi TR görüntülerinde oluşan hedef konumlarının doğruluğunu büyük oranda etkilemektedir. Ortamdaki saçıcıların noktasal kaynak olduğunu ve ortamın basit ortam olduğunu varsayalım. Bu bağlamda $\vec{r}'$ noktasında bulunan bir noktasal kaynağın $\vec{r}$ gözlem noktasında oluşturduğu dalga yapısı Green fonksiyonlarıyla (*G*) ifade edilir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3: Kaynak ve gözlem noktası geometrisi.

Bu koşullar altında Eşitlik (1.1)'deki zaman bağımlı dalga denkleminin G fonksiyonları ile ifadesi;

$$\nabla^2 G\left(\vec{r},t,\vec{r}',t'\right)-\frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}G\left(\vec{r},t,\vec{r}',t'\right)=-\delta\left(\vec{r}-\vec{r}'\right)\delta\left(t-t'\right) \tag{1.4}$$

ile gösterilir. Burada noktasal kaynak, koordinat sisteminin $\vec{r}=\vec{r}'$ noktasında bulunmakta ve olay $t=t'$ anında gerçekleşmektedir. G fonksiyonun Fourier dönüşümü;

$$G(\vec{r},\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} G(\vec{r},t;\vec{r}',t')e^{-j\omega t}dt \tag{1.5}$$

olarak ifade edilir. Eşitlik (1.5), Eşitlik (1.4)'ün içine entegre edildiğinde frekans uzayındaki Green fonksiyonu denklemi,

$$\nabla^2 G\left(r,r'\right)+k^2 G\left(r,r'\right)=-\delta\left(r-r'\right) \tag{1.6}$$

ile ifade edilir. Burada $k = \omega^2 / \upsilon^2$ olup ortamın dalga sayısını ifade eder. Monokromatik yapıda elektromanyetik dalganın yapısı $U(\vec{r},t) = \mathrm{Re}\left\{U\left(\vec{r}\right)e^{j\omega t}\right\}$ olarak ifade edilir. Eşitlik (1.6)'daki dalga denkleminin Green fonksiyonu çözümü;

$$G(\vec{r},\vec{r}',\omega) = \frac{1}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|}e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|} \tag{1.7}$$

olarak bulunur ve bu ifade ortamın dalga fonksiyonunu verir. Zamanda evrilmiş dalgaların saçıcıların bulunduğu koordinata doğru yönlendirilmesini sağlayan önemli bir parametre ortamın Green fonksiyonunun kestirimidir.

TR anten dizisinden zamanda evrilmiş dalgalar, ortama tekrar yayılmaya başladığı ilk yayılma anında dağınık bir yapı sergilemesine rağmen, kaynağın bulunduğu konuma doğru yaklaştıkça eşzamanlı olarak yakınsar ve kaynak bölgesinde odaklanma oluşturur. Sonsuz uzunluklu bir anten açıklığından zamanda evrilmiş dalgaların geri yayıldığını farz edersek, bu dalgalar saçıcıların bulunduğu konumlarda noktasal bir odaklanma oluşturacaktır. Pratik uygulamalarda ise sınırlı bir anten açıklığı ile odaklanma yapılabilmekte olup, saçıcıların bulunduğu konumlarda odaklanan dalgaların çözünürlüğü azimut ekseninde anten açıklığı ile ilişkilidir. Anten açıklığına bağlı olarak bir TR görüntüsünün azimut (yatay eksen) çözünürlüğü;

$$\Delta x = \lambda \frac{R_i}{D_A} \tag{1.8}$$

olarak ifade edilir. Burada $\lambda = 2\pi/k$ dalgaboyunu, R_i saçıcı cisim ile anten arasındaki mesafeyi D_A anten açıklığını ifade eder. Anten açıklığının TR görüntülerine etkisi Şekil 1.2' de sunulmuştur. Saçıcın menzil eksenindeki çözünürlüğü ise gönderilen işaretin bant genişliği ve ortamın elektriksel özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bir TR görüntüsünün menzil çözünürlüğü

$$\Delta r = \frac{c}{2B} \tag{1.9}$$

olup B işaretin bant genişliğini ifade eder. Boş ortamda elektromanyetik dalganın hızı $c = 3\times10^8$ m/s'dir.

Bu başlık altında bir TR görüntüsünü etkileyen parametrelerin matematiksel gösterimi ve TR teorisinin genel yapısı hakkında bilgi sunulmuştur. Bu tez çalışmasında matematiksel çıkarımlar frekans uzayında gösterilmiştir. Zaman bağımlılığı varsayılan $e^{j\omega t}$ terimi gizli tutulmuştur. Monokromatik dalgalarda ω bağımlılığı açıkça gösterilmeyebilir.

1.3. Tezin İçeriği

Bu tez çalışmasında;

i) Literatürde bulunan TD-DORT ve TR-MUSIC yöntemlerinin benzetim ortamında sınırları ve gürültüye karşı duyarlılığı incelenmiştir.
ii) TD-DORT, TR-MUSIC yöntemlerinin analizinde kullanılan SVD ayrıklaşması yerine GPOF tekniği kullanılarak TR yöntemlerine yeni bir bakış açısı kazandırılmıştır.
iii) Geliştirilen TR-GPOF yöntemi hem benzetim hem ölçüm verileri ile doğrulanmıştır.

2. TR MODELİ VE ALAN FORMULASYONU

2.1. Kavramsal Gösterim

TR alıcı-verici dizisinden L mesafe ötede bulunan bir saçıcının $s_i(t)$, $i=1,...,N$, darbe üreteci ile farklı zaman aralıklarında N verici anten ile aydınlatıldığını varsayalım. Verici antenlerden ortama yayılan $s_i(t)$ işaretleri ortamda bulunan hedefler üzerinde indüklenir. Hedef üzerinde indüklenen akımlar saçılan alanları oluşturur. Bu saçılan alanlar her bir alıcı antenden toplanır (Şekil 2.1(a)). Alıcı dizisinin i'nci anteninde $f_i(t)$ toplanan işaret;

$$\underbrace{f_i(t) = s(t) *_t g_{\vec{r}_0\vec{r}_i}(t)}_{\text{Zaman Uzayı}} \quad \Leftrightarrow \quad \underbrace{F_i(\omega) = S(\omega) G_{\vec{r}_0\vec{r}_i}(\omega)}_{\text{Frekans Uzayı}} \tag{2.1}$$

olarak gösterilir. Burada $*_t$ zamanda konvolüsyon işlemini, $g_{\vec{r}_0\vec{r}_i}(t)$ saçıcı ile TR dizisi arasındaki ortamın darbe cevabını içerir. Karşıtlık ilkesine bağlı olarak TR alıcı dizisi ile saçıcı arasındaki ortamın darbe cevabı $g_{\vec{r}_i\vec{r}_0}(t)$ işareti, $g_{\vec{r}_0\vec{r}_i}(t)$ işaretine eşittir.

Eşitlik (2.1)'in sağ tarafı frekans uzayı gösterimidir. Alıcı dizisinde toplanan $f_i(t)$ işaretleri her bir dizi elemanı ile kaydedilir, zamanda evrilir ve ortama tekrar gönderilir (Şekil 2.1(b)). Evrilen işaretler ortamda yayılarak L mesafe ötede bulunan saçıcıya doğru yol alır. i'nci antenden ortama tekrar yayılan evrilmiş işaret,

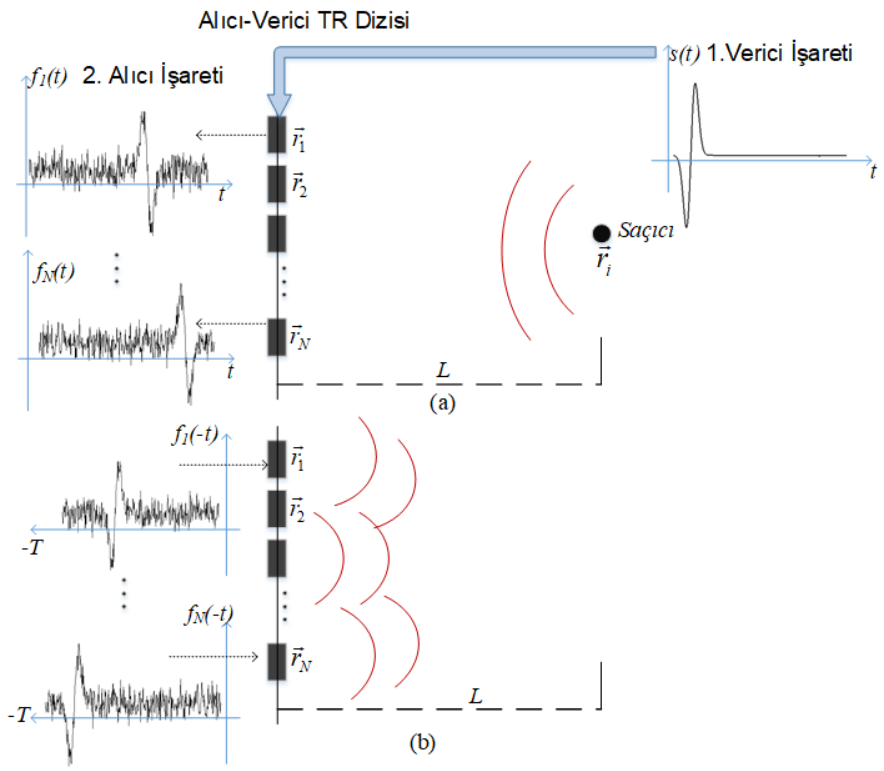
$$\overline{s}_i(t) = \underbrace{s(-t) *_t g_{\vec{r}_0\vec{r}_i}(-t)}_{f_i(-t)} *_t g_{\vec{r}_i\vec{r}_0}(t) \tag{2.2}$$

olarak gösterilir. Burada Eşitlik (2.2)'nin son iki terimi ($g_{\vec{r}_0\vec{r}_i}(-t) *_t g_{\vec{r}_i\vec{r}_0}(t)$) zamanda korelasyon fonksiyonudur. Bu fonksiyonun enerjisi t=0 anında maksimum değere sahiptir. Bu kapsamda çoklu anten yapısında her bir antenden yayılan dalgalar kaynağın bulunduğu konumda maksimum enerji seviyesi oluşturmaktadır. Böylece her bir antenin TR sinyalinin enerjisi saçıcı bölgesinde üst üste kesişim göstererek

saçıcının bulunduğu konumu aydınlatır. TR alıcı-verici dizisinin N elemanlı olduğunu varsayarsak kaynak noktasında oluşan işaret;

$$\bar{s}(\vec{r},t)=\sum_{i=1}^{N} s(-t)*_t\, g_{\vec{r}_0\vec{r}_i}(-t)*_t\, g_{\vec{r}\vec{r}_0}(t) \tag{2.3}$$

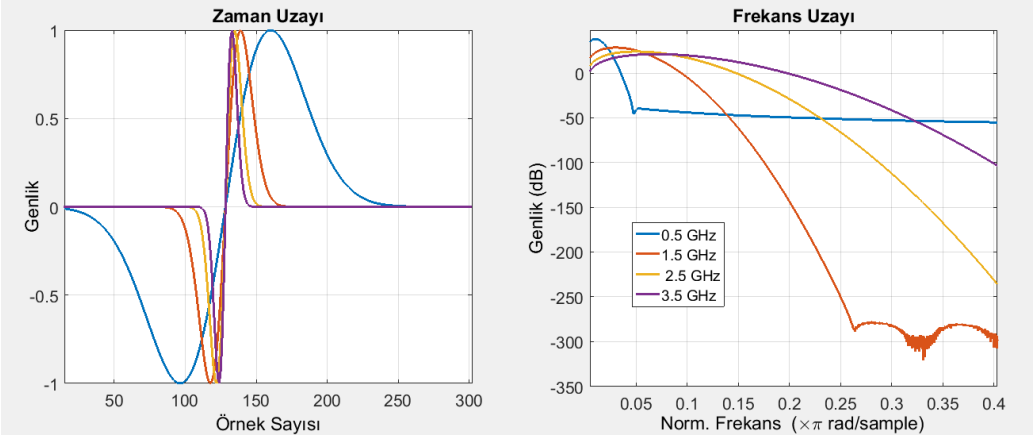
Böylece her bir alıcıdan yayılan evrilmiş dalgaların yüksek enerji değerleri kaynak bölgesinde $\vec{r}_0$ 'da toplanmasıyla odaklanma gerçekleşir. Saçıcı görüntülerinin keskinliği TR dizisindeki anten sayısı arttıkça saçıcı noktasında odaklanan enerji yoğunluğunun toplamı, ortamın yoğunluğuna göre artacağından oluşturulan TR görüntüsü de keskinleşecektir. Bununla birlikte $s(t)$ işaretinin fonksiyon yapısı saçıcının konumudaki çözünürlüğünü de önemli etki etmektedir.



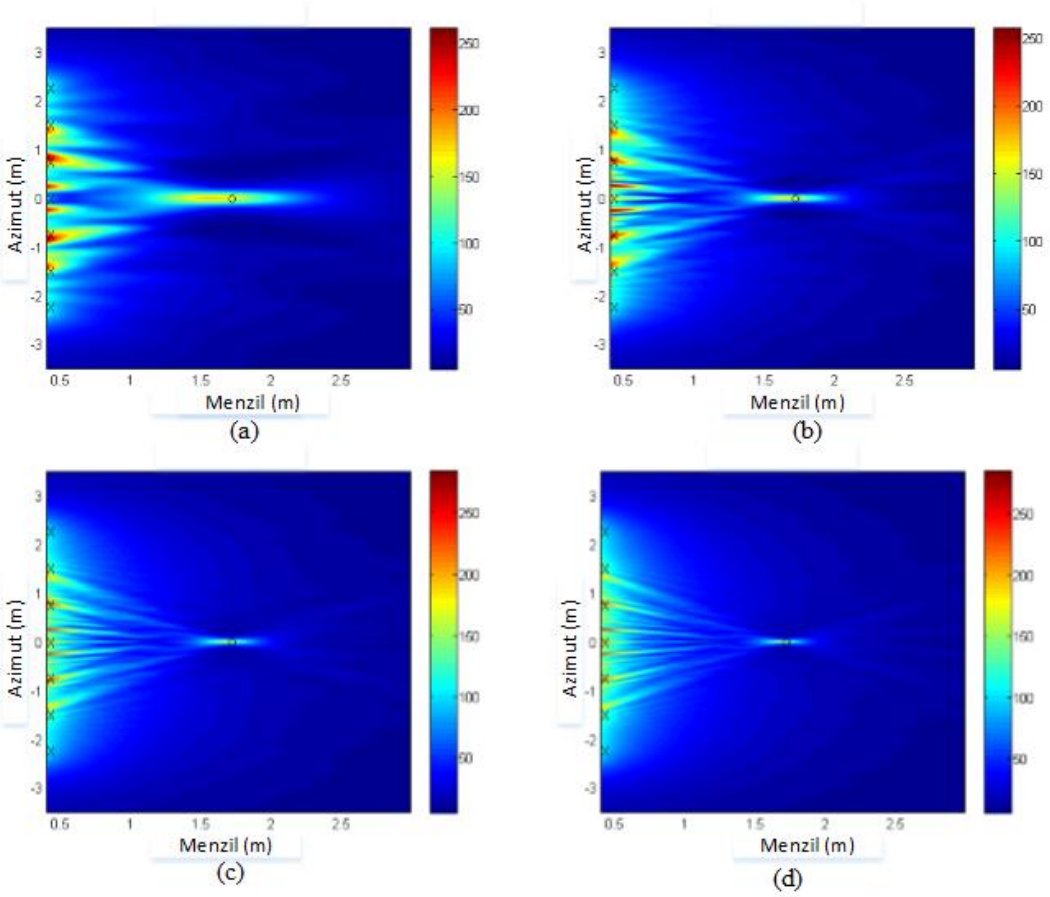
Şekil 2.1: a) Kısa darbe işaretinin verici anten dizisinden ortama yayılmasıyla saçılan darbelerin alıcı dizilerinden toplanması. b) TR işaretlerinin ortama tekrardan gönderilmesi.

Bir TR anten dizisinin 7 alıcı-verici antene sahip olduğunu ve bu antenlerin 5m açıklığa eşit aralıkla yerleştirildiğini varsayalım. 1.75m mesafe ötedeki noktasal saçıcı cisim sırasıyla 0.5 GHz, 1.5. GHz, 2.5 GHz ve 3.5 GHz bant genişliğine sahip darbe

üreteçleri ile aydınlatılsın (Şekil 2.2). Bu işaretlerle elde edilmiş TR görüntüleri Şekil 2.3'te sunulmuştur. Elde edilen TR görüntüleri incelendiğinde saçıcı bölgesindeki odaklanma işaretinin bant genişliği arttıkça hassasiyet değeri artmıştır. 0.5 GHz bant genişliğinde saçıcı cisim yaklaşık 1m'lik bir alanda iken 3.5 GHz için 0.35 m alan içindedir. Bu enerjilerin en yoğun olduğu bölgeler dikkate alındığında hedef merkezinin görüntü merkezinde kaymalar olduğu görülmüştür.



Şekil 2.2: Zaman uzayındaki darbe genişliğinin frekans uzayındaki bant genişliği ilişkisi.

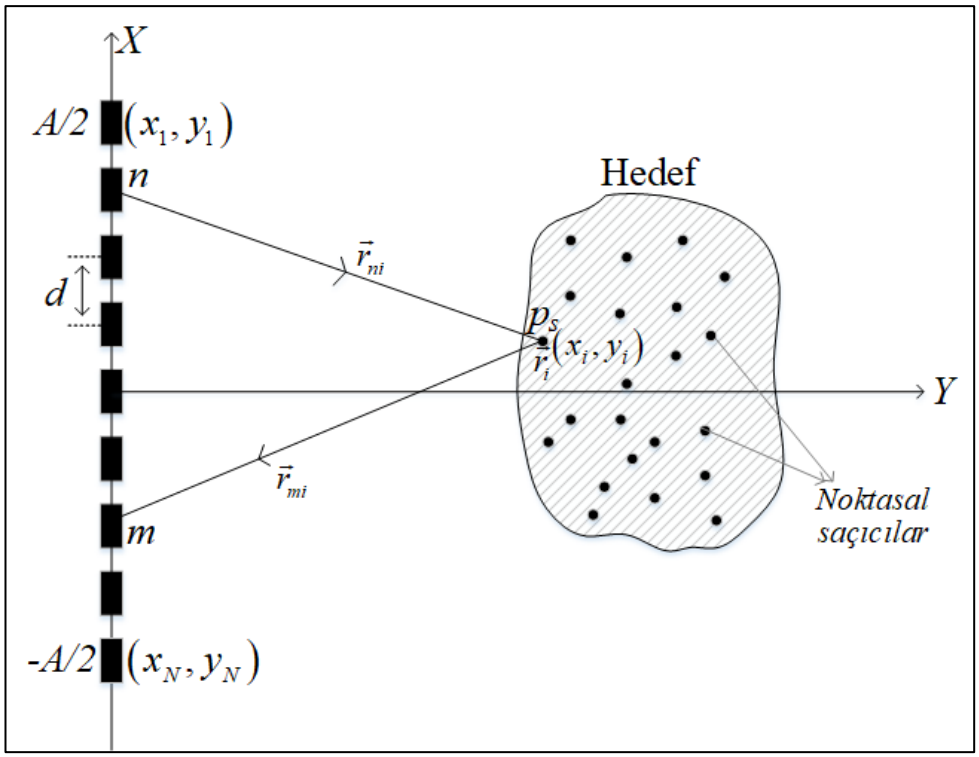


Şekil 2.3: 7 adet alıcı-verici anten dizisinin TR görüntüleri. Bant Genişlikleri : a) Ω=0.5 GHz. b) Ω =1.5 GHz. c) Ω =2.5 GHz. d) Ω= 3.5 GHz.

Tez çalışması kapsamında matematiksel gösterim frekans uzayında yapılmıştır. Saçılan dalgaların düzlemsel yapıda olduğu ve saçıcıların uzak alanda ve homojen ortamda olduğu varsayılmıştır.

2.2. TR Gözlem Modeli ve Alan Formulasyonu

A anten açıklığında eşit aralıklarla dizilmiş *N* adet alıcı verici anten dizisi olduğunu varsayalım. Bu eşit aralıklarla dizilmiş anten dizisinin her bir elemanı arasındaki mesafe *d* olsun (Şekil 2.4).



Şekil 2.4: Noktasal saçıcılı model için TR görüntüleme geometrisi.

Şekil 2.4'deki TR sisteminde ilk olarak *N* kanallı alıcı-verici dizisinin bir verici elemanından *y*>0 uzayına doğru geniş bantlı elektromanyetik dalgalar gönderilir. Saçıcı üzerine düşen bu elektromanyetik dalgaların indüklediği akım ile oluşan saçılan dalgalar alıcı-verici dizisinin her bir alıcı kanalından farklı bakış açılarıyla toplanır. Bu işlem *N*'nci verici yayılım yapana kadar tekrarlanır. Veri toplama işlemi tamamlandıktan sonra her bir frekans bandı için *N*×*N* MDM matrisi **K**(ω) elde edilir. Çalışma kapsamında hedef ile anten arasındaki mesafe $R_0 = \max_{i,j} \left\| \vec{r}_i - \vec{r}_j \right\|$ uzak alan koşulu altında ve saçıcı üzerine düşen dalgalar düzlemsel dalga olarak alınmıştır. Burada **K**(ω) MDM matrisinin her bir alıcı-verici dizisi elemanını tutan $K_{mn}(\omega)$ verisi uzak alan yaklaşımı $R_0 > 2D^2/\lambda$ koşulunu sağladığı dikkate alınmıştır. Burada her bir dizi elemanının *D* anten açıklığını ifade eder.

Bu koşullar altında, saçıcıların noktasal kaynak olduğunu düşünürsek, saçıcı yoğunluk fonksiyonu,

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^{P} \sigma_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \tag{2.4}$$

tanımlayabiliriz. Burada σ_i saçıcıların yansıma katsayısı P noktasal saçıcı sayısıdır. Bu kapsamda $\vec{r}_n$ konumunda bulunan n'nci antenden gönderilen düzlemsel dalgaların $\vec{r}_i$ konumunda bulunan i'nci saçıcı üzerine düşen elektrik alan değeri,

$$\vec{E}^i\left(\vec{r}\right)=\frac{\hat{p}e^{-jkr_{ni}}}{r_{ni}} \tag{2.5}$$

olarak ifade edilir. Eşitlik (2.5)'deki $\hat{p}$ birim polarizasyon vektörünü, $k=\omega/\upsilon$ dalga sayısını, $r_{ni}=\left\|\vec{r}_i-\vec{r}_n\right\|$ ifade eder. Hedef üzerine gelen dalgalar, hedef üzerinde akım indükleyerek saçılan alanları oluşturur. Hedef üzerinde indüklenen akım modeli;

$$\vec{J}_i\left(\vec{r}'\right)=\sigma_i\varepsilon_0\vec{E}^i\left(\vec{r}_i\right)=\sigma_i\varepsilon_0\vec{E}^i(\vec{r}')\delta\left(\vec{r}'-\vec{r}_i\right) \tag{2.6}$$

saçıcı merkezlerine ait σ_i saçılma katsayısı kompleks yapıya sahiptir. Eşitlik (2.6)'da tanımlanan akım modeli saçıcı üzerinde sonlu sayıda akım oluşturduğu, i'nci saçıcı için oluşan akımın saçıcı üzerine düşen elektrik alan değeri ve kompleks bir saçılma katsayısı ile orantılı olduğu varsayılmaktadır. Saçılma katsayısı σ_i 'nin kompleks olmasının sebebi saçılan elektrik alan değerinin genlik ve faz değişimi göstermesidir.

Eşitlik (2.5)'i Eşitlik (2.6) içinde kullandığımızda ve saçıcı yüzey üzerinde oluşan $\vec{J}$ akımlarının gelen alan $\vec{E}^i$ ile eşdeğer alanlara sahip olduğunu varsayarsak n'nci anten üzerinden gelen alan değerine bağlı akım modeli aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\vec{J}\left(\vec{r}'\right)=\sum_{i=1}^{P}\sigma_i\varepsilon_0\delta\left(\vec{r}'-\vec{r}_i\right)\frac{e^{-jkr_{ni}}}{r_{ni}}\hat{p} \tag{2.7}$$

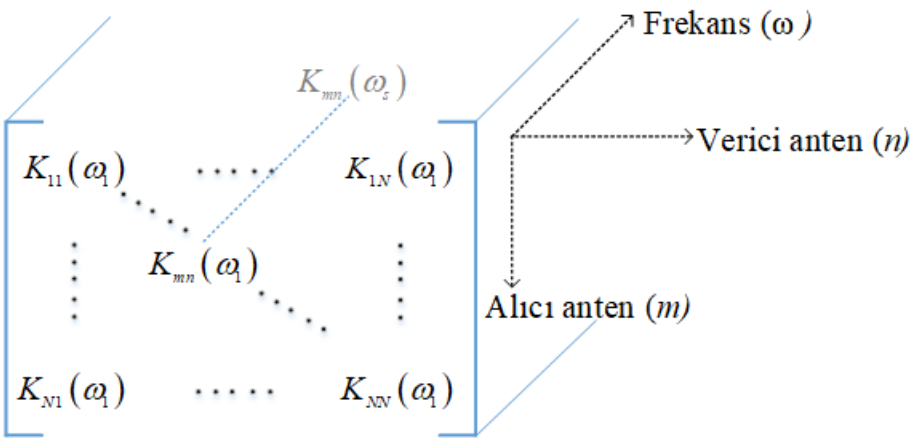
Bu akımların oluşturduğu saçılan alanların gelen alanlarla aynı polarizasyonda olduğunu varsayarsak, TR dizisinin m'nci anteninde gözlemlenen toplam alan değeri $K_{mn}(\omega)$;

$$K_{mn}(\omega)=\sum_{i=1}^{P}\sigma_i\frac{e^{-jk(r_{mi}+r_{ni})}}{r_{mi}r_{ni}} \tag{2.8}$$

Eşitlik (2.8), Şekil 2.4'deki TR modelinde *m*'nci antenden gönderilip *n*'nci antenden alınan ω frekansındaki saçılma değerlerini içermektedir. Bu işlem her bir alıcı-verici için teker teker uygulandığında ω frekansında $\mathbf{K}(\omega)$ MDM matrisi elde edilir (Eşitlik (2.9)).

$$\mathbf{K}(\omega)=\begin{bmatrix} K_{11}(\omega) & \cdots & K_{1N}(\omega) \\ \vdots & K_{mn}(\omega) & \vdots \\ K_{N1}(\omega) & \cdots & K_{NN}(\omega) \end{bmatrix}_{N\times N} \tag{2.9}$$

Burada $K_{mn}(\omega)$, $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin *m*'nci satır *n*'nci sütununun elemanıdır. $\mathbf{K}(\omega)$ karşıtlık ilkesi bağlamında simetrik yapıya sahiptir ki $K_{mn}(\omega) = K_{nm}(\omega)$'dir. $\mathbf{K}(\omega)$ matrisini oluşturma işlemi geniş bantlı sistemlerde her bir frekans için uygulandığında 3B $\mathbf{K}(\omega)$ MDM matrisi elde edilir (Şekil 2.5). Böylece, TR görüntülerinin geniş bantlı analizi elde edilen bu 3B $\mathbf{K}(\omega)$ matrisiyle yapılabilmektedir.



Şekil 2.5: 3B $\mathbf{K}(\omega)$ MDM matrisi.

2.3. K(ω) Matrisinin Ayrıklaştırılması

Geniş bantlı 3B **K**(ω)'nın her bir elemanı, $K_{mn}(\omega)$, Eşitlik (2.8)'de ifade edildiği üzere, saçıcıların kompleks saçılma katsayısı ve ilgili alıcı anten (m) ve verici anten (n) konumlarına bağlı olan faz bilgisini barındırmaktadır.

Eşitlik (2.8)'deki $K_{mn}(\omega)$ ifadesi üç terimi içermektedir. Bu ifadenin iki tanesi alıcı ve verici anten arasındaki mesafeye bağlı olarak salınım gösteren faz değişimini, üçüncüsü ise hedefin saçılma katsayısını içermektedir. Bu kapsamda Eşitlik (2.8)'i alıcı ve verici antenlerin mesafesinden kaynaklanan faz bileşenlerine ve saçıcıların saçılma katsayısına göre her birini ayrıklaştıracak olursak;

$$K_{mn}(\omega) = \sum_{i=1}^{P} \frac{e^{-jkr_{mi}}}{r_{mi}} \sigma_i(\omega) \frac{e^{-jkr_{ni}}}{r_{ni}} \tag{2.10}$$

ifadesi elde edilir. Eşitlik (2.10) doğrultusunda herhangi bir frekans değerinde $N \times N$ boyuta sahip **K**(ω) matrisini ifade edecek olursak;

$$\begin{aligned} \mathbf{K}(\omega) &= \sum_{i=1}^{P} \mathbf{E}_i(\omega) \sigma_i(\omega) \mathbf{E}_i^T(\omega) \\ &= \mathbf{E}(\omega) \bar{\mathbf{\Sigma}}(\omega) \mathbf{E}^T(\omega) \end{aligned} \tag{2.11}$$

burada,

$$\mathbf{E}_i(\omega) = \begin{bmatrix} \frac{e^{-jkr_{1i}}}{r_{1i}} & \cdots & \frac{e^{-jkr_{Ni}}}{r_{Ni}} \end{bmatrix}^T \tag{2.12}$$

$$\mathbf{E}(\omega) = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1(\omega) & \cdots & \mathbf{E}_P(\omega) \end{bmatrix}_{N \times P} \tag{2.13}$$

$$\bar{\Sigma}(\omega) = diag(\sigma_1, ..., \sigma_P) \tag{2.14}$$

elde edilir. Böylece **K**(ω) matrisini oluşturan verilerin alıcı anten, verici anten ve hedef saçılma katsayıları ile ilişkisi açıkça ifade edilmiş olur. Bu şekildeki ayrıklaştırma

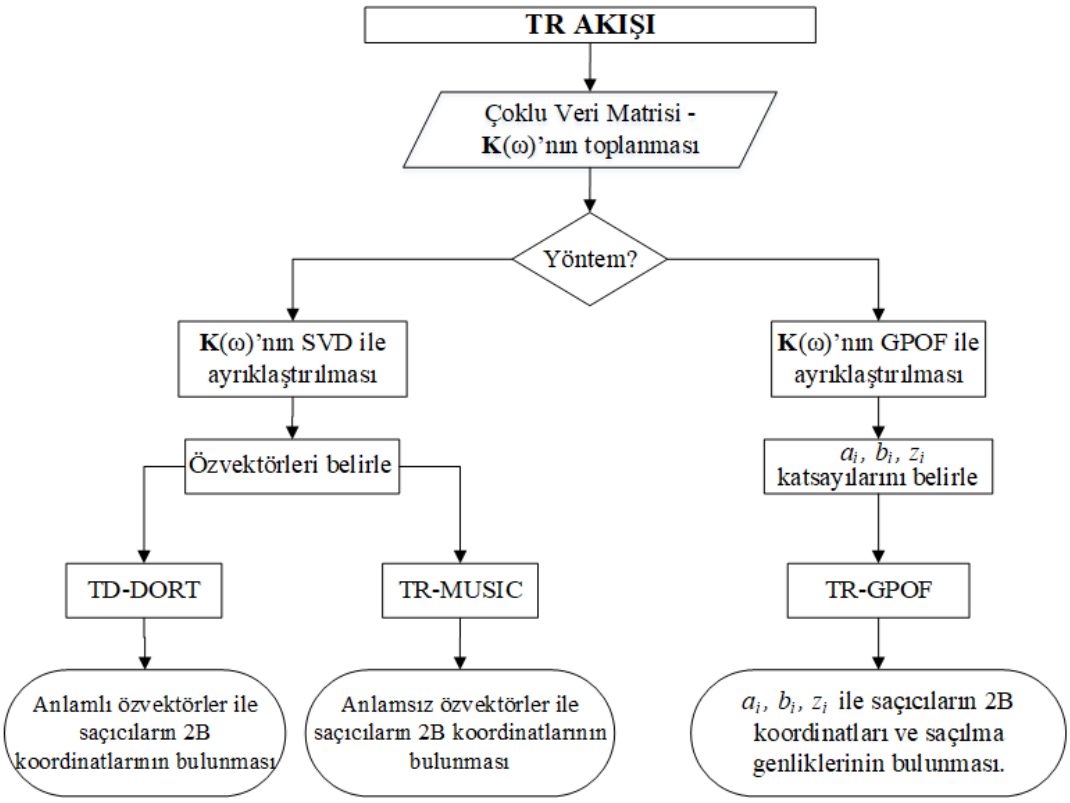
literatürde bulunmayan ve bu tez kapsamında yapılan çalışmalara özgü bir ayrıklaştırmadır [44].

2.4. Değerlendirme

Elektromanyetik saçılımlarda hedeften gelen işaretlerdeki faz ve genlik bilgileri alıcı ve verici anten mesafelerinin oluşturduğu toplam yol bilgisi ve saçılma katsayısı ile beraber iç içe geçmiş şekilde toplanmaktadır. Eğer ki, alıcı antenlerde toplanan saçılmış dalgalar Eşitlik (2.10)'daki gibi ayrık bir yapıda gözlenmesi mümkün olsaydı, her bir saçıcının konum bilgileri doğrudan bulunabilirdi. Fakat alıcıdaki sinyallerin faz bilgileri gidiş ve geliş sinyallerini bir arada içeren toplam yol bilgisi olarak alınabilmektedir.

TR görüntüleme tekniklerinin temel taşı, $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin ayrıklaşması ile elde edilen faz ve genlik bilgilerini kullanılarak saçıcıların bulunduğu konum üzerine evrimiş dalgaları odaklayabilmektir. Geleneksel TR yöntemleri incelendiğinde, $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin ayrıklaştırması literatürde SVD işlemi kullanılarak yapılmaktadır. Bu tez kapsamında ise $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin ayrıklaşması GPOF tekniği ile gerçekleştirilmiştir. $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin ayrıklaştırmasında elde edilen faz ve genlik bilgileri ne kadar kararlı olursa, görüntü uzayında noktasal saçıcıların bulunduğu konuma odaklanma o kadar hassas olacaktır. Çalışmada $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin SVD işlemi kullanılarak elde edilen TD-DORT ve TR MUSIC yöntemleri ile bu teze özgün geliştirilen TR-GPOF yöntemi arasındaki odaklanma sonuçları kıyaslanacaktır (Şekil 2.6).

Geleneksel TR yöntemleri (TD-DORT, TR MUSIC, SF-DORT, CF-DORT vs.) $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin SVD'sinden elde edilen özdeğer ve özvektörlerin ilgili değerlerini kullanarak odaklanma gerçekleştirirken, çalışma kapsamında sunulan yöntemde (TR-GPOF) saçıcı üzerine odaklanma; $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin GPOF ayrıklaşması ile elde edilen a_i, b_i ve z_i katsayılarıyla gerçekleştirilmektedir.

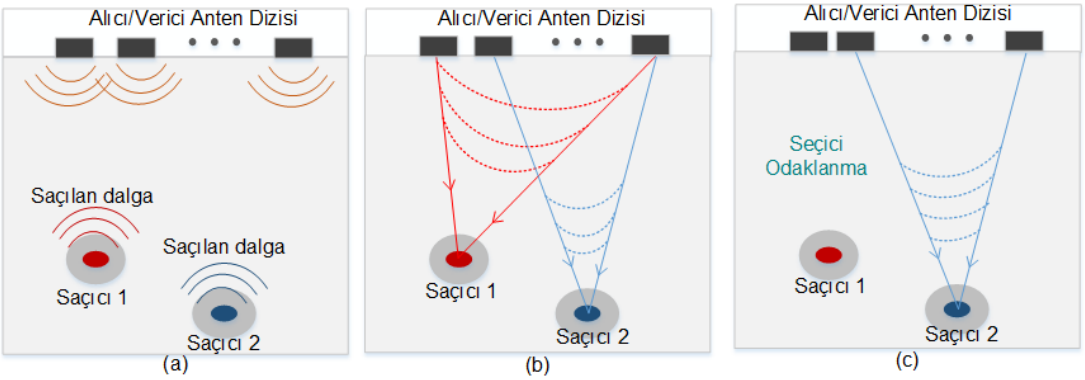


Şekil 2.6: TR yöntemleri akış diyagramı.

3. SVD TABANLI TR YÖNTEMLERİ

Birden çok saçıcının bulunduğu bir ortamda, TR yöntemiyle analiz edilen saçılan dalgalar, eşzamanlı olarak ortamda bulunan tüm saçıcılar üzerinde odaklanma oluşturmaktadır. Bu yöntem standart TR yöntemi olarak adlandırılır. Standart TR algoritmasının iteratif olarak art arda uygulanmasıyla saçıcılığı yüksek olan hedefin olduğu bölge diğer düşük saçıcılara oranla belirginleşme gösterir. Bu yöntem iteratif TR yöntemi olarak bilinir ve TR odaklanma tekniğinin ilk evrelerinde bulunmuştur [2],[3].

İteratif TR yöntemi ile saçılım katsayısı yüksek olan hedef üzerinde odaklanma yapılabilmesine rağmen diğer düşük saçılım katsayısına sahip hedef bölgesinde seçici odaklanma doğrudan yapılamamaktadır. Düşük saçıcılığa sahip hedef bölgelerindeki odaklanma işlemleri zamanda pencereleme (*İng. time gating*) işlemiyle mümkün olmaktadır. İlerleyen yıllarda TR operatörünün ayrıklaştırılması (DORT) ile hedeflerin saçılma katsayılarından bağımsız olarak ve zamanda pencereleme işlemine ihtiyaç duyulmadan çok hedefli bir ortamdaki herhangi bir saçıcı üzerine odaklanma yapılabildiği bulunmuştur. Bu seçici odaklanmayı sağlayan yöntem literatürde DORT yöntemi olarak bilinmektedir (Şekil 3.1) [19].



Şekil 3.1: a) TR Ölçüm uzayı. b) Standart TR yöntemi. c) Seçici Odaklanma DORT yöntemi.

DORT yöntemi temel olarak, MDM matrisi ya da TR operatörünün SVD ayrıklaştırılmasıyla elde edilen özdeğer ve özvektörlerin ayrı ayrı işlenmesiyle seçici odaklanma sağlar. Dolayısıyla, SVD ile elde edilen özdeğer ve özvektör matrislerinin her biri ortamda bulunan her bir saçıcının karakteristiğini barındırdığından, istenilen

hedef üzerine seçici odaklanma zamanda pencereleme işlemine ihtiyaç duyulmaksızın yapılabilmektedir.

TR tekniğinde SVD tabanlı olarak literatürde sıklıkla kullanılan DORT yöntemi ilk olarak C. Prada ve M. Fink tarafından bulunmuştur [18],[19]. G. Micolau ve M. Saillard geniş bantlı sinyallerde DORT yöntemini incelemiştir [21]. D. H. Chambers ve J. G. Berryman, DORT yöntemi ile oluşturulan görüntülerde, SVD'den elde edilen özdeğerlerin hangi kriterler altında saçıcı odaklanması yapabildiğinin analizi detaylıca göstermiş, bu alanda önemli bir konuya açıklık getirmiştir [24]. M. E. Yavuz ve F. L. Teixeira DORT yönteminden farklı birçok görüntüleme tekniği geliştirerek literatüre özgün odaklanma algoritmaları kazandırmış, bununla birlikte bu yöntemin kargaşalı ortamlarda performans analizini yaparak bu ortamlardaki TR görüntüleme tekniklerin başarımını incelemiştir [28]-[30]. J. M. F. Moura ve Y. Jin otomatik odaklanma ve girişim önleme tekniği geliştirmiştir [31]. İlerleyen yıllarda geniş bantlı TR görüntüleme tekniğinin istatiksel kararlılığı iyileştirilmiş, böylece odaklanma görüntüsünün optimal seviyede otomatik olarak bulunabilmesi sağlanmıştır [32]. MDM'nin SVD ayrıklaşmasıyla elde edilen anlamsız özvektörler kullanılarak TR-MUSIC yönteminin performans analizi D. Ciuonzo, G. Romano ve R. Solimene tarafından gerçekleştirilmiştir [33]. SVD tabanlı TR yöntemleri duvar arkası görüntüleme, toprak altı görüntüleme, sualtı haberleşmesi, haberleşme sistemleri, sağlık alanlarında yoğun olarak çalışılmaktadır [34]-[36].

Bu bölümde literatürde en sık kullanılan SVD tabanlı DORT ve TR-MUSIC yöntemlerinin;

i) Matematiksel ifadesi
ii) Geniş bantlı işaretlerde frekans geçişlerinde meydana gelen faz hatalarının analizi
iii) Bu yöntemlerin Fourier dönüşümü ile karşılaştırılması
iv) Darbe sinyalleri ve geniş bantlı frekans adımlı sinyaller ile karşılaştırılması

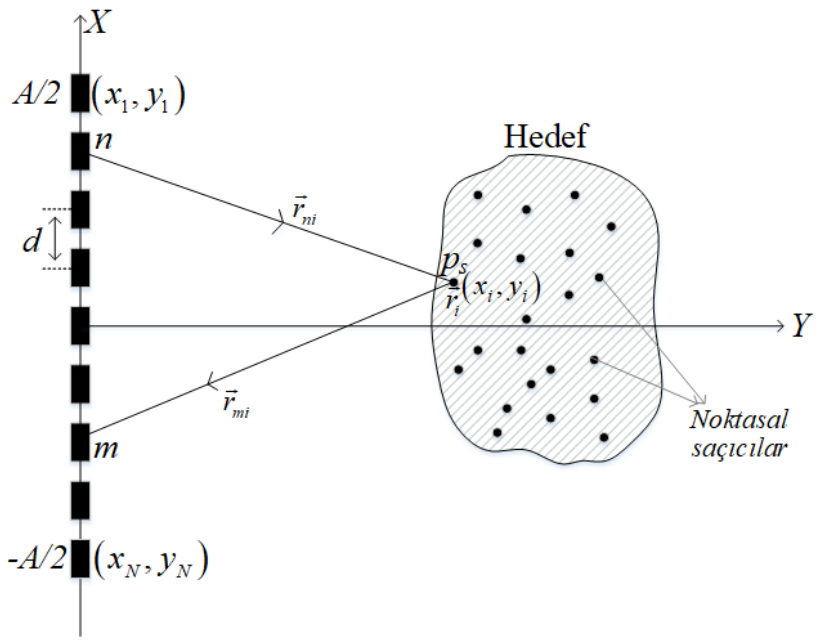
yapılmıştır. SVD tabanlı TR odaklanma yöntemleri genel olarak analiz edilmiştir.

3.1. TD-DORT Yöntemi ile Seçici Odaklanma

Zaman evirme tekniklerinde sıklıkla kullanılan DORT yönteminin analizi için, N adet alıcı-verici anten sistemiyle toplanmış $\mathbf{K}(t)$ zaman uzayı MDM matrisini ele alalım. $N\times N$ boyuta sahip olan $\mathbf{K}(t)$ matrisi;

$$\mathbf{K}(t)=\begin{pmatrix} K_{11}(t) & \dots & K_{1N}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{N1}(t) & \cdots & K_{NN}(t) \end{pmatrix}_{N\times N} \tag{3.1}$$

olarak ifade edilir. $\mathbf{K}(t)$ matrisini oluşturan $K_{mn}(t)$ elemanı, n'nci antenden gönderilen bir $s(t)$ verici işaretinin, ortamdaki saçıcılar ile etkileşimi sonrasında oluşan saçılan dalgaların m'nci antenden alındığını ifade eder (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: $K_{mn}(t)$ matrisinin oluşum senaryosu.

Bu $\mathbf{K}(t)$ işaretinin Fourier dönüşümü ile elde edilen frekans uzayındaki cevabı $\mathbf{K}(\omega)$ MDM matrisi,

$$\mathbf{K}(\omega)=\begin{pmatrix} K_{11}(\omega) & \dots & K_{1N}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{N1}(\omega) & \cdots & K_{NN}(\omega) \end{pmatrix}_{N\times N} \tag{3.2}$$

ile ifade edilir. $\mathbf{K}(\omega)$ içinde bulunan her bir $K_{mn}(\omega)$ elemanı Ω bant genişliğine sahip olsun. TR görüntüleme yöntemlerinde matematiksel işlemler frekans uzayında gerçekleştiğinden devam eden anlatımlarda $\mathbf{K}(\omega)$ gösterimi kullanılacaktır. Bu bağlamda Şekil 3.2'deki senaryo için, bir darbe üreteci, ya da frekans atlamalı geniş bantlı verici sinyali ile toplanan $\mathbf{K}(\omega)$ matrisindeki her bir elemanın $K_{mn}(\omega)$ ifadesi,

$$K_{mn}(\omega) = \sum_{i=1}^{P} G\left(r_{ni},\omega\right)\sigma_i(\omega)G\left(r_{mi},\omega\right) \tag{3.3}$$

olarak ifade edilir. Burada, verici antenden saçıcıya olan mesafe $r_{ni} = \left\|\vec{r}_i - \vec{r}_n\right\|$, saçıcıdan alıcı antene olan mesafe $r_{mi} = \left\|\vec{r}_i - \vec{r}_m\right\|$ olarak gösterilsin. P ortamdaki toplam noktasal saçıcı sayısını, $G\left(r_{ni},\omega\right)$ n'nci verici antenden $\vec{r}_i$ konumunda bulunan p_s saçıcısına giden elektromanyetik dalganın ortamdaki Green fonksiyonunu, $G\left(r_{mi},\omega\right)$ p_s saçıcının ortama yaydığı saçılan dalganın m'nci alıcı antendeki Green fonksiyonunu ifade eder. Eşitlik (3.3)'deki $\sigma_i(\omega)$ ise p_s saçıcısının ω frekansındaki saçılım katsayıdır. Bu bağlamda, ortamın Green fonksiyonunu

$$G\left(r,\omega\right) = \frac{1}{4\pi}\frac{e^{-jkr}}{r} \tag{3.4}$$

olarak tanımlayıp, Eşitlik (3.3)'de yerine yazdığımızda Eşitlik (2.10)'daki ifade elde edilir. Analiz esnasında saçıcıların kendi içinde oluşturduğu çoklu saçılımlar göz ardı edilmiştir.

Eşitlik (3.3) bir alıcı-verici anten çifti için tanımlanmış olup, anten dizisindeki tüm alıcı vericilerin oluşturduğu genel $\mathbf{K}(\omega)$ ifadesi;

$$\mathbf{K}(\omega) = \sum_{i=1}^{P} \mathbf{G}_i\left(r_i,\omega\right)\sigma_i\left(\omega\right)\mathbf{G}_i^T\left(r_i,\omega\right) \tag{3.5}$$

olarak bulunur. Burada $\mathbf{G}(r_i,\omega)$ ifadesi,

$$\mathbf{G}\left(r_i,\omega\right) = \left[G\left(r_{1i},\omega\right),\ldots,G\left(r_{Ni},\omega\right)\right]^T \tag{3.6}$$

ile tanımlanır. Tanımladığımız $\mathbf{K}(\omega)$ MDM matrisi 3B olup, ilk iki boyutu alıcı-verici anten dizisi elemanlarına bağlı faz ve genlik değişimlerini üçüncü boyutu ise farklı frekanslardaki faz ve genlik bileşenlerini içermektedir. DORT analizlerinde $\mathbf{K}(\omega)$ ya da TRO operatörünün özdeğer ve özvektörleri kullanılmaktadır. Her iki matrisin SVD ayrıklaşması benzer matrisler üretmektedir. Bu bağlamda, $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin TRO operatörü;

$$\mathbf{T}(\omega) = \mathbf{K}^{\dagger}(\omega)\mathbf{K}(\omega) \tag{3.7}$$

olarak tanımlanır. $\mathbf{T}(\omega)$ matrisi eşlenik bakışımlı matris (*İng. Self-Adjoint Matrix*) olup, $\mathbf{K}^{\dagger}(\omega)$, $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin karmaşık Hermitian eşlenik matrisidir. $\mathbf{K}^{\dagger}(\omega)$ ifadesi zaman uzayında $\mathbf{K}(-t)$ işaretine karşılık gelmektedir. Toplanmış $N\times N$ boyutlu $\mathbf{K}(\omega)$ MDM matrisine SVD uyguladığımızda,

$$\mathbf{K}(\omega) = \mathbf{U}(\omega)\Sigma(\omega)\mathbf{V}^{\dagger}(\omega) \tag{3.8}$$

elde edilir. Burada $\mathbf{U}(\omega)$, $\mathbf{K}(\omega)\mathbf{K}^{\dagger}(\omega)$ özvektörlerini içeren $N\times N$ boyutlu ortagonal matrisi, $\mathbf{V}(\omega)$ $\mathbf{K}^{\dagger}(\omega)\mathbf{K}(\omega)$ özvektörlerini içeren $N\times N$ boyutlu ortagonal matrisi, $\Sigma(\omega)$ ise $N\times N$ boyutlu özdeğerlerin bulunduğu diagonal matrisi ($diag(\Sigma(\omega))$) ifade eder. Bu bağlamda,

$$\Sigma(\omega) = \begin{pmatrix} \Lambda_{11}(\omega) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \Lambda_{NN}(\omega) \end{pmatrix}_{N\times N} \tag{3.9}$$

reel değerlere sahip olup, $\Lambda_{11}(\omega) > \Lambda_{22}(\omega) > \cdots > \Lambda_{NN}(\omega) > 0$'dır. Ortamdaki saçıcıların birbiri arasındaki oransal değeri hakkında bilgi içeren $\Lambda_{NN}(\omega)$ değerleri Eşitlik (3.3)'deki σ_{NN} değerlerinden farklılık gösterir. Saçıcıların tam genlik bilgileri σ_{NN} içinde olup, bu değer kompleks yapıda iken, $\Lambda_{NN}(\omega)$ reel değere sahiptir. $\Lambda_{NN}(\omega)$ değerleri sadece saçıcıların birbirine olan genlik oranını içerir ve anten sayısı ortamdaki saçıcıdan fazla olduğu durumda ortamda kaç adet saçıcı olduğu hakkında bilgi verir. $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin $\Lambda_{11}(\omega)$,...., $\Lambda_{NN}(\omega)$ özdeğerleri, $\mathbf{T}(\omega)$ matrisinin

özdeğerlerinin kare köküdür. Özvektörleri oluşturan $\mathbf{U}(\omega)$ ve $\mathbf{V}(\omega)$ matrisleri ise şu şekildedir.

$$\mathbf{U}(\omega)=\begin{pmatrix} u_{11}(\omega) & \cdots & u_{1N}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{N1}(\omega) & \cdots & u_{NN}(\omega) \end{pmatrix}_{N\times N} \tag{3.10}$$

$$\mathbf{V}(\omega)=\begin{pmatrix} v_{11}(\omega) & \cdots & v_{1N}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{N1}(\omega) & \cdots & v_{NN}(\omega) \end{pmatrix}_{N\times N} \tag{3.11}$$

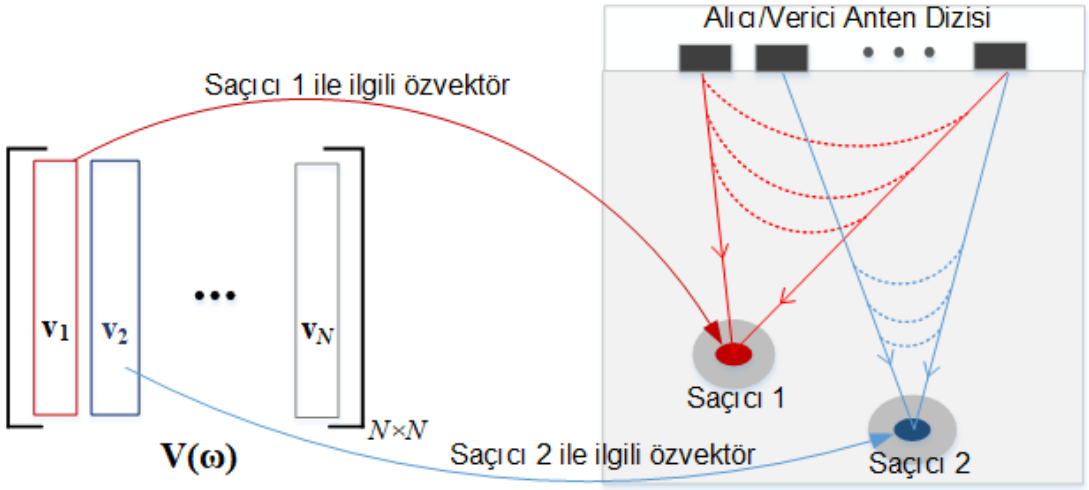
Eşitlik (3.7)'de tanımladığımız TRO operatörü $\mathbf{T}(\omega)$'nın SVD ayrıklaşması ile elde edilen matrisleri incelediğimizde;

$$\mathbf{T}(\omega)=\mathbf{V}(\omega)\mathbf{S}(\omega)\mathbf{V}^{\dagger}(\omega) \tag{3.12}$$

elde edilir. $\mathbf{S}(\omega)$'nın özdeğerler reeldir ve *diag* $(\Sigma(\omega))$'daki değerlerin karesini içermektedir. Dolayısıyla bir TR operatörünün özvektör ve özdeğerleri, $\mathbf{T}(\omega)$ kullanılmaksızın $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin SVD ayrıklaşması ile de bulunabilmektedir. $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin simetrik olmasından dolayı, $\mathbf{U}(\omega)$ ve $\mathbf{V}(\omega)$ matrisi elemanları arasındaki ilişki şu şekilde olur.

$$\mathbf{u}_i(\omega)=\mathbf{v}_i^*(\omega) \tag{3.13}$$

$\mathbf{u}_i(\omega)$ ve $\mathbf{v}_i(\omega)$, $\mathbf{U}(\omega)$ ve $\mathbf{V}(\omega)$ matrisinin *i*'nci sutün matrisini, * işareti faz eşleniğini ifade eder. Ortamda bulunan her bir saçıcı üzerine ayrı ayrı odaklanmayı sağlayacak olan besleme işaretinin bilgileri $\mathbf{u}_i(\omega)$ veya $\mathbf{v}_i(\omega)$ matrislerinin içinde yer almaktadır. $N\times N$ boyutlu $\mathbf{V}(\omega)$ matrisinin her bir sütunu, ortamda bulunan N adet saçıcının yön bilgilerini barındırmaktadır (Şekil 3.3). Bu sütun matrislerinin ayrı ayrı işlenmesi ile istenilen hedef üzerinde seçici odaklanma yapılabilmektedir.



Şekil 3.3: Seçici odaklanmayı sağlayan özvektör gösterimi.

Ortamda bulunan bir *i*'nci saçıcı üzerine odaklanmak için TR anten dizisinden geri yayılan dalgalar bu saçıcı ile bağlantılı $\mathbf{v}_i(\omega)$ özvektörleri ve $\Lambda_i(\omega)$ özdeğeri tarafından üretilmektedir. Bu özvektör ve özdeğerler anten dizisinden ortama geri yayılacak olan TR dalgalarının besleme işaretini oluşturur. $\mathbf{v}_i(\omega)$ (i=1,....,N) kolon matrisi *i*'nci saçıcının olduğu bölgeye yönelecek eşdeğer faz bilgilerini içermektedir. Burada, $\mathbf{V}_i(\omega)$'nın *i*'nci kolonunu, $\Lambda_i(\omega)$ ise bu saçıcıya ait genlik katsayısı değerini içermekte olup, $diag(\Sigma(\omega))$'nın *i*'nci elemanını ifade eder. Bu ifadeyi ortamda bulunan toplam saçıcı sayısına göre genelleştirecek olursak, ortamdaki saçıcıların konumsal bilgisini barındıran *anlamlı* özvektör kümesi $\{\mathbf{v}_1(\omega),\ldots,\mathbf{v}_{Ms}(\omega)\}$, özdeğer kümesi ise $\{\Lambda_1^2(\omega)>,\ldots,>\Lambda_{Ms}^2(\omega)\}$'dir. Burada Ms anlamlı özvektör ve özdeğerlerin sayısını içermektedir. Bu değer dışında kalan diğer özvektörler ise *gürültü* özvektörlerini $\{\mathbf{v}_{Ms+1}(\omega),\ldots,\mathbf{v}_N(\omega)\}$ ve bu gürültü uzayı özvektörleri ile ilişkili özdeğerleri $\{\Lambda_{Ms+1}^2(\omega)>,\ldots,>\Lambda_N^2(\omega)\approx 0\}$ içermektedir.

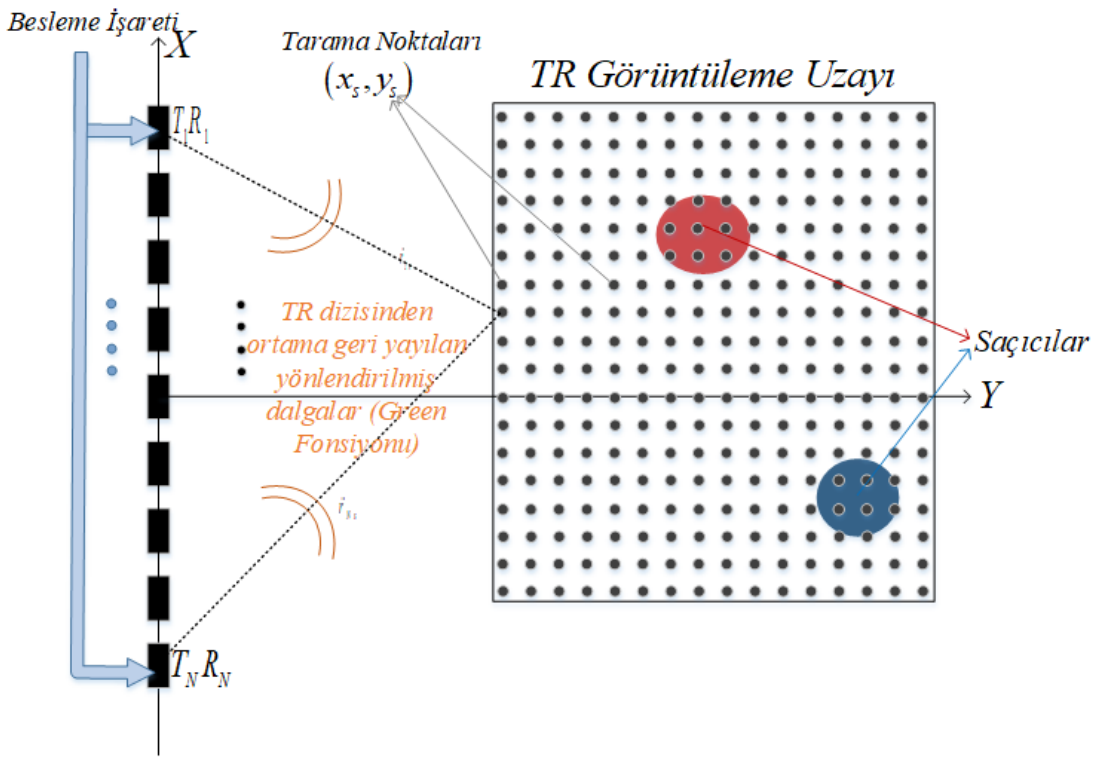
Şekil 3.2'deki gibi homojen olan bir uzayda toplam saçıcı sayısı P_s, anlamlı özvektör sayısını içeren M_s değerine eşittir. Ortamın homojen olmadığı durumlarda tek bir saçıcı ile ilgili birden çok özvektör bulunabilir [20], [21]. M_s değeri, $\mathbf{V}(\omega)$ matrisinin boyutuna bağlı olduğundan, anlamlı özvektör sayısı en fazla N kadar olmaktadır. Bu bağlamda DORT yönteminde ortamda tespit edilebilecek saçıcı sayısı N kadar olabilmektedir. Çalışma boyunca ortamdaki noktasal saçıcı sayısı (P_s) anten dizisi sayısı N'den küçük alınmıştır ($P_s < N$).

TD-DORT yönteminin üçüncü aşaması, **K**(ω) matrisinin SVD'sinden elde edilen $\mathbf{v}_i(\omega)$ ve $\Lambda_i(\omega)$ *anlamlı* özvektör ve özdeğerlerini kullanarak saçıcıların görüntülerinin oluşturulmasıdır. Şekil 3.4'deki homojen ölçüm uzayındaki saçıcıların görüntülerini oluşturmak için ölçüm uzayının Green fonksiyonu $\mathbf{G}(\vec{r}_s,\omega)$'in bilinmesi gerekmektedir. TR anten dizisinden ortama geri yayılacak olan $\mathbf{v}_i(\omega)$ ve $\Lambda_i(\omega)$ besleme sinyalleri $\mathbf{G}(\vec{r}_s,\omega)$ yardımıyla bölgede yayılabilmektedir.

Ortamda saçıcıların bulunduğu bölgede eşit aralıklı tarama noktaları (x_s,y_s) oluşturalım. Bu noktaların anten dizisinde bulunan her bir antene ayrı ayrı uzaklığı $r_{1s}=\|\vec{r}_1-\vec{r}_s\|$, … , $r_{Ns}=\|\vec{r}_N-\vec{r}_s\|$ olarak ifade edelim (Şekil 3.4). Bu bağlamda, anten dizisinin tarama noktalarına olan $\mathbf{g}(r_s,\omega)$ fonksiyonu,

$$\mathbf{G}(\vec{r}_s,\omega)=\left[G(r_{1s},\omega),\ldots,G(r_{Ns},\omega)\right]^T \tag{3.14}$$

olarak ifade edilir. Bu vektör anten huzmelerinin tarama yapmasını sağladığı için tarama vektörü olarak adlandırılır.



Şekil 3.4: TR görüntüleme uzayı.

DORT yöntemi *anlamlı* özvektör kümesini kullanarak TR görüntülemede seçici odaklanmaya imkan sağlamaktadır. Bu *anlamlı* özvektör kümesi ortamdaki saçıcının $\mathbf{v}_p(\omega) = \mathbf{g}^*(\vec{r}_i, \omega) / \|\mathbf{g}(\vec{r}_i, \omega)\|$ fonksiyonu yardımıyla anten dizisini saçıcı konumuna bağlayan Green fonksiyonu vektörünün karmaşık eşleniği ile ilişkilidir. Burada $\vec{r}_i$ saçıcının konumunu ifade eder. Geniş bantlı sinyallerde, her bir dizi elemanının besleme işareti anlamlı özvektör kümesinin tüm frekans bandındaki değerlerini oluşturmaktadır. Yani anten dizisine *p*'nci saçıcıya odaklanmak için uygulanacak TR besleme sinyali;

$$\begin{aligned} s_p(t) &= \mathcal{F}^{-1}\left(\Lambda_p(\omega)\mathbf{v}_p(\omega)\right) = \mathcal{F}^{-1}\left(\mathbf{K}^{\dagger}(\omega)\mathbf{u}_p(\omega)\right) \\ s_p(\omega) &= \Lambda_p(\omega)\mathbf{v}_p(\omega) \end{aligned} \tag{3.15}$$

Alıcı-verici anten dizisine verilecek olan besleme sinyali ve ortamın Green fonksiyonu vektörü yardımıyla bir geniş bantlı TD-DORT sisteminin görüntüleme fonksiyonu;

$$\mathrm{I}_p^{\Omega}(\vec{r}_s) = \int_{\Omega} \Lambda_p(\omega)\mathbf{v}_p^T(\omega)\mathbf{g}(\vec{r}_s, \omega)\, d\omega \tag{3.16}$$

olarak ifade edilir ve TD-DORT yöntemi ile hedeflerin odak görüntülerini oluşturur [29],[30]. Burada *p* odaklanmak istenilen saçıcıyı, Ω bant genişliğini ifade eder. Bant genişliğinin yüksek olması saçıcının menzil eksenindeki odaklanma çözünürlüğünü arttırmaktadır. Yatay eksendeki çözünürlük ise **K**(ω)'nın ayrıklaşması ile elde edilen özvektör ve özdeğerlerden bağımsız olup, bu çözünürlük dalgaboyu, yayılım mesafesi ve anten açıklığı ile ilişkilidir.

3.2. TR-MUSIC Yöntemi ile Seçici Odaklanma

TD-DORT yöntemi ile oluşturulan TR görüntüleri, özvektör ve özdeğer matrislerinin *anlamlı* değerleri ile elde edilmektedir. Ortamdaki saçıcı sayısı P_s'in alıcı-verici anten sayısı *N*'den küçük olduğu durumlarda, **U**(ω) ve **V**(ω) matrislerinin ilk kolonundan P_s'e kadar olan özvektör ve özdeğerleri TD-DORT yönteminin

parametrelerini oluşturur. Bu özdeğer ve özvektörler, alıcı-verici anten dizisinin ana hüzmesinden geri yayılan TR dalgalarının odaklanmayı sağlayan faz ve genlik bilgilerini içermektedir. Homojen bir ortamda bu veriler ile elde edilen TD-DORT görüntülerin çözünürlüğü dalga boyu ve yayılım mesafesiyle doğru orantılı, anten açıklığı ile ters orantılı olarak sonuç üretir.

TR-MUSIC yöntemi ise özvektör ve özdeğer matrislerinin P_s+1'den N'e kadar olan verileri kullanarak ortam görüntüsünü oluşturmaktadır. Burada oluşturulan görüntü ana huzme ile yan huzmeler arasında kalan sıfır bölgelerin karakteristiğine bağlı olduğundan oluşan görüntünün çözünürlüğü TD-DORT yöntemine göre daha yüksektir. Bu kapsamda, geniş bantlı bir TR-MUSIC yönteminin görüntü fonksiyonu şu şekilde ifade edilmektedir [29].

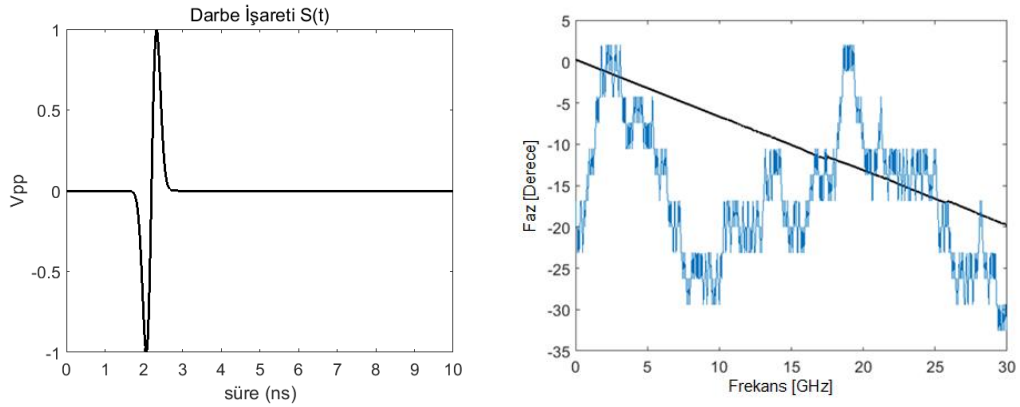
$$\mathbf{M}_{\Omega}\left(\vec{R}_s\right)=\left(\int_{\Omega}\sum_{i=P_s(\omega)+1}^{N}\mathbf{g}\left(\vec{R}_s,\omega\right)\Lambda_i\left(\omega\right)\mathbf{v}_i^*\left(\omega\right)d\omega\right)^{-1} \tag{3.17}$$

3.3. SVD Tabanlı Yöntemlerde Faz Hataları

TD-DORT ve TR-MUSIC tekniklerinde zaman sinyalleri Fourier dönüşümü yardımıyla frekans uzayında analiz edilmektedir. Geniş bantlı zaman işaretleri hesaplama uzayında sürekli bir fonksiyon olarak değil, bu fonksiyonu oluşturan örnek noktaları ile ele alınır. Verici işaretini oluşturan geniş bantlı bir $s(t)$ işaretinin Fourier dönüşümü $S(\omega)$, bu $S(\omega)$ işaretinin hesaplama uzayındaki örnekleri $S[k]=S\ (\omega_k)$, k=1,...,K ve ω_k-ω_1 = Ω ile tanımlansın. SVD tabanlı TR görüntüleme yöntemlerinde 3B MDM matrisine SVD işlemi her bir frekans örneği için ayrı ayrı uygulanmaktadır. Bu uygulama işleminde her bir frekanstaki özvektörler uyumlu olmayan, frekans bağımlı $\varphi_{svd}(\omega)$ faz verisi üretir. Bu uyumlu olmayan faz bilgisi Eşitlik (3.16)'daki görüntüleme fonksiyonunda bulunan $\mathbf{v}_p(\omega)$ öz vektörüne aşağıdaki şekilde etki eder ve ortama geri yayılan TR işaretlerinde sayısal hatalara sebep olur [28]-[30].

$$\mathbf{v}_p\left(\omega\right)=e^{j\phi_{svd}(\omega)}\frac{\mathbf{G}^*\left(\vec{r}_s,\omega\right)}{\left\|\mathbf{G}\left(\vec{r}_s,\omega\right)\right\|} \tag{3.18}$$

Bu eşitlik, Eşitlik (3.15)'de yerine koyulduğunda faz uyumu olmayan zaman sinyalleri oluşturduğu gözlemlenir (Şekil 3.5). Bu faz bozuklukları ise hedefin TR görüntüsünde bozulmalara sebep olmaktadır.



(a) (b)

Şekil 3.5: a) Verici işaret. b) SVD ile gelen faz bozulması (mavi), olması gereken faz işareti (siyah).

3.4. Değerlendirme

Bu başlık altında yukarıda matematiksel ifadesi tanımlanan TD-DORT ve TR-MUSIC yöntemleriyle oluşturulan hedef görüntülerine

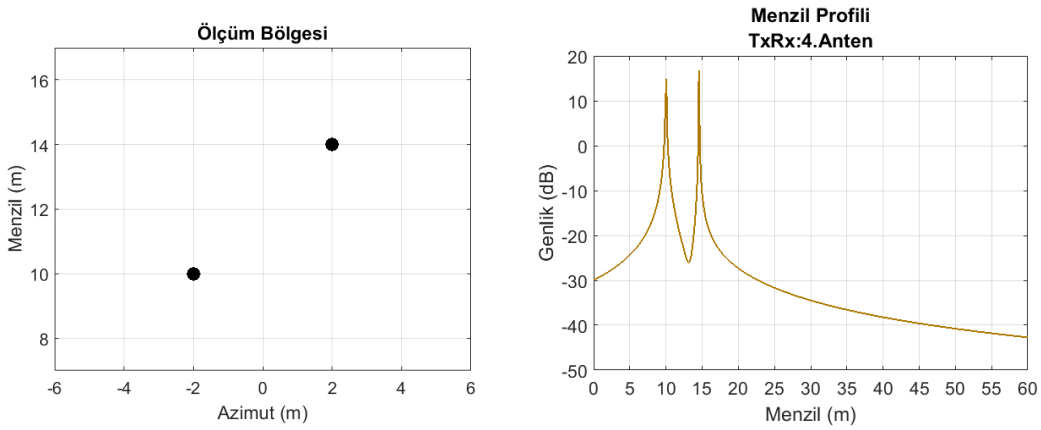
i) Alıcı-verici sayısı
ii) Bant genişliği
iii) Anten açıklığı

parametrelerinin sabit bir senaryo üzerinde oluşturduğu etkiler incelenmiştir. Senaryoda ortamdaki saçıcı sayısı iki olarak alınmış ve saçıcıların noktasal kaynak olduğu varsayılmıştır. Bu iki saçıcının birbirlerine olan konumları *x*-ekseninde 4m, *y*-ekseninde 4m fark olacak şekilde yerleştirilmiştir. Ölçüm sisteminde kullanılan anten dizisindeki her bir antenin ışıma paterni izotropik ve ortamın gürültüsüz olduğu varsayılmıştır. TD-DORT ve TR-MUSIC görüntüleri oluşturulurken görüntü uzayının adım aralığı $dx=dy$=5cm olarak seçilmiştir. Burada dx azimut, dy menzil eksenindeki adım aralığını ifade etmektedir.

Referans senaryo kapsamında;

i) Anten Açıklığı : 16m
ii) Anten Sayısı : 9
iii) Merkez Frekans : 1.5 GHz
iv) Bant Genişliği : 1 GHz
v) Yayılım mesafesi (Menzil eksenindeki Ref. noktası) : 8m
vi) Saçıcı-1 ve Saçıcı-2 koordinatı (*x*,*y*) : (-2m, 6m), (2m, 10m).

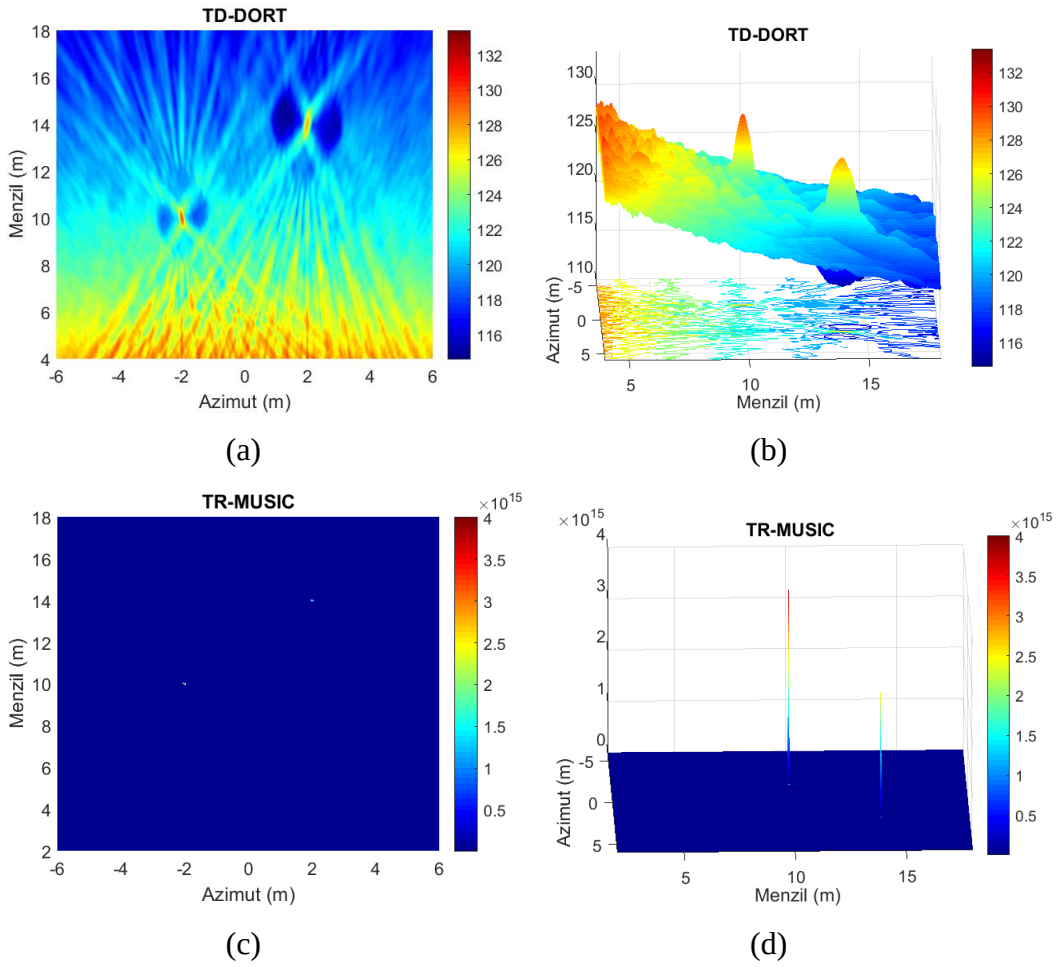
olarak belirlenmiş olup, ölçüm bölgesi Şekil 3.6'da sunulmuştur.



(a) (b)

Şekil 3.6: Senaryo-1 (Referans): a) Ω: 1 GHz, Merkez Frekans 1.5 GHz, Saçıcı koordinatları (*x*,*y*): (10,-2), (14,2). b) Saçıcıların menzil profili.

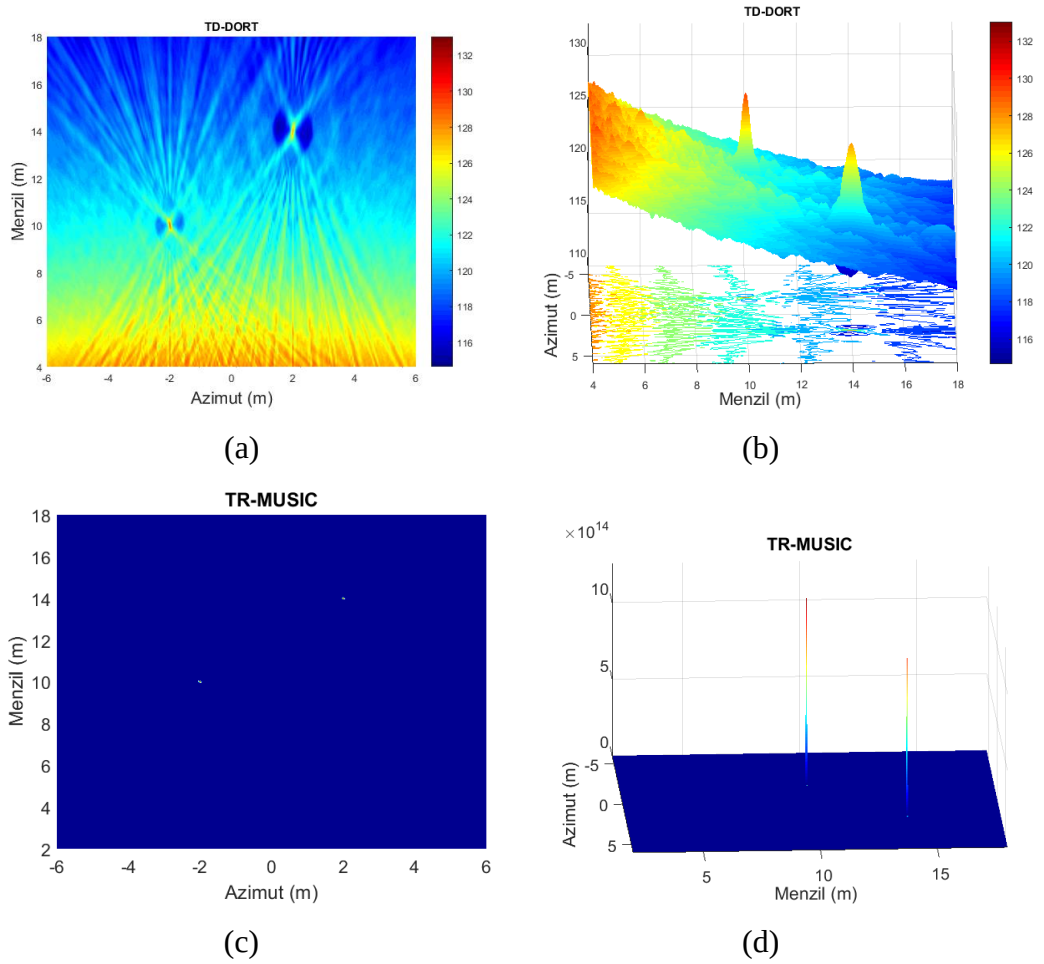
Şekil 3.6 (a) ortamda bulunan noktasal saçıcıların menzil ve azimut eksenindeki konumlarını, Şekil 3.6 (b) ise bu saçıcıların alıcı-verici anten dizisinin 4'ncü elemanına göre menzil profilini göstermektedir. Şekil 3.6'da sunulan Senaryo-1 için TD-DORT ve TR-MUSIC yöntemleri ile elde edilen sonuçlar Şekil 3.7'de sunulmuştur.



Şekil 3.7: Senaryo-1: Ω: 1 GHz, Merkez Frekans 1.5 GHz, TxRx: 9, Anten Açıklığı: 16m. a) 2B TD-DORT. b) 3B TD-DORT. c) 2B TR-MUSIC. d) 3B TR-MUSIC.

Şekil 3.7 incelendiğinde 2B TD-DORT görüntüsünde anten dizisinden geri yayılan TR dalgaları menzil eksenin ilk bölgelerinde (4m-6m civarında) birbirleriyle girişim oluşturarak yüksek genlikli enerji oluşturduğu, bu dalgaların menzil ekseninde ilerlemesiyle saçıcıların bulunduğu konumlarda odaklanma sağladığı gözlenmiştir. TR-MUSIC algoritmasının sonuçları incelendiğinde TD-DORT yöntemine göre daha yüksek çözünürlükte bir hedef konum tespiti yapabildiği görülmüştür. Bunun sebebi, TR-MUSIC yönteminin TD-DORT yöntemine göre çok dar bir anten huzmesi ile çalışmasıdır.

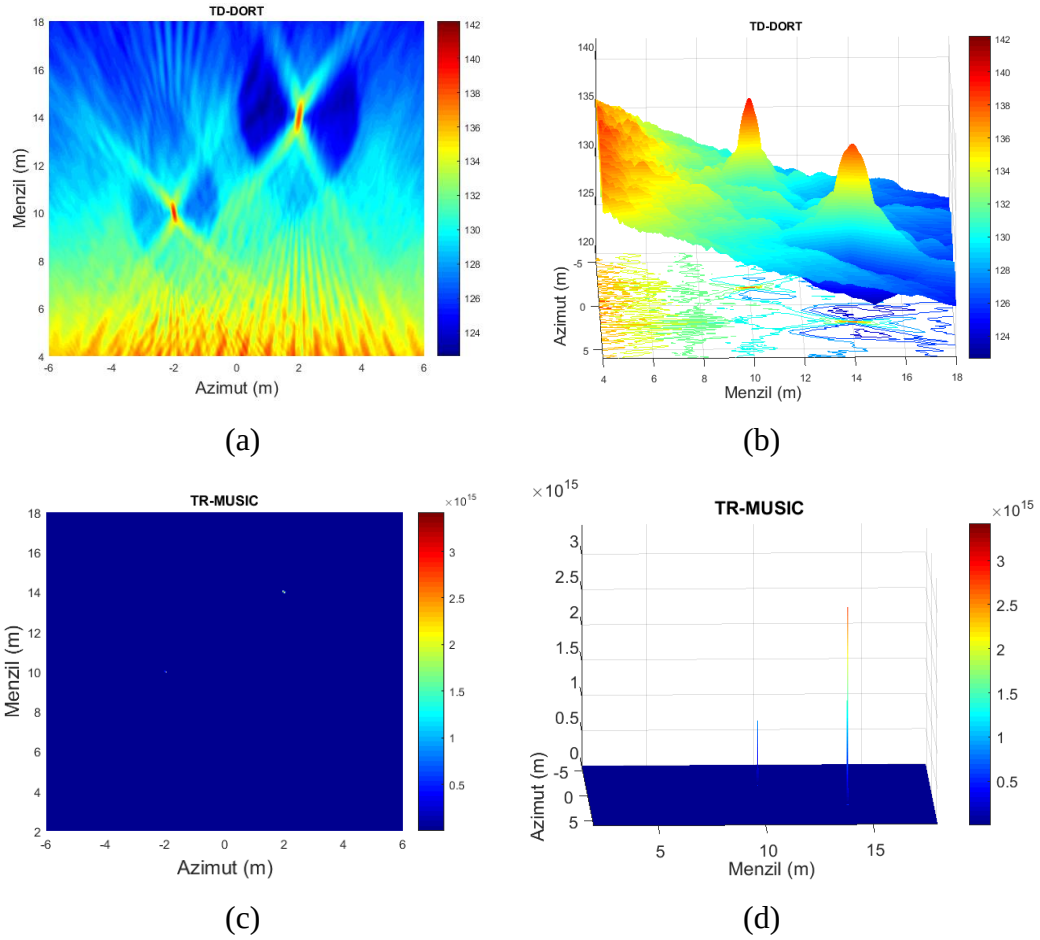
Senaryo-2 kapsamında merkez frekans sabit kalacak şekilde sistemin bant genişliği iki katına çıkarılarak TD-DORT ve TR-MUSIC yöntemleri test edilmiştir. Senaryo-2 kapsamında elde edilen sonuçlar Şekil 3.8'de sunulmuştur.



Şekil 3.8: Senaryo-2: Ω: 2 GHz, Merkez Frekans 1.5 GHz, TxRx: 9, Anten açıklığı: 16m. a) 2B TD-DORT. b) 3B TD-DORT. c) 2B TR-MUSIC. d) 3B TR-MUSIC.

Şekil 3.8'deki sonuçlar incelendiğinde TD-DORT yönteminde menzil ekseninde Şekil 3.7'ye göre yaklaşık 2 kat bir menzil çözünürlüğünün elde edildiği gözlenmiştir. TR-MUSIC yönteminde ise hedef çözünürlüğü olarak herhangi bir değişiklik olmamasına rağmen, saçıcıların enerji fonksiyonlarının arttığı gözlenmiştir. Enerji fonksiyonlarının artması bant genişliğinin artmasından kaynaklanmaktadır (Eşitlik (3.17)).

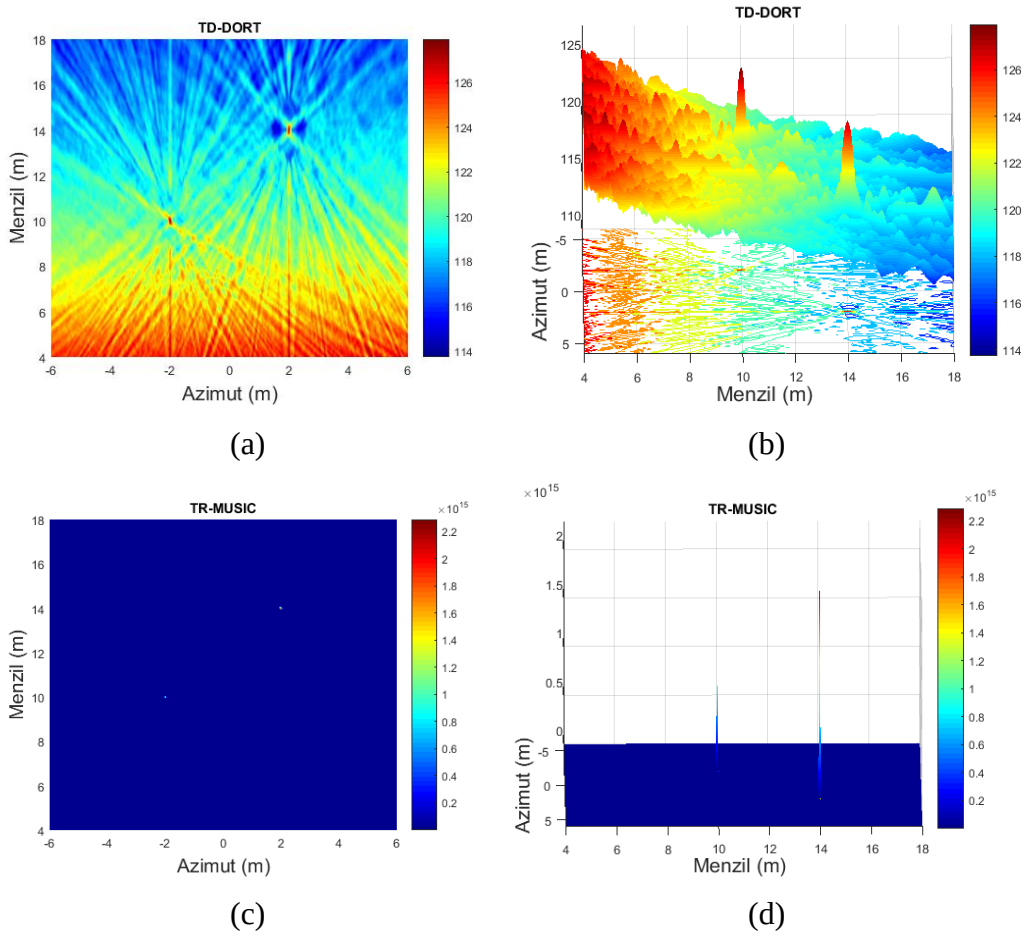
Senaryo-3'te ise alıcı-verici anten dizisindeki anten sayısı 15'e çıkarılmış diğer parametreler referans Senaryo'ya göre sabit tutulmuştur. Senaryo-3 kapsamında üretilen sonuçlar Şekil 3.9'da sunulmuştur.



Şekil 3.9: Senaryo-3: Ω: 1 GHz, Merkez Frekans 1.5 GHz, TxRx: 15, Anten açıklığı: 16m. a) 2B TD-DORT. b) 3B TD-DORT. c) 2B TR-MUSIC. d) 3B TR-MUSIC.

Şekil 3.9 kapsamında sistemdeki alıcı-verici sayısı arttığında TD-DORT yöntemiyle elde edilen TR görüntülerinde belirginleşme gözlenmiş, hedef bölgesinde odaklanan TR dalgalarının Senaryo-1'e göre menzil ekseninde daha kısa mesafelerde saçıcı bölgesine odaklandığı gözlenmiştir. Anten sayısının arttırılması hedefin menzil eksenindeki çözünürlüğüne bir katkısı olmamıştır.

Senaryo-4 kapsamında anten açıklığı 32 m'ye çıkartılarak analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen görüntüler Şekil 3.10'da sunulmuştur.



Şekil 3.10: Senaryo-4: Ω: 1 GHz, Merkez Frekans 1.5 GHz, TxRx: 9, Anten açıklığı: 32m. a) 2B TD-DORT. b) 3B TD-DORT. c) 2B TR-MUSIC. d) 3B TR-MUSIC.

Şekil 3.10'daki TD-DORT yönteminin sonuçları incelendiğinde anten dizisi açıklığının artması ile saçıcıların azimut eksenindeki çözünürlüğü arttığı gözlenmiştir. TR-MUSIC yönteminde ise herhangi bir değişim gözlenmemiştir.

Sonuç olarak, TD-DORT yöntemiyle elde edilen görüntülerin çözünürlüğü bant genişliği, anten açıklığı ve alıcı-verici anten sayısı parametrelerine göre değişim göstermektedir. TR-MUSIC yöntemi ile elde edilen görüntü çözünürlüğü ise, bant genişliği, anten açıklığı ve alıcı-verici sayısı parametrelerinden ziyade ortam gürültüsü, dar huzmeli anten-saçıcı paternine göre değişim göstermektedir. Gürültülü ortamlar için analizler 5. Bölüm'de sunulmuştur.

4. GPOF METODUNUN ZAMAN EVİRME YÖNTEMİNE UYGULANMASI

Kompleks eksponansiyellerin toplamından oluşan bir fonksiyonun yaklaşık değer kesitirimi ile anten paterni, S-parametre ve radar sinyallerinin analizi yapılabilmektedir. Literatürde kompleks eksponansiyel yapıya sahip işaretlerin toplamını tahmin etmek için en sık kullanılan iki popüler lineer yöntem bulunmaktadır. Bunlar,

i) Prony Metodu
ii) Genelleştirilmiş Matris Kalem Yöntemi (GPOF)

GPOF yöntemi Prony yönteminden farklı olarak, genelleştirilmiş özdeğer problemini çözerek köklerin bulunmasını sağlarken, Prony yöntemi, farklı bir şekilde kestirim yapmaktadır. Bu tez kapsamında GPOF yöntemi üzerinde çalışılmıştır.

4.1. GPOF Yöntemi

GPOF yöntemi ekponansiyel değişim gösteren harmoniklerin toplamından oluşan sinyallerin kompleks genlik, kutup ve sönümleme faktörlerinin yüksek doğrulukla hesaplanmasını sağlamaktadır. Genel olarak, bir nesneden saçılan elektromanyetik transient sinyal,

$$y(t) = \sum_{i=1}^{M} r_i z_i^m + n(t) \tag{4.1}$$

olarak ifade edilir. Burada, $y(t)$ gözlemlenen zaman cevabı, $n(t)$ sistem gürültüsü, r_i residu ya da kompleks genlik, z_i faz bilgilerini ifade eder. Eşitlik (4.1)'deki $y(t)$ sürekli sinyalini k adımlarla örneklediğimizi düşünelim.

$$y_k = \sum_{i=1}^{M} r_i z_i^k + n_k \quad ; k = 0, \ldots, N-1 \tag{4.2}$$

$$r_i = b_i z_i^{\eta_0} \tag{4.3}$$

$$z_i = e^{-j2\pi \frac{\Delta f}{c} R_i} \tag{4.4}$$

Burada, k örnekleme indisini, η_0 bant geçiren bölgedeki sinyalin en düşük örnek indisini, M saçıcı merkez sayısını, n_k gürültü bileşenini, b_i i indisli saçıcıya ait eksponansiyelin kompleks genliğini ifade eder. Burada hedeflenen, y_k verisinden M, b_i ve z_i değerlerinin kestirimini yapmaktır. Genel olarak bu değerlerin kestirimi lineer olmayan bir problem olup, GPOF yöntemi tek seferde bu problemi lineer olarak çözebilme yeteneğine sahiptir.

Saçılan alan değerlerinden oluşan bir [**Y**] matrisinin SVD ayrıklaşması, saçıcı merkez sayısının belirlenmesine ve gürültünün filtrelenmesine imkân sağlamaktadır. Bu bağlamda tanımlanan [**Y**] matrisi;

$$[\mathbf{Y}] = [\mathbf{y}_0 \ \mathbf{y}_1 \cdots \ \mathbf{y}_L]_{(N-L)\times(L+1)} \tag{4.5}$$

$$\mathbf{y}_n = [y_n \ y_{n+1} \ \cdots \ y_{N-L+n-1}]^T \tag{4.6}$$

olarak ifade edilir. Burada L kalem parametresi olmak üzere, ortamdaki gürültülerin bastırılması için $N/3<L<N/2$ aralığında seçilir [43]. Eşitlik (4.5)'in SVD ayrıklaşması ile özvektör ve özdeğer matrisleri elde edilir.

$$[\mathbf{Y}] = [\mathbf{U}][\Sigma][\mathbf{V}]^{\dagger} \tag{4.7}$$

Eşitlik (4.7)'de elde edilen [**Σ**] özdeğer matrisindeki $\Sigma_1, \Sigma_2, ..., \Sigma_L$ elemanlarının en baskın olan M tanesi saçıcı merkezleri bileşenlerine aittir. Geri kalan değerler gürültü bileşenlerine aittir. M parametresi özdeğerlerin en büyük özdeğer oranına bakılarak kestirim yapılmaktadır.

$$\frac{\sum_c}{\sum_{\max}} \geq 10^{-p} \tag{4.8}$$

Burada p ondalık hane sayısıdır. Eşitlik (4.8)'in sağlamadığı değerler gürültü değerlerini ifade etmektedir. M değeri Eşitlik (4.8)'i sağlayan sağlayan Σ_c sayısının indis numarasıdır.

SNR değeri >20 dB olan bir ortamda, işaretin kutuplarının bulunması için $[\mathbf{Y}_1]$ ve $[\mathbf{Y}_2]$ matrislerini tanımlayalım.

$$[\mathbf{Y}_2] = [\mathbf{y}_1 \ \mathbf{y}_2 \ \cdots \ \mathbf{y}_L]_{(N-L)\times L} \tag{4.9}$$

$$[\mathbf{Y}_1] = [\mathbf{y}_0 \ \mathbf{y}_1 \ \cdots \ \mathbf{y}_{L-1}]_{(N-L)\times L} \tag{4.10}$$

Eşitlik (4.9) ve Eşitlik (4.10)'da tanımlanan $[\mathbf{Y}_2]$ ve $[\mathbf{Y}_1]$ matrisleri şu şekilde tanımlanabilmektedir.

$$[\mathbf{Y}_2] = [\mathbf{Z}_1][\mathbf{R}][\mathbf{Z}_0][\mathbf{Z}_2] \tag{4.11}$$

$$[\mathbf{Y}_1] = [\mathbf{Z}_1][\mathbf{R}][\mathbf{Z}_2] \tag{4.12}$$

Burada,

$$[\mathbf{Z}_1] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ z_1 & z_2 & z_M \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ z_1^{(N-L-1)} & z_2^{(N-L-1)} & z_M^{(N-L-1)} \end{bmatrix}_{(N-L)\times M} \tag{4.13}$$

$$[\mathbf{Z}_2] = \begin{bmatrix} 1 & z_1 & \cdots & z_1^{L-1} \\ 1 & z_2 & \cdots & z_2^{L-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & z_M & \cdots & z_M^{L-1} \end{bmatrix}_{M\times L} \tag{4.14}$$

$$[\mathbf{Z}_0] = diag[z_1, z_2, \ldots, z_M] \tag{4.15}$$

$$[\mathbf{R}] = diag[r_1, r_2, \ldots, r_M] \tag{4.16}$$

Z1 ve **Z2** tam ranka sahip Vandermonde matrisleridir. Bu **Z1** ve **Z2** matrislerinin [$\mathbf{Y}_1$] ve [$\mathbf{Y}_2$] matrisleri ile arasındaki ilişki şu şekildedir.

$$\left[\mathbf{Y}_2\right]-z\left[\mathbf{Y}_1\right]=\left[\mathbf{Z}_1\right]\left[\mathbf{R}\right]\left\{\left[\mathbf{Z}_0\right]-z\left[\mathbf{I}\right]\right\}\left[\mathbf{Z}_2\right] \tag{4.17}$$

Burada [**I**] $M\times M$ birim matrisi ifade eder. Genel olarak $M \leq L \leq N\text{-}M$ sağlandığı sürece [$\mathbf{Y}_2$]-z[$\mathbf{Y}_1$]'nin matrisinin rankı M'ye eşittir. Eşitlik (4.17)'de $z=z_i$ i=$1,2,...,M$ olması durumunda [$\mathbf{Y}_2$]-z[$\mathbf{Y}_1$] ifadesinin rankı bir azalacaktır. Bu sebeple Eşitlik (4.17) 'deki matris eşleniğinin kökleri z_i değerini vermektedir.

$$\left[\mathbf{Y}_2\right]-z\left[\mathbf{Y}_1\right]=\left[0\right] \;\; ; \quad \left[\mathbf{Y}_2\right]=z\left[\mathbf{Y}_1\right] \tag{4.18}$$

Burada [$\mathbf{Y}_2$] ve [$\mathbf{Y}_1$] kare olmayan iki matris olmak üzere, z_i değerleri bu matrislerin tekil değerleri ile elde edilebilir.

$$z_i = eig\left(\left[\mathbf{Y}_1\right]'\left[\mathbf{Y}_2\right]\right) \quad i=1,2,...,M \tag{4.19}$$

$\left[\mathbf{Y}_1\right]'$ işlemi Moore-Penrose ters alma işlemi olmak üzere, değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\left[\mathbf{Y}_1\right]'=\left(\left[\mathbf{Y}_1\right]^{\dagger}\left[\mathbf{Y}_1\right]\right)^{-1}\left[\mathbf{Y}_1\right]^{\dagger} \tag{4.20}$$

Eşitlik (4.19)'da elde edilen z_i değerleri Eşitlik (4.4)'de kullanıldığında mesafeden kaynaklanan faz değeri elde edilir. Sistemindeki kompleks genlik değerleri ise şu şekilde elde edilir.

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ \vdots \\ r_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_M \\ z_1^2 & z_2^2 & \cdots & z_M^2 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_M^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{N-1} \end{bmatrix} \tag{4.21}$$

$$b_i = \frac{r_i}{z_i^{\eta_0}} \tag{4.22}$$

4.2. GPOF Yönteminin Zaman Evirme Tekniğinde Kullanımı

Bu çalışma kapsamında TR tekniklerinde saçıcıların niteliklerinin belirlenmesinde kullanılan SVD ayrıklaştırılması yerine 4.1 başlığında bahsi geçen GPOF yönteminin **K**(ω) matrisine uygulanması ele alınmıştır. Klasik TR yöntemlerinde SVD ayrıklaşması 3B **K**(ω) matrisinin her bir frekans bileşenine ayrı ayrı uygulanırken, GPOF yöntemi ise 3B **K**(ω) matrisinin tüm frekans bileşenlerine her bir anten çifti için tek seferde uygulanmaktadır.

3B **K**(ω) MDM matrisinde *m* ve *n* indisleri anten dizisinde bulunan alıcı-verici antenlerin indisleri ile ilişki olsun. **K**(ω) matrisinin üçüncü parametresi olan frekans indisini *s* ile ifade edersek, 3B **K**(ω) matrisinin bir elemanını $K_{mn,s}= K_{mn}(\omega_s)$ ile ifade edelim. Burada, $\omega_s = \omega_{min}+ s\Delta\omega$, olup ω_{min} ölçüm frekans bandının en düşük frekans bileşenini, Δω ise frekans aralığını temsil eder. Burada $s = 0,\ldots,S\text{-}1$olup, *S* frekans bandının örnek sayısını ifade eder. Ölçüm yapılan tüm bant genişliğine bağlı olarak $K_{mn,s}$ elemanı şu şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned} K_{mn,s} &= \sum_{i=1}^{M} a_{i,mn} z_{i,mn}^{s} \\ z_{i,mn} &= e^{-jb_{i,mn}\Delta\omega/c} \\ a_{i,mn} &= \frac{\sigma_i e^{-jb_{i,mn}\omega_{\min}/c}}{r_{mi}\cdot r_{ni}} \\ b_{i,mn} &= r_{mi} + r_{ni} \ . \end{aligned} \tag{4.23}$$

Eğer **K**(ω) matrisinin ayrıklaşması doğrudan yapabilmek mümkün olsaydı, ortamda bulunan saçıcıların saçılma katsayısı ve konumu matematiksel olarak doğrudan bulunabilirdi. Geleneksel TR yöntemlerinde **K**(ω) matrisinin SVD'si ile elde edilen Eşitlik (3.8)'deki **[U]**, **[Σ]**, **[V]** matrisleri Eşitlik (2.11)'deki faktorizasyonu doğrudan sağlanamamaktadır. Bu iki faktorizasyon arasındaki temel fark; i) **Σ**(ω) matrisinde bulunan elemanlar reel değer içerirken $\bar{\Sigma}(\omega)$ değerleri kompleks değer içermektedir. ii) **U**(ω) ve **V**(ω) matrisleri birbirinin transpose değerini içermemektedir.

iii) SVD ayrıklaştırılması her frekans bandı için ayrı ayrı yapıldığından geniş frekanslı sistemlerde frekans adımları arasında rastgele faz dağılımları oluşmaktadır.

Bu bağlamda, GPOF tekniği ile, ortamdaki saçıcıların genliğinin ve konumlarının belirlenmesi, eksponansiyel terimlerin toplamından oluşan ayrık sinyallerin kutup parametrelerinin bulunması ile yapılmaktadır. Eşitlik (4.23)'de M, $a_{i,mn}$, ve $b_{i,mn}$ değerlerinin bulunması ile saçıcıların konum ve genlik bilgileri hakkında kestirim yapılabilmektedir.

Burada tüm frekans bandında toplanan $K_{mn,s}$ verisi GPOF tekniği ile ayrıklaştırıldığında M, $a_{i,mn}$, ve $b_{i,mn}$ parametreleri elde edilebilmektedir. Başlık 4.1.'deki adımları dikkate aldığımızda ilk olarak $(S\text{-}L)\times L$ $\mathbf{[Y_1]}$ ve $\mathbf{[Y_2]}$ matrislerini tanımlayalım. Burada L kalem parametresi olup, gürültüleri bastırmak için $S/3<L<S/2$ aralığında seçilmiştir. Bu bağlamda $\mathbf{y}_s$ kolon matrisi;

$$\mathbf{y}_s = \left[K_{mn,s}, K_{mn,s+1}, \cdots, K_{mn,S-L+s-1} \right]^T \tag{4.24}$$

ifade edilir. $\mathbf{y}_s$ yardımıyla $\mathbf{[Y_1]}$ ve $\mathbf{[Y_2]}$ tanımlayalım.

$$\left[\mathbf{Y_1}\right] = \left[\mathbf{y}_0\ \mathbf{y}_1\ \mathbf{y}_2\ \cdots \mathbf{y}_{L-1}\right]_{(S-L)\times L} \tag{4.25}$$

$$\left[\mathbf{Y}_2\right] = \left[\mathbf{y}_1\ \mathbf{y}_2\ \mathbf{y}_3\ \cdots \mathbf{y}_{L}\right]_{(S-L)\times L} \tag{4.26}$$

Burada M parametresi $\mathbf{[Y]}$ matrisinin SVD ayrıklaştırılmasında kestirmekte olup, $\mathbf{[Y]}$ matrisi şu şekilde ifade edilir.

$$\left[\mathbf{Y}\right] = \left[\mathbf{y}_0\ \mathbf{y}_1\ \mathbf{y}_2\ \mathbf{y}_3\ \cdots \mathbf{y}_{L}\right]_{(S-L)\times(L+1)} \tag{4.27}$$

Eşitlik (4.27)'de $\mathbf{[Y]}$ matrisinin SVD ayrıklaşmasından elde edilen özdeğerin en büyük değerinin $\Sigma_{\max}$, diğer özdeğerler Σ_c'ye oranı ile M değerinin kestirimi belirlenmektedir. Burada $|\Sigma_c|/|\Sigma_{\max}| = 10^{-q}$ sayısında q sayısal değer olup, bu oranın yaklaşık 10^{-3} olduğu değerdeki özdeğerin sayısı M değerini belirler.

Eşitlik (4.25) ve Eşitlik (4.26)'da tanımladığımız $\mathbf{[Y_1]}$ ve $\mathbf{[Y_2]}$ matrislerini tekrar ifade edecek olursak;

$$\left[\mathbf{Y_2}\right]=\left[\mathbf{Z_0}\right]\left[\mathbf{A}\right]\left[\mathbf{Z_1}\right]\left[\mathbf{Z_2}\right] \tag{4.28}$$

$$\left[\mathbf{Y}_1\right]=\left[\mathbf{Z}_1\right]\left[\mathbf{A}\right]\left[\mathbf{Z}_2\right] \tag{4.29}$$

Burada **A** ve $\mathbf{Z_0}$ diagonal matris, $\mathbf{Z_1}$ ve $\mathbf{Z_2}$ Vanermonde matrisleridir. Bu bağlamda,

$$\left[\mathbf{Z}_1\right]=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ z_1 & z_2 & z_M \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ z_1^{(N-L-1)} & z_2^{(N-L-1)} & z_M^{(N-L-1)} \end{bmatrix}_{(S-L)\times M} \tag{4.30}$$

$$\left[\mathbf{Z}_2\right]=\begin{bmatrix} 1 & z_1 & \cdots & z_1^{L-1} \\ 1 & z_2 & \cdots & z_2^{L-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & z_M & \cdots & z_M^{L-1} \end{bmatrix}_{M\times L} \tag{4.31}$$

$$\left[\mathbf{Z}_0\right]=diag\left[z_1,z_2,\ldots,z_M\right] \tag{4.32}$$

$$\left[\mathbf{A}\right]=diag\left[a_1,a_2,\ldots,a_M\right] \tag{4.33}$$

Bu tanımlar altında kalem matris tanımı şu şekildedir.

$$\left[\mathbf{Y_2}\right]-z\left[\mathbf{Y_1}\right]=\left[\mathbf{Z_1}\right]\left[\mathbf{A}\right]\left\{\left[\mathbf{Z_0}\right]-z\left[\mathbf{I}\right]\right\}\left[\mathbf{Z_2}\right] \tag{4.34}$$

Bu parametreler ışığında z_i Eşitlik (4.19)'da tanımlanan özdeğerlerin bulunması ile elde edilir. z_i parametresinin belirlenmesi ile $a_{i,mn}$ değerleri Eşitlik (4.21)'de tanımlanan matris denkleminin çözümü ile elde edilmiş olur (Eşitlik 4.35).

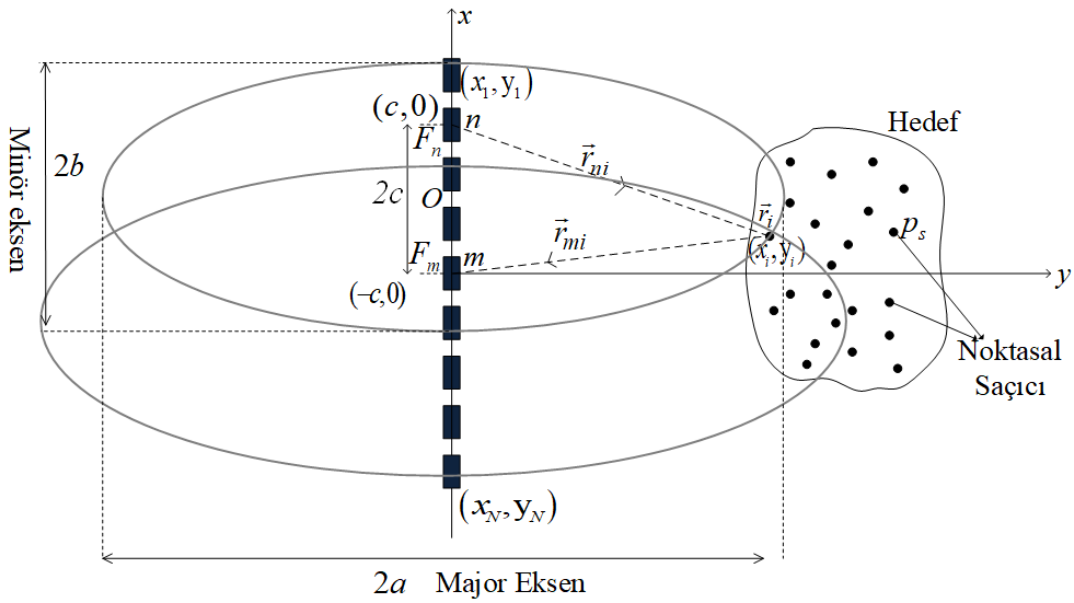
$$\begin{bmatrix} K_{mn}(0) \\ K_{mn}(1) \\ \vdots \\ K_{mn}(N-1) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & 1 & \ldots & 1 \\ z_1 & z_2 & \ldots & z_M \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & & z_M^{N-1} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_M \end{bmatrix} \tag{4.35}$$

4.3. TR-GPOF Yöntemi ile Hedef Üzerine Odaklanma

Herhangi bir alıcı-verici anten çiftinden toplanan geniş bantlı $K_{mn}(\omega_s)$ işaretinin faz ve genlik bilgileri GPOF yöntemi yardımıyla doğrudan bulunabilmektedir. Toplanan verilerin faz değerleri saçıcı ile alıcı-verici anten çifti arasındaki mesafe bilgisini içerir. GPOF yöntemi ile belirlenen $b_{i,mn}$ değeri skaler bir değer olup, eksponasiyel sinyaldeki saçıcının mesafe bilgisini sağlar. Ortamdaki herhangi bir saçıcının 2B konumunu belirleyebilmek için TR dizisinde bulunan bir alıcı-verici çiftinin odak noktası olduğunu varsayalım ve ana eksen uzunluğu $b_{i,mn}$ olan bir elips eğrisi tanımlayalım. Saçıcıların vektörel pozisyonunu bulmak için ilave bir denkleme daha ihtiyacımız vardır. Bu denklem farklı alıcı-verici anten çiftlerinin kombinasyonları ile elde edilir. Her bir farklı anten çiftinin konumu odak noktası olacak şekilde farklı elips eğrileri oluşturur. Bu farklı elips eğrileri üstüste çizdirildiğinde iki noktada kesişim meydana gelir. Bu noktalardan bir tanesi ölçüm bölgesinde diğeri ise, bu bölgenin tam ters eksenindedir. Eğer alıcı-verici çifti aynı konumdaki anten çifti için seçilirse ortamda bir çember eğrisi meydana gelir (Şekil 4.1).

Böylece, ortamdaki bir saçıcının menzil-azimut eksenindeki 2B konum kestirimi anten dizisinde bulunan birden çok antenin oluşturduğu elips eğrilerinin kesişimi ile belirlenebilir.

N adet alıcı-verici anten dizisine sahip bir TR sistemi düşünelim (Şekil 4.1). TR dizisindeki farklı alıcı-verici anten çifti kombinasyonları ile elde edilen menzil bilgisi farklı major ve minor eksenlere sahip eliptik eğriler oluşturur. Bu elipslerin merkezi alıcı-verici anten çiftinin orta noktalarıdır.



Şekil 4.1: TR dizisinin oluşturduğu elips eğrileri.

Şekil 4.1'de $\vec{r}_{mi}$ ve $\vec{r}_{ni}$ vektörlerini oluşturan anten çiftlerinin aralarındaki mesafe 2c olarak tanımlanmış olup, sabit noktaları (c,0) ve (-c,0) olarak gösterilmiştir. Burada F_n ve F_m antenlerinin (x_i,y_i) noktasındaki saçıcıya olan uzaklığı bu antenlerin oluşturduğu elips eğrisinin major eksenini meydana getirir ($r_{mi} + r_{ni} = 2a$). O noktası koordinat sisteminin orijini ifade eder. Elipsin minör ekseni ise $b^2 = a^2 - c^2$'den kolaylıkla bulunabilmektedir. Bu parametrelerin yardımıyla, $x = a\cos\theta$ ve $y = b\sin\theta$ eşitliği kullanılarak x ve y değerleri $\theta \in [0;2\pi)$ aralığında çizildiğinde elips eğrileri oluşur. Bu işlem TR anten dizisinde bulunan her bir farklı anten çifti için uygulanır. Farklı anten çiftlerinin meydana getirdiği elips eğrileri üstüste çizdirildiğinde, saçıcıların bulunduğu (x_i,y_i) konumunda kesişim meydana getirir. Bu kesişim noktaları saçıcıların bulunduğu konumu gösterir.

Saçıcıların konumlarının belirlenmesinde ikinci bir yöntem ise, GPOF yöntemiyle elde edilen katsayılar yardımıyla saçıcıların konumları anten dizisindeki herhangi iki alıcı-verici antenin konumları yardımıyla elde edilebilmektedir. Örneğin, TR anten dizisinin birinci alıcı-verici antenin konumu (x_1, 0), N'nci alıcı-verici anten elemanının kartezyen koordinat düzlemindeki konumu (x_N, 0) olsun (Şekil 4.1). Bu antenlerin (x_i, y_i) noktasındaki noktasal saçıcıya olan uzaklığı R_1 ve R_N olarak tanımlayalım. GPOF analiziyle elde edilen katsayılar yardımıyla, (x_i, y_i) noktasındaki saçıcının birinci alıcı-verici antene uzaklığı $b_{i,11} = 2R_1$, N'nci anten elemanına uzaklığı

$b_{i,NN} = 2R_N$ değerlerini verir. Burada, $y_1 = y_N = 0$ iken (referans koordinat düzlemi), $R_1^2 = (x_1 - x_i)^2 + (y_1 - y_i)^2$ ve $R_N^2 = (x_N - x_i)^2 + (y_N - y_i)^2$ dir. Bu iki denklem birbirinden çıkarıldığında, saçıcıya ait x_i değeri $x_i = \left(\left(R_N^2 - R_1^2\right) - \left(x_1^2 - x_N^2\right)\right) / 2(x_1 - x_N)$ elde edilir. Elde edilen bu x_i değeri R_1 ya da R_N eşitliklerinde yerine koyulduğunda saçıcıya ait y_i değeri de bulunmuş olur.

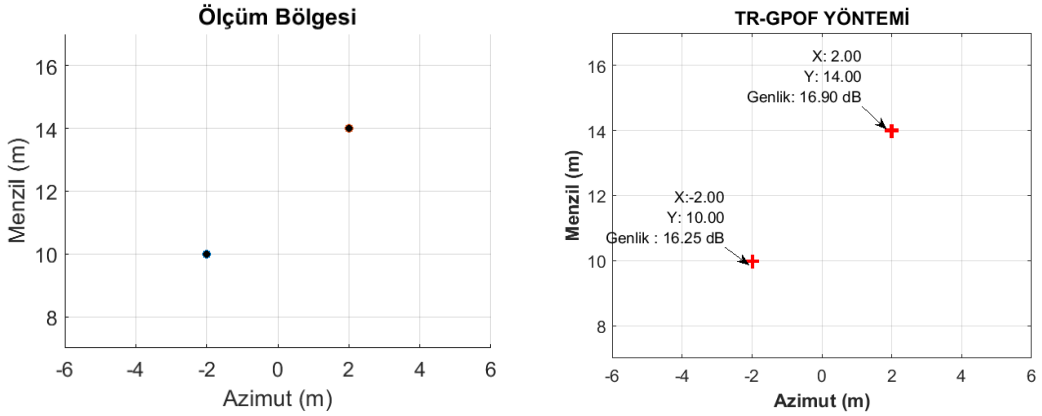
Özetleyecek olursak,

i) Bir (x_i,y_i) noktasındaki i'nci saçıcının konumu TR anten dizisindeki antenlerin oluşturduğu elips eğrilerinden bulunabilmektedir.

ii) GPOF yöntemi ile M, $a_{i,mn}$, $b_{i,mn}$ katsayılarının belirlenmesiyle saçıcıya ait faz ve genlik değerleri bulunabilmektedir. Böylece $\mathbf{K}(\omega)$ veri matrisinde saklı bulunan saçıcıya ait konum bilgisi ve saçılma katsayısı tam olarak elde edilir.

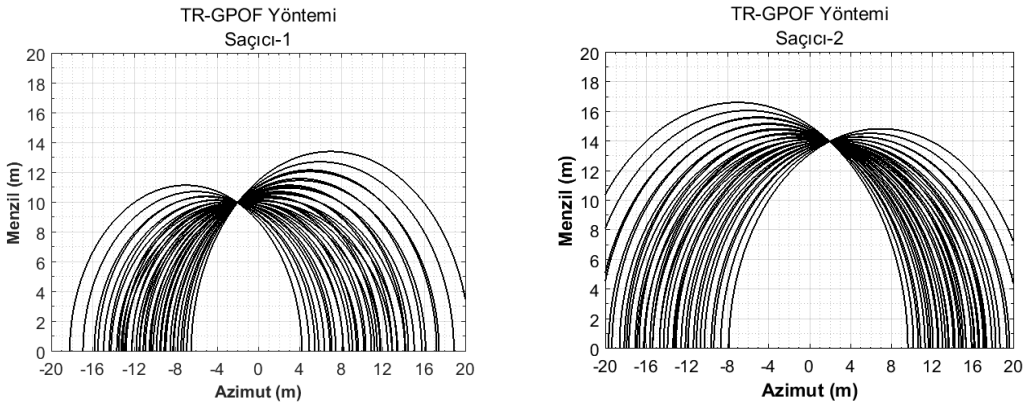
4.4. Değerlendirme

Bölüm 4.2 ve Bölüm 4.3'te tanımlanan TR-GPOF yöntemini belirli senaryolar altında inceleyelim. Birinci senaryo kapsamında, Şekil 4.2'de verilen bant genişliği 1 GHz, Merkez Frekans 1.5 GHz, saçıcı koordinatları (x,y) (10m,-2m), (14m,2m) senaryosu için TR-GPOF yöntemini uyguladığımıza elde edilen sonuçlar Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de sunulmuştur.



(a) (b)

Şekil 4.2: a) Ölçüm bölgesi. b) TR-GPOF yöntemi.



Şekil 4.3: TR-GPOF verileri ile elde edilen elips eğrileri.

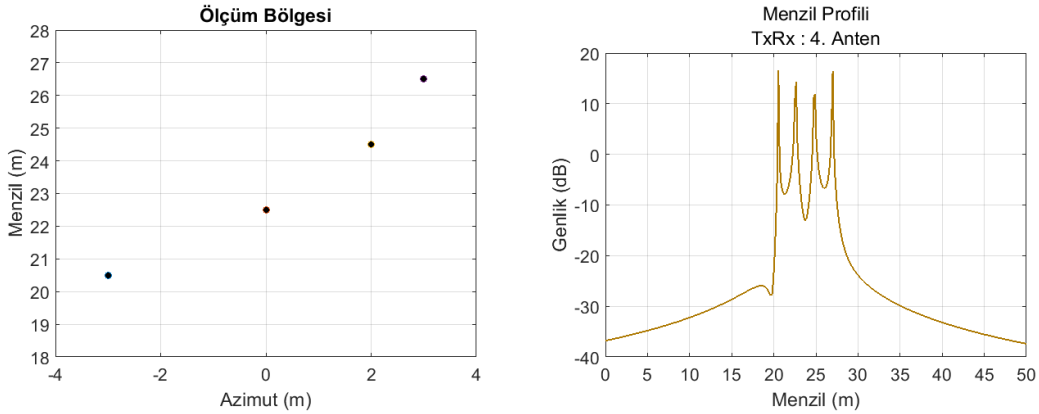
Şekil 3.6'da verilen senaryoda (-2*m*,10*m*) noktasındaki hedefin genliği 16.25 dB, (2*m*,14*m*) konumundaki hedefin saçıcı genliği ise 16.90 dB'dir. TR-GPOF yöntemi ile elde edilen katsayılar ve bu katsayıların analizi ile ortamdaki saçıcıların konumları Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de gösteriliği gibi tam olarak bulunmakla, bununla beraber saçıcıların genlikleri TR-GPOF yöntemi ile türetilen $a_{i,mn}$ katsayısı ile 16.25 dB ve 16.90 dB olarak bulunmuştur. Böylece TR-GPOF yöntemi saçıcıların konumları ile beraber saçıcıların genliği hakkında da bilgi sağlamaktadır.

İkinci senaryoda ortamda 4 adet noktasal saçıcı olduğunu varsayalım. Bu saçıcıların konum ve genlikleri Tablo 4.1'de verildiği gibi olsun.

Tablo 4.1: Saçıcı Konum ve Genlikleri.

Hedef	***Konum (x, y)***	***Genlik***	***TR-GPOF Sonuçları (x, y, dB)***
Saçıcı-1	-3.00 *m*, 20.50 *m*	16.52 dB	-3.00 *m*, 20.50 *m*, 16.52 dB
Saçıcı-2	0.00 *m*, 22.50 *m*	16.65 dB	0.00 *m*, 22.50 *m*, 16.65 dB
Saçıcı-3	2.00 *m*, 24.50 *m*	15.56 dB	2.00 *m*, 24.50 *m*, 15.56 dB
Saçıcı-4	3.00 *m*, 26.50 *m*	17.14 dB	3.00 *m*, 26.50 *m*, 17.14 dB

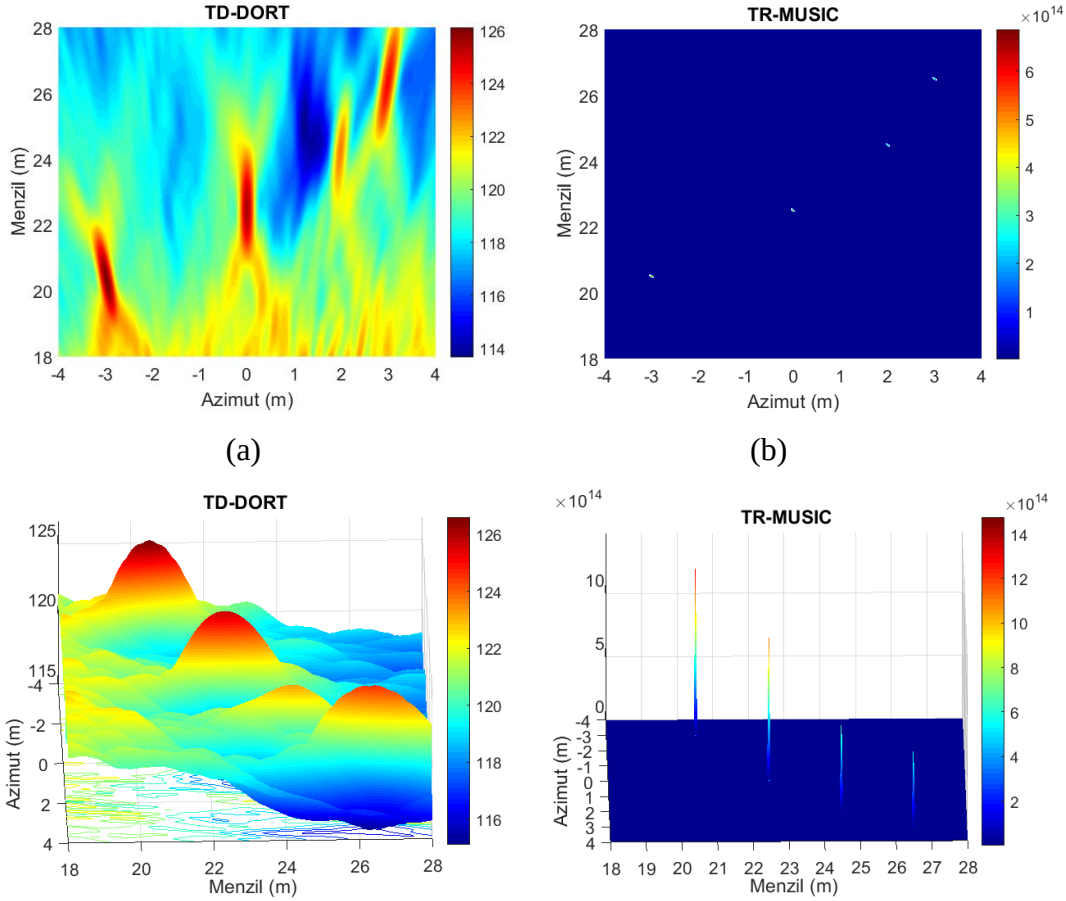
Gürültüsüz bir ortamda, azimut eksenine eşit aralıklarla dizilmiş 7 adet alıcı-verici anten elemanlarının toplam anten açıklığı 17*m* olsun. Her bir antenden ortama merkez frekansı 1.5 GHz, bant genişliği 1 GHz olmak üzere bu frekans bandının 2701 eşit adım aralıklı olacak şekilde ışıma yapılmaktadır. Bu bilgiler ışığında ölçüm bölgesi ve TR anten dizisinin merkez noktasında (0m,0m) bulunan dördüncü alıcı-verici anten elemanından alınan menzil profili Şekil 4.4'te verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.4: a) Ölçüm bölgesi. b) Menzil profili.

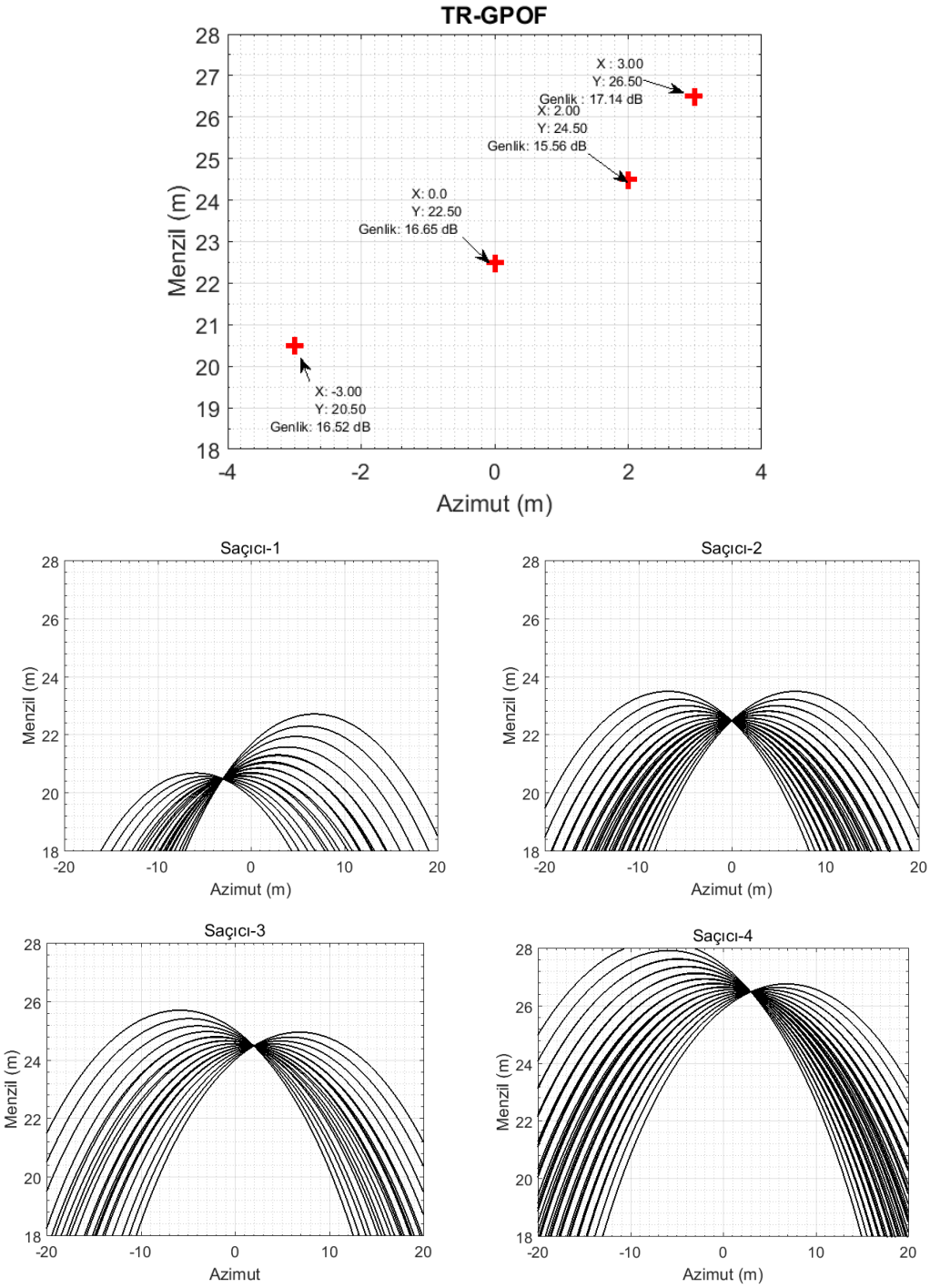
Şekil 4.4'te sunulan senaryo kapsamında TD-DORT, TR-MUSIC ve TR-GPOF yöntemi sonuçları Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4.5: a) 2B TD-DORT. b) 2B TR-MUSIC. c) 3B TD-DORT. d) 3B TR-MUSIC.



Şekil 4.6: TR-GPOF ile saçıcı üzerine odaklanma eğrileri.

Gürültüsüz ortam olmasına rağmen TD-DORT yöntemi saçıcıların bulunduğu noktasal konumların çevresinde odaklanma oluştururken TR-MUSIC ve TR-GPOF yöntemleri saçıcıların bulunduğu konumu noktasal olarak vermektedir. Bu analizi i5 işlemci 4GB RAM'li bir bilgisayar, TD-DORT yöntemini 95.30 sn'de, TR-GPOF yöntemi 92.92 sn'de, TR MUSIC yöntemi 98.26 sn'de üretmiştir.

5. BENZETİM VE ÖLÇÜM ÇALIŞMALARI

Bu başlık altında tez kapsamında anlatılan TD-DORT, TR-MUSIC ve TR-GPOF zaman evirme yöntemleri

i) Farklı frekans bantlarında
ii) Farklı ortam gürültülerinde
iii)Anten/saçıcıların izotropik olduğu ve olmadığı

durumlarda analiz edilerek yöntemlerin performansları incelenmiştir.

5.1. Benzetim ve Ölçüm Senaryosu

Tez kapsamında sunulan TR-GPOF yönteminin etkinliği ilk olarak MATLAB ortamında geliştirilen bilgisayar simülasyonu ile üretilen verilerin işlenmesiyle incelenmiştir. Simülasyon çalışmalarında TR dizisindeki anten elemanları eşit aralıklarla doğrusal bir hat üzerine yerleştirilmiştir. Benzetim ortamı homojen ortam olarak tasarlanmış ve ortamda noktasal kaynakların var olduğu dikkate alınmış, bu noktasal kaynaklar bir düzlem üzerinde rastgele dağıtılmıştır.

TR alıcı-verici anten dizisinde bir antenden verici sinyaller yayılmakta, saçılan alanlar ise dizideki tüm alıcı anten elemanlarından toplanmaktadır. Bu işlem dizide bulunan tüm verici antenler için uyarlanınca MDM matrisi elde edilmektedir. Simülasyon modeli olarak geniş bantlı adım atlamalı sürekli frekans (SFCW) sistemi uygulanmıştır. Bu modelde verici sinyaller belirli bir frekans bandı içinde belirli adım aralıklarıyla sırasıyla ortama yayılmakta, her frekans için faz ve genlik bilgileri alıcı elemanlardan toplanmaktadır. SFCW modelini şu şekilde ifade edebiliriz.

$$f = f_{\min} + s\Delta f \qquad s=0,1,2,...,S-1 \tag{5.1}$$

Başlangıç frekansı f_{min}, frekans adım aralığı Δf ve S toplam örnek sayısını ifade eder. Böylece, her bir frekans adımı için ortamda bulunan tüm noktasal saçıcıların oluşturduğu saçılan alanlar toplanarak geniş bantlı $\mathbf{K}(\omega)$ matrisi oluşturulmaktadır.

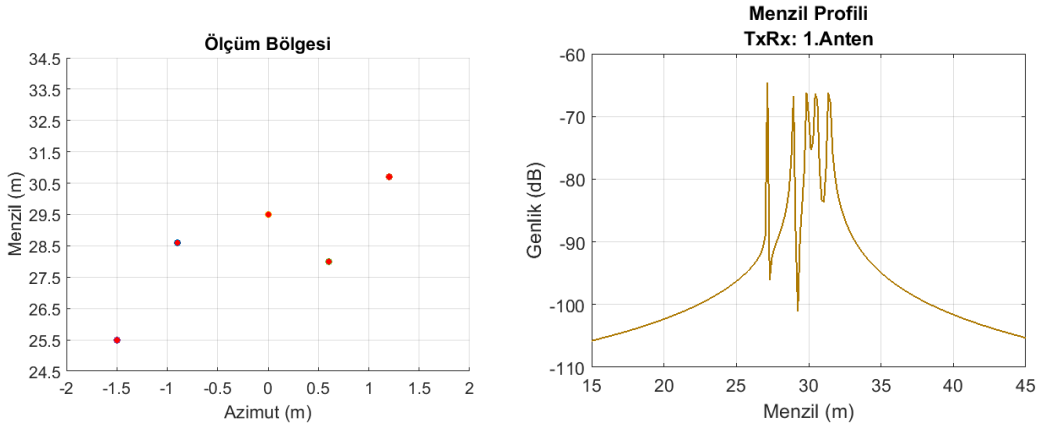
Benzetim çalışmaları boyunca saçıcıların bulunduğu *x,y* düzlemi $\delta = \lambda/10$ ve $\delta x = \delta y$ olarak alınmıştır.

5.2. TD-DORT, TR-MUSIC ve TR-GPOF Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Homojen bir ortamda işaretin gürültüye oranı (SNR) değerinin 40 dB olduğunu varsayalım. Anten dizisinden 24*m* – 34*m* arası mesafede rastgele dizilmiş noktasal saçıcılar bulunsun (Şekil 5.1). Bu bölgede bulunan noktasal saçıcıların konumları ve genlikleri Tablo 5.1'deki gibi olduğunu düşünelim.

Tablo 5.1: Saçıcı Konumları ve Genlikleri.

	HEDEFLER			**TR-GPOF SONUÇLARI**		
	Konum (*x*, *y*)		**Genlik**	**Konum (*x*, *y*)**		**Genlik**
Saçıcı-1	-0.9*m*	28.6 *m*	-20.91 *dB*	-0.9*m*	28.6 *m*	-21.00 *dB*
Saçıcı-2	1.2 *m*	30.7 *m*	-20.00 *dB*	1.2 *m*	30.7 *m*	-20.20 *dB*
Saçıcı-3	0.0 *m*	29.5 *m*	-20.00 *dB*	0.0 *m*	29.5 *m*	-20.07 *dB*
Saçıcı-4	-1.5 *m*	25.5 *m*	-21.94 *dB*	-1.5 *m*	25.5 *m*	-21.94 *dB*
Saçıcı-5	0.6 *m*	28.0 *m*	-22.50 *dB*	0.6 *m*	28.0 *m*	-22.35 *dB*

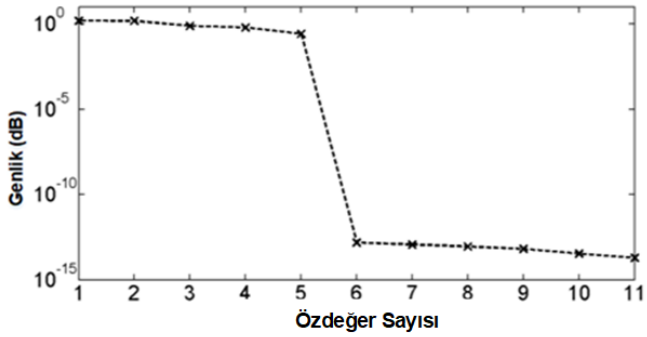


(a) (b)

Şekil 5.1: a) Ölçüm bölgesi. b) Menzil profili.

Benzetim çalışmasında, alıcı-verici anten dizisi azimut eksenine yerleştirilmiş ve dizinin eleman sayısı 11 olup, anten açıklığı 15.6 m'dir. Ölçüm frekans bandı 2 GHz - 3 GHz, örnek sayısı 2701 olarak belirlenmiştir. Ortamdaki saçıcı sayısının

kestirimi herhangi bir frekans için $N \times N$ K(ω_s) matrisinin SVD alınmasıyla elde edilen anlamlı özdeğerinden kestirilebilmektedir (Şekil 5.2).

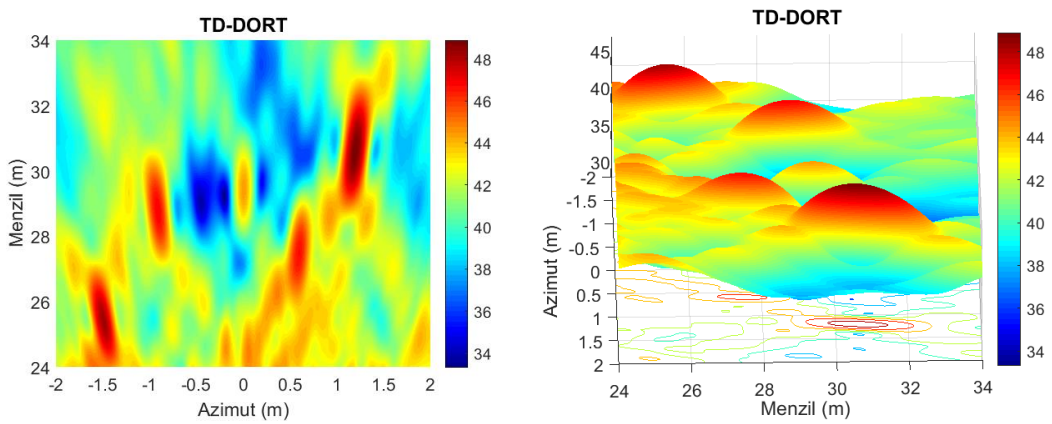


Şekil 5.2: K(ω)'nın SVD paterni (tek frekans).

Şekil 5.2'deki SVD paterni incelendiğinde, ilk 5 özdeğerin diğerlerinden oldukça büyük olduğu gözlenmektedir. Bu da ortamdaki saçıcı sayısına eşdeğerdir. Böylelikle, gürültüsüz ve homojen bir ortamda için, ortamdaki saçıcı sayısının kestirimi **K**(ω) matrisinin herhangi bir frekansının SVD paterni ile bulunabilmektedir.

K(ω) matrisinin SVD ayrıklaşması ile elde edilen özvektör ve özdeğer kümesi iki ana odaklanma algoritması üretir. Şekil 5.2'de olduğu gibi özdeğerleri büyük olan bölgedeki veriler (anlamlı vektör kümesi) TD-DORT yöntemini, küçük olan özdeğer kümesi ise TR-MUSIC odaklanma yöntemine girdi sağlamaktadır.

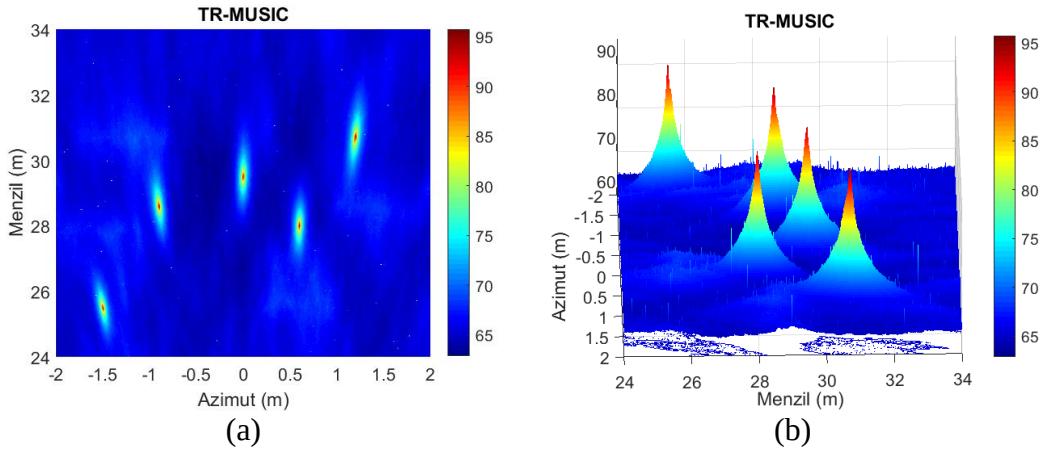
İlk olarak yukarıdaki senaryo için TD-DORT yöntemini uygulayalım. Anlamlı özvektör ve özdeğer kümesi kullanılarak TD-DORT yöntemiyle elde edilen odaklanma Şekil 5.3'de sunulmuştur.



(a) (b)

Şekil 5.3: TD-DORT sonucu. a) 2B gösterim. b) 3B gösterim.

Aynı senaryo için anlamlı olmayan özvektör ve özdeğer kümesi kullanılarak TR-MUSIC yöntemiyle elde edilen odaklanma Şekil 5.4'de sunulmuştur.



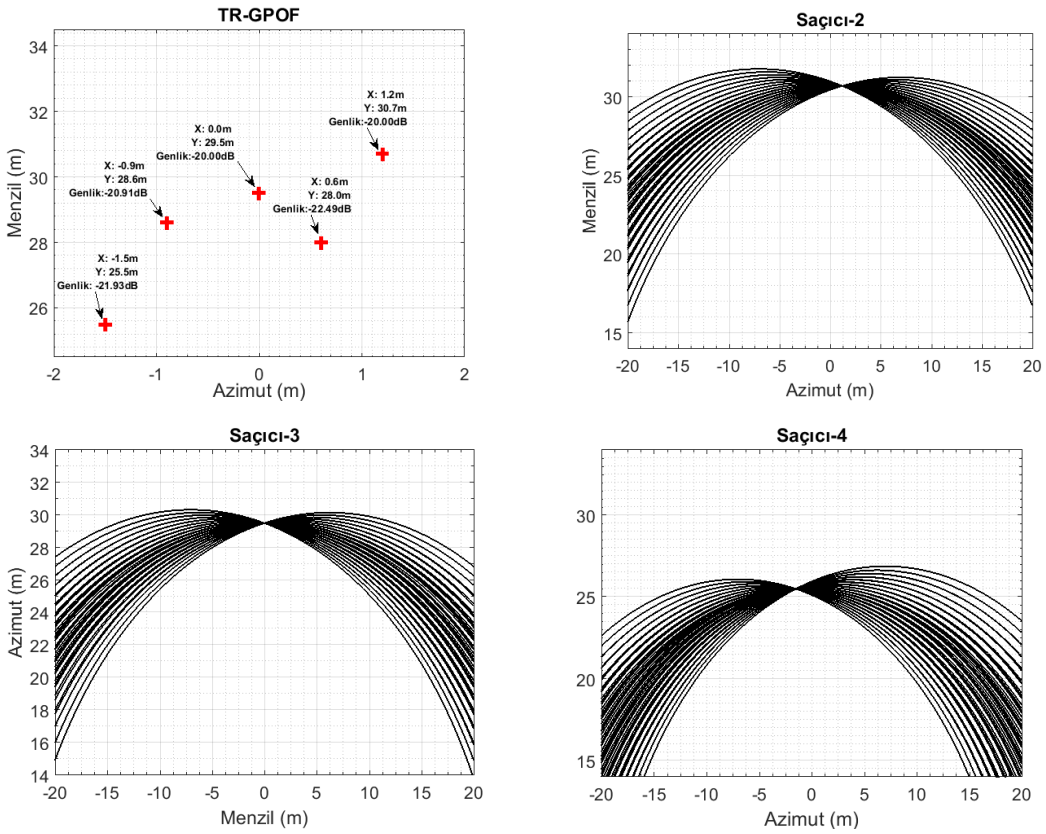
(a) (b)

Şekil 5.4: TR-MUSIC sonucu. a) 2B gösterim. b) 3B gösterim.

TD-DORT yöntemi, K(ω) matrisinin her bir frekansındaki anlamlı özvektörleri kullanarak her bir saçıcının bulunduğu bölgede odaklanma sağlamaktadır. Odaklanmanın yoğun olduğu bölgeler saçıcı merkezlerinin bulunduğu noktaları ifade eder. TD-DORT yöntemi saçıcı noktalarının merkezinde yoğunlaşmasına rağmen, saçıcı noktalarının bulunduğu yakın bölgelerde de bulanıklık oluşturmaktadır. TD-DORT yöntemiyle saçıcıların bulunduğu bölgelere anlamlı özvektörlerin oluşturduğu dalga girişimlerinin yüksek olması odaklanmadaki noktasal çözünürlük değerini düşürmektedir.

TR-MUSIC yöntemi ise anlamlı olmayan özvektör ve özdeğer kümesini kullanarak odaklanma sağlamaktadır. TR-MUSIC yöntemiyle oluşturulan tarama huzmesinin genişliği TD-DORT yöntemine oranla çok dar olduğundan saçıcıların konumsal çözünürlükleri yüksek hassasiyetle elde edilebilmektedir. TR-MUSIC yönteminin tarama vektörü TD-DORT yönteminin tarama vektörüne ortagonaldir.

K(ω) matrisinin GPOF yöntemi ile ayrıklaştırılması ile, saçıcıların faz ve genlik bilgileri doğrudan bulunabilmektedir. Her bir anten çiftinin saçıcılara olan uzaklık bilgisi GPOF yöntemiyle doğrudan elde edilir. Farklı anten çiftlerinin kombinasyonu ile oluşturan elips eğrileri saçıcıların bulunduğu konumda kesişim sağlayarak saçıcıların 2B konumu tam olarak belirlenmiş olur. Bu kapsamda TR-GPOF yöntemi ile elde edilen 2B konum bilgisi ve bu saçıcılara ait genlikleri bilgileri Şekil 5.5'de verilmiştir.



Şekil 5.5: TR-GPOF sonucu.

TD-DORT ve TR-MUSIC gibi SVD tabanlı TR yöntemleri ortamda bulunan noktasal saçıcıları en fazla alıcı-verici antenden dizisinin eleman sayısı kadar belirleyebilmektedir. Çünkü **K**(ω)'nın SVD paterni en fazla *N* adet saçıcının bilgisini bulundurabilir (Şekil 5.2). Tezde sunulan TR-GPOF yöntemi ise dizi anten adedi *N*'den bağımsız olarak ortamdaki saçıcıların tespitini yapabilmektedir. Yani ortamdaki saçıcı sayısı anten sayısından fazla olsa bile ortamdaki tüm saçıcılar TR-GPOF yöntemi ile tespit edilebilmektedir. Bu durum için, Tablo 5.1'deki senaryoyu alıcı-verici anten dizisi 3 adet (*N*=3) olacak şekilde tekrar uygulayalım. TR-GPOF yöntemi her bir antenin her bir saçıcıya olan menzil profilini geniş bantlı sinyalden doğrudan sağlamaktadır. GPOF yöntemi ile elde edilen katsayılar her bir antenin 5 saçıcıya olan uzaklığını sağlar. Bu veriler yardımıyla 5 saçıcının da konumu doğrudan bulunabilmektedir (Tablo 5.2, Tablo 5.3).

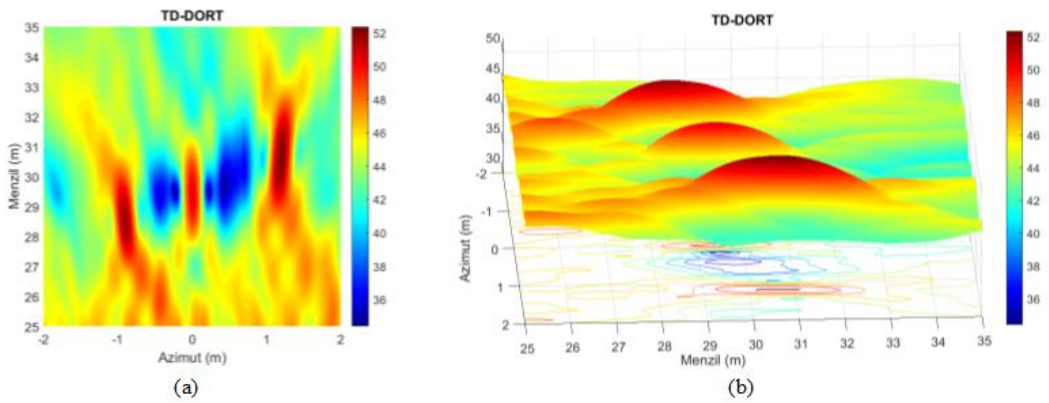
Tablo 5.2: Anten verisinden elde edilen TR-GPOF katsayıları.

	Saçıcı-1	***Saçıcı-2***	***Saçıcı-3***	***Saçıcı-4***	***Saçıcı-5***
Anten-1	26.26 m	31.99 m	30.52 m	29.42 m	29.23 m
Anten-2	25.54 m	30.72 m	29.50 m	28.61 m	28.61 m
Anten-3	27.14 m	31.40 m	30.51 m	29.89 m	29.89 m

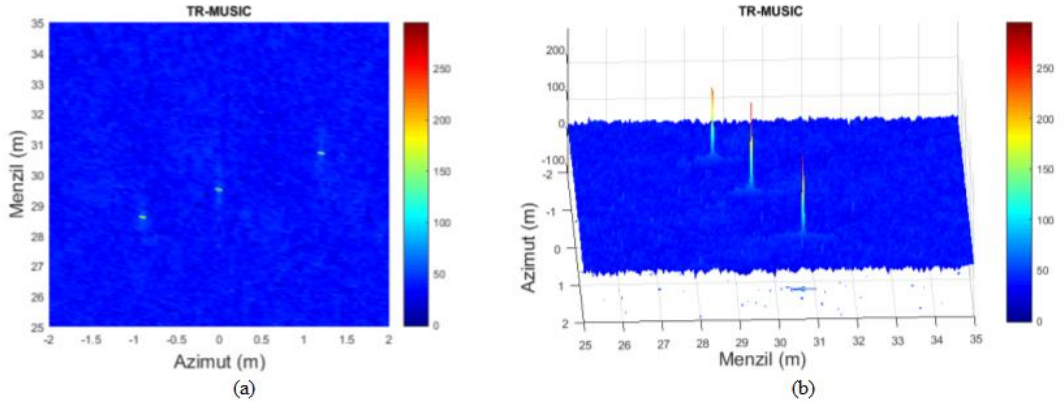
Tablo 5.3: TR-GPOF ile saçıcı konumların belirlenmesi.

Saçıcı/ Konum Bilgisi	***X-konumu***	***Y-Konumu***	***Genlik***
Saçıcı-1	-1.499 m	25.499 m	-21.84 dB
Saçıcı-2	1.199 m	30.699 m	-20.00 dB
Saçıcı-3	0.0001 m	29.500 m	-20.00 dB
Saçıcı-4	-0.900m	28.600 m	-20.90 dB
Saçıcı-5	0.601 m	28.000 m	-22.11 dB

TD-DORT ve TR MUSIC yöntemleri ise özdeğer ve özvektör kümesi en fazla N=3 ile sınırlı olduğundan genlik değeri yüksek ilk 3 saçıcı için sonuç üretebilmektedir (Şekil 5.6, Şekil 5.7).



Şekil 5.6: TD-DORT sonucu ($N > \Sigma_s$ için). a) 2B gösterim. b) 3B gösterim.

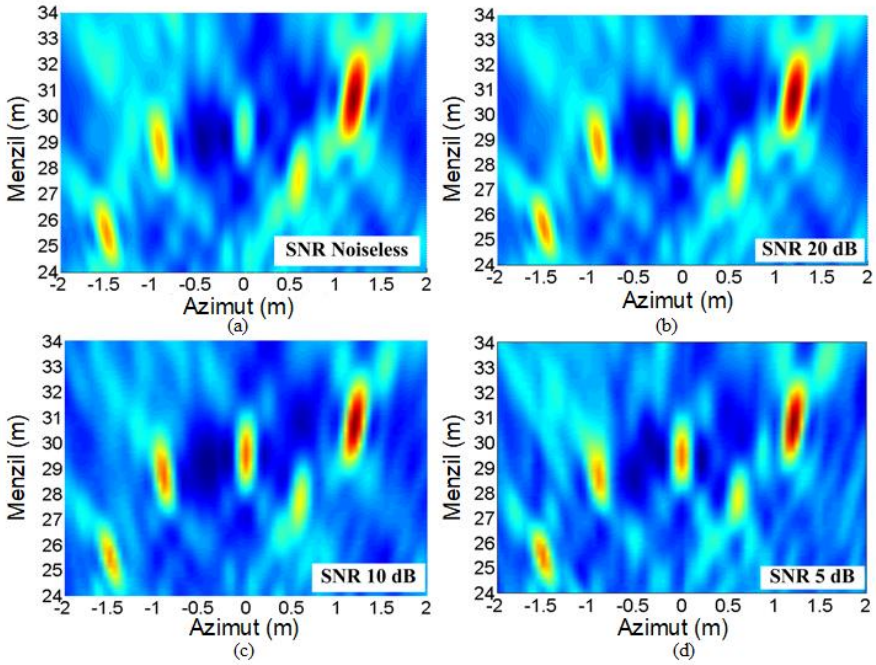


Şekil 5.7: TR-MUSIC sonucu ($N > \Sigma_s$ için). a) 2B gösterim. b) 3B gösterim.

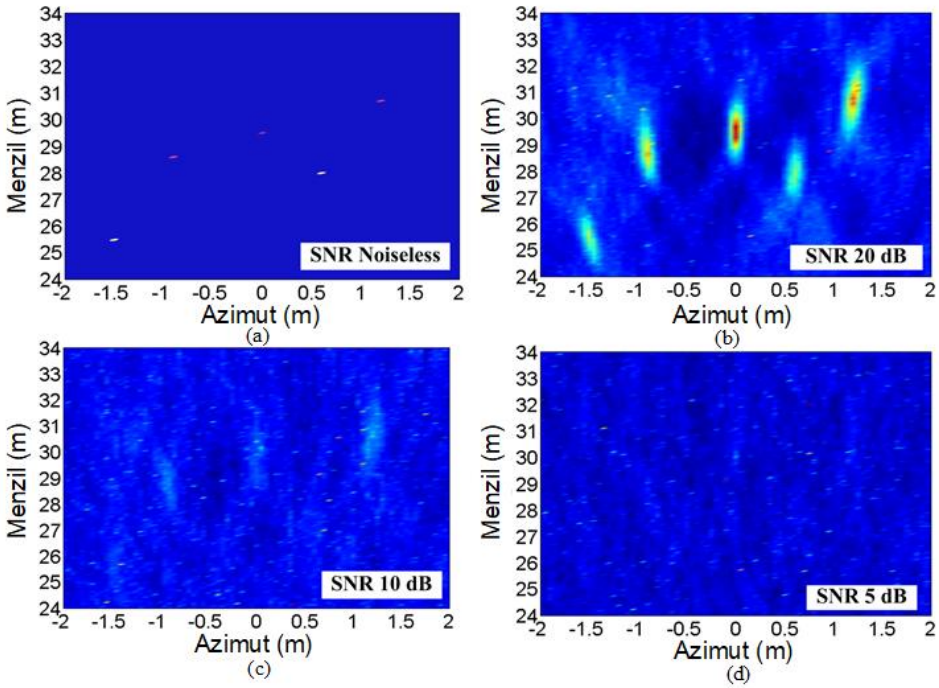
Görüldüğü üzere, anten sayısından fazla saçıcı olduğu durumda, SVD tabanlı TR yöntemleri tüm saçıcıları bulamazken, bu tezde önerilen TR-GPOF yöntemi anten sayısından bağımsız olarak tüm saçıcıları bulabilmektedir.

5.3. Gürültü Performansı

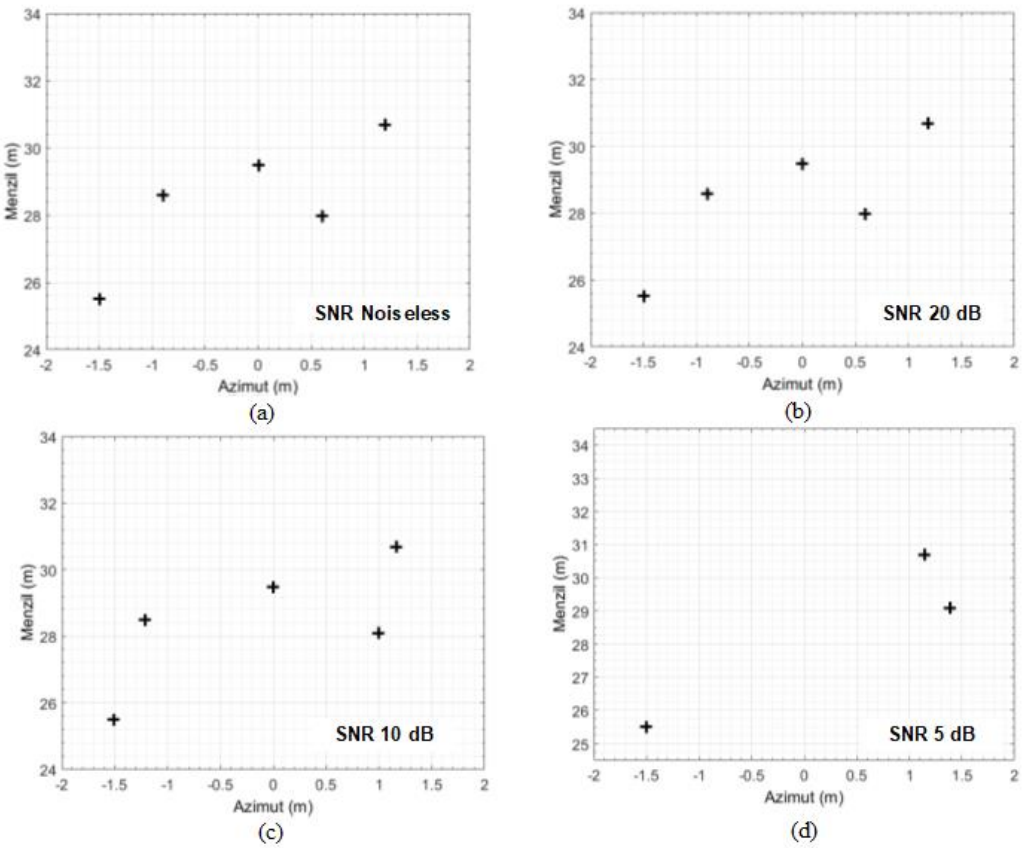
Bu bölümde önerilen TR-GPOF yönteminin gürültü performansı analiz edilmiştir. SNR değerleri sonsuz, 20 dB, 10 dB ve 5 dB iken, benzetim ortamı modellenerek numerik deneyler gerçekleştirilmiş, bununla birlikte önerilen yöntem TD-DORT, TR-MUSIC yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Tablo 5.1 ve Şekil 5.1'de verilen ölçüm senaryosunu sonsuz, 20 dB, 10 dB ve 5 dB gürültü değerleri altında incelediğimizde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 5.8-Şekil 5.10).



Şekil 5.8: TD-DORT Gürültü Performansı. a) Gürültüsüz Ortam. b) SNR 20 dB. c) SNR 10 dB. d) SNR 5 dB.



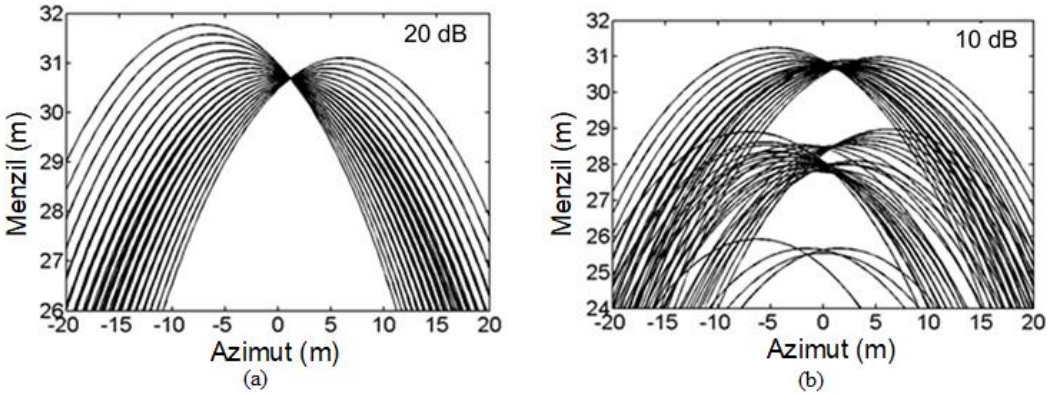
Şekil 5.9: TR-MUSIC Gürültü Performansı. a) Gürültüsüz Ortam. b) SNR 20 dB. c) SNR 10 dB. d) SNR 5 dB.



Şekil 5.10: TR-GPOF Gürültü Performansı. a) Gürültüsüz Ortam. b) SNR 20 dB. c) SNR 10 dB. d) SNR 5 dB.

Şekil 5.8-Şekil 5.10'da TR-DORT, TR-MUSIC ve TR-GPOF yöntemlerinin gürültü performansına göre bağışıklık sonuçları sunulmuştur. Açıkça görülmektedir ki, TR-GPOF yöntemi SNR değeri 10 dB'den büyük iken (SNR ≥10 dB) saçıcı noktalarını tam olarak bulabilmektedir. TD-DORT yöntemi düşük SNR değerinde de çalışabilmekte fakat saçıcı konumlarının merkez noktaları civarında yayvan bir odaklanma oluşturmaktadır. TR-MUSIC yöntemi ise SNR değeri 20 dB'den büyük iken saçıcı noktalarını yüksek çözünürlükle belirleyebilmekte fakat SNR değeri 20 dB'den düşük olduğu durumlarda saçıcıların odak noktalarını belirleyememektedir.

TR-GPOF yönteminde SNR değeri 20 dB ve üzeri iken, GPOF yöntemi ile elde edilen katsayıların oluşturduğu elips eğrileri saçıcının bulunduğu noktada kesişim sağlarken, SNR değeri 10 dB iken GPOF ayrıklaşması ile elde edilen katsayılar ile türetilen elips eğrileri saçıcı üzerine odaklanamamaktadır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11: TR-GPOF yönteminin türettiği SNR değerine göre elips eğrileri.
a) SNR 20 dB. b) SNR 10 dB.

SNR değerine bağlı olarak türetilen tüm benzetim sonuçları için, saçıcıların yukarıdaki üç yöntemle elde edilen saçıcı konumlarının en yüksek genlik değerine göre noktasal konumlarını belirlediğimizde, saçıcıların konumsal hata kayması aşağıda Tablo 5.4'de sunulmuştur. Tablo 5.4'deki sonuçlar incelendiğinde, TR-GPOF yöntemi SNR değeri 10 dB üzerinde iken en düşük hata değerine sahiptir.

Bu çalışma boyunca tüm benzetim çalışmaları MATLAB R2012b ortamında yapılmış olup, Intel i7-2640M CPU @2.8 GHz'li bir bilgisayar ortamında, TD-DORT yöntemi 368.762 sn, TR-MUSIC 437.130 sn, TR-GPOF yöntemi 77.703 sn'de sonuç üretmiştir.

Tablo 5.4: En yüksek Genlik değerine göre Sayısal Konum Hatası.

	Hedef Koordinatları		TD-DORT Sonuçları											
			SNR (Sonsuz)			SNR 20 dB			SNR 10 dB			SNR 5 dB		
	x (m)	y (m)	x(m)	y(m)	Hata(x,y)	x(m)	y(m)	Hata(x,y)	x (m)	y(m)	Hata(x,y)	x(m)	y (m)	Hata(x,y)
Hedef-1	-0.90	28.60	-0.90	28.60	(0, 0)	-0.90	28.60	(0, 0)	-0.90	28.75	(0, 0.15)	-0.90	28.50	(0, 0.1)
Hedef-2	1.20	30.70	1.20	30.70	(0, 0)	1.20	30.70	(0, 0)	1.20	30.65	(0, 0.05)	1.20	30.55	(0, 0.15)
Hedef-3	0.0	29.50	0.0	29.50	(0, 0)	0.0	29.50	(0, 0)	0.0	29.35	(0, 0.15)	0.0	29.45	(0, 0.05)
Hedef-4	-1.50	25.50	-1.50	25.50	(0, 0)	-1.50	25.50	(0, 0)	-1.50	25.50	(0, 0)	-1.50	25.30	(0, 0.2)
Hedef-5	0.60	28.00	0.60	28.00	(0, 0)	0.60	27.70	(0, 0.3)	0.60	27.65	(0, 0.45)	0.60	27.7	(0, 0.3)

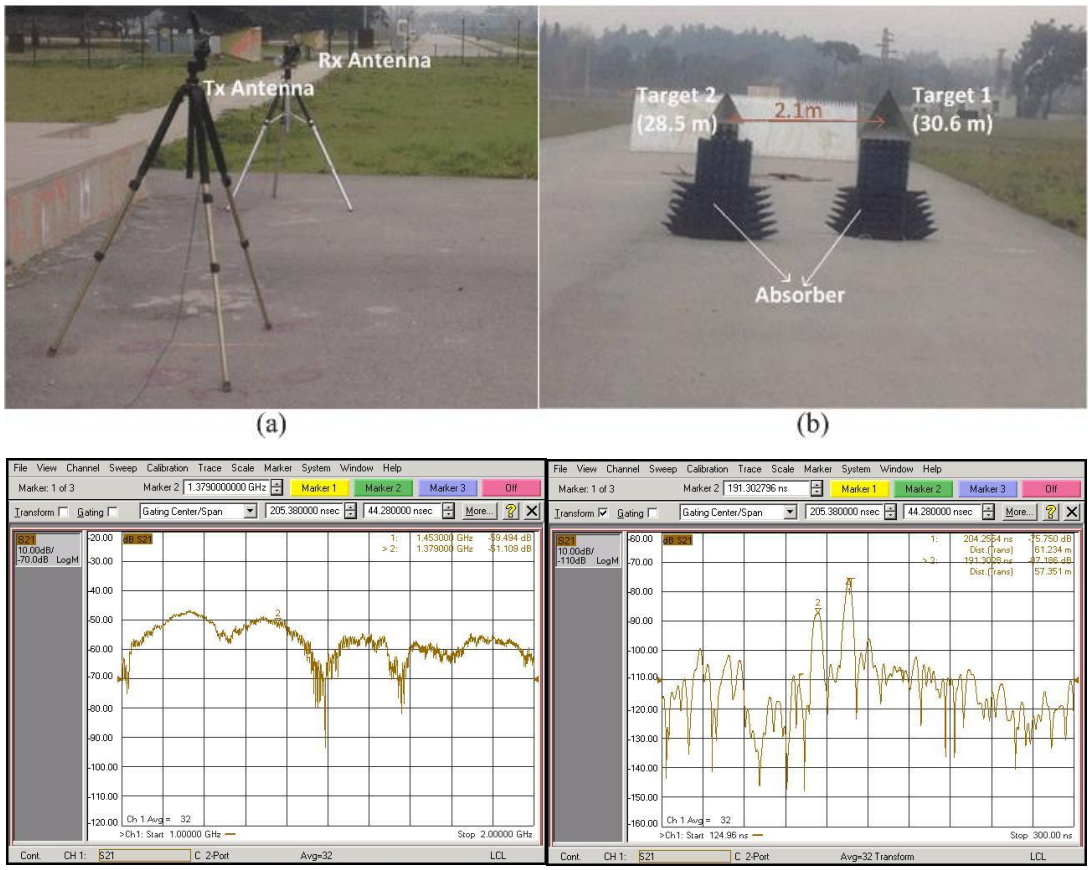
	Hedef Koordinatları		TR-MUSIC Sonuçları											
			SNR (Sonsuz)			SNR 20 dB			SNR 10 dB			SNR 5 dB		
	x (m)	y (m)	x(m)	y(m)	Hata(x,y)	x(m)	y(m)	Hata(x,y)	x (m)	y(m)	Hata(x,y)	x(m)	y (m)	Hata(x,y)
Hedef-1	-0.90	28.60	-0.90	28.60	(0, 0)	-0.90	28.60	(0, 0)	—	—	—	—	—	—
Hedef-2	1.20	30.70	1.20	30.70	(0, 0)	1.20	30.70	(0, 0)	—	—	—	—	—	—
Hedef-3	0.0	29.50	0.0	29.50	(0, 0)	0.0	29.50	(0, 0)	0.0	29.30	(0, 0.20)	—	—	—
Hedef-4	-1.50	25.50	-1.50	25.50	(0, 0)	-1.50	25.50	(0, 0)	—	—	—	—	—	—
Hedef-5	0.60	28.00	0.60	28.00	(0, 0)	0.60	28.00	(0, 0)	—	—	—	—	—	—

	Hedef Koordinatları		TR-GPOF Sonuçları											
			SNR (Sonsuz)			SNR 20 dB			SNR 10 dB			SNR 5 dB		
	x (m)	y (m)	x(m)	y(m)	Hata(x,y)	x(m)	y(m)	Hata(x,y)	x (m)	y(m)	Hata(x,y)	x(m)	y (m)	Hata(x,y)
Hedef-1	-0.90	28.60	-0.90	28.60	(0, 0)	-0.90	28.59	(0, 0.01)	-1.20	28.50	(0.3, 0.1)	—	—	—
Hedef-2	1.20	30.70	1.20	30.70	(0, 0)	1.20	30.70	(0, 0)	1.16	30.70	(0.04, 0)	1.14	30.70	(0.06, 0)
Hedef-3	0.0	29.50	0.0	29.50	(0, 0)	0.0	29.50	(0, 0)	0.0	29.50	(0, 0)	1.40	29.10	(1.4, 0.4)
Hedef-4	-1.50	25.50	-1.50	25.50	(0, 0)	-1.50	25.50	(0, 0)	-1.52	25.50	(0.2, 0)	-1.50	25.50	(0, 0)
Hedef-5	0.60	28.00	0.60	28.00	(0, 0)	0.60	28.00	(0, 0)	1.00	28.10	(0.4, 0.1)	—	—	—

5.4. Ölçüm Sonuçları

TR-GPOF yönteminin saha performansını analiz etmek için Gebze Teknik Üniversitesi Açık Saha Elektromanyetik Ölçüm Laboratuvarında (ASEMLAB) TR ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde farklı boyutlara sahip 2 adet reflektör kullanılmış, bu reflektörlerden küçük olanı alıcı-verici anten dizisinden 28.5 m, diğeri ise 30.6 m öteye yerleştirilmiştir. Bu reflektörlerin (x,y) koordinat sisteminde orijin noktasına göre konumları (1.2m, 30.6m) (büyük reflektör) ve (-0.9m, 28.5m)'dir (küçük reflektör). Teorik olarak, 1.5 GHz'de ölçümde kullanılan büyük reflektörün RKA (Radar Kesit Alanı) değeri, küçük reflektörden 9 dB büyüktür.

Ölçümde TR dizisi 7 adet alıcı-verici antenden oluşmaktadır. Bu anten dizisinin açıklığı 15.6 m'dir. Ölçüm sahası ve ölçüm ekipmanları Şekil 5.12(a),(b)'de sunulmuştur. Ölçüm frekans bandı 1GHz - 2 GHz olup, örnekleme sayısı 2701 olarak seçilmiştir. Ortamın SNR değeri ise 18 dB olarak ölçülmüştür (Şekil 5.12(d)).



Şekil 5.12: ASEMLAB Ölçüm sistemi. a) Anten Sistemi. b) Saçıcı hedefler. c) 1 GHz-2 GHz frekans ölçüm verisi. d) (c)'nin menzil profili.

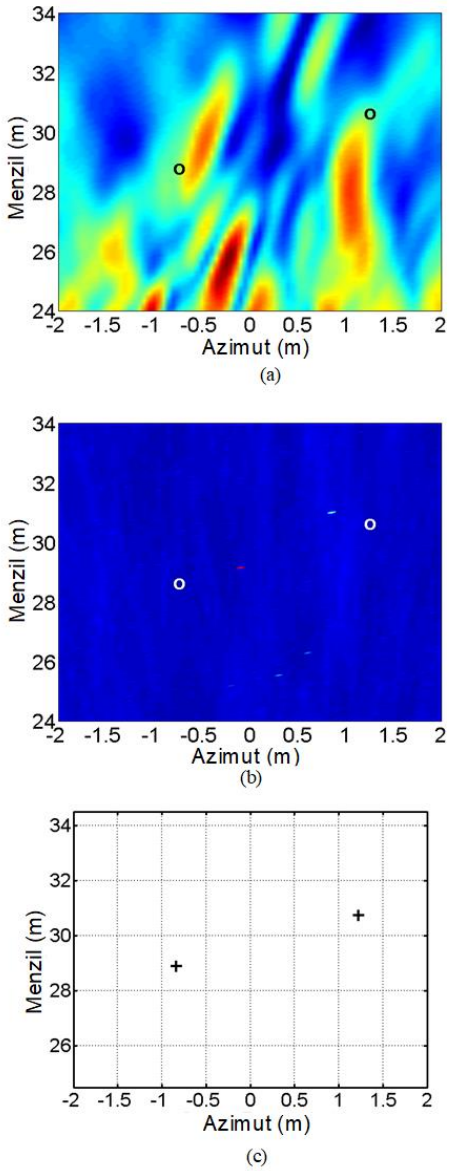
Ölçüm sisteminde kullanılan RF kablolar sınırlı bant genişliğine sahip olduğundan, ölçüm frekans bandı 1 GHz - 2 GHz olarak seçilmiştir. Sisteminde kullanılan RF kabloların çalışma frekansı 300 MHz - 6 GHz olup, antenlerin bant genişliği ise 800 MHz - 10 GHz'dir. Kullanılan RF kablolarda frekans arttıkça, kablo üzerindeki zayıflama katsayısı arttığından düşük frekans bölgesinde veri toplanmıştır. Örnekleme sayısı 2701 olarak seçildiğinde ölçüm sistemi ile ölçülebilecek azami mesafe 202.5 m olup, bu mesafe hedef ölçüm mesafelerini rahatlıkla sağlamaktadır. Ölçümlerde test objesi olarak reflektörün seçilme sebebi, reflektörün tek saçılma merkezi olması ve iyi bir yansıtıcılığa sahip olmasıdır.

Toplanan ölçüm verilerine TD-DORT, TR-MUSIC ve TR-GPOF yöntemlerini uyguladığımızda elde edilen sonuçlar Şekil 5.13'de verilmiştir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde TD-DORT ve TR-MUSIC yöntemi ile edilen odaklanma görüntülerinde saçıcıların konumuna göre kaymalar meydana gelmiştir.

Tezde sunulan TR-GPOF yöntemi ile saçıcıların konumları ölçüm verilerinden tam olarak elde edilmiştir. Hedeflerin gerçek konumları ile TR-GPOF yönteminin sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.5'te sunulmuştur. Tablo 5.5'teki değerler incelendiğinde TR-GPOF yönteminin azimut ve menzil eksenlerinde yüksek hassasiyetle saçıcı konum ve genliklerinin kestirimini yapabildiği görülmektedir.

Tablo 5.5: Ölçüm Sonuçları-TR GPOF.

	Hedefler			TR-GPOF Sonucu		
	X (m)	*Y (m)*	*Genlik*	*X (m)*	*Y (m)*	*Genlik*
Hedef-1	*1.2m*	*30.6m*	*-79.5 dB*	*1.22m*	*30.75m*	*-77.1 dB*
Hedef-2	*-0.9m*	*28.5 m*	*-91.7 dB*	*-0.83m*	*28.90m*	*-92.3 dB*



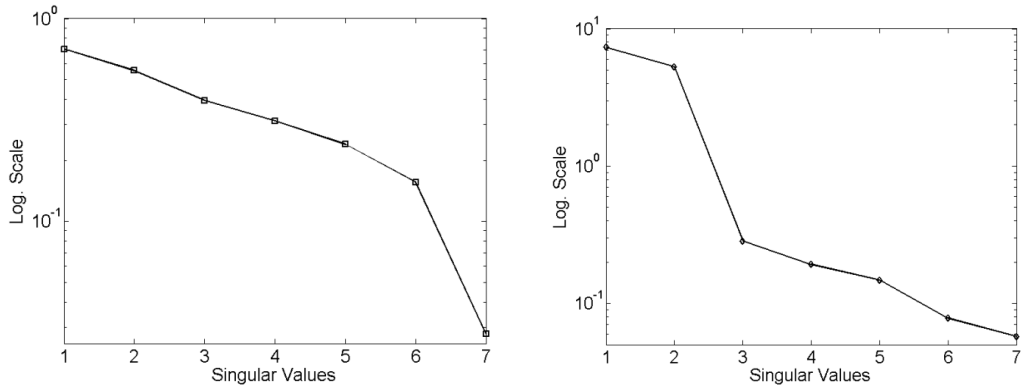
Şekil 5.13: Ölçüm Sonuçları: a) TD-DORT. b) TR-MUSIC. c) TR-GPOF.

5.5. Değerlendirme

SVD tabanlı TR görüntülerinin doğruluğu matematiksel olarak ilgili saçıcının özdeğer ve özvektör bilgilerine, tarama vektörüne ve bant genişliğine bağlıdır. Bu bilgiler ışığında TD-DORT ve TR-MUSIC yöntemleri benzetim çalışmalarında homojen ortam ve izotropik (eşyönlü) yayılım koşullarında test edilmiştir. Bu koşullarda her üç yöntem de doğru sonuçlar ürettiği gözlenmiştir.

TD-DORT ve TR-MUSIC yöntemiyle üretilen ölçüm sonucundaki farklılığın iki sebepten olduğu değerlendirilmektedir. i) Ölçüm verilerinin yönlü ışıma ve yönlü

saçılma verilerine sahip olması, ii) Anten dizi açıklığının yakın alan bölgesi içinde olması. Ölçüm verilerinin SVD tabanlı TD-DORT ve TR-MUSIC yönteminde kullanılan özdeğer eğrisi incelendiğinde ortamda yaklaşık 6 adet hedef olduğu görülmektedir. Halbuki burada beklenen eğri ikinci özdeğer verisinden sonra ani kırılım gösteren eğridir (Şekil 5.14). Benzer şekilde TD-DORT ölçüm sonucu görüntüsünde de ortamda 6 hedef görülmektedir (Şekil 5.13(a)).



(a) (b)

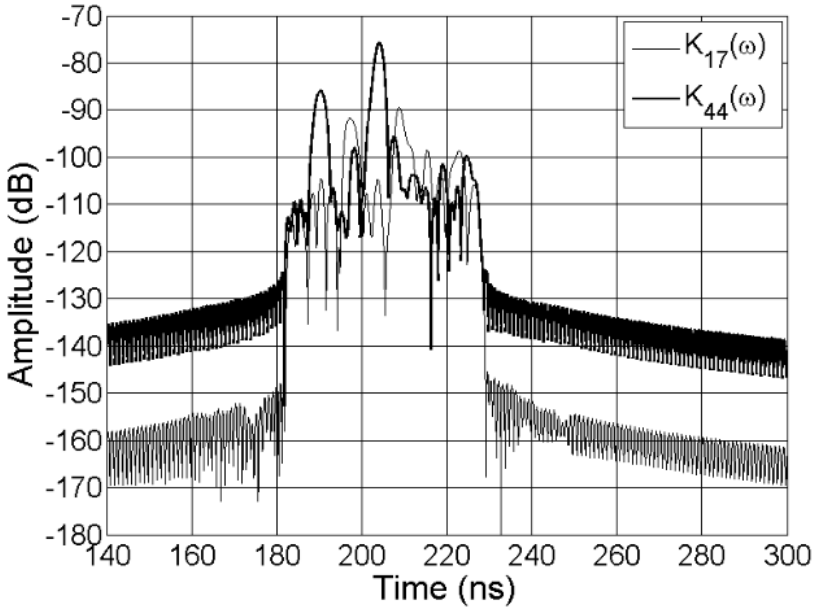
Şekil 5.14: Özdeğer eğrisi. a) Ölçüm verisi, b) Benzetim verisi.

TR-MUSIC yönteminde de herhangi bir saçıcı üzerine odaklanma sağlanamamıştır. Bununla birlikte TD-DORT ve TR-MUSIC yöntemlerinin ölçüm sonuçlarındaki bozukluğun çoklu yansımadan kaynaklandığı düşünülmemelidir. Ölçüm verilerinin 1 boyutlu menzil profili incelendiğinde açık bir şekilde iki saçıcı görülmektedir (Şekil 5.12(d)). Bununla birlikte, [24]'te bir elektromanyetik alan içinde küçük bir kürenin özdeğer davranışı analiz edilmiştir. Analiz sonuçları göstermektedir ki; kürenin bulunduğu alan bölgesine göre (yakın alan/uzak alan) özdeğer verileri farklı sayıda anlamlı özdeğer üretmektedir. Anten dizi açıklığı referans alındığında, yakın alan bölgesi içinde tek bir küre farklı menzillerde birden fazla özdeğer üretmiştir. İlginç bir şekilde ölçüm verilerindeki hedefler anten dizisine göre yakın alan içinde bulunmaktadır ve 3 tane özdeğer üretmektedir. Bu bağlamda TR-MUSIC ve TD-DORT yöntemleri için ölçüm sınırlarının belirlenmesi ayrı bir araştırma konusu olarak göülmektedir.

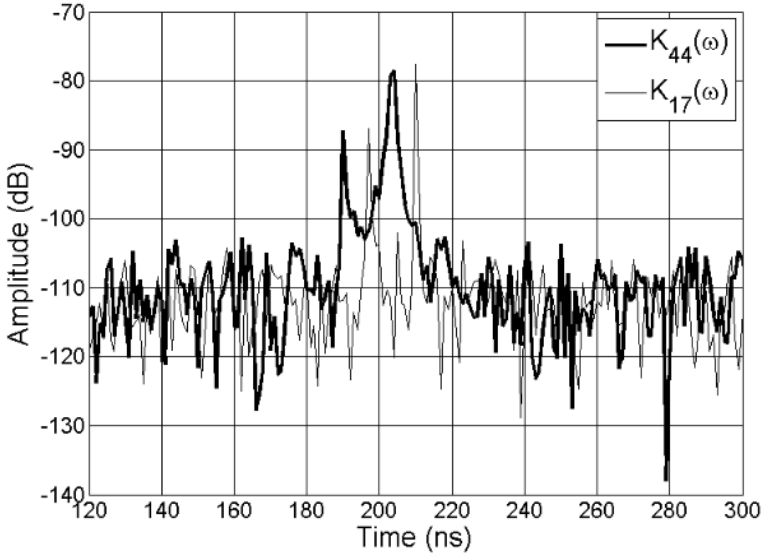
Benzetim çalışmalarında **K**(ω) matrisi verilerindeki saçıcı değerleri üretilirken her bir alıcı-verici antenin ve saçıcıların her yöne eşit ağırlıklı saçılım yaptığı varsayılmıştır (ideal durum). Dolayısıyla benzetim senaryolarında alıcı sinyallerde okunan değerler faz gecikme bilgilerini ve konumsal zayıflama faktörünü içermektedir. Ancak ölçüm verilerinde antenlerin ve saçıcıların isotropik olmadığı, yönlü huzmeye sahip olduğu, farklı bakış açılarında alıcıdan okunan işaretlerin genlik ve faz değerlerinin eşit oranda olmamasından anlaşılmaktadır. Ölçümlerde kullanılan horn anten ve trihedral yansıtıcılar yönlü huzmeye sahiptir. Sahadan toplanan ölçüm verileri simülasyon verileri ile karşılaştırıldığında **K**(ω) matrisindeki saçılma bilgilerinde bozulmalar olduğu görülmektedir. Ölçüm verilerinin 1B menzil profillerini herhangi bir K_{mn} (ω) üzerinden analiz ettiğimizde açıkça görülmektedir ki, genlik sinyallerinde anten ve yansıtıcı huzmesine bağlı olarak genlik zayıflaması görülmektedir (Şekil 5.15).

Şekil 5.15'de ölçüm verilerinde değişik alıcı-verici çiftleri için iki hedefin genlikleri farklılıklar gösterirken, Şekil 5.16'teki benzetim verilerinde aynı alıcı-verici çiftleri için hedef genlikleri arasında farklılıklar görülmemektedir.

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da K_{44}(ω) verisi ölçüm sisteminin tam merkezindeki alıcı-verici anten dizisi verilerini, K_{17}(ω) ise en soldaki alıcı ve en sağdaki verici anten kombinasyonu verilerini içermektedir. Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'daki veriler karşılaştırıldığında anten ve huzme paternine bağlı olarak 10 dB'ye yakın genlik zayıflaması görülmektedir. Bu durum klasik TR yöntemlerinde SVD ayrıklaşmasında ve geri yayılım verilerinde bozulmaya neden olmaktadır.



Şekil 5.15: Ölçüm verilerinin menzil profili.



Şekil 5.16: Benzetim verilerinin menzil profili.

6. SONUÇ VE İLERİ ÇALIŞMALAR

TR teknikleri bir sensör dizisinden alınan işaretlerin zamanda ters çevrilerek ortama tekrardan yayılmasıyla saçıcılar üzerinde odaklanma sağlamaktadır. Literatürde Fink'in düşük frekanslı akustik dalgaların analiziyle gösterdiği TR teknikleri, ilerleyen yıllarda Chambers, Devaney, Yavuz ve Teixeira ile geniş bantlı elektromanyetik sinyallerin uygulamasına kazandırılmış, diğer araştırmacılar ile de medikal, ultrasonik, uzaktan algılama gibi birçok alanda kullanılarak başarılı sonuçlar üretmiştir. Literatürde bulunan TR teknikleri ortamda bulunan saçıcıları belirlemek için SVD ayrıklaşması ile elde edilen özdeğer ve özvektörlerin karakteristliklerini kullanarak saçıcılar üzerinde odaklanma sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, genişbantlı MDM verilerine SVD ayrıklaşması yerine GPOF tekniği kullanılarak yeni bir TR odaklanma yöntemi geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Çalışmada, ilk olarak SVD tabanlı TR tekniklerinin performansları irdelenmiştir. SVD tabanlı yöntemlerin tek frekans ve çok frekans durumlarındaki etkinlikleri ile seçici odaklanma sınırları belirlenmiştir. Bu yöntemlerin gürültüye olan bağışıklıkları, çoklu saçıcının bulunduğu bir ortamda odaklanma yetenekleri, genişbantlı MDM matrisinin özdeğer ve özvektörleri arasındaki frekans bağımlılığı ilişkisi analiz edilmiştir.

İkinci olarak MDM matrisine GPOF tekniği uygulanarak, MDM matrisinde bulunan saçıcıların her bir antene olan uzaklıkları ve genlikleri doğrudan yüksek hassasiyetle bulunabilmiştir. MDM matrisi verileri saçıcılar hakkında üç farklı bilgiyi içermektedir. Bunlar; verici anten ile saçıcı arasındaki mesafe bilgisi, saçıcıların saçılma katsayısı ve saçıcı ile alıcı anten arasındaki mesafe bilgisidir. Geleneksel TR yöntemlerinde SVD ayrıklaşması ile elde edilen $\mathbf{U}$, $\mathbf{\Sigma}$ ve $\mathbf{V}$ matrisleri bu bilgileri barındırmamaktadır. Geliştirilen TR-GPOF yöntemi ile MDM matrisini oluşturan eksponansiyel sinyallerin kestirimi doğrudan yapılarak her bir anten çiftinin saçıcıya olan mesafe bilgisi ve her bir saçıcının genlik bilgisi doğrudan türetilmiştir. Diğer bir anlatımla, analizlerin SVD yerine GPOF tabanlı bir yaklaşımla gerçekleştirilmesi MDM matrisinin bileşenlere ayrılırken saçınım probleminin doğasına uygun bileşenlerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bu yüzden de GPOF tabanlı yaklaşımın daha iyi sonuçlar vermesi beklenmektedir. Nitekim, SVD tabanlı yöntemlerde saçıcıların tespit edilmesi için zamanda evrilmiş sinyallerin tekrar sanal olarak ortama

yayılım yapılması ve bir görüntünün oluşturulması gerekirken GPOF tabanlı yöntem ile saçıcı konumları ve şiddetleri doğrudan hesaplama sonucunda bulunabilmektedir. MDM matrisinin boyutları $N \times N$ boyutlu olması nedeniyle, SVD tabanlı yöntemlerde seçici odaklanmayı sağlayan $\mathbf{v}_p(\omega)$ özvektörü ve $\Sigma_p(\omega)$ özdeğeri azami anten sayısı (N) ile sınırlıdır. Bu bağlamda, ortamdaki saçıcı sayısının N'den fazla olduğu durumlarda SVD tabanlı yöntemler ile tespit edilebilecek saçıcı sayısı maksimum N kadardır. TR-GPOF yönteminde ise tespit edilebilen saçıcı sayısı N'den bağımsızdır. Anten sayısı saçıcı sayısından küçük olduğu durumda TR-GPOF yöntemi ortamdaki tüm saçıcıları yüksek hassasiyetle bulabilmektedir.

Üçüncü olarak, geliştirilen yöntem hem benzetim hem de ölçüm verileri üzerinde uygulanarak doğru sonuç ürettiği görülmüştür. Benzetim çalışmalarında, homojen bir ortam içinde yayılım ve saçılımların izotropik olduğu dikkate alınmasına rağmen, ölçüm verilerinde yayılım ve saçılımlar yönlü bir ışımaya sahiptir. SVD tabanlı yöntemlerde yayılım ve saçılımların yönlü olduğu durumlarda özdeğer eğrilerinde bozulmalar olduğu gözlenmiştir. Özdeğer eğrisindeki bozulma TR görüntüleri üzerinde bozulmalara sebep olmuştur. TR-GPOF yöntemi ise yönlü yayılım ve saçılımlara karşı SVD ayrıklaşmasına göre daha kararlı bir sonuç üretmiş, saçıcıların konumu ve genliği aynı şekilde yüksek hassasiyet ile bulunmuştur. Üç yöntemin gürültüye karşı dayanımları da karşılaştırılmıştır. TR-GPOF'in gürültüye karşı hassasiyetinin TR-MUSIC ile aynı seviyede olduğu örneklerle görülmüştür.

Sonuç olarak, sunulan TR-GPOF yöntemi ile MDM $\mathbf{K}(\omega)$ matris ayrışımının hassas bir şekilde yapılabildiği ve saçıcıların konumlarının anten sayısından bağımsız olarak yüksek hassasiyetle bulunduğu hem ölçüm hem de benzetim verilerinde gözlenmiştir.

İlerideki çalışmalarda;

i) TR yöntemlerinin yakın alan/uzak alanda etkilerinin
ii) TR-GPOF yöntemiyle analiz edilen saçılma katsayılarına görüntüleme fonksiyonu tanımlayarak noktasal sonuç bulma yerine saçıcıların görüntülerinin oluşturulmasının ve
iii) 3B $\mathbf{K}(\omega)$ matrisinin tensör matris ayrıklaştırması yapılarak tek seferde matris analizinin yapılması ve görüntü fonksiyonun oluşturulmasının

çalışılabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Pepper D. M., (1982), “Nonlinear Optical Phase Conjugation,” Optical Engineering, 21 (2), 156.

[2] Prada C., Wu F., Fink M., (1991), “The iterative time reversal mirror: A solution to self-focusing in the pulse echo mode”, Journal Acoustic Socality of America, 90 (2), 1119-1129.

[3] Prada C., Thomas J. L., Fink M., (1995), “The iterative time reversal process: Analysis of the convergence”, Journal Acoustic Socality of America, 97 (1), 62-71.

[4] Fink M., Prada C., Wu F., Cassereau D., (1989), “Self focusing in inhomogeneous media with time reversal acoustic mirrors,” IEEE Ultrasonics Symposium, Montreal, CANADA, 681–686, Oct. 3–6, 1989.

[5] Fink. M., Cassereau D., Derode A., Prada C., Roux P., Tanter M., Thomas J., Wu F., (2000), “Time-reversed acoustics,” Reports on Progress in Phys., 63 (12), 1933–1995.

[6] Fink M., (1992), “Time Reversal of Ultrasonic Fields-Part I: Basic Principles,” IEEE Transaction On Ultrasound Ferroelectric and Frequency Control, 39 (5), 555-566.

[7] Wu F., Thomas J. L., Fink M., (1992), "Time reversal of ultrasonic fields - Part II: Experimental results", IEEE Transaction On Ultrasound Ferroelectric and Frequency Control, 39 (5), 567-578.

[8] Thomas J. L., Roux P., Fink M., (1994), “Inverse scattering analysis with an acoustic time-reversal mirror,” Physics Review Letters, 72 (5), 637–640.

[9] Edelmann G. Akal F., T., Hodgkiss W. S., Kim S., Kuperman W. A., Song H. C., (2002), “An initial demonstration of underwater acoustic communications using time reversal,” IEEE Journal of Oceanic Engineering., 27, 602–609.

[10] Yavuz M. E., Teixeira F. L., (2005), “A numerical study of time reversed UWB electromagnetic waves in continuous random media,” IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 4, 43–46.

[11] Kosmas P., Rappaport C. M., (2005), “Time reversal with the FDTD method for microwave breast cancer detection,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques., 53, 2317–2323.

[12] Devaney A. J., (2005), “Time reversal imaging of obscured targets from multistatic data,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 53 (5), 1600–1610.

[13] Gruber F. K., Marengo E. A., Devaney A. J., (2004), “Time-reversal imaging with multiple signal classification considering multiple scattering between the targets,” Journal Acoustic Socality of America., 115,3042–3047.

[14] Jin Y. Moura J. M. F., (2007), "TR-SAR Time Reversal Target Focusing in Spotlight SAR", Acoustic Speech and Signal Proccesing, ICASSP, 2, 957-960.

[15] Jin Y. Moura J. M. F., O'Donoughue N., (2007) "Time Reversal Synthetic Aperture Radar Imaging In Multipath," Signals, Systems, ACSSC, 1812 – 1816.

[16] Jin Y. Moura J. M. F., (2008) "Time Reversal Imaging by Adaptive Interference Canceling," IEEE Trans. Signal Proccesing, 56 (1), 233-247.

[17] Prada C., Manneville S., Spoliansky D., Fink M., (1996), "Decomposition of the time reversal operator: Detection and selective focusing on two scatterers," Journal Acoustic Socality of America, 99, 2067-2076.

[18] Prada C., Fink M., (1994) "Eigenmodes of the time-reversal operator: A solution to selective focusing in multiple target media," Wave Motion 20, 151-163.

[19] Prada C., Manneville S., Spoliansky D., Fink M., (1996), "Decomposition of the time-reversal operator: Application to detection and selective focusing on two scatterers," Journal Acoustic Socality of America. 99, 2067-2076.

[20] Tortel H., Micolau G., Saillard M., (1999), "Decomposition of the time reversal operator for electromagnetic scattering," Journal Electromagnetic Waves Appl., 13, 687–719.

[21] Micolau G., Saillard M., (2003), "DORT method as applied to electromagnetic sensing of buried objects", Radio Science, 38 (3), 4-1-12.

[22] Web 1, (2012), http://www.ece.neu.edu/faculty/devaney/ajd/preprints.html (Erişim Tarihi: 07/12/2012)

[23] Lehman S., Devaney A. J. (2003), "Transmission mode time-reversal super-resolution imaging," Journal Acoustic Socality of America. 113, 2742-2753.

[24] Chambers D. H., Berryman J. G., (2004), "Analysis of Time-Reversal Operator for small Spherical Scatterer in an Electromagnetic Field," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 52 (7), 1729–1738.

[25] Lehman S. K., Devaney A. J., (2003), "Transmission mode time-reversal super-resolution imaging," Journal Acoustic Socality of America, 113 (5), 2742-2753.

[26] Lev-Ari H., Devaney A. J., (2000), "The time reversal techniques re-interpreted: Subspace-based signal processing for multistatic target location", Proc. IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing. Workshop, 509–513, Cambridge, USA, 17 March.

[27] Prada C., Fink M., (1994), "Eigenmodes of the time reversal operator: a solution to selective focusing in multiple-target media," Wave Motion, 20, 151–163.

[28] Yavuz M. E., Teixeira F. L., (2006), "Full Time-Domain DORT for Ultrawideband Electromagnetic Fields in Dispersive, Random Inhomogeneous Media," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 54 (8), 2305-2315.

[29] Yavuz M. E., Teixeira F. L., (2008) “On the Sensitivity of Time-Reversal Imaging Techniques to Model Perturbations,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 56 (8), 834-843.

[30] Yavuz M. E., Teixeira F. L, (2008), “Space-Frequency Ultrawideband Time Reversal Imaging,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46 (4), 1115-1124.

[31] Moura J. M. F., Jin Y., (2008), “Time Reversal Imaging by Adaptive Interference Canceling”, IEEE Trans. on Signal Processing, 56 (1), 233-247.

[32] Fouda A.E., Teixeira F. L., (2014), “Statiscal Stability of Ultrawideband Time-Reversal Imaging in Random Media”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52 (2), 870-879.

[33] Ciuonzo D., Romano G., Solimene R., (2015), “Performance Analysis of Time-Reversal MUSIC”, IEEE Transactions on Signal Processing, 63 (10), 2650-2662.

[34] Santos V. R. N., Teixeira F. L., (2017), “Application of time-reversal-based processing techniques to enhance detection of GPR targets”, Journal of Applied Geophysics, 80-94.

[35] Odedo V.C., Yavuz M. E., Costen F., Himeno R., Yokota H., (2017) “Time Reversal Technique Based on Spatiotemporal Windows for Through the Wall Imaging”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 65 (6), 3065-3072.

[36] Hossain Md. D., Mohan A. S., (2017), “Cancer Detection in Highly Dense Breasts Using Coherently Focused Time-Reversal Microwave Imaging”, IEEE Trans. on Compt. Imaging, 3, (4), 928-939.

[37] Sarkar T. K., Pereira O., (1995), “Using the matrix pencil method to estimate the parameters of a sum of complex exponentials,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 37, 48–55.

[38] Hua Y. and Sarkar T. K., (1991), “On SVD for estimating generalized eigenvalues of singular matrix pencil in noise,” IEEE Trans. Signal Processing, 39, 892–900.

[39] Hua Y., (1988), “On Techniques for Estimating Parameters of Exponentially Damped/Undamped Sinusoids in Noise,” Doktora Tezi, Syracuse Universitesi.

[40] Broquetas A., Palau J., Jofre L., Cardama A., (1998), “Spherical Wave Near-Field Imaging and Radar Cross-Section Measurement,” IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 46 (5), 730-735.

[41] Odendaal J. W., Joubert J., (1996), “Radar Cross-Section Measurements Using Near-Field Radar Imaging,” IEEE Trans. Instruments and Measurements, 45 (6), 730-735.

[42] IEEE, (2007), Recommended Practice for Radar Cross-Section Test Procedures, Std 1502-2007.

[43] Özsoy Ş., Ergin A. A., (2009), “Pencil Back-Projection Method for SAR Imaging”, IEEE Transaction on Image Processing, 18, 573-581.

[44] Nazlı H., Ergin A. A., (2017), “Application of the Generalized Pencil of Function Method to Time Reversal Imaging”, IEEE Antennas and Wireless Propag. Letters, 16, 3113-3117.

ÖZGEÇMİŞ

Hakkı NAZLI, 1982 yılında İstanbul'da doğmuştur. Lise eğitimini 2001 yılında Vefa Lise'nde tamamlamıştır. 2005 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Lisans eğitimini tamamlamıştır. 2009 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Elektromanyetik Anabilimdalı'nda Ters Yapay Açıklı Radar görüntülerinin oluşturulması üzerine yüksek lisans tezini yapmıştır. Bu tez çalışmasında hem ölçüm hem de benzetim verilerinden TYAR görüntülerinin elde edildiğini göstermiştir.

2005-2010 yılları arasında TÜBİTAK MAM Bilişim Teknolojileri Enstitüsü'nde Araştırmacı olarak görev yapmıştır.

2010-2014 yılları arasında TÜBİTAK BİLGEM'de çeşitli projelerde Uzman Araştırmacı, devam eden yıllarda TÜBİTAK BİLGEM'de Başuzman Araştırmacı olarak görev almıştır.