

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERS YAPAY AÇIKLIKLI RADAR
GÖRÜNTÜLERİNİN DENEYSEL
VERİLERDEN ELDE EDİLMESİ

Hakkı NAZLI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE

2009

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERS YAPAY AÇIKLIKLI RADAR
GÖRÜNTÜLERİNİN DENEYSEL
VERİLERDEN ELDE EDİLMESİ

Hakkı NAZLI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Ahmet Arif ERGİN

GEBZE
2009



**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JÜRİ ONAY FORMU

JÜRİ

ÜYE (BAŞKAN) : Doç. Dr. Ahmet Arif Ergin

ÜYE : Prof. Dr. Caner Özdemir

ÜYE : Doç. Dr. Serkan Aksoy

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 15.01.2009 tarih ve 2009/01 sayılı kararı ile yukarıdaki öğretim elemanlarından oluşmuş jüri tarafından düzenlenen/...../.....tarihli Tez Savunma Tutanağı neticesinde Yüksek Lisans öğrencisi Hakkı NAZLI'nın çalışması GYTE mühendislik ve Fen Bilimleri Yönetim Kurulu/...../..... tarih ve/..... sayılı kararıyla Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak onaylanmıştır.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZ BAŞLIĞI : Ters Yapay Açıklıklı Radar Görüntülerinin Deneysel Verilerden Elde Edilmesi

YAZAR ADI : Hakkı NAZLI

Bu tezde, monostatik yapıda (alıcı ve vericinin aynı noktada olduğu durum) deneysel bir sistem tarafından farklı bakış açıları ve farklı frekanslarda toplanan ölçüm verileri kullanılarak Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR) görüntüsünün elde edilmesi anlatılmıştır. Bir hedefin TYAR görüntüsünün oluşturulması akım-alan bağıntıları ile analiz edilmiş ve ters Fourier dönüşümü kullanılarak hedefin tomografik görüntüsü oluşturulmuştur.

Çalışmanın ilk aşamasında TYAR görüntüsünü etkileyen parametreler hesaplanmış, bu parametreler doğrultusunda hedefin farklı bakış açısı ve belirli bir frekans bandında ölçülebilen elektrik alan verileri yapay olarak üretilmiş ve TYAR görüntüleri bu yapay veriler kullanılarak oluşturulmuştur. İkinci aşamada, deneysel bir monostatik ölçüm sistemi ile farklı bakış açısı ve farklı frekanslarda hedeften dönen sinyallerin genlik ve faz bilgileri kaydedilerek ölçüm verileri toplanmıştır. “Spektral Uzay” olarak adlandırılan k_x - k_y düzleminde kartezyen koordinatlarda ihtiyaç duyulan elektrik alan verileri, polar koordinatlardaki ölçülmüş verilerden aradeğerleme (interpolasyon) tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Spektral uzaydaki her bir kartezyen noktanın koordinatı, hedef bölgesinin genişliğine bağlı olarak örnekleme kuramına göre belirlenmiştir. Spektral uzaydaki ölçüm verilerinin iki boyutlu ters Fourier dönüşümü alınarak hedef bölgesindeki TYAR görüntüsü elde edilmiştir.

Böylece hem deneysel hem de yapay ölçüm verileri kullanılarak TYAR görüntüleri oluşturulmuştur.

SUMMARY

Title of thesis: Reconstruction of Inverse Synthetic Aperture Radar Images Using an Experimental System

Author: Hakkı NAZLI

In this thesis, production of inverse synthetic aperture radar (ISAR) images using measurement data gathered from multiple observation angles and limited frequency bandwidth by a monostatic (receiver and transmitter at the same position) experimental system has been presented. ISAR images of a target have been interpreted as tomographic reconstruction via inverse Fourier transformation and have been analyzed by current-field relations.

In the first part of this study, parameters effecting reconstruction of the ISAR images have been analyzed and these parameters are used in producing ISAR images from synthetic (simulated) measurement data from different aspect angles and limited bandwidth. In the second part of this study, measurement data from multiple observation angles have been obtained by a monostatic experimental system which records both amplitude and phase of scattered field in the frequency domain. The measurement data that has been collected on a polar grid on the k_x - k_y plane, called the spectral domain, has been interpolated to a Cartesian grid. Sampling interval of the k_x - k_y plane depends on the maximum target extent on the x - y plane called image plane. Finally, the ISAR images of the target have been reconstructed via 2D inverse Fourier transform of the interpolated data on k_x - k_y plane.

Consequently, ISAR imaging has been accomplished by a tomographic reconstruction process using both synthetic and measured data.

Kıymetli anneme ve babama...

TEŞEKKÜR

İlk olarak şunu ifade etmek isterim ki, gösterdiği çok yönlü ve amaca odaklı danışmalıkla bana bu değerli unvanı kazandıran, bunun yanında, tez çalışmam boyunca hoşgörülü ve içten yaklaşımlarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanım Doç. Dr. Ahmet Arif Ergin'e en derin şükranlarımı sunarım. Kendisinin bilimsel konularda ileriye dönük araştırmacılığı, yenilikçiliği ve sorunlar karşındaki çözüm yöntemleri hem bu öğrencisi için iyi bir örnek teşkil etmekte hem de bu ülkenin teknolojik gelişimi için büyük faydalar sağlamaktır.

Ayrıca tez jürimde yer alan değerli öğretim üyeleri Prof. Dr. Caner Özdemir'e, Doç. Dr. Serkan Aksoy'a ve Yrd. Doç. Dr. Gökhan Çınar'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Onlarla seminerlerde, öğle aralarında ve okul koridorlarında gerçekleştirdiğim diyaloglar benim için çok faydalı olmuştur.

Doç. Dr. Ergin'in ASEMLAB ölçüm grubunda yer alan Sezgi Yıkılmazçınar ve Ahmet Faruk Coşkun'a TYAR ölçümlerinde gösterdikleri özverili çalışmadan dolayı, ayrıca bu çalışmanın ilk aşamalarında ölçüm sisteminin hazır hale getirilmesi için emek harcayan arkadaşım Emrullah Bıçak'a teşekkür ederim.

Tez sürem boyunca gerekli desteği sağlayan TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Bilişim Teknolojileri Enstitüsü yönetimine teşekkür ederim.

Son olarak ama bunu en çok hak eden, sevgili eşim Fatma'ya bu çalışma sürecinde ona ihtiyaç duyduğum her an benimle beraber olduğu ve çalışmalarımnda beni desteklediği için sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL MATEMATİKSEL KAVRAMLAR	6
2.1. Temel Elektromanyetik Kavramlar	6
2.1.1. Uzak Alan Yaklaşımları	8
2.1.2. Uzak Alanda Dalga Yayılımı	9
2.2. Fourier Dönüşümü	10
2.2.1. Sürekli Fourier Dönüşümü	10
2.2.2. Periyodik İşaretlerin Ayrık Fourier Dönüşümü	11
2.3. Tomografik Görüntüleme Tekniği	12
2.3.1. İzdüşüm – Dilim Kuramı	13
3. TERS YAPAY AÇIKLIKLI RADAR GÖRÜNTÜLEME	16
3.1. TYAR ile BYT Arasındaki Farklılıklar	16
3.2. YAR ve TYAR Kavramı	18
3.3. Vektörel Akım - Alan Dağılımları	19

	x
3.4. TYAR Teorisi	21
4. TYAR GÖRÜNTÜLEMESİNDE ÖLÇÜM VERİLERİNDEN GELEN ZORLUKLAR	26
4.1. Örnekleme Kuramı	27
4.2. Menzilde Pencereleme	30
4.3. Menzilde Öteleme	32
4.4. Aradeğerleme Tekniği ile TYAR Görüntüsünün Oluşturulması	33
4.5. Gerçek Ölçüm Verisinden TYAR Görüntüsü Elde Edilmesi	34
5. TYAR GÖRÜNTÜLEMEDE KULLANILAN ÖLÇÜM DÜZENEĞİ	36
5.1. Ölçüm Sistemi ve Ölçüm Bilgileri	38
6. TYAR ÖLÇÜM SONUÇLARI	41
7. SONUÇ VE GELECEKTE PLANLANAN ÇALIŞMALAR	47
EK-A	54
EK-B	60
KAYNAKLAR DİZİNİ	63
ÖZGEÇMİŞ	65

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
1B	Bir Boyutlu
2B	İki Boyutlu
3B	Üç Boyutlu
ASEMLAB	Açık Saha Elektromanyetik Laboratuvarı
BYT	Bilgisayar Yardımlı Tomografi
FD	Fourier Dönüşümü
GYTE	Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü
MAM	Marmara Araştırma Merkezi
RKA	Radar Kesit Alanı
TFD	Ters Fourier Dönüşümü
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TYAR	Ters Yapay Açıklıklı Radar
YAR	Yapay Açıklıklı Radar
<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
ω	Açısal frekans (rad/s)
J	Akım yoğunluğu (A/m^2)
k	Dalga sayısı (rad/m)
E	Elektrik alan şiddeti (V/m)
ϵ	Elektriksel geçirgenlik (F/m)

f	Frekans (1/s)
$F(k_u)$	Spektral uzaydaki herhangi bir fonksiyon
$f(u)$	Konum uzayındaki herhangi bir fonksiyon
c	Işık hızı (m/s)
H	Manyetik alan şiddeti (A/m)
A	Manyetik vektör potansiyeli (Wb/m)
μ	Manyetik geçirgenlik (H/m)
t	Saniye (s)
ρ	Yük yoğunluğu (C/m ³)
x - y	2B konum uzayı düzlemi
k_x - k_y	2B spektral uzay düzlemi
$U(\mathbf{r}, t)$	Zamana bağımlı harmonik alan
$U(\mathbf{r})$	Harmonik alanın karmaşık fazör gösterimi
R	Kaynaktan gözlem noktasına olan konum vektörü
r	Orijinden gözlem noktasına olan konum vektörü
r'	Kaynağın bulunduğu noktanın konum vektörü
j	Karmaşık ifade ($j = \sqrt{-1}$)
$\hat{\mathbf{r}}$	r yönündeki birim vektör
$\hat{\theta}$	θ yönündeki birim vektör
$\hat{\phi}$	ϕ yönündeki birim vektör
N	Örnek sayısı
Δu	Konum uzayının adım aralığı
Δk_u	Spektral uzayın adım aralığı
π	Pi sayısı

U_{\max}	Hedef bölgesinin azami genişliği
K_{\max}	Spektral uzayın bant genişliği
$p_y(x)$	2B bir $f(x,y)$ fonksiyonun x eksenindeki izdüşümü
M	Boyut (İkinci Bölüm), saçıcı sayısı (Üçüncü bölüm)
$f(x,y)$	2B herhangi bir fonksiyon
$f_{\theta}(u,v)$	$f(x,y)$ fonksiyonun $u-v$ düzlemindeki cevabı
$u-v$	$x-y$ düzleminin θ kadar döndürülmesiyle oluşan koordinat sistemi
$F(k_x, k_y)$	Herhangi bir 2B spektral uzay fonksiyonu
$F(k_u, k_v)$	$F(k_x, k_y)$ 'nin $k_u - k_v$ düzlemindeki cevabı
$k_u - k_v$	$k_x - k_y$ düzleminin θ kadar döndürülmesiyle oluşan koordinat sistemi
$p_{\theta}(u)$	$f_{\theta}(u,v)$ fonksiyonun u eksenindeki izdüşümü
$P_{\theta}(k)$	$p_{\theta}(u)$ izdüşüm fonksiyonun Fourier cevabı
θ	Koordinat sisteminin dönme açısı
i	Saçıcı sayısı
$\hat{\mathbf{p}}$	Polarizasyon vektörü
$\hat{\mathbf{v}}$	Dalganın v yönündeki yayılım vektörü
a_i	Eşdeğer akım dağılımları
$F(k, \theta)$	Menzilde düzeltilmiş elektrik alan
\mathcal{F}_2^{-1}	2B ters Fourier dönüşümü
\mathcal{F}_2	2B Fourier dönüşümü
δ	Noktasal fonksiyon
B	Frekans düzleminin bant genişliği

f_s	Örnekleme frekansı
D_{\max}	Hedef bölgesinin genişliği
t_s	$f(t)$ 'nin örnekleme aralığı
$f(t)$	Zaman uzayında herhangi bir fonksiyon
$F(\omega)$	Frekans uzayında herhangi bir fonksiyon
Δk_x	k_x eksenindeki örnekleme aralığı
Δk_y	k_y eksenindeki örnekleme aralığı
$g(r)$	Konum uzayındaki pencereleme fonksiyonu
$f(r)$	Menzil fonksiyonu
$\bar{f}(r)$	Pencerelenmiş menzil fonksiyonu
$\bar{F}(k)$	$\bar{f}(r)$ fonksiyonun ters Fourier cevabı
$G(k)$	$g(r)$ fonksiyonun Fourier cevabı
$\bar{F}_{R_0}(k, \theta)$	Spektral uzayda menzilde ötelenmiş fonksiyon
λ	Dalga boyu
Δr	Menzil çözünürlüğü
$\Delta \theta$	Açısal çözünürlük

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. TYAR ölçüm geometrisi.	3
1.2. TYAR algoritması.	4
2.1. Kaynak ve gözlemci konumlarını gösteren koordinat sistemi.	8
2.2. Uzak alan yaklaşımının gösterimi.	9
2.3. Ayırıklaştırılmış Fourier dönüşümü	12
2.4. Bakış açısına göre değişen koordinat sistemi.	14
3.1. Mikrodalga görüntüleme ile İzdüşüm – Dilim kuramı arasındaki farklılıklar.	17
3.2. 2B YAR görüntüleme düzlemi.	18
3.3. TYAR ölçüm geometrisi.	22
3.4. TYAR teorisinin grafiksel gösterimi.	24
4.1. Örnekleme kuramı.	28
4.2. TYAR ölçümü için spektral uzaydaki örnekleme noktaları.	29
4.3. Pencereleme işlemi.	31
4.4. Öteleme işlemi.	33
4.5. Aradeğerleme tekniği ile TYAR görüntüsünün elde edilmesi.	34
4.6. TYAR görüntüsünün ölçümsel verilerle elde edilme algoritması.	35
5.1. Menzil ve çapraz menzil çözünürlüğünde hedef bölgesinin grafiksel gösterimi.	36
5.2. TYAR ölçmelerinde döner tabla üzerine yerleştirilmiş reflektörler.	38
5.3. ASEMLAB monostatik ölçüm sistemi.	39
5.4. Saçıcılığı farklı iki reflektörün menzil cevabı.	40
6.1. Frekans bandı 2.75-3.25 GHz için TYAR benzetim sonucu.	42
6.2. Frekans bandı 2.75-3.25 GHz için TYAR ölçüm sonucu.	42
6.3. Frekans bandı 9.75-10.25 GHz için TYAR benzetim sonucu.	43
6.4. Frekans bandı 9.75-10.25 GHz için TYAR ölçüm sonucu.	43
6.5. Frekans bandı 16.75-17.25 GHz için TYAR benzetim sonucu.	45
6.6. Frekans bandı 16.75-17.25 GHz için TYAR ölçüm sonucu.	45
7.1. Ölçüm bölgesinde ve hedef bölgesinde bulunan saçıcılar.	48

- 7.2. Menzilde pencereleme ve öteleme yapılmamış alan verilerinden elde edilen TYAR görüntüsü. 49
- 7.3. Menzilde pencereleme yapılmış fakat menzilde öteleme yapılmamış alan verilerinden elde edilen TYAR görüntüsü. 50
- 7.4. Menzilde öteleme yapılmış fakat menzilde pencereleme yapılmamış alan verilerinden elde edilen TYAR görüntüsü. 50
- 7.5. Menzilde pencereleme ve menzilde öteleme işlemi yapıldıktan sonra elde edilen TYAR görüntüsü. 51
- 7.6. Radar y doğrultusunda yayılım yaparken elde edilen TYAR görüntüsü. 52
- 7.7. Radar v doğrultusunda yayılım yaparken elde edilen TYAR görüntüsü. 52

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.1. TYAR ölçüm senaryosu verileri.	39
7.1. Saçıcıların ölçüm bölgesindeki konumu.	48

1. GİRİŞ

Bir hedefin radar tarafından aydınlatılmasıyla hedef üzerinde hedefin yapısına ve malzemesine bağlı olarak akım indüklenmesi meydana gelir. İndüklenen bu akım dağılımları tekrardan elektrik alanları üretir. Hedefteki akım dağılımlarının meydana getirdiği elektrik alanlar saçılan alanlardır. Bu saçılan alanların radara dönen kısmı hedefin Radar Kesit Alanı (RKA) hakkında bilgi vermektedir. Fakat bu RKA değeri, indüklenen akım dağılımlarının hedefteki konumu ve şiddeti hakkında bilgi içermez. Saçılan alanların belirli çapraz menzil (radarın yayılım doğrultusunun normali) ve menzil (radarın yayılım doğrultusu) çözünürlüğünde işlenmesi ile hedef üzerindeki akım yoğunluklarının dağılımı görüntülenebilir [1]. Bu şekilde hedef hakkında elde edilen bilgiye “Saçılma merkezleri” de denir [2,3]. Saçılma merkezleri, hedefin üzerinde indüklenen akımlarla ilişkili olmakla beraber bu iki olgunun aynı şey olduğu söylenemez.

Yapay Açıklıklı Radar (YAR) bir sahnedeki hedeflerin yüksek çözünürlüklü görüntülerinin oluşturulması için geliştirilmiş bir uzaktan algılama tekniğidir [4–10]. Bu teknikte geniş bantlı bir radar, hedefin etrafında hareket ederek verileri toplar ve işler. “Yapay Açıklık” kavramı, hedefin gözlemlendiği farklı bakış açılarından oluşan yüzeyin sanki tek bir açıklıklı gibi yorumlanması ile ortaya çıkar. Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR) görüntüleme ise, radar sabit dururken hedef kendi ekseninde hareket ettirilerek hedefin görüntüsü oluşturulur.

Bu tezde, uzak alan yaklaşımları doğrultusunda manyetik vektör potansiyeli kullanılarak akım-alan dağılımları arasındaki ilişki incelenmiş, bu ilişki skaler bir denkleme indirgenmiştir. Ardından elektrik alan verileri radarın hedefe bakış açısına ve ölçüm frekansının bant genişliğine bağlı olarak polar düzlemde toplanmıştır. Bu ölçüm verilerinin adım aralığı örnekleme kuramına bağlı olarak spektral uzayda (k_x – k_y düzlemi) aradeğerleme tekniği ile konumlandırılarak kartezyen düzleme indirgenmiştir. Bu kartezyen düzlemdeki alan verilerinin ters Fourier dönüşümü alınmasıyla hedef

bölgesinin 2B kesitsel görüntülenmesi gerçekleştirilmiştir. Bir TYAR görüntüsünün elde edilebilmesi için ölçüm verileri hedefe farklı bakış açısı ve farklı frekanslarda olmalıdır. Bir TYAR görüntüsünde, menzil çözünürlüğü radarın bant genişliği, çapraz menzil çözünürlüğü yapay açıklığı sağlayan farklı bakış açıları aralığının genişliği ile elde edilir [10].

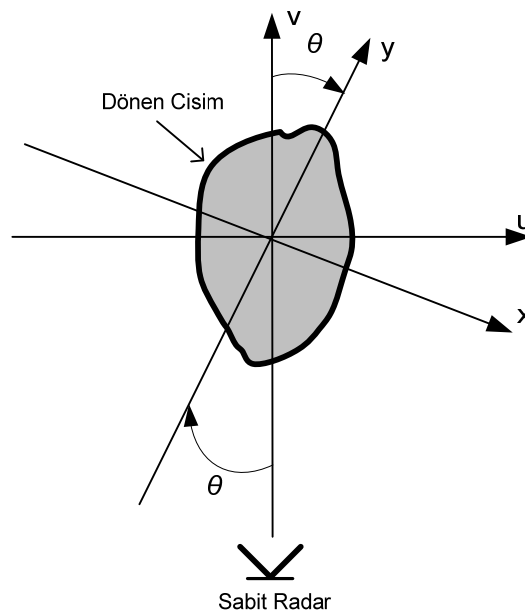
Bu tez kapsamında, Türkiye’de ilk kez bir açık sahada saçıcılığı farklı iki hedefin farklı bakış açılarından RKA ölçümleri yapılarak hedeflerin açık saha TYAR görüntüsü elde edilmiştir. Bu çalışma, ölçüm sahasının modellenmesiyle yapay ölçüm verilerinden TYAR görüntüsünün oluşturulması, TYAR ölçümlerinin gerçekleştirilmesi ve açık saha ölçüm verileri kullanılarak TYAR görüntüsünün oluşturulması olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır.

İlk aşamada akım-alan dağılımları arasındaki vektörel ilişki, skaler bir denklem olarak ifade edilmiştir. Buna bağlı olarak konum uzayında bulunan akım yoğunluk fonksiyonu ile spektral uzayda bulunan alan dağılımları fonksiyonu arasındaki ilişki belirli değişken dönüşümleri kullanılarak Fourier dönüşümüne benzetilmiştir. Böylece 2B ters Fourier dönüşümü tekniği ile TYAR görüntülemenin matematiksel ifadesi elde edilmiştir. Bu matematiksel ifade doğrultusunda ölçüm sahası modellenerek yapay ölçüm verileri üretilmiş, bu verilerin 2B ters Fourier dönüşümü alınarak TYAR görüntüsü elde edilmiştir.

İkinci aşamada, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü’nde (GYTE) yer alan Açık Saha Elektromanyetik Laboratuvarında (ASEMLAB) radardan 300m (uzak alan menzili) uzaklıkta döner tabla (İngilizce: *rotator*) üzerine yerleştirilmiş farklı saçıcılığa sahip iki reflektörün farklı bakış açıları ve belirli bir bant genişliğinde RKA ölçümleri yapılmıştır. Döner tabla çapraz menzil ekseninde yeterli açısal çözünürlükte saat yönünde 10° hareket ettirilerek gerekli yapay açıklık sağlanmıştır. TYAR ölçüm sisteminin geometrisi Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Alıcı tarafta hedeften dönen sinyallerin faz ve genlik bilgileri kaydedilmiştir. Ölçümler 3, 10 ve 17 GHz merkez

frekanslar olmak üzere 500 MHz bant genişliğinde ve 10° tarama açısı için farklı açısal çözünürlükte gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü aşamada, spektral uzayda polar koordinatlarda toplanan bu ölçüm verilerine menzilde pencereleme ve menzilde öteleme işlemi yapıldıktan sonra, aradeğerleme tekniği ile bu veriler kartezyen koordinatlarda türetilmiştir. Kartezyen koordinatlarda elde edilen bu verilerin 2B ters Fourier dönüşümü ile TYAR görüntüsü elde edilmiştir. Aynı hedef için farklı frekans bandında toplanan ölçüm verilerinin TYAR görüntüsüne etkisi incelenmiştir.



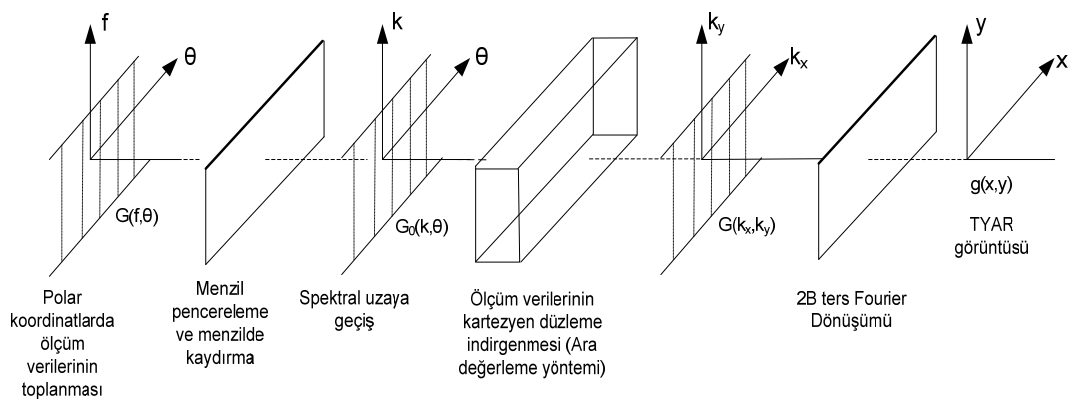
Şekil 1.1. TYAR ölçüm geometrisi.

Yukarıdaki genel açıklamalar doğrultusunda bir TYAR görüntüsünün elde edilebilmesi için aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmelidir (Şekil 1.2).

1. Hedef bölgesinden dönen işaretlerin açı ve frekansa bağlı olarak polar koordinatlarda toplanması.
2. Frekansa ve bakış açısına bağlı olarak f - θ düzleminde toplanan ölçüm verilerinin spektral uzayda k - θ düzleminde türetilmesi. Burada f frekans ve c ışık hızı olmak üzere, $k = 2\pi f / c$ dalga

sayısını ifade eder. Bu işlem sırasında menzil pencereleme ve kaydırma işlemleri de gerçekleştirilir.

3. Spektral uzayda k - θ düzlemindeki ölçüm verilerinin aradeğerleme tekniği ile kartezyen koordinatlarda (k_x - k_y düzlemi) türetilmesi.
4. Spektral uzayda kartezyen koordinatlara dönüştürülen ölçüm verilerinin 2B ters Fourier dönüşümü ile hedef uzayı olan x - y düzleminde TYAR görüntüsünün oluşturulmasıyla saçılma merkezlerinin belirlenmesi.



Şekil 1.2. TYAR algoritması.

Bu tez kapsamında, bölüm 2' de bir TYAR görüntüsünün elde edilmesinde kullanılacak olan temel matematiksel kavramlar ele alınmıştır.

Bölüm 3'de, bölüm 2'de ifade edilen kavramlar kullanılarak TYAR görüntülemenin akım-alan dağılımlarına bağlı matematiksel ifadesine yer verilmiştir. Burada saçılma merkezlerinin görüntülenmesi için gerekli teorik altyapı oluşturulmuştur.

Bölüm 4’de ölçümlerden gelen kısıtlamaların TYAR görüntüsüne etkisi incelenmiştir.

Bölüm 5’te monostatik ölçüm sistemi ve TYAR ölçümlerin yapılışı ele alınmıştır.

Bölüm 6’da ölçüm ve benzetim sonuçlarına yer verilmiştir.

Bölüm 7’de bir TYAR görüntüsünün elde edilebilmesinde dikkat edilecek hususlara yer verilmiştir.

2. TEMEL MATEMATİKSEL KAVRAMLAR

Bu bölümde TYAR görüntülemeye kullanılacak olan önemli matematiksel kavramlar ele alınmıştır. Bu başlık altında temel elektromanyetik kavramlar, sürekli ve ayrık Fourier dönüşümü yaklaşımları ve İzdüşüm-Dilim kuramı anlatılmıştır.

2.1. Temel Elektromanyetik Kavramlar

Elektromanyetik teoride akım ve alanların birbiriyle olan bağıntıları en genel halde Maxwell denklemleri ile ifade edilir [11]. Maxwell denklemlerindeki alan ifadeleri zamana göre harmonik ise fazör gösterimle tanımlanabilir. Herhangi bir zamana bağımlı harmonik alanı $U(\mathbf{r}, t)$ olarak ifade edelim. Burada harmonik zaman değişimleri $e^{j\omega t}$ ile gösterilsin. Bu kapsamda $U(\mathbf{r}, t)$ nin fazör gösterimi şu şekildedir.

$$U(\mathbf{r}, t) = \text{Re} \left\{ U(\mathbf{r}) e^{j\omega t} \right\} \quad (2.1)$$

Burada t zamanı, $U(\mathbf{r})$ eşitlik (2.1)'deki harmonik alanın karmaşık fazör değerini, ω açısal frekansını ifade eder. Bu ifade doğrultusunda Maxwell denklemlerinin basit ortamda fazör olarak gösterimi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) + j\omega\mu \mathbf{H}(\mathbf{r}) = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) - j\omega\varepsilon \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{J}(\mathbf{r}) \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mu \mathbf{H}(\mathbf{r}) = 0 \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \varepsilon \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \rho(\mathbf{r}) \quad (2.5)$$

Maxwell denklemlerindeki zaman türevi fazör gösterimde $j\omega$ faktörü ile yer değiştirmiştir. Yukarıdaki denklemlerde $e^{j\omega t}$ zaman faktörü bastırılmıştır ve alanlar karmaşık vektörel fonksiyonlardır. Burada, $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ (V/m) elektrik alan

şiddetini, $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ (A/m) manyetik alan şiddetini, $\mathbf{J}(\mathbf{r})$ (A/m²) akım yoğunluğunu, μ (H/m) manyetik geçirgenliği, ε (F/m) dielektrik sabitini, $\rho(\mathbf{r})$ (C/m³) elektrik yük yoğunluğunu, \mathbf{r} (m) konum vektörünü ifade eder.

Herhangi bir $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ manyetik vektör potansiyeli, $\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r}) = 0$ özdeşliğinden, Maxwell denklemleri aracılığıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

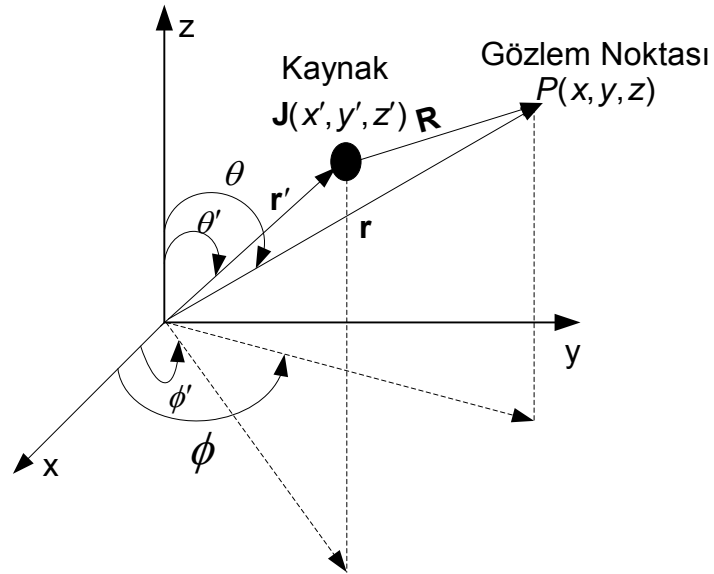
$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r}) \quad (2.6)$$

Eşitlik (2.6)'te $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ manyetik vektör potansiyelinin sağladığı Helmholtz denklemi şu şekildedir.

$$\nabla^2 \mathbf{A}(\mathbf{r}) + k^2 \mathbf{A}(\mathbf{r}) = -\mu \mathbf{J}(\mathbf{r}) \quad (2.7)$$

Burada k dalga sayısını ifade eder. Eşitlik (2.7)'nin çözümü $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ manyetik vektör potansiyelinin akıma bağlı ifadesini verir. Bir koordinat sisteminde kaynakların konumu \mathbf{r}' ve bu kaynakların gözleendiği P noktası ile orijin arasındaki mesafe \mathbf{r} vektörüyle gösterilsin (Şekil 2.1). Bu kapsamda \mathbf{r}' konumundaki akım kaynağının orijinden \mathbf{r} mesafe uzaklıkta gözlem noktasında oluşturduğu $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ potansiyeli şu şekilde ifade edilir. Burada \mathbf{R} kaynak ile gözlemci arasındaki mesafedir ve $\mathbf{R} = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ ile ifade edilir.

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') \frac{e^{-jk\mathbf{R}}}{\mathbf{R}} d\mathbf{r}' \quad (2.8)$$



Şekil 2.1. Kaynak ve gözlemci konumlarını gösteren koordinat sistemi.

Manyetik vektör potansiyeli $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ aracılığıyla bir $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ elektrik alan şiddeti şu şekilde ifade edilir [12].

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -j\omega\mathbf{A}(\mathbf{r}) + \frac{1}{j\omega\epsilon\mu}\nabla(\nabla\cdot\mathbf{A}(\mathbf{r})) \quad (2.9)$$

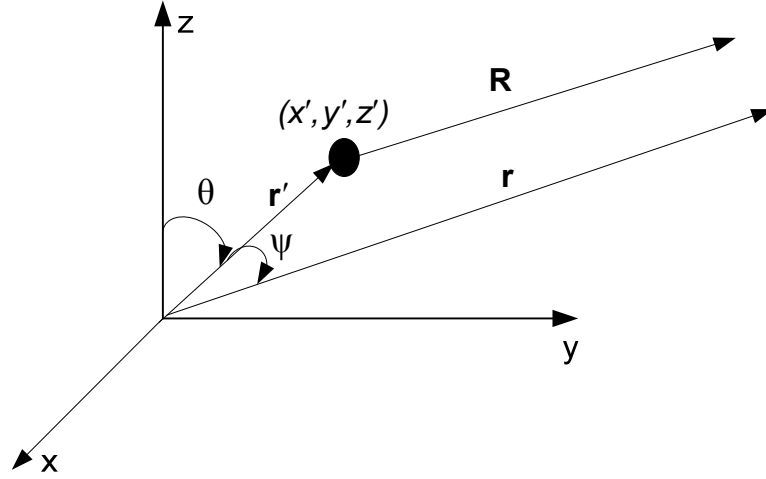
2.1.1. Uzak Alan Yaklaşımları

Bir koordinat sisteminde kaynakların koordinat merkezinin yakınında olduğunu varsayalım ve bu kaynakların konumunu \mathbf{r}' ile ifade edelim. Gözlem noktası olan \mathbf{r} , kaynaktan uzaklaştıkça \mathbf{r} ve \mathbf{R} vektörleri birbirine paralel olmaya başlar (Şekil 2.2). Bu durumda \mathbf{R} uzunluğu için genlik ve faz olarak ifade edilen yaklaşıklıklara uzak alan yaklaşımı denir.

$$\begin{aligned} |\mathbf{R}| &\cong |\mathbf{r}| = r && \text{(Yaklaşık Genlik Değeri)} \\ |\mathbf{R}| &\cong |\mathbf{r}| - \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}' = r - \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}' && \text{(Yaklaşık Faz Değeri)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Eşitlik (2.8) ile eşitlik (2.10) birleştirildiğinde $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ manyetik vektör potansiyeli şu şekilde ifade edilir. Burada $\hat{\mathbf{r}}$ konumsal birim vektörünü ifade eder.

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') e^{jk\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}'} d\mathbf{r}' \quad (2.11)$$



Şekil 2.2. Uzak alan yaklaşımının gösterimi.

2.1.2. Uzak Alanda Dalga Yayılımı

Noktasal bir kaynaktan yayılan dalgalar küresel dalgaları meydana getirir. Küresel koordinatlarda (2.7)'deki vektörel dalga denkleminin genel çözümünde $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ manyetik vektör potansiyeli r, θ, ϕ bileşenlerine sahiptir.

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \hat{\mathbf{r}}A_r(r, \theta, \phi) + \hat{\boldsymbol{\theta}}A_\theta(r, \theta, \phi) + \hat{\boldsymbol{\phi}}A_\phi(r, \theta, \phi) \quad (2.12)$$

Eşitlik (2.12)'de her bir bileşendeki r 'nin genlik değişimi $1/r^n$, $n = 1, 2, \dots$ 'dir. Burada $1/r^n$ 'nin yüksek terimlerinin ihmal edilmesiyle ($n \geq 2$ için) eşitlik (2.12) şu hale indirgenir.

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) \cong \frac{e^{-jkr}}{r} \left[\hat{\mathbf{r}} A'_r(\theta, \phi) + \hat{\boldsymbol{\theta}} A'_\theta(\theta, \phi) + \hat{\boldsymbol{\phi}} A'_\phi(\theta, \phi) \right], \quad r \rightarrow \infty \quad (2.13)$$

Burada, $A'_\xi(\theta, \phi) = re^{jkr} A_\xi(r, \theta, \phi)$, ($\xi \in \{r, \theta, \phi\}$) olarak tanımlanmıştır. Eşitlik (2.13) ile eşitlik (2.9)'u birleştirirsek $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ elektrik alan ifadesi şu şekilde ifade edilir.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{r} \left\{ -j\omega e^{-jkr} \left[\hat{\boldsymbol{\theta}} A'_\theta(\theta, \phi) + \hat{\boldsymbol{\phi}} A'_\phi(\theta, \phi) \right] \right\} + \frac{1}{r^2} \{ \dots \} + \dots \quad (2.14)$$

Yayılan bir $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ alanları için $1/r^n$ terimlerinin $n \geq 2$ için ihmal edilmesiyle $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ yalnız θ ve ϕ bileşenlerine sahiptir. Bunun geçerli olduğu bölge, “uzak alan bölgesi” olarak adlandırılır ve bu bölgede elektrik alan bileşenleri şu şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned} E_r &\cong 0 \\ E_\theta &\cong -j\omega A_\theta \\ E_\phi &\cong -j\omega A_\phi \end{aligned} \quad (2.15)$$

Eşitlik (2.15) doğrultusunda uzak alanda elektrik alan ifadesi şu şekilde ifade edilir.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \cong j\omega \hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{A}(\mathbf{r}) \quad (2.16)$$

2.2. Fourier Dönüşümü

Fourier dönüşümü sinyal işlemede en sık kullanılan tekniklerden biridir. Genel olarak Fourier dönüşümü zaman uzayında bulunan bir işaretin frekans uzayındaki cevabını ifade eden matematiksel dönüşümdür [13]. Fourier dönüşümü, sürekli ve ayrık zamanlı olarak ikiye ayrılır.

2.2.1. Sürekli Fourier Dönüşümü

Bu tezde Fourier dönüşümü, konum uzayı (u düzlemi) ile spektral uzay (k_u düzlemi) arasındaki ilişkiyi göstermek için kullanılmıştır. Bir $f(u)$ işaretinin sürekli Fourier dönüşümü ile elde edilen $F(k_u)$ işareti aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$F(k_u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) e^{-jk_u u} du \quad (2.17)$$

Bu işaretin ters Fourier dönüşümü ise şu şekildedir.

$$f(u) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(k_u) e^{jk_u u} dk_u \quad (2.18)$$

Eşitlik (2.17)'de u uzayındaki $f(u)$ fonksiyonu Fourier dönüşümü ile k_u uzayında tanımlanmıştır. Bu denklemin k_u uzayında çözümü bulunduktan sonra ters dönüşüm ile u uzayındaki karşılığı tekrar elde edilebilir.

2.2.2. Periyodik İşaretlerin Ayırık Fourier Dönüşümü

Ayrık Fourier dönüşümü, sürekli Fourier dönüşümünün ayrıklaştırılmış formda yaklaşımıdır. Bir $f(u)$ işaretimizin sonlu sayıda N örnekten oluştuğunu düşünelim ve her bir örnek aralığı Δu olsun. Bu kapsamda $f(u)$ işaretinin ayırık Fourier dönüşümü şu şekilde ifade edilir [14].

$$F(k_u) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta u) e^{-jk_u n\Delta u} \Delta u \quad (2.19)$$

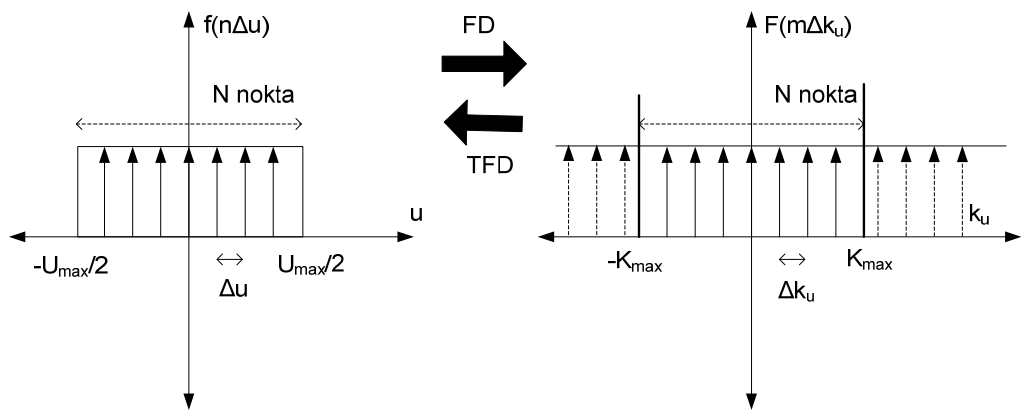
Burada k_u hala sürekli bir değişkendir. Bu k_u değişkenini $k_{u,m} = 2\pi m / ((N-1)\Delta u)$ eşitliğiyle örnekleyelim. Burada $m = 0, 1, \dots, N-1$ dir ve her bir örnek $2\pi / \Delta u$ katsayısı ile çarpılmıştır. Böylece k_u uzayı $-K_{\max}, K_{\max}$ aralığında örneklenmiş olur. Bu şartlar altında ayırık Fourier dönüşümü şu şekilde ifade edilir.

$$F(k_{u,m}) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta u) e^{-j2\pi m \frac{n}{N}} \quad (2.20)$$

Benzer şekilde ayırık ters Fourier dönüşümü şu şekildedir.

$$f(n\Delta u) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} F(k_{u,m}) e^{j2\pi m \frac{n}{N}} \quad (2.21)$$

N noktadan oluşmuş bir $f(u)$ işaretinin Δu örnekleme aralığı için bant genişliği $U_{\max} = (N-1)\Delta u$ dur. Bu işaretin Fourier dönüşümünün alınmasıyla yukarıdaki anlatım doğrultusunda spektral uzayda Δk_u adım aralıklı N noktalı $F(k_u)$ işaretini elde ederiz. Bu işaret sonsuz uzayda kendisinden ve örneklerinden oluşmuştur. Bu $F(k_u)$ işaretinin bant genişliği $[-K_{\max}, K_{\max}]$ aralığındadır. Burada $2K_{\max} = (N-1)\Delta k_u$ 'dur. Bu durum grafiksel olarak Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Ayrılaştırılmış Fourier dönüşümü

Bu iki uzay arasındaki örnekleme aralığı ve bant genişliği arasındaki bağıntı örnekleme kuramı doğrultusunda şu şekilde ifade edilir [13].

$$\Delta k_u = \frac{2K_{\max}}{N-1} = \frac{2\pi}{U_{\max}} \quad (2.22)$$

$$U_{\max} = (N-1)\Delta u = \frac{2\pi}{\Delta k_u} \quad (2.23)$$

2.3. Tomografik Görüntüleme Tekniği

Bilgisayar Yardımlı Tomografi (BYT) üç boyutlu (3B) bir nesnenin farklı bakış açılarından alınmış bir boyutlu (1B) birçok izdüşüm fonksiyonunun işlenmesiyle 2B kesitsel görüntülenmesini sağlayan bir tekniktir [15]. Bu izdüşüm çizgileri dar huzmeli X ışınları tarafından sağlanır. Bu X ışınlarının

cisim üzerinden gelen şiddeti, bir algılayıcı dizisi tarafından kaydedilir. Bu işaretlerin İzdüşüm-Dilim kuramı kullanılarak işlenmesiyle cismin 2B tomografik görüntüsü elde edilir.

2.3.1. İzdüşüm – Dilim Kuramı

Bilgisayar yardımlı tomografinin temeli İzdüşüm-Dilim kuramına dayanır. İzdüşüm, M boyutlu bir fonksiyonun belirlenen bir yönde integrasyon fonksiyonu ile tanımlanan (M-1) boyutlu fonksiyondaki görüntüsüdür [16]. Bir 2B $f(x,y)$ 'nin x doğrultusundaki izdüşümü aşağıdaki gibi elde edilir.

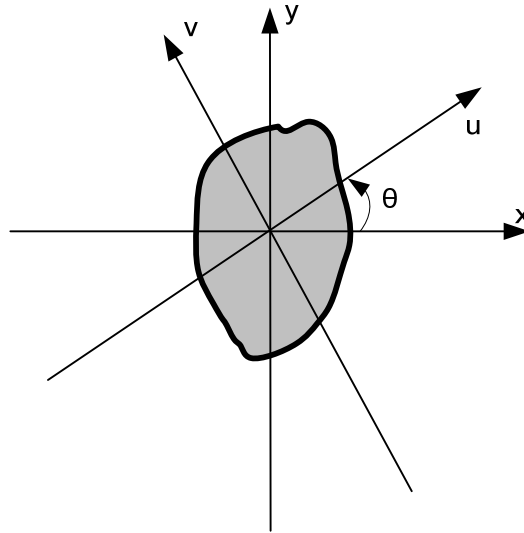
$$p_y(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)dy \quad (2.24)$$

Bu x-y koordinat sisteminin saat yönünün tersinde θ açısı kadar döndürülmesiyle yeni oluşan koordinat sistemini u-v olarak ifade edelim. Bu $f(x,y)$ fonksiyonunun yeni düzlemdeki ifadesini $f_\theta(u,v)$ olarak tanımlayalım (Şekil 2.4). Bu u-v koordinat sistemi ile x-y koordinat sistemi arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

veya tersi olarak şu şekilde ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (2.26)$$



Şekil 2.4. Bakış açısına göre değişen koordinat sistemi.

Bu kapsamda $f(x,y)$ ve $f_{\theta}(u,v)$ fonksiyonunun 2B Fourier dönüşümü, sırasıyla, şu şekilde ifade edilir.

$$F(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) e^{-jk_x x} e^{-jk_y y} dx dy \quad (2.27)$$

$$F_{\theta}(k_u, k_v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\theta}(u,v) e^{-jk_u u} e^{-jk_v v} du dv \quad (2.28)$$

Eşitlik (2.27)'deki üslü ifadelerdeki değişkenler için eşitlik (2.26)'deki dönüşümü kullanırsak $F(k_x, k_y)$ $u-v$ koordinat sisteminde şu şekilde ifade edilir.

$$F(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\theta}(u,v) e^{-jk_x(u \cos \theta - v \sin \theta)} e^{-jk_y(u \sin \theta + v \cos \theta)} du dv \quad (2.29)$$

Eşitlik (2.29)'i tekrar düzenlersek aşağıdaki ifade elde edilir.

$$F(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\theta}(u,v) e^{-j(k_x \cos \theta + k_y \sin \theta)u} e^{-j(-k_x \sin \theta + k_y \cos \theta)v} du dv \quad (2.30)$$

Eşitlik (2.30) ile k_x-k_y ile k_u-k_v düzlemleri arasındaki bağıntı elde edilir. Bu düzlemler spektral uzayın koordinat sistemini ifade eder.

$$\begin{aligned} k_u &= k_x \cos \theta + k_y \sin \theta \\ k_v &= -k_x \sin \theta + k_y \cos \theta \end{aligned} \quad (2.31)$$

Eşitlik (2.24) doğrultusunda $u-v$ koordinat sistemindeki $f_\theta(u,v)$ fonksiyonunun u eksenini üzerindeki izdüşümü aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$p_\theta(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f_\theta(u,v) dv \quad (2.32)$$

Eşitlik (2.32)'un 1B Fourier dönüşümünü k spektral uzayında alırsak şu ifade elde edilir.

$$P_\theta(k) = \int_{-\infty}^{\infty} p_\theta(u) e^{-jku} du \quad (2.33)$$

Eşitlik (2.32) ile eşitlik (2.33)'ü birleştirirsek İzdüşüm-Dilim kuramı görüntülenmiş olur.

$$P_\theta(k) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_\theta(u,v) e^{-j(ku+0v)} dudv \quad (2.34)$$

Eşitlik (2.34)'i eşitlik (2.28) ile karşılaştırdığımızda $P_\theta(k)$ ile $F_\theta(k_u, k_v)$ arasındaki bağıntı şu şekildedir.

$$P_\theta(k) = F_\theta(k_u, 0) = F(k \cos \theta, k \sin \theta) \quad (2.35)$$

Bu sonuç, bilinen İzdüşüm-Dilim kuramıdır. Bir izdüşüm fonksiyonun Fourier dönüşümü, görüntünün iki boyutlu Fourier dönüşümünün merkezi enine kesitini ifade eder. X ışınları ile çalışan tomografik görüntüleme sistemlerinin temeli bu teoriye dayanır. Bu teori mikrodalga frekanslarda kullanıldığında hedefin farklı bakış açılarından toplanan elektrik alan verileri ile hedefin TYAR görüntüsü sağlanabilir.

3. TERS YAPAY AÇIKLIKLI RADAR GÖRÜNTÜLEME

Bu bölümde yukarıda ifade edilen kuramlar kullanılarak vektörel bir alan ifadesinden tomografi tekniği ile akım dağılımları belirlenerek TYAR görüntüsünün elde edilmesi anlatılmıştır.

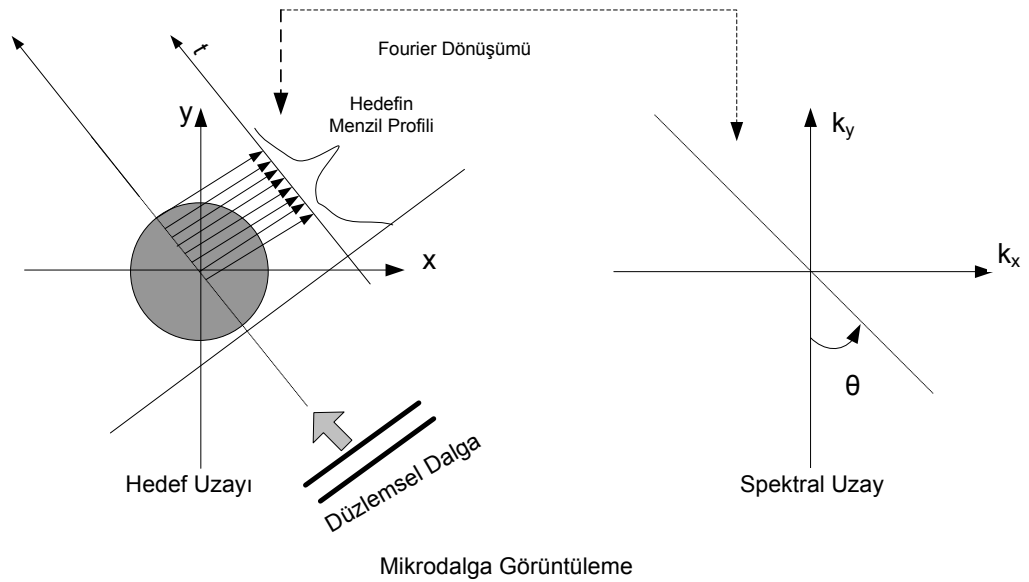
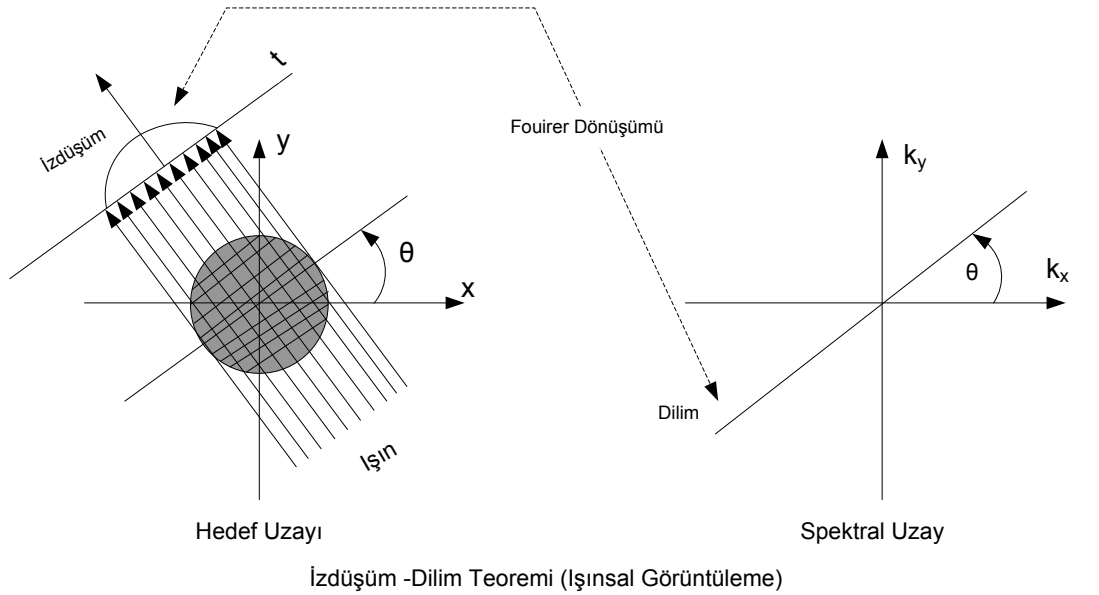
Mensa, İzdüşüm–Dilim kuramını kullanarak 2B TYAR görüntüleme tekniğini geliştirmiştir [4]. Bu teknik tomografik görüntülemenin mikrodalga teoriye uygulanması olarak sınıflandırılabilir. Bu bölümde, yukarıda ifade edilen temel matematiksel kavramlar kullanılarak akım-alan dağılımları arasındaki ilişki, BYT'nin temelini oluşturan İzdüşüm–Dilim kuramına benzetilerek TYAR görüntülemenin matematiksel ifadesi elektromanyetik kavramlarla ifade edilmiştir. Burada alıcı ve verici antenlerin eşpolarizeli olduğu durumda, akım-alan dağılımları arasındaki vektörel bağıntı skaler hale indirgenmiştir [17]. Fourier dönüşümü tekniği ile akım-alan dağılımları arasında geçiş yapılarak TYAR görüntüsü elde edilmiştir.

Bir TYAR görüntüsünün Fourier dönüşümü tekniği ile elde edilebilmesi için spektral uzaydaki ölçüm verilerinin kartezyen koordinatlarda konumlandırılması gerekir. Hedefin kendi ekseninde hareketiyle farklı açılarda toplanan ölçüm verileri polar koordinatlarda yer almaktadır. Bu veriler aradeğerleme tekniği ile kartezyen koordinatlara getirilerek Fourier dönüşümü almaya uygun hale gelir. Burada aradeğerlemeden doğan hatalar tüm TYAR görüntüsünün çözünürlüğüne etki edecektir. Bu hataların en aza indirgenmesi açısal tarama ve frekans örnekleme adımlarının küçük, olmasına bağlıdır. Fakat tarama açısının küçük ve ölçüm bandının geniş olması ölçüm süresinin uzamasına neden olacaktır.

3.1. TYAR ile BYT Arasındaki Farklılıklar

Tomografik görüntülemede BYT ile TYAR yapısı kesitsel görüntüleme açısından benzer niteliklere sahip olmasına rağmen bir takım temel farklılıklar

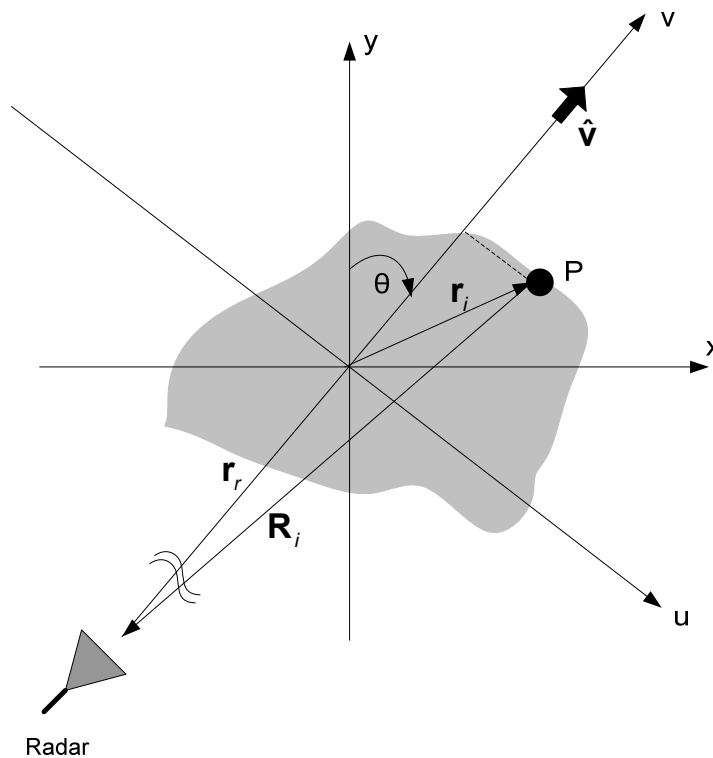
içermektedir. BYT'de X ışınları kullanılırken TYAR görüntülemede mikrodalga frekansları kullanılmaktadır. BYT'den farklı olarak bir TYAR yapısı faz uyumlu (İngilizce: *phase-coherent*) bir sistem gerektirir ve bu sistem ile toplanan işaretler karmaşık yapıda olmalıdır. Bir TYAR sistemi izdüşüm işaretlerinin kendisi yerine izdüşüm işaretlerinin spektral uzaydaki Fourier dönüşüm işaretlerini ölçer (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Mikrodalga görüntüleme ile İzdüşüm – Dilim kuramı arasındaki farklılıklar.

3.2. YAR ve TYAR Kavramı

Konum uzayında x-y koordinat sisteminde bulunan bir hedefin kendi ekseninde saat yönünde θ açısı kadar dönmesiyle oluşan yeni koordinat sistemini u-v koordinat sistemi olarak tanımlayalım (Şekil 3.2). Bu açı hedefin koordinat sistemi ile radarın yayılım doğrultusu arasındaki açısal farkı ifade eder. Burada y menzil eksenini x ise çapraz menzil eksenini oluşturur. Hedef ilk olarak y ekseninden aydınlatılmaya başlanmıştır. Radarın, saat yönünde θ kadar döndürülmesiyle oluşan yeni aydınlatma eksenine v eksenini denilmiştir. Şekil 3.2'deki sistemle elde edilecek ölçüm sonuçlarına, radarı sabit tutup hedefin saatin tersi yönünde θ kadar döndürülmesi ile de ulaşılabilir. Sonuçta elde edilen ölçüm verileri aynı olmakla beraber, ilk yaklaşıma "spotlight" YAR, ikinci yaklaşıma TYAR denilmiştir.



Şekil 3.2. 2B YAR görüntüleme düzlemi.

3.3. Vektörel Akım - Alan Dağılımları

Akım – Alan dağılımlarını matematiksel olarak ifade ederken hedef bölgesinde bulunan saçılma merkezlerinin sonlu sayıda noktasal kaynaktan oluştuğunu ve hedef bölgesinin uzak alan yaklaşımlarını sağlayacak şekilde yeterince uzun bir mesafeden aydınlatıldığını varsayalım. Aydınlatma yönünün normalindeki çapraz menzil çizgilerinin düz olması için görüntüleme işlemi boyunca gözlem mesafesi hedefin büyüklüğünden yeterince büyük tutulmuş olduğu varsayılacaktır [1]. Bu koşullar altında, $\mathbf{E}^{inc}(\mathbf{r})$, hedef üzerine gelen düzlemsel dalgayı şu şekilde ifade edelim.

$$\mathbf{E}^{inc}(\mathbf{r}) = \hat{\mathbf{p}} e^{-j\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \quad (3.1)$$

Burada $\hat{\mathbf{p}}$ birim polarizasyon vektörünü, $\mathbf{k} = k\hat{\mathbf{v}}$ eşitliğinde k dalga sayısını $\hat{\mathbf{v}}$ dalga yayılım doğrultusunun birim vektörünü ifade eder (Şekil 3.2).

Hedef üzerindeki saçılma merkezlerinin saçılma katsayıları genellikle karmaşık yapıdadır ve bu katsayılar ölçüm frekansından bağımsızdır. Hedef üzerine gelen dalga, sonlu sayıda akım indükler ve bu akımların her bir i saçıcısı için a_i karmaşık katsayısı, \mathbf{r}_i konumundaki gelen dalganın elektrik akı yoğunluğu ile orantılıdır. Hedef üzerinde sonlu sayıdaki eşdeğer akım dağılımlarını şu şekilde ifade edelim.

$$\mathbf{J}_i(\mathbf{r}') = a_i \varepsilon_0 \mathbf{E}^{inc}(\mathbf{r}_i) = a_i \varepsilon_0 \mathbf{E}^{inc}(\mathbf{r}') \delta(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_i) \quad (3.2)$$

Eşitlik (3.2)'de ε_0 boş uzayın dielektrik sabitini gösterir. Akım dağılımları TYAR görüntüsünde genlik olarak gösterilmesine rağmen bu dağılımlarının yerleri a_i sabitindeki faz bilgisinden bulunur. Faz bilgisi malzemenin elektriksel özelliğine ve hedeften dönen sinyalin gecikme süresine bağlıdır. Eşitlik (3.1) ve (3.2)'yi birleştirecek olursak hedef üzerine düşen alanın oluşturduğu akım dağılımı şu şekilde ifade edilir.

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}') = \hat{\mathbf{p}} \varepsilon_0 \sum_{i=1}^M a_i \delta(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_i) e^{-jk \cdot \mathbf{r}'} \quad (3.3)$$

Bu ifadede M saçılma noktalarının sayısıdır. Hedef üzerinde indüklenmiş akımlar tekrardan elektrik alan oluşturarak $\mathbf{E}^S(\mathbf{r})$ saçılan alanları meydana getirirler. Dolayısıyla alıcıda gözlemlenen manyetik vektör potansiyeli $\mathbf{A}(\mathbf{r}_r)$ şu şekilde ifade edilir.

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}_r) = \frac{\mu}{4\pi} \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') \frac{e^{-jk|\mathbf{R}|}}{|\mathbf{R}|} d\mathbf{r}' \quad (3.4)$$

Burada $|\mathbf{R}| = |\mathbf{r}_r - \mathbf{r}'|$ dir. Uzak alanda faz ve genlik değerleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$|\mathbf{R}| \cong |\mathbf{r}_r| + \mathbf{r}' \cdot \hat{\mathbf{v}} \quad (3.5)$$

$$|\mathbf{R}| \cong |\mathbf{r}_r| = r_r \quad (3.6)$$

Eşitlik (3.5) uzak alanda faz değerini, (3.6) ise genlik değerini ifade eder. Uzak alan yaklaşımları kullanılarak eşitlik (3.3) ve (3.4) birleştirildiğinde saçılan elektrik alan şu şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^S(\mathbf{r}_r) &\cong j\omega \hat{\mathbf{r}}_r \times \hat{\mathbf{r}}_r \times \mathbf{A}(\mathbf{r}_r) \\ &= \hat{\mathbf{r}}_r \times \hat{\mathbf{r}}_r \times \hat{\mathbf{p}} j\omega \frac{\mu \varepsilon_0}{4\pi} \frac{e^{-jkr_r}}{r_r} \sum_{i=1}^M a_i e^{-2jk \hat{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{r}_i} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Eşitlik (3.5) TYAR görüntüleme için önemli bir adımdır. Bu eşitlik sayesinde, (3.7)'de saçılma merkezlerinin menzil koordinatında izdüşümü toplam işareti içindeki terimlerde görülmektedir. Bu çalışma kapsamında hedefe gönderilen ve hedeften dönen alanların polarizasyonun aynı olduğunu varsayalım.

$$\begin{aligned}
E_s &= \hat{\mathbf{p}} \cdot \mathbf{E}^s(\mathbf{r}_r) \\
&\cong \underbrace{\hat{\mathbf{p}} \cdot \hat{\mathbf{r}}_r \times \hat{\mathbf{r}}_r \times \hat{\mathbf{p}}}_{-1} j\omega \frac{\mu\epsilon_0}{4\pi} \frac{e^{-jkr_r}}{r_r} \sum_{i=1}^M a_i e^{-2jk\hat{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{r}_i} \\
&= -j\omega \frac{\mu\epsilon_0}{4\pi} \frac{e^{-jkr_r}}{r_r} \sum_{i=1}^M a_i e^{-2jk\hat{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{r}_i}
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Eşitlik (3.8)'de ortamın yayılım hızı sabittir ve $k\hat{\mathbf{v}}$ v yönündeki vektörel dalga sayısını, \mathbf{r}_i orijinden P noktasına olan konum vektörünü ifade eder (Şekil 3.2). Eşitlik (3.8)'i, $\omega = kc$ ve yayılım hızı $c = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$ ifadelerini kullanarak tekrar düzenlersek aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\underbrace{\frac{4\pi r_r}{-jke^{-jkr_r}}}_{F(k,\theta)} E_s = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^M a_i e^{-2jkv_i} \tag{3.9}$$

Burada $v_i = \mathbf{r}_i \cdot \hat{\mathbf{v}}$ 'dir. Eşitlik (3.9)'un sol tarafı θ bakış açısında “menzilde düzeltilmiş elektrik alan” olarak adlandırılır ve $F(k,\theta)$ olarak gösterilir [18]. Eşitliğin sağ yanındaki $1/c$ terimi karmaşık katsayıya dahil edilebilir ya da ihmal edilebilir.

3.4.TYAR Teorisi

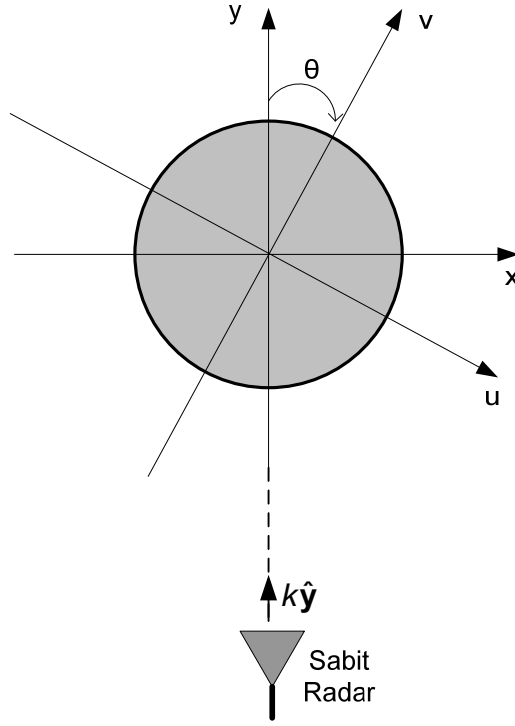
Bir önceki bölümü göz önünde tutarak x-y düzleminde bulunan 2B noktasal akım yoğunlukları fonksiyonunu şu şekilde ifade edebiliriz.

$$f(x,y) = \sum_{i=1}^M a_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \tag{3.10}$$

Burada (x,y) hedefin yerel koordinat sistemini, diğer bir deyişle hedefin faz merkezini, (x_i, y_i) i nci saçıcının bu sistemdeki konum noktasını ifade eder. Hedef düzleminin saat yönünde θ açısı kadar döndürülmesiyle elde edilen yeni koordinat sistemi (u,v) olsun (Şekil 3.3). Buna göre x-y düzleminde

bulunan bir i'nci saçıcının u - v düzlemindeki (u_i, v_i) konumu şu şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned} u_i &= x_i \cos \theta - y_i \sin \theta \\ v_i &= x_i \sin \theta + y_i \cos \theta \end{aligned} \quad (3.11)$$



Şekil 3.3. TYAR ölçüm geometrisi.

Genel olarak eşitlik (3.10) için M , a_i , x_i , y_i parametreleri hedefin radar karşısındaki konumuna bağlıdır, çünkü karmaşık geometrili bir hedefte belirli bir bakış açısında hedefin bir bölümü diğer bölümünü gölgeleyebilir. Bu gösterimde hedefler noktasal kaynak olarak kabul edilmiş ve radarın bakış açısında birbirini gölgelemeyecek şekilde seçilmiştir.

TYAR görüntülemenin amacı sınırlı bant genişliğindeki ölçüm verilerinden M , a_i , x_i , y_i bilinmeyenlerini bulmak ve $2B$ $f(x, y)$ akım dağılım fonksiyonunu görüntülemektir. Eşitlik (3.9) aracılığıyla hedeften yansıyan elektrik alan işaretleri kullanılarak hedef bölgesinin saçılma merkezleri görüntülenebilir.

Bir TYAR sisteminde radarın \hat{y} doğrultusunda yayılım yaptığını varsayalım(Şekil 3.3). Burada x - y düzleminde yer alan i 'nci bir hedefin (x_i, y_i) konumu hedefin saat yönünde θ kadar dönmesiyle oluşan u - v düzlemindeki karşılığı (u_i, v_i) olsun. Dönmenin etkisiyle menzilde düzeltilmiş elektrik alanda ifadesindeki faz değişimi şu şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 F(k, \theta) &= \sum_{i=1}^M a_i e^{-2jk \cdot \mathbf{r}_i} \\
 &= \sum_{i=1}^M a_i e^{-2jk \hat{y} \cdot (u_i \hat{x} + v_i \hat{y})} \\
 &= \sum_{i=1}^M a_i e^{-2jk v_i}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Bu kapsamda eşitlik (3.12)'nin faz terimindeki ifade, eşitlik (3.11)'deki v_i ifadesi ile birleştirilirse aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$F(k, \theta) = \sum_{i=1}^M a_i e^{-2jk(x_i \sin \theta + y_i \cos \theta)} \tag{3.13}$$

Burada eşitlik (3.9)'da verilen $1/c$ terimi a_i karmaşık değerine dahil edilmiştir. Eşitlik (3.13)'nin faz teriminde parantez içindeki ifadeyi genişletirsek $F(k, \theta)$ şu şekilde yazılır.

$$F(k, \theta) = \sum_{i=1}^M a_i e^{-2jk \sin \theta x_i} e^{-2jk \cos \theta y_i} \tag{3.14}$$

Eşitlik (3.14)'deki elektrik alan verilerinden eşitlik (3.10)'da ifade edilen $f(x, y)$ akım yoğunlukları fonksiyonunu Fourier dönüşümü ile bulmak için $k_x = 2k \sin \theta$ ve $k_y = 2k \cos \theta$ değişken dönüşümünü yaparsak elektrik alan verileri 2B (k_x - k_y) spektral uzayında konumlandırılmış olur.

$$F(k_x, k_y) = \sum_{i=1}^M a_i e^{-jk_x x_i} e^{-jk_y y_i} \quad (3.15)$$

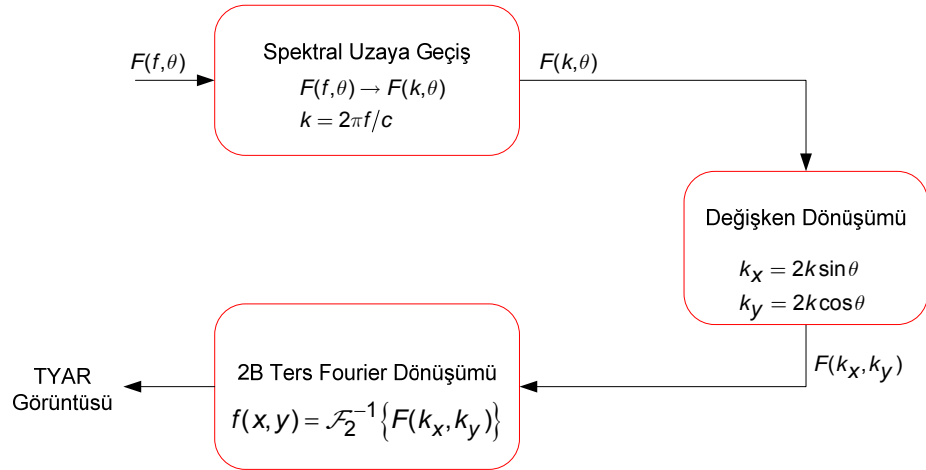
Dikkat edilirse, eşitlik (3.15)'in $f(x, y)$ fonksiyonunun 2B Fourier dönüşümü olduğu, denklem (3.10)'un

$$\begin{aligned} F(k_x, k_y) &= \mathcal{F}_2 \{f(x, y)\} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-jk_x x} e^{-jk_y y} dx dy \end{aligned} \quad (3.16)$$

eşitlikte kullanılması ile anlaşılır. Buna göre ölçülen $F(k_x, k_y)$ elektrik alan şiddeti verilerinden $f(x, y)$ akım dağılımı 2B ters Fourier dönüşümü ile bulunabilir:

$$f(x, y) = \mathcal{F}_2^{-1} \{F(k_x, k_y)\} \quad (3.17)$$

TYAR görüntülemenin teorik yapısını ifade eden grafiksel gösterim Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. TYAR teorisinin grafiksel gösterimi.

Yukarıda yapılan çıkarımları bir de İzdüşüm-Dilim kuramına göre inceleyelim. İzdüşüm-Dilim kuramına göre eşitlik (3.15), $f(x, y)$ fonksiyonun v eksenindeki izdüşümünün Fourier cevabına eşit olmalıdır. Bunun için

öncelikle, $f(x, y)$ fonksiyonun v eksenindeki izdüşümü şu şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \rho(v, \theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(u, v) du \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \sin \theta + y \cos \theta - v) dx dy \end{aligned} \quad (3.18)$$

Bu eşitliği eşitlik (3.10)'da yer alan akım yoğunluğu fonksiyonu ile birleştirirsek, $f(x, y)$ 'nin v eksenindeki izdüşümü elde edilir.

$$\begin{aligned} \rho(v, \theta) &= \sum_{i=1}^M a_i \delta(v - \underbrace{(x_i \sin \theta + y_i \cos \theta)}_{v_i}) \\ &= \sum_{i=1}^M a_i \delta(v - v_i) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Eşitlik (3.19)'de yer alan $\rho(v, \theta)$ izdüşüm fonksiyonun v 'ye göre 1B Fourier dönüşümü bu fonksiyonun spektral uzaydaki $F(k_v, \theta)$ cevabını verir.

$$\begin{aligned} F(k_v, \theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} \rho(v, \theta) e^{-jk_v v} dv \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^M a_i \delta(v - v_i) e^{-jk_v v} dv \\ &= \sum_{i=1}^M a_i e^{-jk_v v_i} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Burada ilk olarak $v = x \sin \theta + y \cos \theta$, ardından $k_x = k_v \sin \theta$ ve $k_y = k_v \cos \theta$ ifadeleri kullanıldığında

$$F(k_v, \theta) = \sum_{i=1}^M a_i e^{-jk_x x_i - jk_y y_i} \quad (3.21)$$

eşitliği elde edilir ki bu da açık bir şekilde denklem (3.15)'e eşittir.

4. TYAR GÖRÜNTÜLEMESİNDE ÖLÇÜM VERİLERİNDEN GELEN ZORLUKLAR

Önceki bölümde vektörel alanlar skaler hale indirgenerek TYAR görüntülemenin teorik altyapısı hem akım alan dağılımları ile hem de tomografik bir teknikle elde edilmiştir. Yukarıda ifade edilen TYAR görüntüleme teorisinin bu şekliyle açık sahada toplanmış ölçüm verilerine uyarlanması doğru sonuç vermeyecektir. Çünkü gerçek hayatta ölçüm verilerinde göz önünde tutulması gereken bazı kısıtlamalar vardır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir.

1. Örneklenmiş ölçüm verilerinden hedef bölgesinin TYAR görüntüsünü elde edebilmek için spektral uzaydaki ölçüm örneklerinin aralığı hedef bölgesinin genişliğine bağlı olarak örnekleme kuramınca belirlenmelidir.
2. Hedef bölgesinin dışından gelen yankıların TYAR görüntüsünde etkisini engellemek için ölçüm verilerine menzilde pencereleme işlemi (İngilizce: *range gating*) yapılmalıdır.
3. Hedefin radara göre bulunduğu koordinat merkezinin, görüntü koordinat merkezi ile uyumlu olması için ölçüm verilerine menzilde öteleme işlemi (İngilizce: *range shifting*) yapılmalıdır.
4. Ölçüm parametrelerini oluşturan bant genişliği ve açısal tarama değerleri, TYAR görüntüsünde istenilen çapraz menzil ve menzil çözünürlüğüne bağlı olarak belirlenmelidir.
5. Alıcı ve verici antenler eş polarizasyonlu olmalıdır.
6. Alıcı ve verici devreleri faz uyumlu olmalıdır.

Bu bölümde bu etkilerin nasıl gerçekleştirildiği anlatılacaktır.

4.1. Örnekleme Kuramı

Bir TYAR görüntüsünün Fourier dönüşümü tekniği ile elde edilebilmesi için spektral uzayda bulunan sonlu sayıda örneklenmiş ölçüm verilerinin kartezyen düzlemde eşit aralıklarla konumlanması gerekir. Bu verilerden hedef bölgesinin görüntüsünün Fourier dönüşümü ile doğru elde edilebilmesi için spektral uzayda konumlanan ölçüm örneklerinin aralığı örnekleme kuramına göre belirlenmelidir.

Örnekleme kuramını genel olarak şu şekilde ifade edebiliriz. Eğer bir $f(t)$ fonksiyonun Fourier dönüşümü ile elde edilen $F(\omega)$ fonksiyonu $|\omega| \geq 2\pi B$ değerleri için sıfır, diğer bir deyişle $f(t)$ 'nin bant genişliği B ise, $f(t)$ fonksiyonu, $f(t)$ 'nin $t_s < 1/(2B)$ aralıklarla örneklenmiş değerlerinden belirlenebilir [13]. Bunun neticesinde en küçük örnekleme frekansı $f_s = 2B$ olmalıdır.

Örnekleme kuramı uyarınca sonlu bir hedef bölgesinin TYAR görüntüsünü elde etmek için spektral uzaydaki örnekleme aralığını belirleyelim. Hedef uzayında $-D_{\max}/2 < r < D_{\max}/2$ aralığında bulunan bir $f(r)$ fonksiyonun Fourier dönüşümü, spektral uzayda $-\infty < k < \infty$ aralığında $F(k)$ fonksiyonunu verir (Şekil 4.1). Burada D_{\max} genişliğindeki $f(r)$ fonksiyonu $F(k)$ fonksiyonun örneklerinden elde edilebilir. Spektral uzaydaki $F(k)$ fonksiyonu $\delta(k - n\Delta k)$ dürtü katarı ile çarpılırsa bu fonksiyonun Δk aralığındaki örnekleri elde edilir. Örneklenmiş $F(k)$ fonksiyonunu şu şekilde ifade edelim.

$$\bar{F}(k) = \sum_n F(n\Delta k) \delta(k - n\Delta k) \quad (4.1)$$

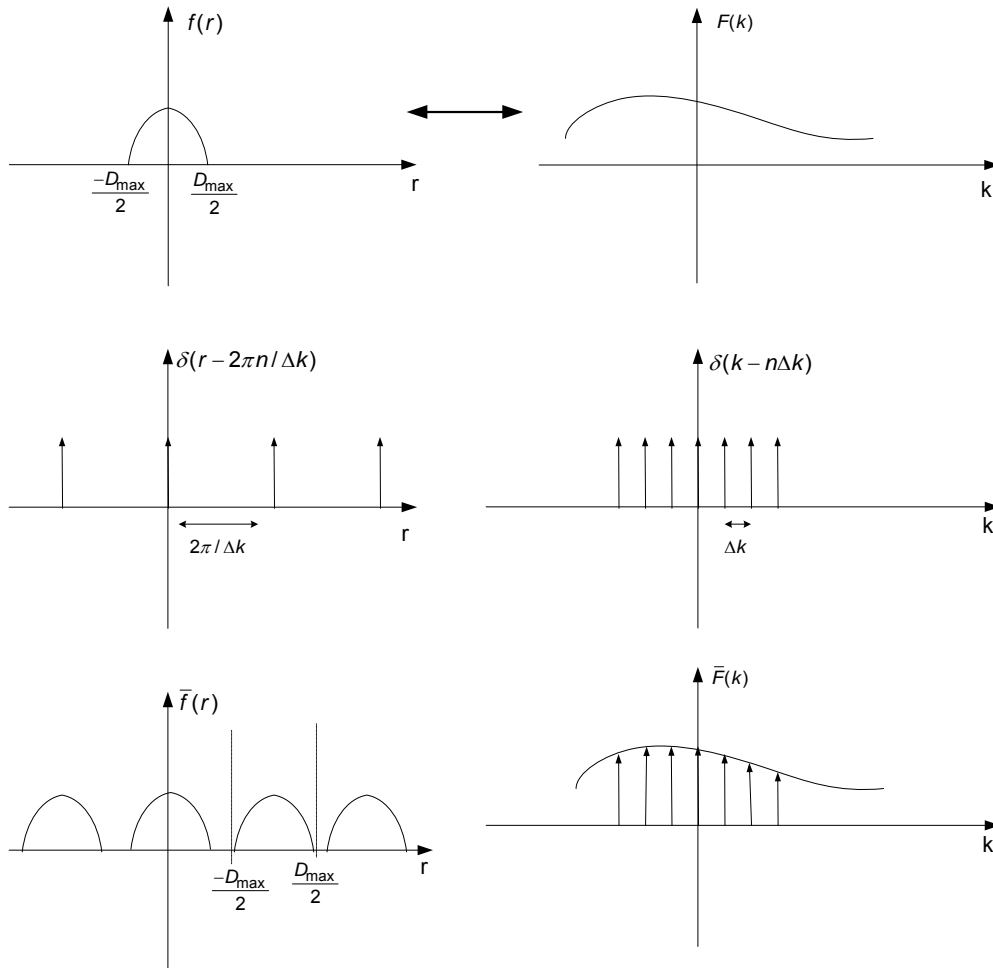
Eğer Δk aralığı yukarıda ifade edilen örnekleme kuramınca belirlenirse $F(k)$ (ve dolayısıyla $f(r)$) fonksiyonu bu örneklerden üretilebilir. Elde edilen bu yeni fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$\bar{f}(r) = \frac{1}{\Delta k} \sum_n f\left(r - n \frac{2\pi}{\Delta k}\right) \quad (4.2)$$

Burada $f(r)$ fonksiyonun örneklenmiş $\bar{F}(k)$ fonksiyonundan elde edilebilmesi için $F(k)$ fonksiyonun örnekleme aralığı şu şekilde olmalıdır.

$$\Delta k \leq \frac{2\pi}{D_{\max}} \quad (4.3)$$

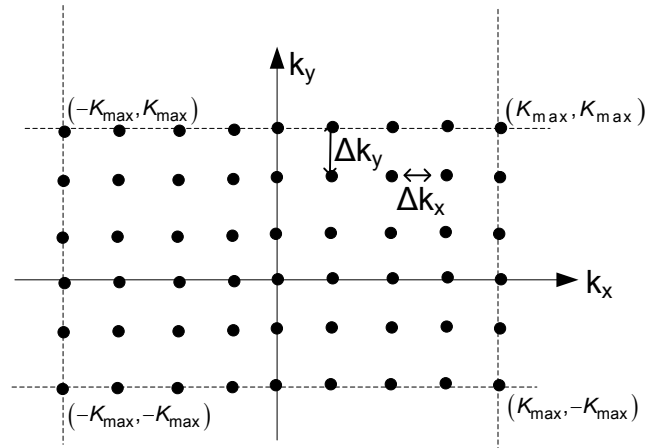
Bu eşitliğin $\Delta k = 2\pi/D_{\max}$ olduğu durum Nyquist aralığını ifade eder.



Şekil 4.1. Örnekleme kuramı.

Yukarıda ifade edilen tanım ve bulunan eşitlikler doğrultusunda x, y düzleminde, her iki ekseninde de D_{\max} genişliğindeki bölgede yer alan akım fonksiyonunun, sonlu bir frekans bandı için, spektral uzayda $-K_{\max} < k_u < K_{\max}$ aralığında kartezyen düzlemde bulunan aradeğerleme yapılmış alan fonksiyonunun eşit aralıklı örneklerinden elde edilebilmesi için (Şekil 4.2), bu örneklerin adım aralığı şu şekilde olmalıdır.

$$\Delta k_x \leq \frac{2\pi}{D_{\max}} ; \quad \Delta k_y \leq \frac{2\pi}{D_{\max}} \quad (4.4)$$



Şekil 4.2. TYAR ölçümü için spektral uzaydaki örnekleme noktaları.

Bu sonuçlar doğrultusunda eşitlik (3.16)'i $-K_{\max} < k_u < K_{\max}$ sınırlı aralığında, eşitlik (4.4)'de elde edilen değerler ile örneklersek spektral uzaydaki $F(k_x, k_y)$ elektrik alan dağılımı şu şekilde ifade edilir.

$$F(m\Delta k_x, n\Delta k_y) = \sum_{n=-K_{\max}}^{K_{\max}} \sum_{m=-K_{\max}}^{K_{\max}} \sum_{i=1}^M a_i \delta(v - x_i \sin \theta - y_i \cos \theta) \times e^{-jm\Delta k_x x_i} e^{-jn\Delta k_y y_i} \Delta x \Delta y \quad (4.5)$$

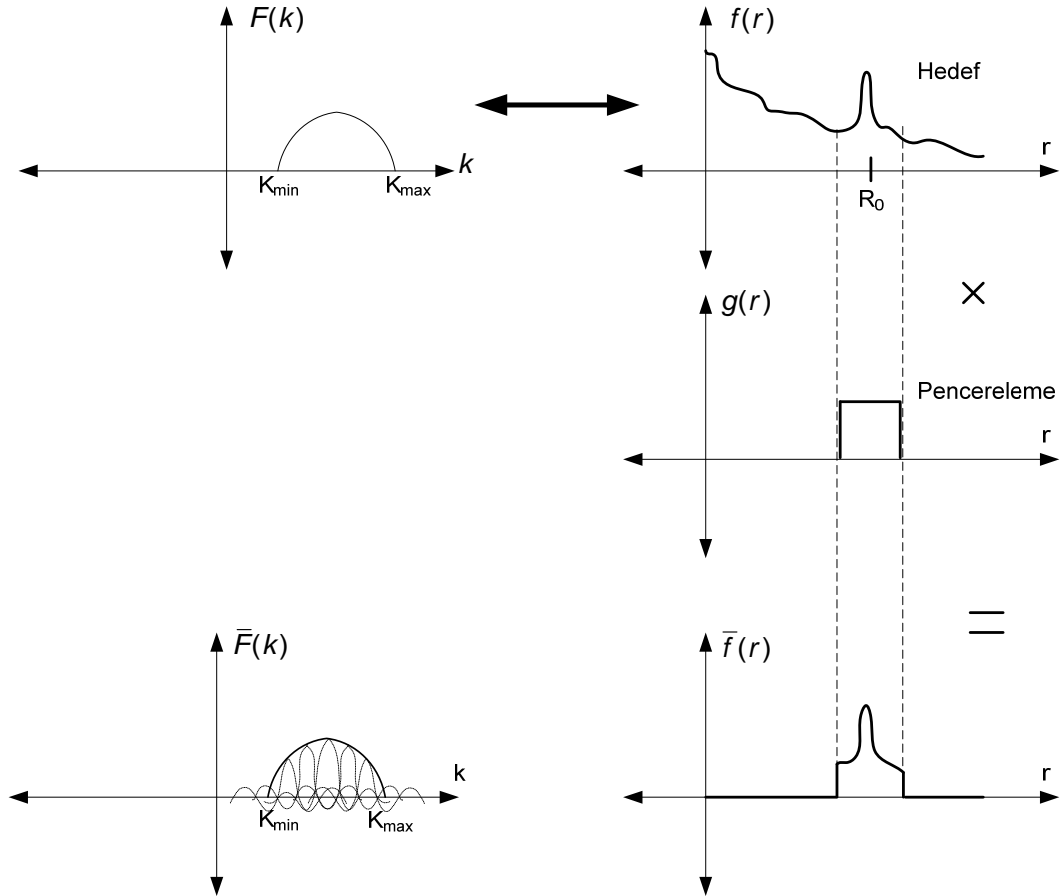
4.2. Menzilde Pencereleme

Bir TYAR görüntüsünün oluşturulması için hedefin olduğu bölgedeki saçılma merkezlerinin saçıcılık oranının diğer bölgelerdeki saçılma merkezlerinden büyük olması gerekmektedir. TYAR görüntülemesinde hedefin RKA değerinden çok hedef üzerindeki saçılma merkezlerinin birbirine oranı önemlidir. Bu sebeple açık saha TYAR ölçümünde hedeften dönen sinyallerin diğer bölgelerden gelen saçıcı girişimlerinden etkilenmemesi için hedefin olduğu bölgeye menzilde pencereleme uygulanır. Böylece yalnız hedefin bulunduğu bölgeden saçılan alanlar gözlemlenir. Bu şekilde toplanan elektrik alan verilerinde diğer bölgelerden gelen girişimler bastırılmış olur.

Belirli bir bant genişliğinde spektral uzayda yapılan ölçümün fonksiyonu $F(k)$ olsun (Şekil 4.3). Bu fonksiyonun ters Fourier dönüşümü ölçüm uzayının menzil cevabı olan $f(r)$ fonksiyonunu verir. Menzil uzayında hedef bölgesi $g(r)$ pencereleme fonksiyonu ile çarpılıp Fourier dönüşümü alındığında hedef bölgesinin menzilde pencerelenmiş frekans cevabı elde edilmiş olur.

Bir radar alıcısından R_0 mesafe ötede bulunan bir hedefin D_{\max} genişliğine sahip $g(r)$ pencereleme fonksiyonu aşağıdaki gibidir. Burada D_{\max} hedef bölgesinin azami genişliğidir.

$$g(r) = \begin{cases} 1 & ; R_0 - D_{\max}/2 < r < R_0 + D_{\max}/2 \\ 0 & ; \text{Diğer} \end{cases} \quad (4.6)$$



Şekil 4.3. Pencereleme işlemi.

Burada $f(r)$ fonksiyonun $g(r)$ pencereleme fonksiyonu ile çarpılıp Fourier dönüşümünün alınmasıyla hedef bölgesinin elektrik alanı elde edilmiş olur.

$$\begin{aligned}\bar{f}(r) &= f(r) \times g(r) \\ \bar{F}(k) &= \mathcal{F}^{-1}\{\bar{f}(r)\}\end{aligned}\quad (4.7)$$

Eşitlik (4.7)'de $\bar{f}(r)$ menzil fonksiyonun pencerelenmiş cevabını, $\bar{F}(k)$ ise hedef bölgesinin k uzayı cevabını ifade eder. Bu işlem konvolüsyon işlemi ile de yapılabilir.

$$\bar{F}(k) = F(k) * G(k) \quad (4.8)$$

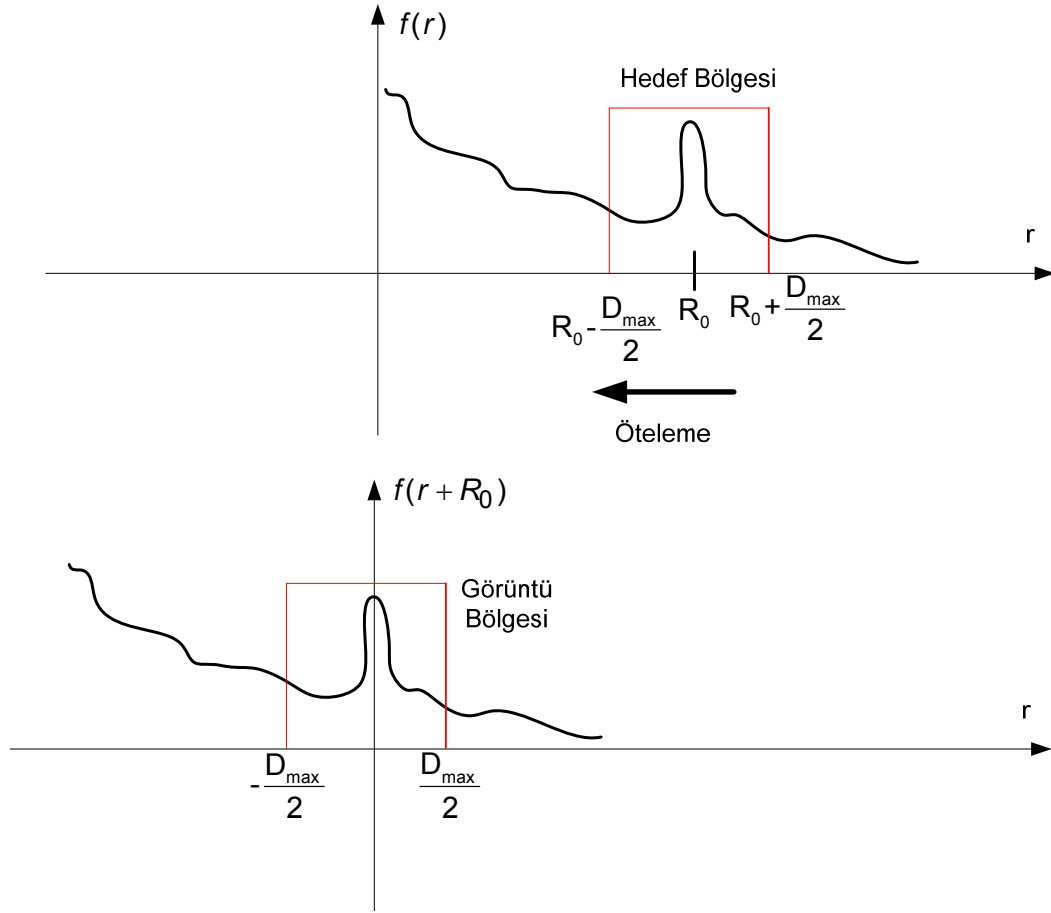
Burada $G(k)$, $g(r)$ 'nin Fourier cevabıdır.

4.3. Menzilde Öteleme

Açık sahada farklı bakış açılarında ve farklı frekanslarda toplanan TYAR ölçüm verilerine menzilde pencereleme işleminin yapılması hedef bölgesinin görüntüsünün elde edilmesi için yeterli değildir. Burada hedef bölgesinin menzildeki koordinat merkezi, TYAR görüntüsünün koordinat merkezi ile uyumlu olmalıdır. TYAR'ın görüntü merkezi, konumsal düzlemde hedef bölgesinin merkezinin orijindeki cevabıdır. Bu nedenle merkezi R_0 mesafe ötede bulunan bir hedef bölgesinin TYAR görüntüsünü elde etmek için bu merkezdeki hedef bölgesi koordinat sisteminin orijinine taşınmalıdır. Bu işleme menzilde öteleme işlemi denir (Şekil 4.4). Bu işlem yapılmadığı takdirde, eğer R_0 hedef bölgesinin genişliğinin (D_{\max} 'ın) katı değil ise, TYAR görüntüsünde saçılma merkezlerinin konumu yanlış olacaktır.

Bir x - y düzleminde, merkezi R_0 mesafede bulunan bir hedef bölgesinin spektral uzay cevabı kullanılarak koordinat sisteminin merkezine ötelenmesi şu şekilde gerçekleşir.

$$f(r + R_0) \Leftrightarrow F(k)e^{jkR_0} \quad (4.9)$$



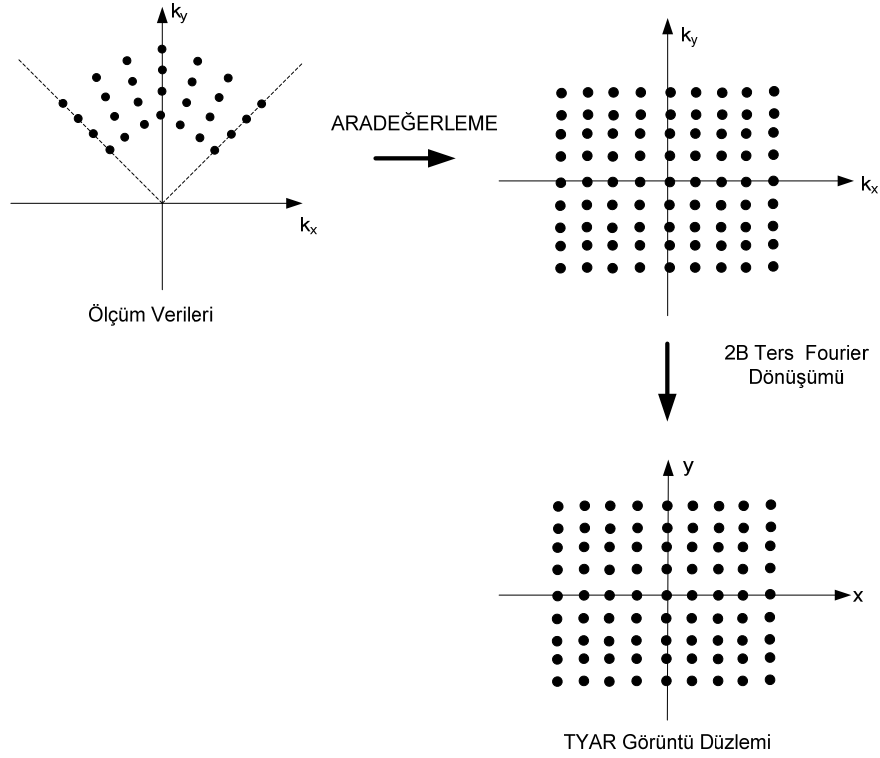
Şekil 4.4. Öteleme işlemi.

Burada $f(r)$, R_0 menzilineki akım fonksiyonunu, $F(k)$ bu menzildeki akım fonksiyonun Fourier cevabını ifade eder.

4.4. Aradeğerleme Tekniği ile TYAR Görüntüsünün Oluşturulması

Bir TYAR görüntüsünün Bölüm 3'te anlatılmış olan teorik altyapı doğrultusunda elde edilebilmesi için spektral uzayda ayırık noktalarla konumlanmış ölçüm verilerinin kartezyen düzlemde olması gerekmektedir. Hâlbuki bir TYAR sisteminde ölçüm verileri polar koordinatlarda toplanmaktadır, dolayısıyla bu verilerin spektral uzaydaki konumu 2B ayırık Fourier dönüşümü almak için gerekli olan kartezyen düzlemdeki ayırık noktalarla uyumlu değildir. Burada polar koordinatlarda toplanmış ölçüm verilerinden bir TYAR görüntüsünün oluşturulması, bu verilerin doğrusal

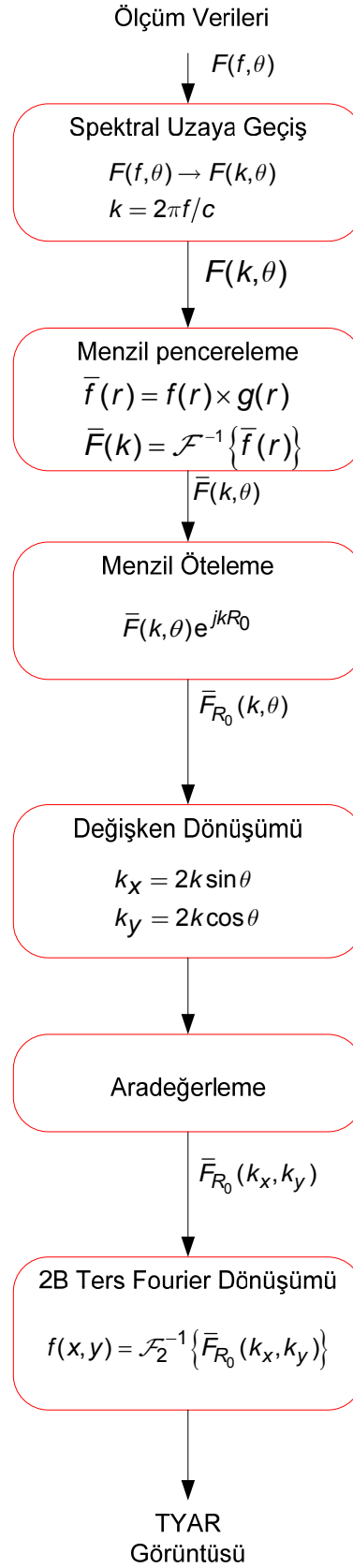
aradeğerleme tekniği ile kartezyen düzlemdeki örneklerinin üretilmesiyle mümkündür. Böylece aradeğerlemesi yapılmış ölçüm verileri 2B ayırık Fourier dönüşümünün uygulanmasına olanak sağlar. Bu verilere 2B ayırık dönüşümü uygulanmasıyla hedef yoğunluk fonksiyonunun kartezyen düzlemdeki TYAR görüntüsü elde edilir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Aradeğerleme tekniği ile TYAR görüntüsünün elde edilmesi.

4.5. Gerçek Ölçüm Verisinden TYAR Görüntüsü Elde Edilmesi

Yukarıdaki ifadeler doğrultusunda deneysel bir sistem ile elde edilecek bir TYAR görüntüsü oluşturma algoritması şu şekildedir.

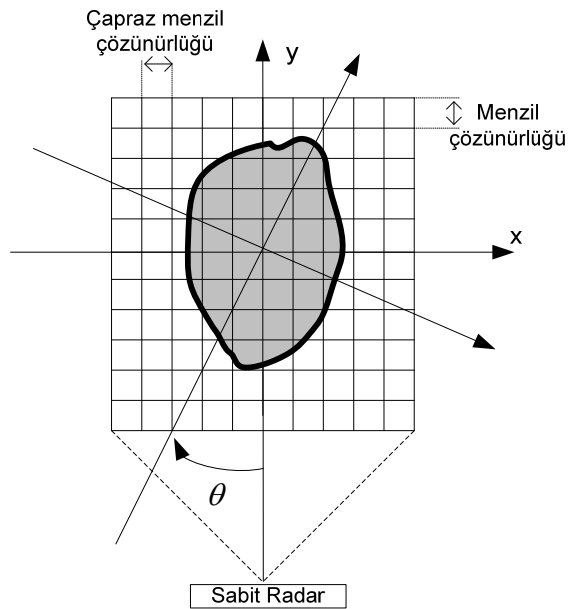


Şekil 4.6. TYAR görüntüsünün ölçümsel verilerle elde edilmiş algoritması.

5. TYAR GÖRÜNTÜLEMEDE KULLANILAN ÖLÇÜM DÜZENEGİ

Bu bölümde TYAR görüntüsü elde etmek için bir hedefin farklı bakış açısı ve frekanslarda geniş bant RKA ölçümleri ve bu ölçümlerin gerçekleştirildiği monostatik ölçüm sistemi anlatılmıştır. Bu ölçümlerde hedefin farklı doğrultularından geri dönen işaretlerin frekans uzayı cevabının genlik ve faz bilgisi kaydedilmiş, bu verilerin TYAR algoritması doğrultusunda bilgisayar ortamında işlenmesiyle hedefin TYAR görüntüsü oluşturulmuştur.

Bir TYAR görüntüsünde birbirine yakın iki hedefin menzil ve çapraz menzil eksenlerinde ayırt edilebilmesi, hedef bölgesinin yatay ve dikey eksenlerinin belirli bir çözünürlükte olmasıyla mümkündür. Burada hedef bölgesinin menzildeki çözünürlüğü ölçüm frekansının bant genişliğine, çapraz menzildeki çözünürlüğü ise hedefin dönme eksenindeki hareketiyle oluşturduğu yapay açıklığa bağlıdır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Menzil ve çapraz menzil çözünürlüğünde hedef bölgesinin grafiksel gösterimi.

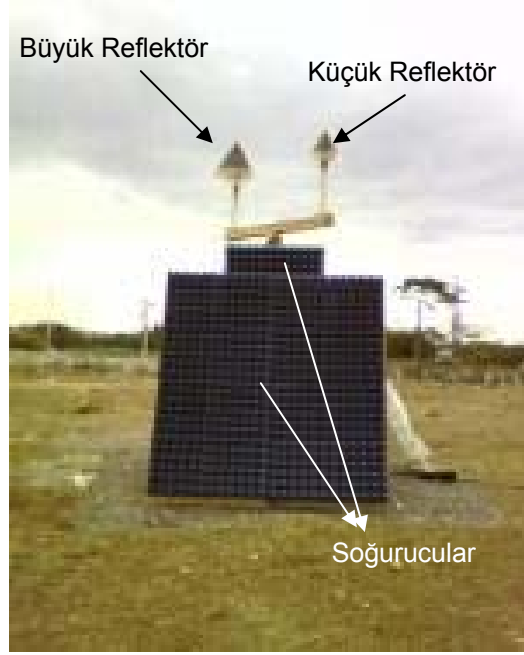
Bu kapsamda bir TYAR görüntüsünün menzil ve çapraz menzildeki çözünürlüğü aşağıdaki gibi ifade edilebilir [19].

$$\begin{aligned}\Delta r &= c/2B \\ \Delta\theta &\cong \lambda/2D_{\max}\end{aligned}\tag{5.1}$$

Burada Δr menzil çözünürlüğünü, B bant genişliğini, $\Delta\theta$ açısal çözünürlüğü, D_{\max} hedef bölgesinin azami genişliğini ifade eder.

Düşük çözünürlüklü ölçümlerde hedef üzerindeki saçılma merkezleri hakkında bilgi edinmek zordur, fakat yüksek çözünürlüklü ölçümlerde hedef bölgesi daha küçük hücrelere ayrıklaştığından hedef görüntüsü hakkında daha fazla detay elde edilir. Böylece hedef üzerindeki saçılma merkezlerinin konumu hakkında daha detaylı bir bilgi edinilmiş olur.

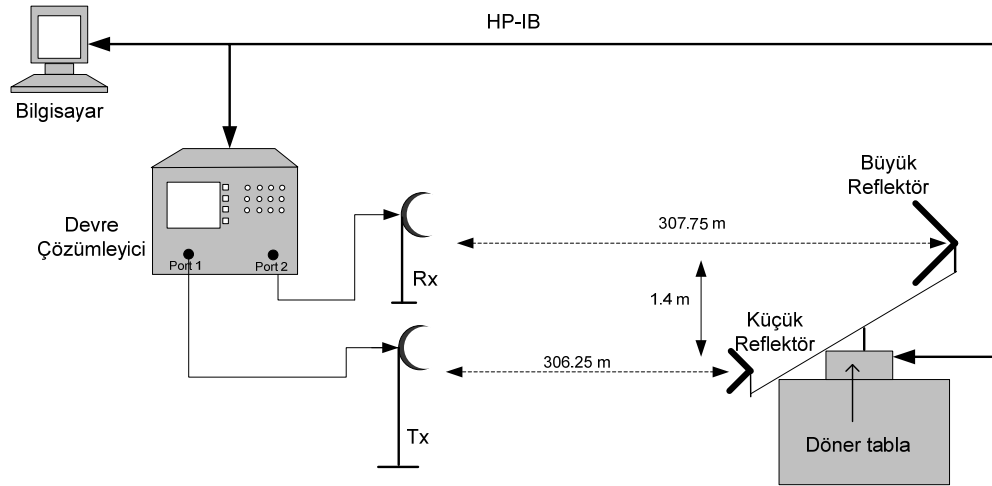
Bu tez kapsamında ölçüm verileri ile bir TYAR görüntüsünün elde edilebilmesi için ölçümlerde kullanılacak gerekli parametreler benzetim ortamında belirlenmiş ve bu parametreler doğrultusunda GYTE ASEMLAB'da farklı bakış açısı ve belirli bir bant genişliğine sahip farklı merkez frekanslarda RKA ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde saçıcılığı farklı iki reflektör kullanılmıştır. Bu reflektörler menzil ve çapraz menzil ekseninde farklı konumlara gelecek şekilde döner tabla üzerine yerleştirilerek belirli bir açı ve belirli bir frekans bandında faz uyumlu bir sistem ile RKA ölçümleri yapılmıştır. Her bir frekans örneğinin genlik ve faz bilgileri kaydedilmiştir.



Şekil 5.2. TYAR ölçmelerinde döner tabla üzerine yerleştirilmiş reflektörler.

5.1. Ölçüm Sistemi ve Ölçüm Bilgileri

Yukarıda gösterilen reflektörlerin farklı bakış açısı ve geniş banttaki RKA ölçümlerinin gerçekleştirilmesinde GYTE ASEMLAB'da bulunan *Agilent Tech. E8363B 10 MHz- 40 GHz PNA* devre çözümleyici (İngilizce: *Network Analyzer*), iki adet horn anten, *Orbit-FR* firmasına ait bir adet döner tabla cihazları kullanılmıştır. Burada verici anten devre çözümleyicinin birinci portuna, alıcı anten ise ikinci portuna bağlanarak S_{21} kanalının frekans uzayı cevabı kaydedilmiştir. Döner tabla ile devre çözümleyici arasındaki bağlantı 300 m'lik GPIB uzatıcılarla sağlanmıştır. Tüm ölçüm sistemi devre çözümleyici üzerinden bilgisayar aracılığıyla MATLAB'da gerçekleştirilen yazılım ile kontrol edilmiştir [20]. Ölçüm sistemin grafiksel gösterimi Şekil 5.3'de verilmiştir.



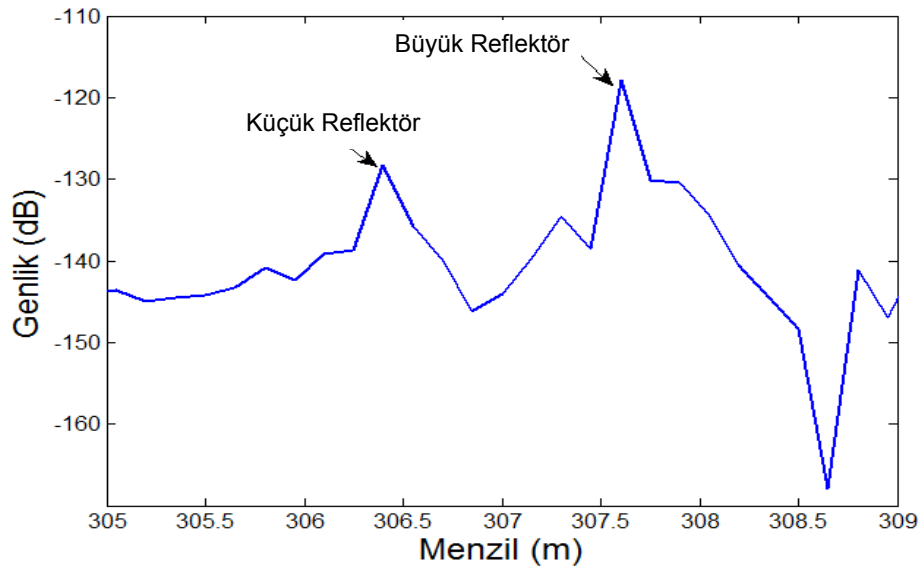
Şekil 5.3. ASEMLAB monostatik ölçüm sistemi.

Ölçümler merkez frekansları 3, 10 ve 17 GHz'de, bant genişliği 500 MHz olmak üzere 3 farklı frekans bandında gerçekleştirilmiştir. Döner tabla saat yönünde -5° 'den $+5^\circ$ 'ye doğru, 3, 10, 17 GHz için sırasıyla, 0.45° , 0.15° , 0.05° adım aralıklarıyla döndürülmüştür. Böylece her bir frekans bandında 23, 69 ve 203 farklı bakış açıdan ölçüm verisi toplanmıştır. Ölçümlerde 500 MHz bant genişliği için 6401 örnek toplanmıştır. Bu çalışmada gerçekleştirilen geniş bantlı RKA ölçüm senaryoları Tablo 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. TYAR ölçüm senaryosu verileri.

Ölçüm No	Merkez Frekansı [GHz]	Bant Genişliği [MHz]	Örnekleme sayısı	Tarama Açısı	Açısal Çözünürlük
1	3	500	6401	10°	0.45°
2	10	500	6401	10°	0.15°
3	17	500	6401	10°	0.05°

Ölçümlerde döner tabla üzerine yerleştirilen reflektörlerden büyük olanın alıcı antene olan uzaklığı 307.75 m, küçük reflektörün alıcı antene uzaklığı 306.25 m'dir. Bu durum bir ölçüm verisinin menzil cevabından da görülebilir (Şekil 5.4). Bu iki reflektörün çapraz menzildeki aralığı yaklaşık 1.4 m'dir. Şekil 5.4'deki büyük reflektörün RKA değeri küçük reflektörden yaklaşık 10 kat kadar büyüktür. Burada genlikteki değerlerde kablo kaybı, anten kazancı, girişim gibi ölçüm belirsizliklerini meydana getiren etkiler hesaba katılmamıştır.



Şekil 5.4. Saçıcılığı farklı iki reflektörün menzil cevabı.

Ölçümlerin sonunda her bir frekans bandı için toplanan veriler 6401 x 23, 6401 x 69, 6401 x 203 boyutlu matrislerde tutulmuştur. Bu matrislerin her bir sütunu, her bir açıda gerçekleştirilen ölçümün frekans uzayı cevabını tutar. Pencereleme ve menzil öteleme işlemi veriler alındıktan sonra yazılımsal olarak gerçekleştirilmiştir.

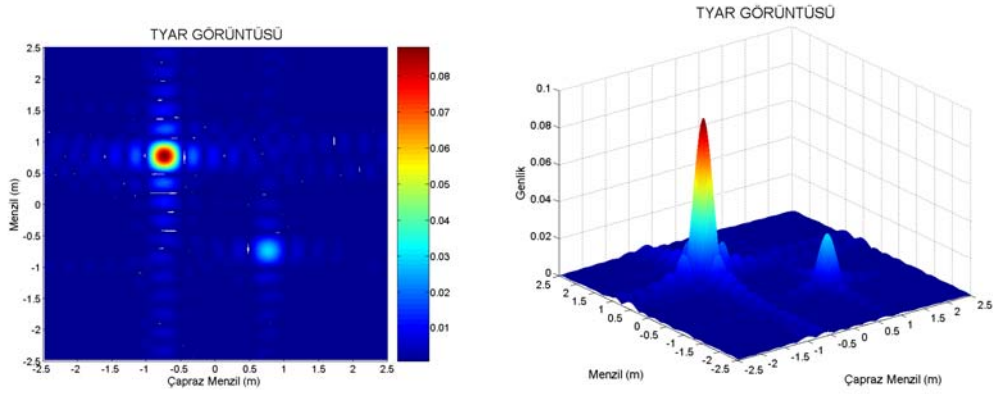
6. TYAR ÖLÇÜM SONUÇLARI

Ölçümlerde, saçıcılığı farklı iki reflektör menzil ve çapraz menzil ekseninde farklı noktalara yerleştirilmiştir. Bir döner tabla üzerine yerleştirilen bu reflektörlerin 10°'lik yapay açıklık için farklı açısal çözünürlükte, 3, 10, 17 GHz merkez frekanslarında RKA ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde bant genişliği 500 MHz, örnek sayısı 6401 olarak belirlenmiştir. Hedef bölgesinin alanı 5m x 5m olduğu düşünülmüştür. Burada reflektörler arasındaki mesafe hem çapraz menzil hem menzil ekseninde yaklaşık 1.5 m.'dir.

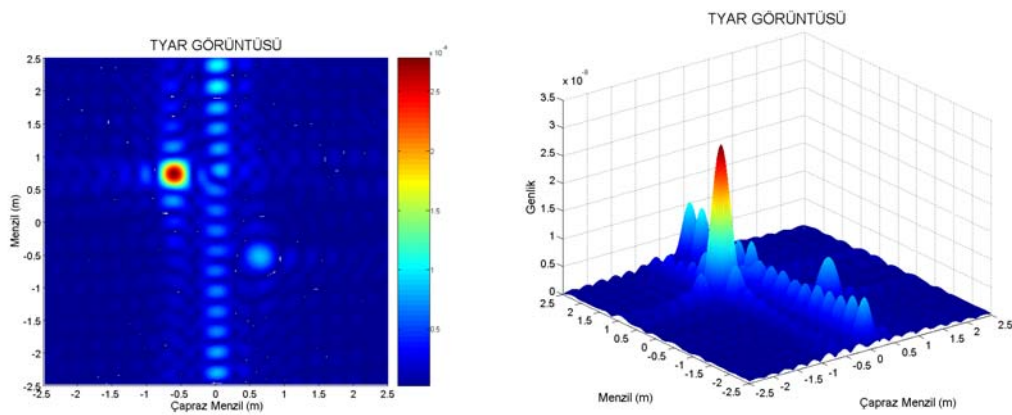
Çalışmanın ilk safhasında hedefin farklı bakış açısı ve farklı frekanslarında hedeften yansıdığı düşünülen elektrik alan verileri yapay olarak üretilmiştir. Bu verilerin Şekil 4.6'da ifade edilen TYAR algoritmasında kullanılmasıyla hedeflerin TYAR görüntüsü elde edilmiştir. Burada benzetim ortamında kullanılan hedef modeli noktasal kaynaktır.

İkinci aşamada bu yapay alanlar yerine bölüm 5'te anlatılan faz uyumlu monostatik ölçüm sistemi ile hedeften yansıyan elektrik alan verileri toplanmış, bu ölçüm verilerinin TYAR algoritmasında kullanılmasıyla hedef bölgesindeki saçılma merkezleri görüntülenmiştir. Burada hedef modeli reflektör olarak seçilmiştir.

Şekil 6.1'de 2.75-3.25 GHz frekans bandında 0.45° açısal çözünürlük için 23 farklı bakış açısından yapay olarak üretilmiş elektrik alan verileri kullanılarak elde edilen TYAR görüntüsü sunulmuştur. Benzetim ortamındaki aynı ölçümsel parametreler kullanılarak açık sahada saçıcılığı farklı reflektörlerin RKA ölçümleri gerçekleştirilmiş, monostatik bir ölçüm düzeneği ile toplanan bu elektrik alan verilerinin TYAR algoritmasında kullanılmasıyla elde edilen TYAR görüntüsü Şekil 6.2'de sunulmuştur.



Şekil 6.1. Frekans bandı 2.75-3.25 GHz için TYAR benzetim sonucu.

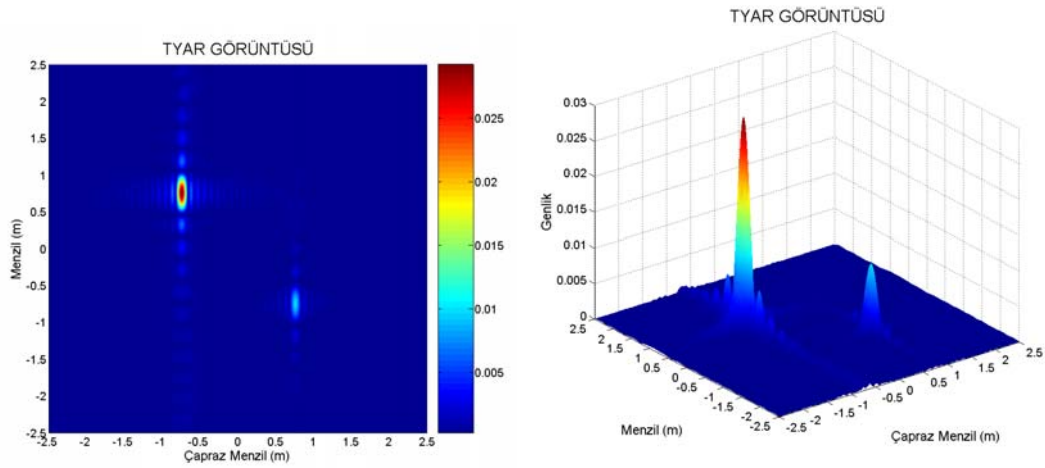


Şekil 6.2. Frekans bandı 2.75-3.25 GHz için TYAR ölçüm sonucu.

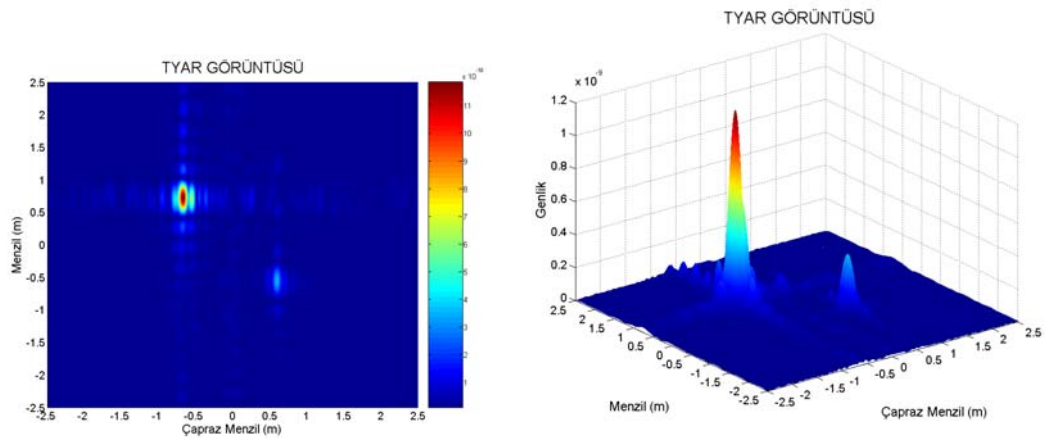
Şekil 6.1'deki benzetim sonucu ve Şekil 6.2'deki ölçüm sonucu karşılaştırıldığında hedef bölgesindeki saçılım merkezlerinin çapraz menzil ve menzildeki konumlarının birbiriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Fakat ölçüm verilerinden elde edilen TYAR görüntüsü benzetim sonuçlarına göre daha gürültülüdür. Ayrıca çapraz menzil ekseninde sıfır konumundaki tüm menzil değerlerinde bir hedef gözlenmektedir. Bunun sebebinin ne olduğu anlaşılamamıştır. Bu çalışmanın ileri aşamalarında menzil boyunca çapraz menzil eksenin merkezinde meydana gelen yanlış hedefin sebebi araştırılacaktır. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'deki 3B grafiklerde tepe değerlerindeki farklılıkların sebebi, benzetim ile elde edilen sonuçlarda saçılma merkezlerinin genlik değerine etki edecek olan ortamın dielektrik sabiti, manyetik geçirgenliği, ölçüm sistemindeki kablo kayıpları ve anten kazançları ve ölçüm belirsizlikleri gibi etkenler göz ardı edilmiştir. Burada asıl gözlenmek

istenilen sonuç hedef bölgesindeki saçılım merkezlerinin genliklerinin birbirine olan oranıdır.

Şekil 6.3'de aynı yapay hedef için 9.75-10.25 GHz frekans bandında 0.15° açısal çözünürlükte 69 farklı bakış açısından üretilmiş yapay elektrik alan verileri kullanılarak elde edilen TYAR görüntüsü sunulmuştur. Benzetim ortamındaki aynı ölçümsel parametreler kullanılarak açık sahada saçıcılığı farklı reflektörlerin RKA ölçümleri gerçekleştirilmiş, monostatik bir ölçüm düzeneği ile toplanan elektrik alan verilerinin TYAR algoritmasında kullanılmasıyla elde edilen TYAR görüntüsü Şekil 6.4'de sunulmuştur.



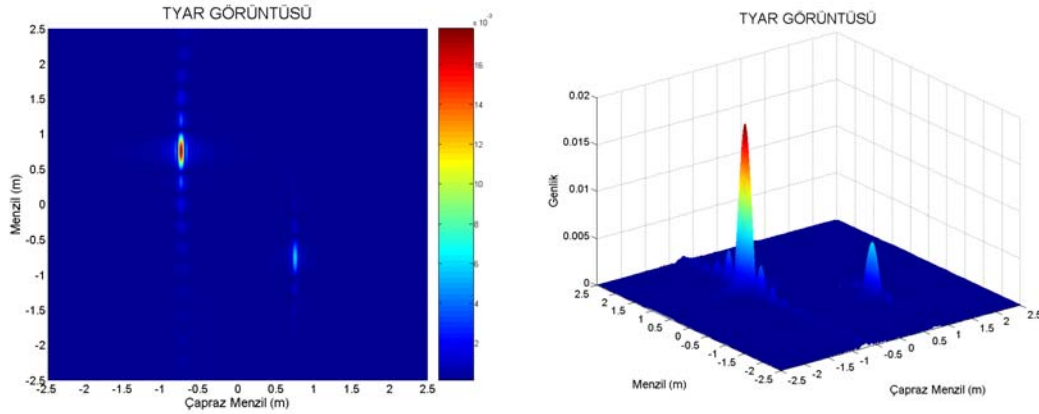
Şekil 6.3. Frekans bandı 9.75-10.25 GHz için TYAR benzetim sonucu.



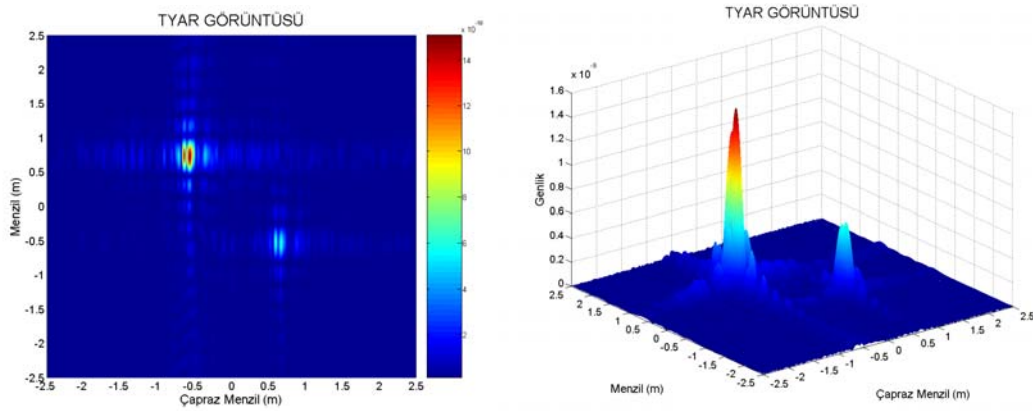
Şekil 6.4. Frekans bandı 9.75-10.25 GHz için TYAR ölçüm sonucu.

Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'deki, sırasıyla, benzetim ve ölçüm sonucu karşılaştırıldığında hedef bölgesinin görüntüleri birbiriyle tutarlı, ayrıca saçılma merkezlerinin menzildeki ve çapraz menzildeki konumu, reflektörlerin birbirine olan konumu ile aynıdır. Ölçüm sonuçlarından elde edilen TYAR görüntüsünde çapraz menzil ekseninde -0.75 noktasında bulunan hedef görüntüsünün hemen sağında daha küçük şiddetli bir hedef olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebinin frekansın etkisiyle eşitlik (3.2)'deki a_j terimindeki faz değişiminden olduğu düşünülmektedir. Çalışma frekansı arttıkça reflektör içindeki yansımalar değişmektedir. Buradaki sonuçlar ile 3 GHz merkez frekansındaki sonuçlar karşılaştırıldığında, açısal çözünürlük arttıkça çapraz menzil ekseninde görüntü çözünürlüğünün arttığı, ölçüm frekansının merkez frekansı artmasına rağmen, ölçümün bant genişliği aynı kalmasından dolayı menzil eksenini çözünürlüğünde herhangi bir değişimin olmadığı gözlenmemiştir. Burada benzetim ile ölçüm sonuçlarında 3B grafiklerde genlik değerlerindeki farklılığın sebebi ortam parametrelerinin, Fourier dönüşümündeki katsayıların ve sistem kayıplarının benzetim sonuçlarına eklenmemiş olmasıdır.

Şekil 6.5'de 16.75-17.25 GHz frekans bandında 0.05° açısal çözünürlük için 203 farklı bakış açısından üretilmiş yapay elektrik alan verileri kullanılarak elde edilen TYAR görüntüsü sunulmuştur. Benzetim ortamındaki aynı ölçümsel parametreler kullanılarak açık sahada saçıcılığı farklı reflektörlerin RKA ölçümleri gerçekleştirilmiş, bu ölçüm verilerinin kullanılmasıyla elde edilen TYAR görüntüsü Şekil 6.6'de sunulmuştur.



Şekil 6.5. Frekans bandı 16.75-17.25 GHz için TYAR benzetim sonucu.



Şekil 6.6. Frekans bandı 16.75-17.25 GHz için TYAR ölçüm sonucu.

Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'daki, sırasıyla, benzetim ve ölçüm sonuçları birbiri ile tutarlı, hem benzetim hem de ölçüm sonuçları ile elde edilen TYAR görüntüsündeki saçılma merkezlerinin konumu reflektörlerin menzil ve çapraz menzil eksenlerindeki konumu ile eşdeğer olduğu gözlenmiştir. Burada 17 GHz bandında gerçekleştirilen ölçmeler ile diğer ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında farklı noktadaki saçılma merkezlerinin açısal çözünürlüğün artmasıyla çapraz menzil eksenindeki görüntü çözünürlüğünün arttığı gözlenmiştir. Şekil 6.6'daki ölçüm sonuçları incelendiğinde her bir saçılma merkezinin ikiye ayrıldığı görülmektedir. Bu etki 3 GHz sonuçlarında gözlenmezken, 10 GHz sonuçlarında daha düşük bir genlikte gözlenmiş, 17 GHz'de elde edilen TYAR görüntüsünde ise, her bir reflektörün bulunduğu konumda birbirine bitişik iki tane hedefin olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebinin yüksek frekanslarda reflektörün iç bölgelerindeki yansımaların daha farklı bir faz gecikmesine sebep olduğu, bu etkinin de saçılma

merkezlerinin konumunu kaydirdığı ve ayrıklaştirdığı düşünölmektedir. Şekil 6.5'de 3B grafikte verilen saçılma merkezlerinin genliklerinin birbirine oranı Şekil 6.6'da 3B grafikte yan yana duran iki hedef genliklerinin toplanmasıyla eşit duruma gelebilir.

Sonuç olarak farklı frekans bantlarında ve farklı açısai çözünörlükte elde edilen TYAR görüntüleri karşılaştırıldığında, açısai çözünörlük arttıka çapraz menzil ekseninde görüntü çözünörlüğünün arttığı, menzil çözünörlüğünün değişmediği gözlenmiştir. Bu da eşitlik (5.1)'i doğrulamaktadır. Ayrıca hedeften dönen sinyallerin faz bilgisi frekans bandı değiştikçe değişmekte, bunun sonucunda aynı hedef için farklı frekans bantlarındaki TYAR görüntüleri farklı karakteristikler içerebilmektedir.

7. SONUÇ VE GELECEKTE PLANLANAN ÇALIŞMALAR

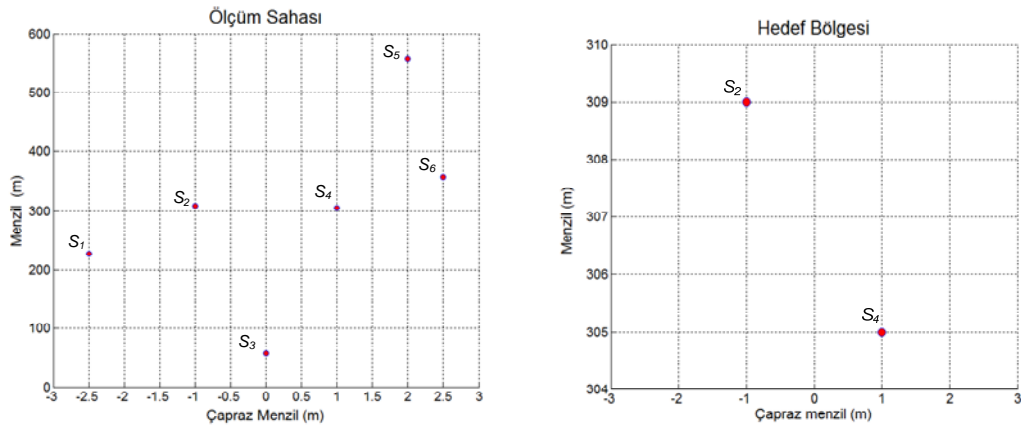
Bu tezde, deneysel bir sistem ile toplanan ölçüm verilerinden TYAR görüntüsünün elde edilişi sunulmuştur. Burada bir TYAR algoritması uzak alan parametrelerine bağlı olarak akım–alan dağılımları cinsinden gösterilmiş, Fourier dönüşümü tekniği ile hedef bölgesindeki saçılma merkezlerinin kesitsel görüntüsü elde edilmiştir.

Yukarıda elde edilen deneysel sonuçlar göz önünde tutulduğunda bir TYAR görüntüsünde menzil çözünürlüğü bant genişliğine, çapraz menzil çözünürlüğü yapay açıklıktaki açısal çözünürlüğe bağlıdır. Hedeften yansıyan işaretler farklı ölçüm frekansları için saçıcının karakteristiğe bağlı olarak farklı şekilde faz bilgisi içerir. Bu faz değerleri hedefin TYAR görüntüsüne etki eder. Bu sebeple aynı hedefin farklı frekanslardaki TYAR görüntüleri birbirleriyle farklılık içerebilir.

Deneysel bir sistem ile açık sahadaki bir hedeften yansıyan elektrik alan verileri kullanılarak bir TYAR görüntüsü elde edilirken, bölüm 4’de ele alınan hususlar dikkate alınmadığı takdirde hedef bölgesinin TYAR görüntüsü yanlış bilgi içerecektir. Bunu benzetim ortamında gerçekleştirilen bir çalışma ile açıklayalım.

Bir hedef bölgesinin 600 m’lik bir ölçüm sahası içinde yer aldığını ve bu hedef bölgesinin merkezinin radardan 307 m uzakta ve alanının 6m x 6m olduğunu varsayalım. Burada 600 m’lik ölçüm sahası içinde radardan 307 m uzaklıkta alanı 6m x 6m olan hedef bölgesinin bölüm 4’deki koşullar dikkate alınmadığı takdirde elde edilen TYAR görüntülerini inceleyelim. Bu hedef bölgesinde, (-1,309m) ve (1,305m) noktalarında farklı genlikte iki saçıcının olduğunu, ayrıca hedef bölgesinde olmayıp, ölçüm sahasında (-2.5,227), (0, 57), (2,557) ve (2.5,357) konumlarında yer alan farklı 4 saçıcının daha olduğunu düşünelim ve tüm saçıcıları S_i ($i=1,2,3\dots$) ile gösterelim (Şekil 7.1).

Burada parantezin ilk değerleri saçııcıların çapraz menzil eksenini, ikinci değerleri ise menzil eksenindeki konumunu ifade eder.



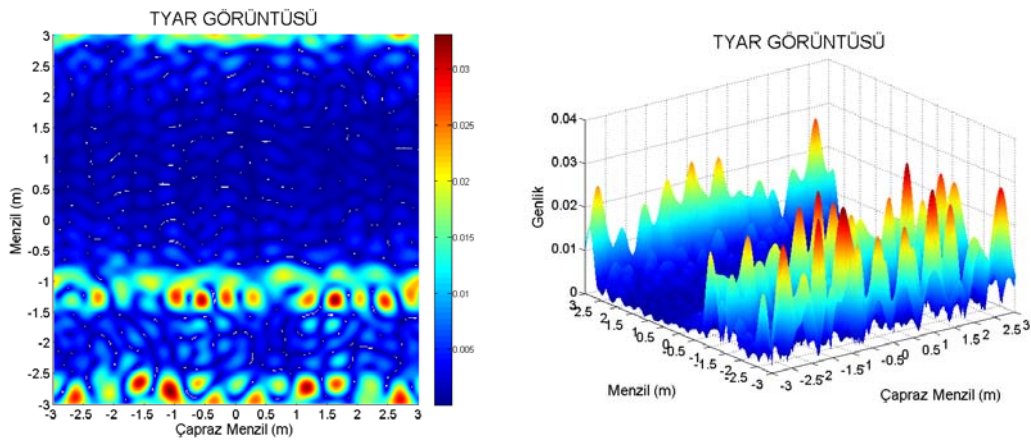
Şekil 7.1. Ölçüm bölgesinde ve hedef bölgesinde bulunan saçııcılar.

Tüm ölçüm sahasında yer alan saçııcıların konumu ve şiddeti Çizelge 7.1'de verilmiştir. Bu benzetim çalışmasında radar menzil doğrultusunda yayılım yapmaktadır.

Çizelge 7.1. Saçııcıların ölçüm bölgesindeki konumu.

Saçııcı	Çapraz Menzildeki Konumu (x eksenini) (m)	Menzildeki Konumu (y eksenini) (m)	Mutlak Genlik Değeri
S_1	-2.5	227	8
S_2	-1	309	10
S_3	0	57	20
S_4	1	305	5
S_5	2	557	20
S_6	2.5	357	8

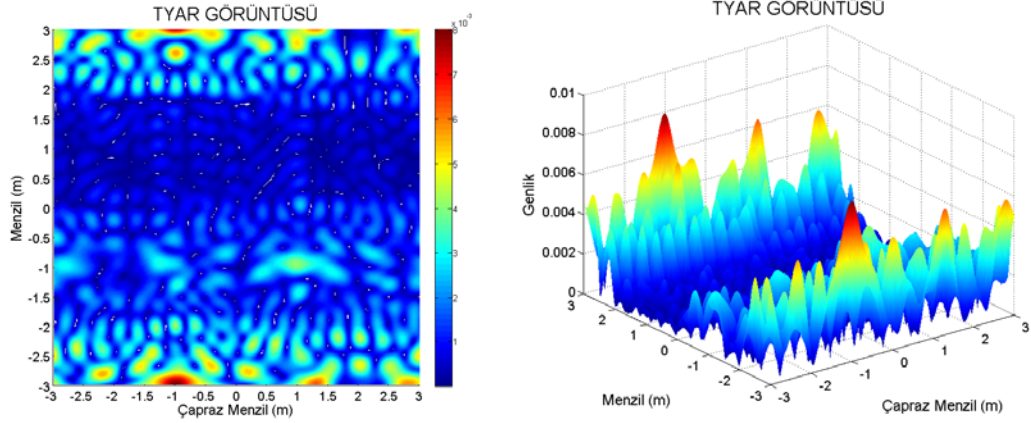
Şekil 7.1'deki ölçüm bölgesinde yer alan saçıcılardan yansıyan elektrik alan değerlerini yapay olarak üretelim. Burada 2001 noktada örnekli 2.75–3.25 GHz frekans bandında yapay üretilmiş elektrik alan verileri, 10° 'lik yapay açıklık içinde 0.4° açısal çözünürlükteki farklı bakış açılarından toplanmıştır. Bu alan verilerine bölüm 4.2'de anlatılan menzilde pencereleme ve menzilde öteleme işlemi yapılmadığı takdirde hedef bölgesinin TYAR görüntüsü bir anlam içermeyecektir (Şekil 7.2). Hedef bölgesinde yer alan S_2 ve S_4 saçıcıları Şekil 7.2'deki TYAR görüntüsünde görülememektedir.



Şekil 7.2. Menzilde pencereleme ve öteleme yapılmamış alan verilerinden elde edilen TYAR görüntüsü.

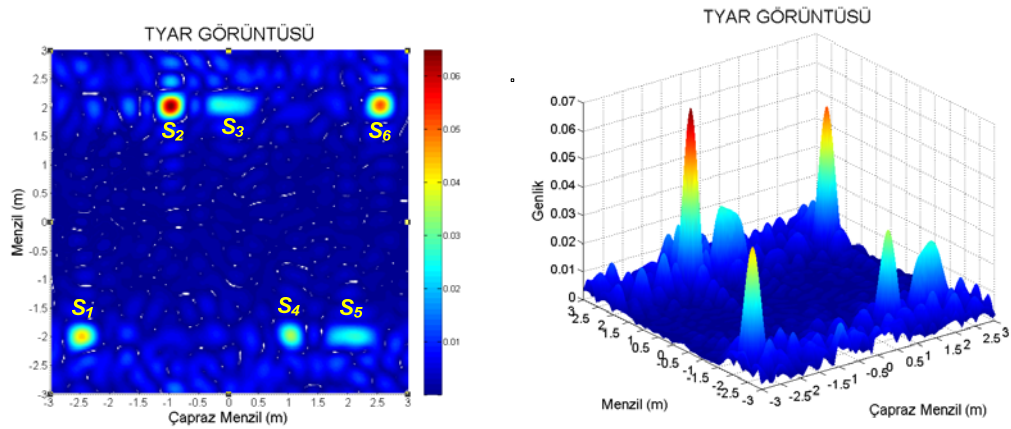
Benzetim ortamında yukarıda verilen ölçüm parametreleri doğrultusunda elde edilen yapay elektrik alan verilerine menzilde pencereleme işlemi yapıldığı fakat menzilde öteleme işlemi yapılmadığı takdirde elde edilecek hedef bölgesinin TYAR görüntüsü Şekil 7.3'deki gibi olacaktır.

Şekil 7.3'de elde edilen TYAR görüntüsü hedef bölgesi hakkında doğru bilgi içermemektedir. Hedef bölgesinde yer alan S_2 ve S_4 saçıcıları Şekil 7.3'deki TYAR görüntüsünde görülememektedir.



Şekil 7.3. Menzilde pencereleme yapılmış fakat menzilde öteleme yapılmamış alan verilerinden elde edilen TYAR görüntüsü.

Benzetim ortamında yapay olarak üretilen elektrik alan verilerine yalnız menzilde öteleme işlemi uygulanır, fakat menzilde pencereleme işlemi uygulanmadığı takdirde elde edilecek TYAR görüntüsü Şekil 7.4'deki gibi olur.

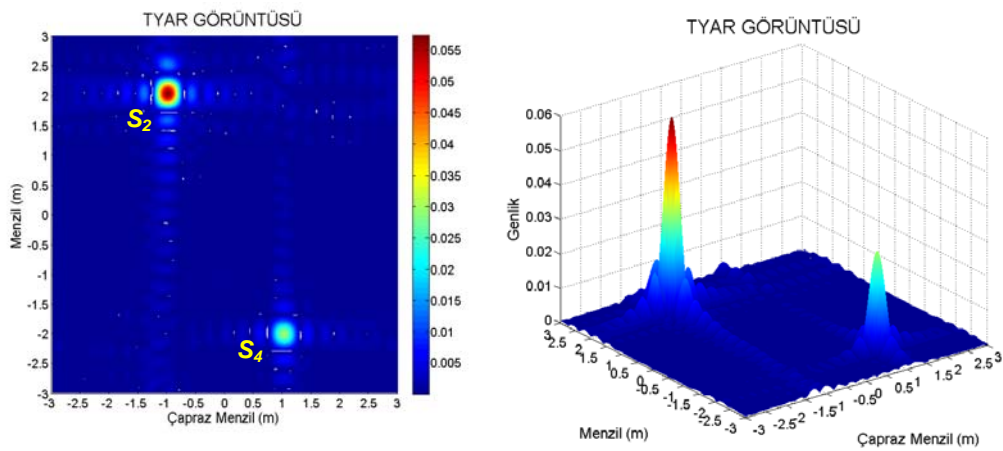


Şekil 7.4. Menzilde öteleme yapılmış fakat menzilde pencereleme yapılmamış alan verilerinden elde edilen TYAR görüntüsü.

Elektrik alan verilerine sadece menzilde öteleme yapılarak elde edilen Şekil 7.4'deki TYAR görüntüsünde hedef bölgesinin dışında yer alan S_1 , S_3 , S_5 , S_6 saçıcılarının etkisi gözlenmektedir. Bu sebeple ölçüm verilerine menzilde pencereleme işlemi yapılmadığı takdirde hedef bölgesi dışındaki kaynaklar hedef bölgesinin TYAR görüntüsü üzerine düşmektedir. Burada hedef bölgesi dışındaki kaynakların mutlak genlik değerleri farklı olmasına

rağmen TYAR görüntüsünde eşit şiddette görülmesi farklı menzil uzaklıklarında olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 7.1'de gösterilen ölçüm sahasındaki hedef bölgesi üzerinde bulunan S_2 ve S_4 kaynaklarının TYAR görüntüsünün elde edilebilmesi için yapay olarak üretilen elektrik alan verilerine menzilde pencereleme ve menzilde öteleme işlemi uygulandığı takdirde hedef bölgesinin TYAR görüntüsü hedef bölgesindeki kaynaklarla eşdeğer olduğu açıkça görülmektedir. (Şekil 7.5) .

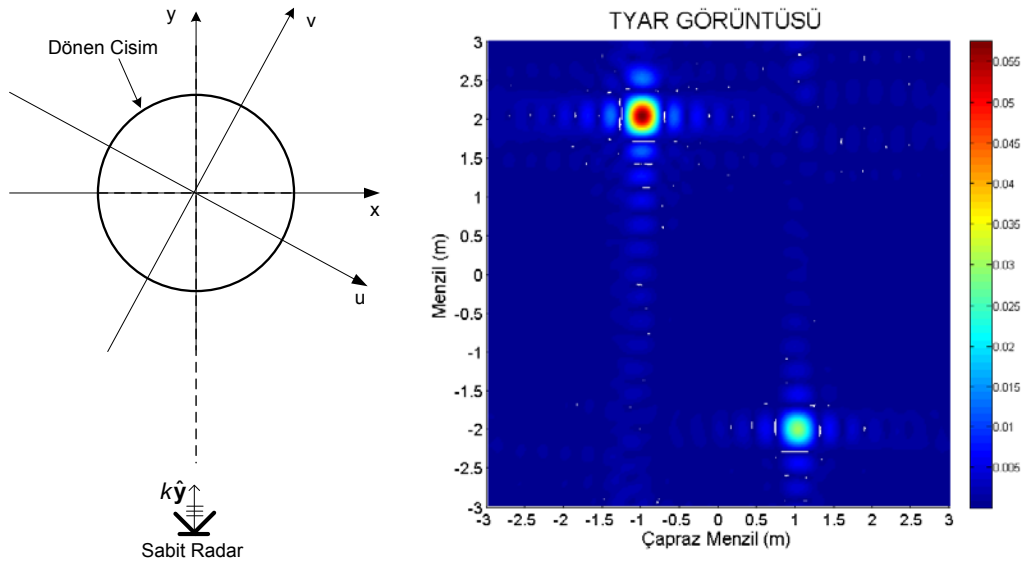


Şekil 7.5. Menzilde pencereleme ve menzilde öteleme işlemi yapıldıktan sonra elde edilen TYAR görüntüsü.

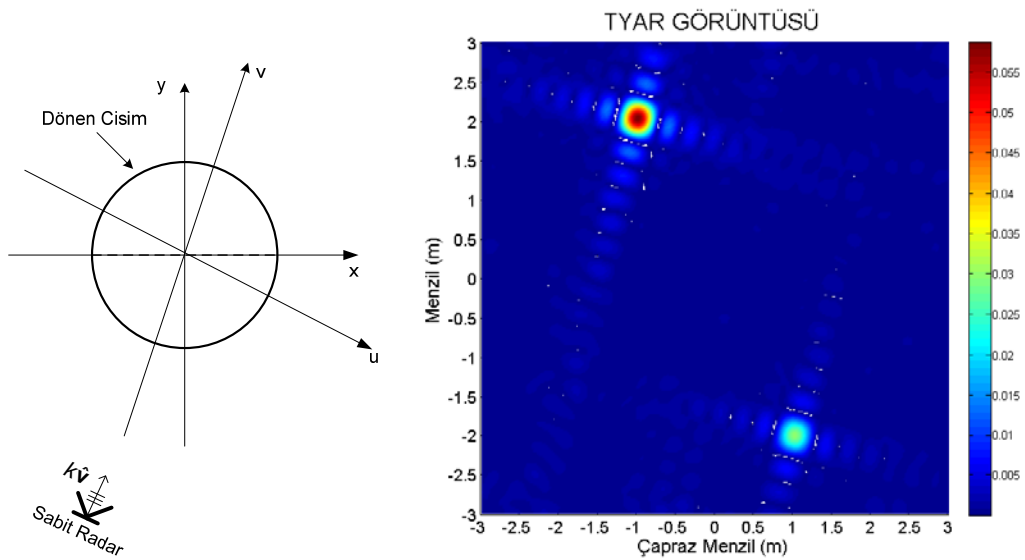
Açık sahada toplanan ölçüm verilerinden herhangi bir genişlikteki hedef bölgesin TYAR görüntüsünün elde edilmesi için bu verilere menzilde öteleme ve menzilde pencereleme işlemlerinin yapılması gerekliliği yukarıdaki örneklerde açıklanmıştır. Burada pencereleme fonksiyonu gözlenmek istenilen hedef bölgesinin genişliğine göre keyfi olarak seçilebilir fakat öteleme mesafesi, hedef bölgesinin merkezi ile radarın koordinat merkezi arasındaki mesafe kadar olmalıdır.

Yukarıdaki gösterimler dışında bir hedef bölgesinin TYAR görüntüsü hedefin radara olan doğrultusu hakkında da bilgi verir. Şekil 7.5'de gösterilen TYAR görüntüsünün elde edilmesinde kullanılan yapay ölçüm verileri için, radar y doğrultusunda yayın yapmakta ve hedef bölgesi saat yönünde 10°

hareket ettirilerek yapay açıklık sağlanmaktadır. Burada radarı saat yönünde 15° çevirelim ve radarı bu yeni bakış açısında sabit tutup, hedefi aynı şekilde saat yönünde 10° hareket ettirerek yapay açıklık sağlayalım. Bu kapsamda elde edilen TYAR görüntüsü ile radarın y doğrultusunda yayın yaparken elde edilen TYAR görüntüsü aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 7.6. Radar y doğrultusunda yayılım yaparken elde edilen TYAR görüntüsü.



Şekil 7.7. Radar v doğrultusunda yayılım yaparken elde edilen TYAR görüntüsü.

Şekil 7.6 ve Şekil 7.7’de verilen sonuçlar incelendiğinde TYAR görüntüsündeki hedeflerin noktasal görüntülerinin yayılımları radarın hedefe olan doğrultusunu ya da hedefin radara olan doğrultusu hakkında bilgi vermektedir.

Yukarıdaki tüm benzetim sonuçları ve bölüm 6’da yer alan ölçüm sonuçları incelendiğinde deneysel bir sistem ile toplanan ölçüm verilerinden bir TYAR görüntüsün elde edilebilmesi için aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir.

1. Farklı bakış açısı ve farklı frekanslarda hedeften saçılan alanlar faz uyumlu bir sistem ile toplanmalıdır.
2. Açık ve frekans düzleminde toplanan $F(f, \theta)$ elektrik alan verileri $k = 2\pi f/c$ dönüşümü ile spektral uzayda konumlandırılır. Yeni oluşan elektrik alan fonksiyonu $F(k, \theta)$ olarak ifade edilir.
3. Hedef bölgesinden yansıyan elektrik alan verilerinin diğer bölgelerden gelen girişimin önlenmesi için bu verilere menzilde pencereleme işlemi yapılmalıdır.
4. Hedef bölgesinin koordinat merkezi ile radarın koordinat merkezi faz uyumlu olması için pencerelenmiş ölçüm verilerine menzilde öteleme işlemi yapılmalıdır.
5. Spektral uzayda polar koordinatlarda yer alan $F(k, \theta)$ ölçüm verileri, aradeğerleme tekniği $k_x - k_y$ düzlemine indirgenerek kartezyen koordinatlarda elde edilmelidir.
6. Kartezyen koordinatlarda yer alan $F(k_x, k_y)$ ölçüm verilerinin 2B ters Fourier dönüşümünün alınmasıyla hedef bölgesinin TYAR görüntüsü elde edilir.

Bu çalışmanın devamında “*pencil-back projection*” yönteminin [17] deneysel bir sisteme uyarlanması ve çapraz menzil ekseninde yüksek çözünürlüklü bir metodun geliştirilmesi araştırılacaktır.

EK-A

Bu başlık altında, elektrik alan verilerinin benzetim ortamında yapay olarak üretilmesiyle elde edilen TYAR görüntüleme kodu yer almaktadır. Burada programlama dili olarak MATLAB kullanılmıştır [20].

PROGRAM KODU

```

clc;
clear all;
close all;
colordef white

%% 1. Girdi Verileri
%=====
Object = [-1 2 10;1 -2 5; 0 -250 20;2 250 20; 2.5 20 8;-2.5 -80 8];
fprintf('Input Parameters\n');
fprintf('=====\n');

D0 =input('Enter distance (D0) between target and Measurement System
[m]: ');
Dshift=0;
Dmax =input('Enter maximum size of target range(Dmax) [m]: ');

frequency =input('Enter Center Frequency (Fcent) [GHz]: ');
frequency = frequency * 1e9;
BandWidth = input('Enter BandWidth [GHz]: ');
BandWidth = BandWidth * 1e9;
nofp=input('Enter Number of Points : ');

AspectAngle=input('Enter Aspect Angle of Radar to Target [deg] :');
SweepAngle= input ('Enter Rotate Angle of Rotator [deg] :');

nofangle_points=input('Enter Number of Measurements : ');

Sec=103/6401*nofp;
Hour=nofangle_points*Sec/3600;
Min=mod(Hour,1)*60;
fprintf('\nSingle Meas. Time : %.1f sn.\n',Sec);
fprintf('Estimated Meas. Time : %d hour %d
min.\n', floor(Hour), ceil(Min) );

pause(2);

c=3e8/2;

phi_limits = [AspectAngle-SweepAngle/2 AspectAngle+SweepAngle/2]
phi_lim1=phi_limits(1);
phi_lim2=phi_limits(2);

fmin=(frequency-BandWidth/2);
fmax=(frequency+BandWidth/2);

```

```

Kmax = 2*pi*fmax/c;
Kmin = 2*pi*fmin/c;
dkx = 2*pi/Dmax;
dky = 2*pi/(Dmax);

df = BandWidth/(nofp-1);
freq = (frequency-BandWidth/2): df : (frequency+BandWidth/2);
kk=2*pi.*freq/c;

angle=linspace(phi_lim1,phi_lim2,nofangle_points);
dphi=angle(2)-angle(1);

SizeObj=size(Object);
N=SizeObj(1);

[PHI, KK] = meshgrid(angle, kk);

% 2. Sentetik Ölçüm verilerini oluştur.
%=====

[MeasData] = Measure (frequency, BandWidth, nofp, nofangle_points,
phi_lim1, phi_lim2, D0, Dmax, Object);

row=0; column=0;
count=0;

fprintf(' \nInterpolation has been running..... \n');

for ky=-Kmax:dkx:Kmax
    row=row+1;
    column=0;

    for kx=-Kmax:dky:Kmax

        column=column+1;

        phi_in=atan2(kx,ky)*180/pi;

        if phi_limits(1)<=phi_in && phi_in<=phi_limits(2)

            k=sqrt(abs(kx)^2 + abs(ky)^2);

            if k>= Kmin && k <= Kmax

                InterPData(row, column)=interp2 (PHI, KK, MeasData,
phi_in, k, '*linear');

                count = count +1;
                if mod(count,75)==0
                    fprintf('\n');
                else
                    fprintf('.') ; pause(0.01);
                end

            end

        end

    end
end

```



```

        else
            InterPData(row,column)=0;
        end

    end

end

end

fprintf('\nInterpolation has been completed...\n'); pause(1);

%% 3. TYAR Görüntüsü
%=====

fprintf('Calculate pixel Value of ISAR Image...\n');pause(2);

Imaging =calculatePixelVal(InterPData);

%% PLOT FIGURES
figure;
kxx=-Kmax:dkx:Kmax;
kyy=-Kmax:dky:Kmax;
imagesc(kxx,kyy,abs((InterPData)));
title('kx-ky Plane');
xlabel('kx');
ylabel('ky');

figure;
[Nx Ny] = size(Imaging);
dx = 2*pi/(2*Kmax);
yy=((1:Ny)*dx - Dmax/2);
xx=((1:Nx)*dx - Dmax/2);
surf(xx,yy,(abs(Imaging)));view(2); shading interp;
xlabel('Çapraz Menzil (m)','FontSize',16); xlim([-Dmax/2 Dmax/2]);
ylabel('Menzil (m)','FontSize',16);ylim([-Dmax/2 Dmax/2]);
zlabel('Genlik','FontSize',16);
title('TYAR GÖRÜNTÜSÜ','FontSize',20);

figure;
[Nx Ny] = size(Imaging);
dx = 2*pi/(2*Kmax);
yy=((1:Ny)*dx - Dmax/2);
xx=((1:Nx)*dx - Dmax/2);
surf(xx,yy,((abs(Imaging))));view(3); shading interp;
xlabel('Çapraz Menzil (m)','FontSize',16); xlim([-Dmax/2 Dmax/2]);
ylabel('Menzil (m)','FontSize',16);ylim([-Dmax/2 Dmax/2]);
zlabel('Genlik','FontSize',16);
title('TYAR GÖRÜNTÜSÜ','FontSize',20);

df=BandWidth/(nofp-1);
max_time=1/df; %sn.
max_range=max_time*1.5e8; %m

v=size(Object);
figure
hold on
for m=1:v(1)

```

```

plot(Object(m,1),Object(m,2)+D0,'o','MarkerSize',6,'MarkerFaceColor'
,'r');

end

grid on
xlim([-Dmax/2 Dmax/2]);
ylim ([0 max_range]);
xlabel('Çapraz Menzil (m)','FontSize',10);
ylabel('Menzil (m)','FontSize',10);
title('Ölçüm Bölgesi','FontSize',16);

figure
hold on

for m=1:v(1)

plot(Object(m,1),Object(m,2)+D0,'o','MarkerSize',10,'MarkerFaceColor'
,'r');

end

grid on
xlim([-Dmax/2 Dmax/2]);
ylim([(D0+Dshift-Dmax/2) (D0+Dshift+Dmax/2)]);
xlabel('Çapraz Menzil(m)','FontSize',10);
ylabel('Menzil (m)','FontSize',10);
title('Hedef Bölgesi','FontSize',16);

```

```

function [MeasData]=Measure(frequency, BandWidth,nofp,
nofangle_points,phi_lim1, phi_lim2, D0, Dmax, Obj)

df = BandWidth/(nofp-1);
angle=linspace(phi_lim1,phi_lim2,nofangle_points);

SizeObj=size(Obj);
n=SizeObj(1);
vlite=1.5e8;

%% Yapay Ölçüm Verilerini Üret
%=====
====
fprintf('\nMEASUREMENTs have started....\n');

for counter = 1:length(angle)

    phi = angle(counter)*pi/180;

    cc=0;

    fprintf('.....');pause(0.01);

```

```

    if mod(counter,5)==0, fprintf('\n'); end

    for f=(frequency-BandWidth/2): df : (frequency+BandWidth/2)

        cc=cc+1;
        Int=0;
        kk(cc,1)=2*pi*f/vlite;

        for p=1:n
            x=Obj(p,1)*sin(phi);
            y=Obj(p,2)*cos(phi)+D0;
            J=Obj(p,3);

            E=J*exp(-j.*kk(cc,1).*x)*exp(-j.*kk(cc,1).*y);

            Int=Int+E;
        end

        EAx(cc,counter)=Int;

    end
end

fprintf('\n%d MEASUREMENTs have been Completed ... \n',counter);
pause(2)

%% Pencereleme
%=====

Jx(1:nofp,1:length(angle))=ifft((EAx(1:nofp,1:length(angle) )));
time = (1:nofp)*(1/(nofp*df));
range = time*vlite;
gate = [D0-Dmax/2 D0+Dmax/2];

for ii=1:nofp

    if range(ii)<=gate(1) || range(ii)>=gate(2)

        g(ii,1)=0;
    else
        g(ii,1)=1;
    end
end

for i=1:length(angle)
    Jxgated(1:nofp,i)=Jx(1:nofp,i).*g(:,1);
end

EAgated(1:nofp,1:length(angle))=fft(Jxgated(1:nofp,1:length(angle)))
;
fprintf('Range Gating has been Completed....\n'); pause(1)
MeasData(1:nofp,1:length(angle)) = EAgated(1:nofp,1:length(angle));
%=====

```

```
%% Öteleme
=====
for i=1:length(angle)

EAgated(1:nofp,i)=EAgated(1:nofp,i).*exp(j.*kk(:,1).*D0);

end

fprintf('Range Compansation has been Completed....\n'); pause(1);

MeasData(1:nofp,1:length(angle)) = EAgated;

fprintf('Data of Polar Measurements has been
Created....\n');pause(1);
%
Return
```

```
function [pixelVal]= calculatePixelVal(MeasData)
```

```
pixelVal= fftshift(iff2(MeasData));
```

EK-B

Bu başlık altında, gerçek ölçüm verilerinin işlenmesiyle elde edilen TYAR görüntüleme kodu yer almaktadır. Programlama dili olarak MATLAB kullanılmıştır [20].

PROGRAM KODU

```

clc;
clear all;
close all;
colordef white

%% 1. Girdi Verileri
%=====
MEASUREMENT=load('angls.mat');
load TYAR;

D0 = MEASUREMENT.D0;
Dmax = MEASUREMENT.Dmax;
frequency = MEASUREMENT.freqs(3201);
BandWidth = MEASUREMENT.BW;
nofp=TYAR.nofp;
nofangle_points= 69;

c=3e8/2;

phi_limits = [MEASUREMENT.phi_bas MEASUREMENT.phi_bit];
phi_lim1=phi_limits(1);
phi_lim2=phi_limits(2);

fprintf('\t3 GHz ISAR MEASUREMENTS\n');
fprintf('===== \n');
fprintf('Frequency Range : %.2f - %.2f GHz\n', (frequency-
BandWidth/2)*1e-9, (frequency+BandWidth/2)*1e-9);
fprintf('Scan Angle : %.2f deg\n\n', (phi_lim2-phi_lim1));

pause(2);

fmin=MEASUREMENT.fmin;
fmax=MEASUREMENT.fmax;

Kmax = 2*pi*fmax/c;
Kmin = 2*pi*fmin/c;
dkx = 2*pi/Dmax;
dky = 2*pi/(Dmax);

df = BandWidth/(nofp-1);
freq = MEASUREMENT.freqs;
kk=2*pi.*freq/c;
angle=MEASUREMENT.angls;
dphi=angle(2)-angle(1);

```

```

[PHI, KK] = meshgrid(angle, kk);

fprintf ('Input Parameters of Measurement have been loaded...\n');
pause(2);

%% 2. Ölçüm verilerini yükle
%=====

[MeasData] = MEASUREMENT.PolarData;

fprintf ('Polar MEASUREMENTs Data have been loaded...\n');
pause(2);

row=0; column=0;
count=0;

fprintf(' \nInterpolation has been running.....\n');

for ky=-Kmax:dkx:Kmax
    row=row+1;
    column=0;

    for kx=-Kmax:dky:Kmax

        column=column+1;

        phi_in=atan2(ky,kx)*180/pi;

        if phi_limits(1)<=phi_in && phi_in<=phi_limits(2)

            k=sqrt(abs(kx)^2 + abs(ky)^2);

            if k>= Kmin && k <= Kmax

                InterPData(row,column)=interp2(PHI, KK, MeasData,
phi_in, k, '*linear');

                count = count +1;
                if mod(count,75)==0
                    fprintf('\n');
                else
                    fprintf('.'); pause(0.01);
                end

            end

        else
            InterPData(row,column)=0;
        end

    end

end

end

fprintf('\nInterpolation has been completed...\n'); pause(1);

```

```

%% 3. TYAR Görüntüsünü Oluştur
=====

fprintf('Calculate pixel Value of ISAR Image...\n');pause(2);

Imaging =calculatePixelVal(InterPData);

figure;
kxx=-Kmax:dkx:Kmax;
kyy=-Kmax:dky:Kmax;
imagesc(kxx,kyy,abs((InterPData)));
title('kx-ky Plane');
xlabel('kx');
ylabel('ky');

figure;
[Nx Ny] = size(Imaging);
dx = 2*pi/(2*Kmax);
yy=((1:Ny)*dx - Dmax/2);
xx=((1:Nx)*dx - Dmax/2);
surf(xx,yy,(abs(Imaging)));view(2); shading interp;
xlabel('Çapraz Menzil (m)'); xlim([-Dmax/2 Dmax/2]);
ylabel('Menzi (m)');ylim([-Dmax/2 Dmax/2]);
zlabel('Genlik');
title('TYAR Görüntüsü','FontSize',14);

figure;
[Nx Ny] = size(Imaging);
dx = 2*pi/(2*Kmax);
yy=((1:Ny)*dx - Dmax/2);
xx=((1:Nx)*dx - Dmax/2);
surf(xx,yy,(abs(Imaging)));view(3); shading interp;
xlabel('Çapraz menzil (m)'); xlim([-Dmax/2 Dmax/2]);
ylabel('Menzil (m)');ylim([-Dmax/2 Dmax/2]);
zlabel('Genlik');
title('TYAR Görüntüsü','FontSize',14);

```

```

function [pixelVal]= calculatePixelVal(MeasData)

pixelVal= fftshift(iff2(MeasData));

```

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] D. L. Mensa, *High Resolution Radar Cross Section Imaging*. Boston London: Artech House, 1993.
- [2] R. Bhalla; H. Ling, “3D scattering center extraction from Xpatch”, Antenna and Propagation Soc. Int. Symp. AP-S. Digest Vol.4, 18-23 June 1995
- [3] R. Bhalla, H. Ling, J. Moore,. J. Andevsh, S. W. Lee, and J. Hughes, “3D scattering center representation of complex targets using the shooting and bouncing ray technique: a review”, Antenna and Propagation Magazine, IEEE, vol.40—5 pp.30-39, Oct. 1998
- [4] D.L. Mensa, S. Halevy and G. Wade, “ Coherent Doppler tomography for microwave imaging” , *Proc. IEEE*, vol.71, no.2, pp.254-261, Feb. 1983
- [5] David C. Munson, JR., James Dennis O'brien and W. Kenneth Jenkins, “A Tomographic Formulation of Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar”, *Proc. IEEE* vol. 71 No.8 Aug. 1983
- [6] J.L.Walker, “Range-Doppler imaging of rotating objects”, *IEEE Trans. Aerosp. Electron Syst.*, vol. AES-16, pp.23-52, Jan. 1980
- [7] W.M. Brown, R.J. Fredricks, “Range-Doppler imaging with motion through resolution cells”, *IEEE Trans. Aerosp. Electron Syst.*, vol. AES-5, pp.98-102, Jan. 1969
- [8] D. Mensa, G. Heidbreder, G. Wade, “Aperture Synthesis by object rotation in coherent imaging”, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, vol. NS-27, pp. 989-998, Apr., 1980
- [9] C. Chen and H.C. Andrews, “Multifrequency imaging of radar turnable data”, *IEEE Trans. Aeorosp. Syst.*, vol. AES-16, pp. 15-22, Jan. 1980

- [10] Özdemir C., "Synthetic Aperture Radar", K. Chang (Ed), *The Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, New York: Wiley-Interscience, Feb. 2005.
- [11] Mithat İdemen, *Elektromanyetik Alan Teorisinin Temelleri*, Literatür Yayıncılık, 1996
- [12] C. Balanis, *Antenna Theory and Design*, Third Edition, Wiley
- [13] B.P. Lathi, *Modern Digital and Analog Communication Systems*, Third Edition, Oxford University Press
- [14] Bracewell, R.N. (1990). "Numerical Transforms". *Science* 248: 697–704. doi:10.1126/science.248.4956.697. PMID 17812072
- [15] Henry J. Scudder, "Introduction to Computer Aided Tomography", *Proc. IEEE*, vol. 66 no.6, June 1978
- [16] Russell M. Mersereau, Alan V. Oppenheim, "Digital Reconstruction of Multidimensional Signals from Their Projections", *Proc. IEEE*, vol. 62, No. 10, Oct 1974
- [17] Şahin Özsoy, A. Arif Ergin, "Pencil Back-Projection Method for SAR Imaging", *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 18, No.3 March 2009
- [18] R. Bhalla and H. Ling, "Image domain ray tube Integration formula for the shooting and bouncing ray technique," *Radio Sci.*, vol. 30, pp. 1435-1446, Sep.-Oct. 1995
- [19] D.L. Mensa, "Wideband Radar Cross Section Diagnostic Measurements", *IEEE Trans. on Ins. and Meas.*, vol. IM-33, no. 3, Sep. 1984
- [20] MATLAB R2007a, The Mathworks Corporation, 2007

ÖZGEÇMİŞ

Hakkı Nazlı, 1982 yılında İstanbul'da doğmuştur. 2001 yılında Vefa Lisesi'nden, 2005 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun olmuş ve elektronik mühendisi unvanını almıştır.

2005 yılından itibaren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi (TÜBİTAK MAM) Bilişim Teknolojileri Enstitüsü'nde GPR ve yüzey dalgalı HF radar projelerinde araştırmacı olarak görev yapmaktadır. Araştırma alanları, hesaplamalı elektromanyetik, elektromanyetik yayılım ile ilgili ölçümler, radar anten tasarımı, radar görüntüleme ve görüntüleme algoritmalarının geliştirilmesidir.