

**İKİ BOYUTLU KOMPLEKS KAFES YAPISI İLE YÜKSEK
ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ TERS YAPAY AÇIKLIKLI RADAR
GÖRÜNTÜLEME**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMENTASYON MERKEZİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Işın Yazgan ERER
504932020**

104269

104269

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 Aralık 2000
Tezin Savunulduğu Tarih : 2 Mart 2001**

Tez Danışmanı :

Prof.Dr. Ahmet Hamdi KAYRAN

Diğer Jüri Üyeleri

Prof.Dr. İbrahim AKDUMAN (İ.T.Ü.)

Doç.Dr. Sedef KENT (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Metin YÜCEL (Y.T.Ü.)

Doç.Dr. Aysın ERTÜZÜN (B.Ü.)

MART 2001

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında değerli önerileri ile beni yönlendiren ve her zaman yardımcı olan hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Hamdi KAYRAN'a ve desteklerini esirgemeyen aileme ve meslektaşlarıma içten teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2000

Işın Yazgan ERER



İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş ve Problemin Tanıtımı	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	3
1.3. Konu İle İlgili Yapılmış Diğer Çalışmalar	5
2. DOĞRUSAL ÖNGÖRÜ İLE TERS YAPAY AÇIKLIKLI RADAR GÖRÜNTÜLEME	8
2.1. Problemin Geometrisi ve Fourier Yaklaşımı	8
2.2. Parametrik Yaklaşım	11
2.3. 1-B Doğrusal Öngörü Denklemlerinin Oluşturulması	12
2.4. 1-B Doğrusal Öngörü Denklemlerinin En Küçük Kareler Yöntemi İle Çözümü	16
2.5. 2-B Doğrusal Öngörü Denklemlerinin Oluşturulması	18
2.6. 2-B Doğrusal Öngörü Denklemlerinin En Küçük Kareler Yöntemi İle Çözümü	24
3. 2-B KOMPLEKS KAFES ÖNGÖRÜ SÜZGEÇLERİ İLE GERİ SAÇILAN ALANLARIN MODELLENMESİ	27
3.1. 1-B Doğrusal Öngörü Denklemlerinin Burg Yöntemi İle Çözülmesi	27
3.1.1. Levinson algoritması	27
3.1.2. 1-B Kafes öngörü süzgeçleri	28
3.1.3. Burg algoritmasının adımları	30
3.2. 2-B Doğrusal Öngörü Denklemlerinin Yinelemeli Olarak Çözülmesi İçin Önerilen 2-B Yöntem	32
3.2.1. Giriş	32
3.2.2. 2-B Dik kompleks kafes öngörü süzgeçleri	34
4. 2-B KOMPLEKS KAFES ÖNGÖRÜ SÜZGEÇLERİ İLE YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ ISAR GÖRÜNTÜLEME	39
4.1. Giriş	39
4.2. Çeyrek Düzlem Model İçin Hata Aktarım İşlevlerinin Elde Edilmesi	39
4.3. Hedefin Konum Bilgisinin Elde Edilmesi	41
4.4. Hedefin Genlik Bilgisinin Elde Edilmesi	43

4.5. Sayısal Uygulama Sonuçları	43
4.5.1. Yapay hedef için sayısal uygulama sonuçları	43
4.5.2. Deneysel hedef için sayısal uygulama sonuçları	54
5. 2-B VERİ GENİŞLETME İLE YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ ISAR GÖRÜNTÜLEME	62
5.1. Giriş	62
5.2. 1-B Veri Genişletme	62
5.3. 2-B Veri Genişletme	63
5.4. 2-B Kafes Öngörü Süzgeçlerinin Kararlı Duruma Getirilmesi	66
5.5. 2-B Veri Genişletme Algoritmasının Adımları	68
5.6. Sayısal Uygulama Sonuçları	69
5.6.1. Yapay hedef için sayısal uygulama sonuçları	69
5.6.2. Deneysel hedef için sayısal uygulama sonuçları	74
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	79
KAYNAKLAR	84
EK A	88
EK B	90
ÖZGEÇMİŞ	91

KISALTMALAR

SAR	: Yapay açıklıklı radar
ISAR	: Ters yapay açıklıklı radar
1-B	: Bir boyutlu
2-B	: İki boyutlu
EM	: Elektromagnetik
AR	: Özyinelemeli
S/N	: İşaret/Gürültü
SVD	: Tekil özdeğerlere ayrıştırma
ARMA	: Özbağımlı-kayan ortalamalı
LS	: En küçük kareler



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1. Yapay hedef için hata değerleri	60
Tablo 4.2. Deneysel hedef için hata değerleri	61
Tablo 4.3. Yöntemlerin işlem yükü	61
Tablo 5.1. 1-B ve 2-B veri genişletme yöntemlerinin işlem yükü	73
Tablo 5.2. Yapay hedef için hata değerleri	73
Tablo 5.3. Deneysel hedef için hata değerleri	78



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Görüntüleme sisteminin geometrisi	8
Şekil 2.2 : 2-B hata süzgeçlerinin ilerleme yönleri	19
Şekil 2.3 : Çeyrek düzlem destek bölgeleri	20
Şekil 3.1 : 1-B kafes süzgeç yapısının m . adımı	30
Şekil 3.2 : 2-B destek bölgesi için olası sıralamalar	35
Şekil 4.1 : Yapay hedef dağılımı	44
Şekil 4.2 : Yapay hedef için üniform ağırlıklı ters Fourier dönüşümü ile oluşturulan radar görüntüsü (gürültüsüz durum)	45
Şekil 4.3 : Yapay hedef için Hamming ağırlıklı ters Fourier dönüşümü ile oluşturulan radar görüntüsü (gürültüsüz durum)	45
Şekil 4.4 : En küçük kareler çözümünden elde edilen öngörü katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi (gürültüsüz durum)	47
Şekil 4.5 : En küçük kareler çözümünden elde edilen öngörü katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi ($S/N = 10dB$)	47
Şekil 4.6 : 1. Derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi (gürültüsüz durum)	49
Şekil 4.7 : 2. Derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi (gürültüsüz durum)	49
Şekil 4.8 : 3. Derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi (gürültüsüz durum)	50
Şekil 4.9 : 1. Derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi ($S/N = 10dB$)	50
Şekil 4.10 : 2. Derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi ($S/N = 10dB$)	51
Şekil 4.11 : 3. derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi ($S/N = 10dB$)	51
Şekil 4.12 : 3. derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{ASHP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi (gürültüsüz durum)	53
Şekil 4.13 : 3. derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{ASHP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi ($S/N = 10dB$)	53
Şekil 4.14 : Deneysel hedef dağılımının geometrisi	55

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 4.15 : Deneysel hedef için üniform ağırlıklı ters Fourier dönüşümü ile oluşturulan radar görüntüsü	56
Şekil 4.16 : Deneysel hedef için Hamming ağırlıklı ters Fourier dönüşümü ile oluşturulan radar görüntüsü	56
Şekil 4.17 : Deneysel hedef için En küçük kareler çözümünden elde edilen öngörü katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi	58
Şekil 4.18 : Deneysel hedef için SVD yönteminden elde edilen öngörü katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi	58
Şekil 4.19 : Deneysel hedef için 3. Derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi	59
Şekil 5.1 : Ölçüm verisinin 2-B uzayda genişletilmesi: a) 2-B uzayın alt bölgelere ayrıştırılması, b) öngörünün ilerleme yönü	66
Şekil 5.2 : 2-B veri genişletme algoritması	68
Şekil 5.3 : Yapay hedef için geniş frekans bandı ve gözlem açısı aralığından klasik yöntem ile oluşturulan radar görüntüsü (gürültüsüz durum)	70
Şekil 5.4 : Yapay hedef için genişletilmiş veriden oluşturulan radar görüntüsü (Burg yöntemi, genişletme faktörü=4, gürültüsüz durum)	71
Şekil 5.5 : Yapay hedef için genişletilmiş veriden oluşturulan radar görüntüsü (2-B kafes öngörü süzgecine dayalı yeni yöntem, genişletme faktörü=4, gürültüsüz durum)	71
Şekil 5.6 : Yapay hedef için genişletilmiş veriden oluşturulan radar görüntüsü (Burg yöntemi, genişletme faktörü=4, $(S/N = 10dB)$)	72
Şekil 5.7 : Yapay hedef için genişletilmiş veriden oluşturulan radar görüntüsü (2-B kafes öngörü süzgecine dayalı yeni yöntem, genişletme faktörü=4, $(S/N = 10dB)$)	72
Şekil 5.8 : Deneysel hedef için dar frekans bandı ve gözlem açısı aralığından klasik yöntem ile oluşturulan radar görüntüsü	74
Şekil 5.9 : Deneysel hedef için geniş frekans bandı ve gözlem açısı aralığından klasik yöntem ile oluşturulan radar görüntüsü	75
Şekil 5.10 : Deneysel hedef için ölçüm verisi genişletilerek oluşturulan radar görüntüsü (Burg yöntemi, öngörü derecesi=3, genişletme faktörü=4)	76
Şekil 5.11 : Deneysel hedef için ölçüm verisi genişletilerek oluşturulan radar görüntüsü (Burg yöntemi, öngörü derecesi=8, genişletme faktörü=4)	76
Şekil 5.12 : Deneysel hedef için ölçüm verisi genişletilerek oluşturulan radar görüntüsü (2-B kafes süzgeç yöntemi, öngörü derecesi=8, genişletme faktörü=4)	77

SEMBOL LİSTESİ

$G(f, \theta)$	: f frekansı ve θ gözlem açısı için alıcıda ölçülen geri saçılan alan
$W(f, \theta)$	: Pencere fonksiyonu
$g(x, y)$	: Hedefin yansıtıcılık fonksiyonu
c	: Dalga hızı
f_x, f_y	: Konumsal frekans uzayı bileşenleri
$G(k_1, k_2)$	: Konumsal frekans uzayında tanımlı geri saçılan alan örnekleri
$v(k_1, k_2)$	: Ölçüm sisteminden kaynaklanan gürültü
$f^{(m)}, b^{(m)}$	: m . derece ileri ve geri yönde öngörü hatası
$S(f)$	: Güç spektrumu
N	: Örnek sayısı
M	: 1-B süreç için öngörü derecesi
L	: 2-B süreç için öngörü derecesi
$M_{FQ}^{(L)}, M_{SQ}^{(L)}, \tilde{M}_{FQ}^{(L)}, \tilde{M}_{SQ}^{(L)}$	: 1.,2.,3.,4. Çeyrek düzlem için öngörü uzayı
$D_{FQ}^{(L)}, D_{SQ}^{(L)}, \tilde{D}_{FQ}^{(L)}, \tilde{D}_{SQ}^{(L)}$	: 1.,2.,3.,4. Çeyrek düzlem için öngörü destek bölgesi
$a_{FQ}^{(L)}, a_{SQ}^{(L)}, \tilde{a}_{FQ}^{(L)}, \tilde{a}_{SQ}^{(L)}$	: 1.,2.,3.,4. Çeyrek düzlem model için öngörücü katsayıları
$e_{FQ}^{(L)}, e_{SQ}^{(L)}, \tilde{e}_{FQ}^{(L)}, \tilde{e}_{SQ}^{(L)}$	: 1.,2.,3.,4. Çeyrek düzlem model için öngörü hataları
R	: Özilişki matrisi
r	: Öngörülen süreç ile geçmiş değerler uzayı arasındaki çapraz ilişki
$f_0^{(m)}$	: Sıfırıncı örneğin kendinden sonraki m örnek ile öngörülmesinde yapılan öngörü hatası
$a_0^{(m)}$	: m . derece ileri yönde öngörü hata süzgeci ağırlık katsayıları
$b_m^{(m)}$	: m . örneğin kendinden önce gelen m örnek ile öngörülmesinde yapılan öngörü hatası
$g_m^{(m)}$	: m . derece geri yönde öngörü hata süzgeci ağırlık katsayıları
$\Gamma_{b_p}^{(n)}, \Gamma_{p-n}^{(n)}$	: İleri ve geri yönde kafes yansıma katsayıları
$a_{p-n}^{(n)}, g_p^{(n)}$	: İleri ve geri yönde öngörü hata süzgeci katsayı ağırlıkları
$A_{FQ}^{(L)}, A_{SQ}^{(L)}, \tilde{A}_{FQ}^{(L)}, \tilde{A}_{SQ}^{(L)}$	: 1.,2.,3.,4. Çeyrek düzlem destek bölgesi öngörü hata süzgeci hata aktarım işlevleri
$P_{QP}(x, y)$	: Çeyrek düzlem model için saçıcıların konum fonksiyonu
$P_{ASHP}(x, y)$	: Simetrik olmayan yarı düzlem destek bölgesi model için saçıcıların konum fonksiyonu
Δf	: Konumsal frekans artım aralığı

İKİ BOYUTLU KOMPLEKS KAFES YAPISI İLE YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ TERS YAPAY AÇIKLIKLIL RADAR GÖRÜNTÜLEME

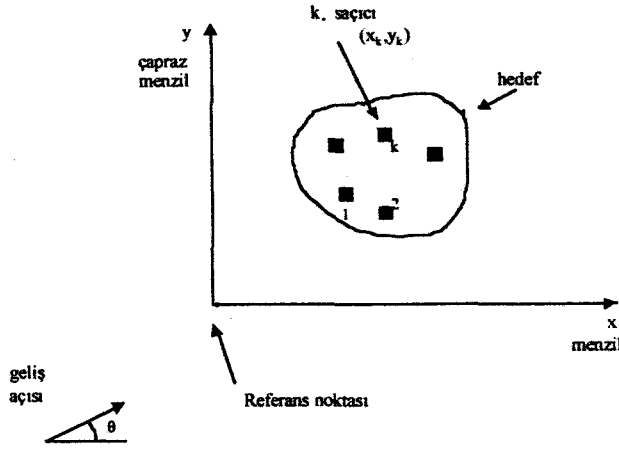
ÖZET

Klasik radar görüntüleme yöntemleri 2-B kartezyen geri saçılan alan verisinin 2-B ters Fourier dönüşüne ya da 1-B kutupsal frekans cevabının 1-B ters Fourier dönüşümünün geri izdüşüm algoritması ile birlikte kullanılmasına dayanır. Bu yöntemlerde, menzil çözünürlüğü radarın taradığı frekans bandı genişliği ile orantılıdır ve çapraz menzil çözünürlüğü de gözlem açısı aralığı ile ters orantılıdır. Bu nedenle, istenilen çözünürlüğe ulaşabilmek için radar geniş bir frekans bandına sahip olmalı ve hedef geniş bir gözlem açısı aralığında incelenmelidir. Ancak, pek çok uygulamada radar sisteminin frekans bandı sınırlıdır ve hedef istenilen açı aralığında izlenemeyebilir. Bu sınırlamalar düşük çözünürlüklü radar görüntüleri elde edilmesine neden olur.

Bir hedefin yüksek çözünürlüklü radar görüntüsünün oluşturulabilmesi için, sınırlı sayıda ölçüm verisine modern spektral kestirim tekniklerinin uygulanabildiği bilinmektedir. Bu teknikler arasında doğrusal öngörü yöntemi önemli yer tutar. Bu konudaki ilk çalışmalar 1-B öngörü tekniklerinin geri izdüşüm algoritması ya da hibrit tekniklerle kullanılması veya 2-B öngörü denklemlerinin en küçük kareler yaklaşımı ile çözülmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. En küçük kareler yaklaşımı her öngörü derecesi için iki adet denklem sisteminin çözülmesini gerektirir ve ölçüm sisteminden kaynaklanan gürültüye yüksek oranda duyarlıdır.

Bu tez çalışmasında, en küçük kareler yaklaşımının sakıncalarını ortadan kaldırmak için yüksek çözünürlüklü yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem, 2-B geri saçılan alan verisinin, bu tezde kompleks formu ilk defa tanımlanan 2-B dik kafes yapısı ile 2-B modellenmesine dayanmaktadır. Sözde ters alma (pseudo-inverse) teknikleri ile iki ayrı denklem sisteminin çözülmesi yerine geri saçılan alan verisini dört çeyrek düzlemde modellemek için tek bir özyinelemeli kafes yapısı kullanılmıştır. Önerilen yöntem, Burg yönteminin 2-B geliştirilmesi olarak düşünülebilir.

Yüksek frekans bölgesinde, bir radar hedefinin sonlu sayıda saçıcı merkezin ve bu merkezler arası girişimlerin toplamı şeklinde temsil edilebileceği yaklaşımı çeşitli araştırmalarda kullanılmıştır. Bu yaklaşımda bir hedeften geri saçılan toplam işaret, her bir saçıcı merkezden geri saçılan kompleks işaretlerin toplamı olarak ifade edilebilir. K adet ayrık saçıcı merkezden oluşan bir hedef için görüntüleme sisteminin geometrisi Şekil. 1 de verilmiştir.



Şekil 1 Görüntüleme sisteminin geometrisi

Hedeften geri saçılan toplam alan,

$$G(k_1, k_2) = \sum_{k=1}^K G_k(0,0) z_{x_k}^{k_1} z_{y_k}^{k_2} + v(k_1, k_2) \quad (1)$$

verilebilir. Burada $G_k(0,0)$ konumsal frekans başlangıç değerleri için k . saçıcı merkezden geri saçılan alanı, $v(k_1, k_2)$ ise ölçüm gürültüsünü göstermektedir. $z_{x_k} = e^{j4\pi/c\Delta f_x x_k}$, $z_{y_k} = e^{j4\pi/c\Delta f_y y_k}$ alınmıştır.

Bu tez çalışmasında, durağan ve özbağlanımlı varsayılan 2-B geri saçılan alan verisinin modellenmesi için 2-B kafes yapısının kullanılması önerilmiştir. 2-B geri saçılan alan verisi $G(k_1, k_2)$ komşu örnek noktaların doğrusal bileşimi ile öngörülmüştür. İndislemeyi basitleştirmek için, 2-B destek bölgesi içindeki noktalar yatay ve dikey yönler kullanılarak 1-B dizi şeklinde sıralanır.

$$G_{p,q}(k_1, k_2) = [G((k_1, k_2) - p) \ G((k_1, k_2) - p - 1) \cdots G((k_1, k_2) - q)]^T \quad (2)$$

$G((k_1, k_2) - i)$, $G(k_1, k_2)$ den i eleman sonra gelen örneği göstermektedir. Destek bölgesindeki sıfıncı örneğin kendinden önceki m örnek değeri kullanılarak öngörülmesi durumunda yapılan ileri yönde öngörü hatası,

$$f_0^{(m)}(k_1, k_2) = \mathbf{a}_0^{(m)T} \mathbf{G}_{0,m}(k_1, k_2) \quad (3)$$

olarak tanımlanır ve öngörü destek bölgesindeki m inci örneğin kendinden sonraki m örnek cinsinden tanımlanması durumunda yapılan geri yönde öngörü hatası,

$$b_m^{(m)}(k_1, k_2) = \mathbf{g}_m^{(m)T} \mathbf{G}_{0,m}(k_1, k_2) \quad (4)$$

ile verilir. Burada $a_0^{(m)}$ and $g_m^{(m)}$ ileri ve geri yönde öngörü hata süzgeçlerinin katsayı ağırlıklarıdır. İleri ve geri yönde öngörü hata alanlarının tanımlanmasında kullanılan üst indis öngörü süzgecinin derecesini, alt indis ise öngörülen elemanı temsil eder. Toplam geri saçılan alan $G(k_1, k_2)$, 2-B dik kafes süzgeç girişine $1 \leq k_1, k_2 \leq N$ için uygulanır. Öngörü hata alanlarının başlangıç değerleri olarak,

$$f_p^{(0)}(k_1, k_2) = b_p^{(0)}(k_1, k_2) = G((k_1, k_2) - p) \quad (5)$$

$$p = 0, 1, 2, \dots, M$$

alınır. Algoritma sıfıncı dereceden başlar, M .dereceye kadar devam eder. n . adımdaki ileri ve geri yönde öngörü hata alanları $(n-1)$.derecedeki hatalar cinsinden,

$$\begin{bmatrix} f_{p-n}^{(n)}(k_1, k_2) \\ b_p^{(n)}(k_1, k_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_{b_p}^{(n)*} \\ \Gamma_{f_{p-n}}^{(n)*} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{p-n}^{(n-1)}(k_1, k_2) \\ b_p^{(n-1)}(k_1, k_2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$p = 1, 2, \dots, M \quad \text{ve} \quad n = 1, 2, \dots, p$$

bağıntısı ile verilir. İleri ve geri yönde yansıma katsayıları $\Gamma_{b_p}^{(n)}$ ve $\Gamma_{f_{p-n}}^{(n)}$, öngörü hata alanlarını öngörü süzgeç katsayılarına göre enküçükletirerek bulunur. $A_0^{(m)}(z_1, z_2)$ ve $G_m^{(m)}(z_1, z_2)$ birinci ve ikinci çeyrek düzlem destekli öngörü süzgeçlerinin hata aktarım işlevlerini gösterir ve aşağıdaki gibi verilir.

$$\begin{bmatrix} A_{p-n}^{(n)}(z_1, z_2) \\ G_p^{(n)}(z_1, z_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_{b_p}^{(n)*} \\ \Gamma_{f_{p-n}}^{(n)*} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{p-n}^{(n-1)}(z_1, z_2) \\ G_p^{(n-1)}(z_1, z_2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$p = 1, 2, \dots, M \quad \text{ve} \quad n = 1, 2, \dots, p$$

Bu tez çalışmasında yüksek çözünürlüklü Ters yapay açıklıklı radar görüntüleme için iki yeni yöntem önerilmiştir. İlk yöntem güç spektrumuna dayanmaktadır. Oluşturulan hata aktarım işlevlerinin sıfırlarının saçıcı merkezlerin konumlarına karşı geldiği gösterilebilir. Bu durumda radar görüntüsü, birinci ve ikinci çeyrek düzlem modeller birleştirilerek,

$$P_{QP}(x, y) = \frac{1}{|A_0^{(M)}(z_1, z_2)|^2 + |G_M^{(M)}(z_1, z_2)|^2} \quad (8)$$

ya da simetrik olmayan yarı düzlem model kullanılarak,

$$P_{ASHP}(x, y) = \frac{1}{|A_0^{(M)}(z_1, z_2)|^2} \quad (9)$$

şeklinde tanımlanan fonksiyonların çizdirilmesiyle oluşturulur. Bu ifadede $z_1 = e^{j4\pi/c\Delta f_x x}$, $z_2 = e^{j4\pi/c\Delta f_y y}$ ve $M = (L+1)^2 - 1$ destek bölgesi içindeki eleman sayısıdır. Hesaplama adımında, (x, y) hedefin bir saçıcı merkezi ile karşılaştığında, payda terimi çok küçük değer alır, $P(x, y)$ fonksiyonu tepe değer oluşturur.

Yukarıda açıklanan yöntem ile genlik bilgisi bulunamadığı için, geliştirilen ikinci yöntemde ölçüm bölgesi dışındaki verinin 2-B kafes yapısı kullanılarak 2-B olarak modellenmesi önerilmiştir. Bu yöntemde süzgeçlerin kararlılığı garanti edilemediğinden kararlılığı sağlayacak şekilde katsayıların değiştirilmesi gerekir. Bu değiştirilmiş katsayılar 2-B geri saçılan alan verisinin 2-B genişletilmesi için kullanılmıştır. Genişletilmiş veri matrisinin 2-B ters Fourier dönüşümü alınarak, yüksek çözünürlüklü ISAR görüntüsü elde edilmiştir. Önerilen algoritma geri saçılan alanların 2-B genişletilmesine dayanmaktadır. Oysa klasik genişletme algoritmaları verinin, konumsal frekans uzayında (f_x, f_y) için ayrıştırılabilir olmasından yararlanarak veri matrisinin satır ve sütunlarını ayrı ayrı işler. Önerilen yöntem nokta saçıcı modeliyle tanımlanamayacak karmaşık hedefler için daha gerçekçi sonuçlar verir. İşlem yükü verinin büyüklüğüne yada genişletme faktörüne bağlı değildir. Daha da önemlisi, önerilen yöntem genlik bilgisini korur ve gürültüden etkilenmez.

Yapay ve deneysel veri için elde edilen sonuçlar, bu tez çalışmasında önerilen yüksek çözünürlüklü görüntüleme algoritmalarının hem menzil hem de çapraz menzil için iyileştirme sağladığını göstermiştir.

HIGH RESOLUTION INVERSE SYNTHETIC APERTURE RADAR IMAGING BY TWO DIMENSIONAL COMPLEX LATTICE STRUCTURE

SUMMARY

Classical radar imaging methods are based on 2-D inverse Fourier transform (IFT) of 2-D Cartesian backscattered data or on the use of a backprojection algorithm combined with 1-D inverse Fourier transform of the the polar frequency data. In these methods, the range resolution is inversely proportional with the bandwidth and the cross-range resolution is inversely proportional with the observed angular sector. To achieve the desired resolution, therefore, the radar should have a large bandwidth and the target should be observed over a large angular sector. However, in many practical applications, the radar system has a limited frequency band and the target can not be observed over the desired angular sector. These limitations lead to radar images with low resolution.

It is well known that a high resolution radar image of a target can be generated by applying modern spectral estimation techniques to the measured limited data. Among these techniques, linear prediction methods take an important place. Earlier research that has been carried out in this area, was focused mainly on the use of 1-D prediction techniques combined with backprojection algorithm and hybrid methods, or the solution of 2-D linear prediction equations in the least square sense. The least square approach needs the solution of two different sets of equations for each prediction order and is highly sensitive to the measurement noise.

In this thesis, a new high resolution method to overcome the difficulties of the least-square approach is proposed. The proposed method is based on 2-D modeling of the 2-D backscattered data using a 2-D orthogonal lattice filter which is defined in the complex form for the first time in this thesis. Instead of solving two different sets of linear equations by pseudo-inverse matrix inversion techniques, a single autoregressive lattice structure is used to model the backscattered data for four quarters. The proposed method can be considered as the generalization of the well-known Burg method to 2-D case.

In the high frequency region, a radar target can be considered as a collection of a finite number of scattering centers and scattering centers interactions. This approach was used in quite a number of research studies. The coherent scattered signal from such a target can be represented as the sum of complex scattered signals from each scattering center. The geometry of the imaging system for a target represented by K discrete scattering centers is shown in Figure 1.

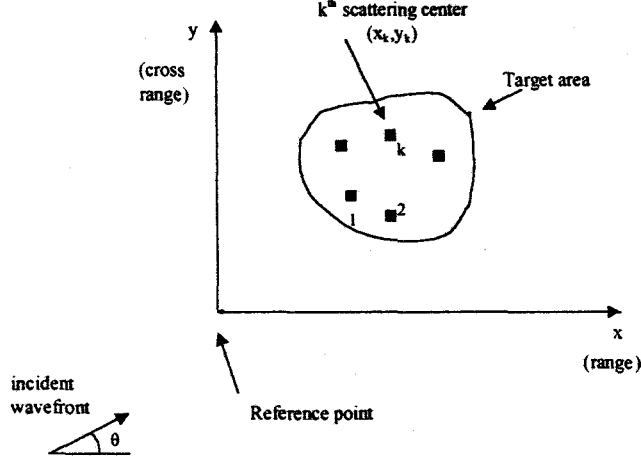


Fig.1 Geometry of the imaging system

The total backscattered field from this target is given as,

$$G(k_1, k_2) = \sum_{k=1}^K G_k(0,0) z_{x_k}^{k_1} z_{y_k}^{k_2} + v(k_1, k_2) \quad (1)$$

where $G_k(0,0)$ is the scattered field for the k th scattering center at initial Cartesian frequencies, $v(k_1, k_2)$ is the measurement noise and $z_{x_k} = e^{j4\pi/c\Delta f_x x_k}$, $z_{y_k} = e^{j4\pi/c\Delta f_y y_k}$.

In this thesis, a 2-D lattice structure for the modeling of 2-D backscattered radar data is proposed, assuming that the 2-D backscattered fields constitute a stationary and autoregressive process. 2-D backscattered field $G(k_1, k_2)$ is predicted by a linear combination of its neighboring samples. To make indexing simple, the elements in the 2-D prediction region are ordered into 1-D array. The indexing in the prediction region is defined as

$$\mathbf{G}_{p,q}(k_1, k_2) = [G((k_1, k_2) - p) \ G((k_1, k_2) - p - 1) \cdots G((k_1, k_2) - q)]^T \quad (2)$$

with $G((k_1, k_2) - i)$ denoting the i th element behind $G(k_1, k_2)$. The forward prediction error associated with the prediction of the zeroth sample from the previous m samples within the prediction region is defined as

$$f_0^{(m)}(k_1, k_2) = \mathbf{a}_0^{(m)T} \mathbf{G}_{0,m}(k_1, k_2) \quad (3)$$

and the backward prediction error associated with the prediction of the m th sample from the m samples prior to it in the prediction region is given as

$$b_m^{(m)}(k_1, k_2) = \mathbf{g}_m^{(m)T} \mathbf{G}_{0,m}(k_1, k_2) \quad (4)$$

where $a_0^{(m)}$ and $g_m^{(m)}$ are the tap weight coefficients of the forward and backward prediction error filters. In the definition of forward and backward prediction error fields, the superscript will be considered to be the order of the error filters, i.e., the number of the points in the prediction region. On the other hand, the subscript denotes the number of the element to be predicted in the indexing scheme. The total backscattered field $G(k_1, k_2)$ is used as an input of the 2-D orthogonal lattice structure for $1 \leq k_1, k_2 \leq N$ starting with

$$f_p^{(0)}(k_1, k_2) = b_p^{(0)}(k_1, k_2) = G((k_1, k_2) - p) \quad (5)$$

for $p = 0, 1, 2, \dots, M$.

The analysis algorithm begins from the zeroth order and continues up to the M th order. The n th stage forward and backward prediction errors are given as

$$\begin{bmatrix} f_{p-n}^{(n)}(k_1, k_2) \\ b_p^{(n)}(k_1, k_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_{b_p}^{(n)*} \\ \Gamma_{f_{p-n}}^{(n)*} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{p-n}^{(n-1)}(k_1, k_2) \\ b_p^{(n-1)}(k_1, k_2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$p = 1, 2, \dots, M$ and $n = 1, 2, \dots, p$

The reflection coefficients $\Gamma_{b_p}^{(n)}$ and $\Gamma_{f_{p-n}}^{(n)}$ are calculated so as to minimize the prediction error fields. $A_0^{(m)}(z_1, z_2)$ and $G_m^{(m)}(z_1, z_2)$ denote the first- and second-quadrant model prediction error transfer functions, respectively and can be described as

$$\begin{bmatrix} A_{p-n}^{(n)}(z_1, z_2) \\ G_p^{(n)}(z_1, z_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_{b_p}^{(n)*} \\ \Gamma_{f_{p-n}}^{(n)*} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{p-n}^{(n-1)}(z_1, z_2) \\ G_p^{(n-1)}(z_1, z_2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$p = 1, 2, \dots, M$ and $n = 1, 2, \dots, p$

In this thesis, two different methods for high resolution ISAR imaging are proposed. The first method is based on the power spectral density. It can be shown that the zeroes of the resulting transfer functions correspond to the locations of the scattering centers. Thus, the radar image is given by the combination of the first- and second-quarter plane models as,

$$P_{QP}(x, y) = \frac{1}{|A_0^{(M)}(z_1, z_2)|^2 + |G_M^{(M)}(z_1, z_2)|^2} \quad (8)$$

or by asymmetric half plane model as,

$$P_{ASHP}(x, y) = \frac{1}{|A_0^{(M)}(z_1, z_2)|^2} \quad (9)$$

where $z_1 = e^{j4\pi/c\Delta f_x x}$, $z_2 = e^{j4\pi/c\Delta f_y y}$ and $M = (L+1)^2 - 1$ is the number of points in the prediction support. In the computation step, when (x, y) coincides with a scattering center of the target, the denominator will become small, then the image function $P_{QP}(x, y)$ will have high peaks at the positions of the target scattering centers.

As the method described above does not provide amplitude information, in the second method, the available data is extrapolated using 2-D orthogonal lattice predictors. As this technique does not guarantee a stable prediction filter, the prediction parameters should be modified to ensure the stability. These modified parameters are used for

2-D extrapolation of 2-D Cartesian backscattered data. Then, high resolution Inverse synthetic aperture radar (ISAR) image is obtained by 2-D inverse Fourier transform of the extended data matrix. The proposed algorithm is based on 2-D extrapolation of the backscattered data, while other existing algorithms extrapolate range or cross-range profiles separately due to the separability assumption of the input data. The proposed method will provide more reliable results for the experimental and real world targets, which cannot be described by point target model. The complexity decreases considerably as data size or extrapolation factor increases. Moreover, this method preserves amplitude information and is not effected by noise.

Results obtained for simulated and experimental targets show that high resolution algorithms proposed in this study provide an enhancement in resolution both for range and cross-range.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş ve Problemin Tanıtımı

Yapay açıklı radar (SAR), uzaktan algılama amacıyla uzun yıllardır kullanılan bir mikrodalga radar sistemidir. Ters yapay açıklıklı radar ya da kısaca ISAR (Inverse synthetic aperture radar) hareketli cisimleri sabit veya hareketli radarlar ile görüntülemeye yarayan yapay açıklıklı radarın bir çeşididir. ISAR, bir cismi görüntülemek üzere SAR da olduğu gibi radarı hareket ettirmek yerine özellikle hedefin iç açısal veya yer değiştirme hareketini kullanır. ISAR daki ters (inverse) sözcüğü radarın cisim etrafında dönmesi yerine cismin dönmesi ve radarın sabit kalması ile oluşan yapay açıklığı ifade eder [1].

ISAR sistemi ile cisimlerin görüntülenmesi tipik bir elektromagnetik ters (inverse) problemdir. Bu problemde, yapısı bilinen işaret ile görüntülenmek istenen cisim uzaktan aydınlatıldığında cisimden yansıyan ve saçılan alanlar radarın alıcısı tarafından algılanır. Bu işlemde amaç, cisim tarafından değişikliğe uğratılmış bulunan işareti kullanarak bu değişikliğe neden olan mekanizmanın (konum, şekil, fiziksel özellikler) karakteristiklerini belirlemektir. Bu tür ters problemler günümüzde çok değişik alanlarda araştırma ve keşif amaçlı kullanılmaktadır. Örneğin, jeolojik ve jeofizik araştırmalarda, tahribatsız muayenelerde, biomedikal tanı sistemlerinde kullanılan görüntüleme yöntemleri benzer özelliklere sahiptir.

ISAR görüntülenmesinde kullanılan yapay açıklık, hedeften geriye saçılan işaretlerin uyumlu olarak toplanmasına olanak verir. Radarın yarattığı uzak radyasyon alanının yapısı yaklaşık olarak küreseldir. ISAR da ters problemin dayandığı temel, aydınlatılan cismin fiziksel boyutunun menzil mesafesi yanında küçük olması nedeniyle küresel dalga yerine düzlemsel dalga yaklaşımının kullanılmasıdır. Radarın bakış açılarında, yansıtma fonksiyonunun integralleri şeklinde bilgi toplanır. Bunlar, aranan görüntünün frekans uzayında kutupsal frekans bileşenlerine dönüştürülür [2-4].

Bir ISAR görüntüsü, hedeften dönen radar işaretleri kullanarak elde edilmiş ve hedef içindeki saçınım mekanizmaları hakkında bilgi içeren bir çeşit yapay resim olarak değerlendirilebilir. Yeteri kadar yüksek frekanslarda hedefin sonlu sayıda saçıcı merkezden oluştuğu kabul edilir. Radar görüntüleme algoritmalarının amacı bu saçıcı merkezlerin konum ve genlik bilgilerini çıkartmaktır [5]. ISAR ile görüntü elde edilmesinde kullanılan yaklaşımlar Fourier dönüşümüne dayalı klasik yöntemler ve son yıllarda geliştirilen modern spektrum kestirimine dayalı parametrik yöntemler olarak iki ana grupta toplanabilir [6].

Görüntü oluşturmada klasik yaklaşım, cismin 2-B (2-boyutlu) yansıtıcılık işlevi ile 2-B frekans yanıtının Fourier dönüşüm çifti oluşturmaya dayanır [5-9]. Hedefin ölçülen 2-B frekans cevabından ters dönüşüm ile yansıtıcılık işlevi ya da başka bir deyişle dürtü yanıtı elde edilebilir. Fourier dönüşümüne dayanan klasik görüntüleme algoritmalarında hedefe ait geri saçılan alan verileri kartezyen (dik) koordinat sistemine aktarılıp radar görüntüsünü oluşturan yansıtıcılık fonksiyonu 2-B ters Fourier dönüşümü ile bulunur ya da her hangi bir gözlem açısı için kutupsal koordinatlarda tanımlanmış geri saçılan alan verileri 1-B ters Fourier dönüşümleri alınarak geri izdüşüm algoritmasıyla birleştirilir [5]. Fourier yaklaşımı saçıcı merkezlerin tam olarak ayrıştırılabildiği durumlarda diğer yöntemlere tercih edilir. Elde edilen radar görüntüsündeki tepeler saçıcı merkezlerin konum kestirimini sağlar. Tepelerin genlikleri ise cisme ait saçıcı merkezlerin toplam saçılan alanın oluşumuna katkılarını gösterir. Ancak bu yöntemler Fourier yaklaşımına dayandıklarından, kullanılan işaretin band genişliği menzil çözünürlüğünü, gözlem aralığı ise çapraz-menzil çözünürlüğünü sınırlar. Ayrıca frekans uzayında sadece belirli bir bölgenin kullanılmasının yarattığı pencereleme etkisi konum uzayında yüksek genlikli yan loblara neden olur. Bu durumda zayıf saçıcılara ait yanıtlar kuvvetli saçıcıların yan loblarıyla örtüşerek gözükmebilirler. Yan lob etkisini gidermek için dönüşüm öncesi, frekans domeni verisi daha yumuşak geçişli pencere fonksiyonlarıyla örneklenerek yan loblar bastırılabilir. Ancak bu durumda radar görüntüsünün çözünürlüğü daha da azalır.

Yüksek frekanslarda ve dar bandlı işaret varsayımı ile hedeften geri saçılan alanlar bir dizi karmaşık üstel fonksiyonun toplamı olarak gösterilebilir [10]. Bu durumda görüntüleme problemi üstel fonksiyonların parametrelerinin kestirimine indirgenir. Bu parametrelerin kestirimi için son yıllarda modern spektrum kestirim tekniklerine

dayanan pek çok yöntem önerilmiştir [11-29]. Bu konuda yapılmış araştırmalar arasında önemli bir yeri doğrusal öngörü yöntemleri tutar [11-13, 21-27]. Doğrusal öngörü yöntemlerinde model parametreleri doğrudan ölçüm verisinden en küçük kareler yöntemi (LS) ile hesaplanır. 1-B işaretler için, 1-B öngörü modelinin katsayılarının, matris tersi gerektirmeyen iteratif bir algoritmayla bulunmasını sağlayan Burg yöntemi önerilmiştir [5,25-27]. Ancak bu yöneme benzer bir yaklaşım 2-B işaretler için bulunmamaktadır.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının amacı, ISAR görüntüleme sistemi ile sınırlı veri elde edilebildiği durumda yüksek çözünürlüklü görüntü oluşturabilmek için doğrusal öngörü tekniklerine dayanan yeni bir görüntüleme algoritması geliştirmektir. Bu nedenle,

2-B geri saçılan alan değerleri, kompleks formu ilk defa bu tez çalışmasında tanımlanan 2-B kafes (lattice) yapısı kullanılarak modellenmiştir [30].

2-B dikgen kompleks kafes yapısına dayanan modelleme yönteminin üstünlükleri aşağıda özetlenmiştir:

- Hedef hakkında herhangi bir ön bilgi gerektirmez.
- Yöntem 2-B ve kompleks yapıdadır.
- Matris tersi gerektirmez.
- Her öngörü derecesi için öngörü denklemlerinin yeniden oluşturulması gerekmez.
- Ölçüm sisteminden kaynaklanan gürültüden etkilenmez.
- İleri ve geri yönde öngörü için oluşturulan denklem sistemleri kafes yapısı içerisinde aynı anda çözülür.

Çalışmada 2-B kompleks kafes yapısı ile elde edilen öngörü model katsayıları kullanılarak iki farklı yüksek çözünürlüklü görüntüleme algoritması önerilmiştir.

İlk yöntem verinin 2-B spektrum tepeleri ile saçıcıların konumları arasında bire bir ilişki olmasına dayanmaktadır. Verilen herhangi bir öngörü derecesi için, öngörü katsayıları ile sürecin spektrumu tanımlanmakta ve çizdirilerek, 2-B ISAR görüntüsü bulunmaktadır. Bu yöntem ile spektrumun tepelerinden saçıcıların konum bilgisi çıkartılır, ancak tepelerin genlikleri saçıcıların saçma şiddeti ile orantılı olmadığından genlik bilgisi elde edilemez.

Önerilen ikinci yöntemde, 2-B kafes yapısından elde edilen katsayılar kullanılarak, gözlem bölgesi dışında bulunan bölge için ölçülememiş veri değerleri öngörülmüştür. Klasik yaklaşımların aksine 2-B destek bölgesi kullanılmıştır. 2-B ölçüm verisinin yakın komşuluk ilişkisi gözetilerek, 2-B genişletilmesi daha doğru bir yaklaşımdır. Genişletilmiş verinin pencereleme adımından sonra 2-B ters Fourier dönüşümü alınarak hedefin genlik bilgisi içeren yüksek çözünürlüklü ISAR görüntüsü elde edilmiştir. Önerilen yöntem daha geniş frekans ve açı aralığında ölçüm yapmaya denk olduğundan, Fourier metodunun sakıncalarını ortadan kaldırmaktadır.

Bildiğimiz kadarıyla, literatürde mevcut olan doğrusal öngörü yöntemlerinin kullanıldığı radar görüntüleme çalışmalarında, 2-B doğrusal öngörü denklemlerinin yinelemeli olarak çözülmesine yönelik bir yaklaşım kullanılmamıştır. Varolan yöntemler, 1-B doğrusal öngörü denklemlerinin Burg yöntemi ile yinelemeli olarak çözümü ya da 2-B doğrusal öngörü denklemlerinin en küçük kareler yöntemi kullanılarak çözülmesi ile sınırlıdır.

Yüksek çözünürlüklü radar görüntüleme konusunda yapılmış çalışmalarda, genelde 1-B spektral kestirim yöntemlerinin kullanılmasının ana nedeni, bu yöntemlerin 2-B durum için genelleştirilememiş olmalarından kaynaklanır. Bu durum, geliştirilen algoritmaların hibrit yapıda olmasına ya da geri izdüşüm algoritmasıyla birlikte kullanılmasına neden olmuş ve doğrusal öngörü teknikleri ile ulaşılabilecek çözünürlük oranına sınırlama getirmiştir.

2-B doğrusal öngörü denklemlerinin en küçük kareler yöntemi ile çözülmesi ise, matris tersi almayı gerektirir ve ölçüm sisteminden kaynaklanan gürültü etkisine duyarlıdır.

Bu çalışmada önerilen ve 2-B geri saçılan alanların, 2-B kompleks kafes yapısı ile modellenerek, 2-B öngörü denklemlerinin yinelemeli olarak çözülmesini içeren yaklaşım tamamen yenidir. Geri saçılan alan örnekleri, kompleks değerli olduğundan, 2-B kompleks kafes yapısı oluşturulmuştur. Ayrıca, doğrusal öngörü tekniklerinde model derecesinin seçimi büyük önem taşır. Model derecesinin küçük seçimi, birbirine yakın saçıcıların ayırdedilememesine neden olabilir. Model derecesinin gereğinden büyük seçimi ise, bir saçıcı merkezin parçalanarak iki ayrı

saçıcı şeklinde algılanmasının yanında işlem yükünün de gereksiz artmasına yol açar. Model derecesinin seçimi için belli bir kriter bulunmamaktadır. Kafes yapısında, ilk dereceden başlayarak, istenilen öngörü derecesine ulaşmaya kadar tüm öngörü dereceleri için katsayılar hesaplanır. Öngörü derecesi değişiminin, sonuç üzerine etkisi görülebildiğinden, model derecesi seçimi için daha sağlıklı bir karar verilebilir.

Yine bu çalışmada ilk kez olarak, 2-B geri saçılan alan verisinin 2-B kafes yapısı ile 2-B olarak genişletilmesi önerilmiştir. 2-B verinin satır ve sütunlarının ayrı ayrı genişletilmesine dayanan klasik yaklaşım, verinin konumsal frekans uzayında ayrıştırılabilir olması varsayımına dayanır. Ancak bu kabul her zaman doğru değildir ve 2-B bir işaretin yakın komşuluk ilişkisi dikkate alınarak genişletilmesi daha uygundur.

İkinci Bölümde problem geometrisi tanıtılmış, sonlu sayıda saçıcı merkezden oluşan bir hedef için geri saçılan toplam işaretin nasıl bulunduğu gösterilmiştir ve Üçüncü Bölüm için gereken doğrusal öngörü denklemleri çıkarılmıştır. Üçüncü Bölümde, bu tez çalışmasının ürünü olan 2-B kompleks kafes süzgeç yapısına ait formülasyon çıkartılmış ve yapı geri saçılan alan verisinin 2-B modellenmesi için kullanılmıştır. Çalışmanın Dördüncü Bölümünde, değişik öngörü dereceleri için güç spektrumu çizdirilerek hedef görüntüleri oluşturulmuş ve öngörü derecesine bağlı olarak sonuçlardaki değişim gözlenmiştir. Beşinci bölümde ilk defa bu çalışmada önerilen 2-B veri genişletmeye dayanan ikinci bir yüksek çözünürlüklü görüntüleme algoritması verilmiştir.

Tezde yüksek çözünürlüklü ISAR görüntüsü elde etmek için önerilen ve 2-B dik kompleks kafes yapısına dayanan her iki yaklaşım da hem yapay hem de deneysel hedefler için denenmiştir.

1.3 Konu ile İlgili Yapılmış Diğer Çalışmalar

Geri saçılan alanların modern spektrum kestirim yöntemleriyle modellenerek yüksek çözünürlük elde edilmesiyle ilgili pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu algoritmalar ile Klasik Fourier Yaklaşımına oranla çok daha sınırlı aralıkta ölçülmüş veriden yeterli çözünürlük elde edilmektedir [11-29].

Herhangi bir gözlem açısı için ölçülen veri, 1-B doğrusal öngörü yöntemiyle işlenerek, tüm açı aralığı için bulunan sonuçlar filtrelenmiş geri izdüşüm algoritmasıyla birleştirilmiştir [21]. Bu yöntemle Fourier dönüşümüne göre menzil için iyi çözünürlükte sonuç elde edilebilirken, yeterli çapraz menzil çözünürlüğüne ulaşabilmek için gözlem aralığının büyük tutulması gerekir.

Diğer bir yöntem olan hibrit görüntülemeye her açı için elde edilen frekans örneklerinin 1-B ters Fourier dönüşümü alınır, daha sonra açı değişimleri üzerinde yüksek çözünürlüklü modern spektrum kestirim yöntemleri ile görüntü oluşturulur. Bu yöntem de geniş frekans bandı gerektirir [22].

Yüksek çözünürlüklü radar görüntüleme için temel bir yaklaşım Gupta tarafından gerçekleştirilmiştir [23]. Bu yöntemde, geri saçılan alanlar 2-B doğrusal öngörü kavramı kullanılarak özyinelemeli olarak modellenmiş ve çeyrek düzlem model için oluşturulan öngörü denklemleri en küçük kareler yaklaşımıyla çözülmüştür. En küçük kareler yöntemi gürültüye duyarlı olduğundan Tekil Özdeğerlere Ayırıştırma (SVD) algoritmasıyla gürültü etkisi azaltılarak sonuçlarda iyileşme sağlanmıştır.

1-B veri genişletmeye dayanan çalışmalar da bulunmaktadır. Geri saçılan alan değerlerini içeren veri matrisinin satır ve sütunlarının ayrı ayrı modellenerek genişletilmesine dayanan bu yaklaşımlar (extrapolation, veri uzatma) ile oluşturulan veri matrisinin köşelerindeki değerler, “genişletmenin genişletmesi” olur ve çözünürlüğün iyileştirilmesi için fazla katkı sağlamaz [5, 25-26].

Yüksek çözünürlüklü radar görüntüsü oluşturmak için kullanılan diğer bir yaklaşım Capon yöntemidir. Bu yöntem, Fourier yaklaşımının sakıncası olan yan lobları azaltır. Amplitude and Phase Estimation of Sinusoids (APES) yöntemi ise, Capon yöntemine benzer, ancak genlik bilgisinin çıkarımında farklılık gösterir. Hedef cevabının frekansa bağımlılık göstermesi, bu yöntemlerin başarımını önemli ölçüde sınırlandırır. Adaptive Sidelobe Reduction (ASR) ise eşit ağırlıklı Fourier dönüşümü ile aynı oranda çözünürlük sağlarken, yan lob etkisini azaltmayı amaçlayan uyarlamalı bir yaklaşımdır [26].

Diğer bir çalışmada, Schmidt tarafından geliştirilmiş Multiple Signal Classification (MUSIC) algoritması Compton tarafından radar görüntülemeye uyarlanmıştır. Bu çalışmada değişik açılar için alınan 1-B geri saçılan alan verisi MUSIC algoritması

ile konum uzayına taşınmış ve geri izdüşüm algoritmasıyla 2-B görüntüler oluşturulmuştur. Ayrıca MUSIC algoritması 2-B ye genişletilerek 2-B geri saçılan alan değerlerinden yüksek çözünürlüklü radar görüntüleri oluşturulması için kullanılmıştır [17].

Prony yönteminde ise, 1-B geri saçılan alanların modellenmesinde kullanılan üstel fonksiyonların parametreleri, tanımlanan bir polinomun köklerini kullanarak bulunur. Bu yöntem gürültüye çok duyarlı olduğundan, düşük işaret/gürültü oranlarında kullanılabilmesi için pek çok değişik yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan en çok tercih edileni SVD yöntemidir [14-16].

Maximum Likelihood (ML) kestirimi de yüksek çözünürlüklü radar görüntüleme için önerilmiştir. ML kestirimi özellikle işaret/gürültü oranının düşük olması durumunda lineer öngörü yöntemlerine ve MUSIC algoritmasına göre daha iyi sonuçlar sağlar [31]. Ancak bu yöntem karmaşıklığı ve başarımının başlangıç değerlerinin seçimine bağlı olması nedeniyle fazla ilgi görmemiştir. Diğer bir çalışmada ML kestirimi klasik yaklaşımla oluşturulmuş radar görüntülerine uygulanarak çözünürlükte iyileşme sağlanmıştır [32].

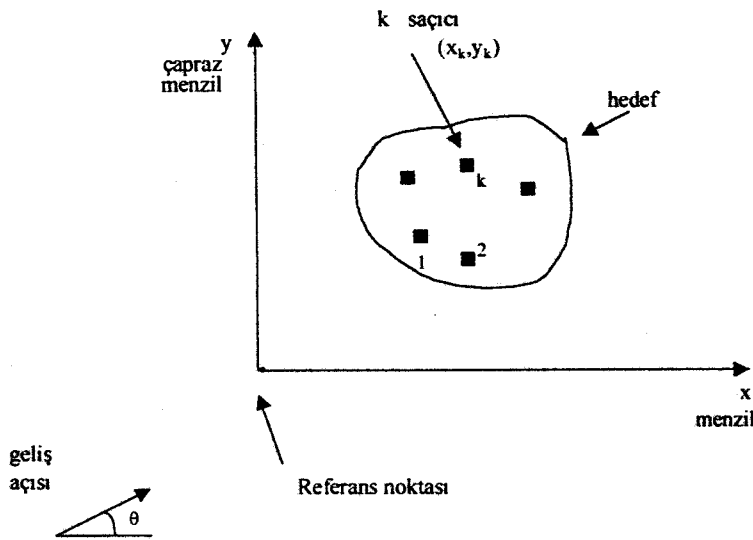
Yüksek çözünürlük elde etmek için önerilen diğer bir yaklaşım verinin frekans ya da açı için sınırlı olması durumunda sınırlı olan eksen için zaman-frekans tekniklerinin kullanılarak, zamana bağlı bir görüntü kümesi oluşturulmasına dayanır [33-35]. Bu yöntem gürültüye karşı en küçük kareler yaklaşımından daha dayanıklıdır. Ayrıca hedefe gönderilen darbenin dalgacık (wavelet) fonksiyonu olarak seçildiği ve alıcıda ölçülen zamanda geçmiş ve frekans kaymasına uğramış işaretin hedefin dalgacık dönüşümü olarak kabul edildiği çalışmalar bulunmaktadır [36].

Yukarıda sayılanların dışında, hedefi oluşturan saçıcı merkezlerin konum ve genliklerini tanımlanan hata fonksiyonunun parametreleri olarak kabul eden çeşitli optimizasyon algoritmalarına ve uyarlamalı süzgeçlere dayanan bazı çalışmalar yapılmıştır [37-38].

2. DOĞRUSAL ÖNGÖRÜ İLE TERS YAPAY AÇIKLIKLI RADAR GÖRÜNTÜLEME

2.1 Problemin Geometrisi ve Fourier Yaklaşımı

Bir radar hedefinden geri saçılan EM (Elektromagnetik) alanlar hem doğrudan geri yansımaların, hem de cisim geometrisine bağlı olarak cisim içerisinde meydana gelen iç yansımaların toplamı olarak düşünülebilir. Radar hedefinin boyutları gönderilen işaretin dalga boyundan yeteri kadar büyükse, saçılma belli sayıda saçıcı merkezin toplam etkisi olarak ortaya çıkar. Sonuç olarak, yüksek frekans bölgesinde bir radar hedefinin gelen işarete davranışı sonlu sayıda saçıcı merkezin ve bu merkezler arası elektromagnetik etkileşimlerin toplamı olarak ifade edilebilir. Böyle bir hedeften geri saçılan toplam işaret, her bir saçıcı merkezden geri saçılan kompleks işaretlerin toplamı olarak gösterilebilir [10]. K adet saçıcı merkezden oluşan bir hedefi görüntülemek için kullanılan görüntüleme sisteminin geometrisi Şekil 2.1 de verilmiştir. Hedef alanı taşıyıcı frekansı f olan sinüzoidal bir işaretle aydınlatılmaktadır.



Şekil 2.1 Görüntüleme sisteminin geometrisi

Bu çalışmada hedefin nokta saçıcılarından oluştuğu ve saçıcıların yansıtıcılığının frekansa bağlı olmadığı varsayılmıştır. Bu varsayımlar altında, k . saçıcı merkezden geri saçılan alan belli bir θ açısı ve f frekansı için aşağıdaki gibi verilebilir.

$$G_k(f, \theta) = A_k(f, \theta) e^{j2\pi f t_k} \quad (2.1)$$

$A_k(f, \theta)$ referans noktasına yerleşmiş kabul edilen k . saçıcıdan geri saçılan alandır. t_k , k . saçıcının (x_k, y_k) noktasında bulunmasından ileri gelen zaman gecikmesidir ve c ışık hızı olmak üzere,

$$t_k = \frac{2(x_k \cos \theta + y_k \sin \theta)}{c} \quad (2.2)$$

ifadesi ile verilebilir. K adet nokta saçıcıdan oluştuğu kabul edilen hedeften geri saçılan toplam alan,

$$G(f, \theta) = \sum_{i=1}^K A_i(f, \theta) e^{j \frac{4\pi f}{c} (x_i \cos \theta + y_i \sin \theta)} \quad (2.3)$$

olarak elde edilir. Bu ifadede (x_i, y_i) , i . saçıcının sırasıyla menzil ve çapraz menzil koordinatlarıdır. Frekansın $f_{\min}$ ve $f_{\max}$ ve gözlem açısının da $-\theta_{\max}$ ve $\theta_{\max}$ değerleri arasında değiştirilmesiyle toplanan geri saçılan alan verisi,

$$g(x, y) = \int_{-\theta_{\max}}^{\theta_{\max}} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} W(f, \theta) G(f, \theta) e^{-j2\pi f t(x, y)} f df d\theta \quad (2.4)$$

dönüşümüyle konum uzayına geçirilebilir. $W(f, \theta)$ pencereleme fonksiyonudur. Herhangi bir θ_i gözlem açısı için menzil profili,

$$g(d_i) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} W(f, \theta_i) G(f, \theta_i) e^{-j2\pi f t(d_i)} f df \quad (2.5)$$

olarak gösterilir. d_i menzil uzaklığı, $t(d_i) = 2d_i / c$ propagasyon gecikmesidir. (2.5) ifadesi 1-B ters Fourier dönüşümüne karşı gelmektedir. Başka bir deyişle, belli bir gözlem açısı için elde edilen menzil profili o gözlem açısı için toplanan frekans yanıtının 1-B ters Fourier dönüşümüne eşittir.

2-B hedef görüntüsü oluşturmak için ya geri izdüşüm algoritması ile (2.4) ifadesindeki gibi menzil profilleri gözlem açıklığı boyunca uyumlu olarak birleştirilir ya da

$$f_x = f \cos \theta \quad \text{ve} \quad f_y = f \sin \theta \quad (2.6)$$

şeklinde tanımlanan koordinat dönüşümü yapılarak, geri saçılan alan değerleri kartezyen koordinatlarda,

$$G(f_x, f_y) = \sum_{k=1}^K A_k(f_x, f_y) e^{j4\pi/c(f_x x_k + f_y y_k)} \quad (2.7)$$

yazılır. Burada

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad \text{ve} \quad \theta = \tan^{-1}(f_y / f_x) \quad (2.8)$$

olarak tanımlanır. (f_x, f_y) konumsal frekans uzayından, (x, y) konum uzayına 2-B Fourier dönüşümü alınarak, aşağıda verildiği gibi geçilebilir.

$$g(x, y) = \int_{-f_{y,\max}}^{f_{y,\max}} \int_{-f_{x,\max}}^{f_{x,\max}} W(f_x, f_y) G(f_x, f_y) e^{-j\frac{4\pi}{c}(f_x x + f_y y)} df_x df_y \quad (2.9)$$

ifadesinde görüldüğü gibi hedefin yansıtıcılık işlevi ile frekans cevabı Fourier dönüşüm çifti oluşturmaktadır.

2.2. Parametrik Yaklaşım

Bir cismin radar görüntüsünü oluşturan saçıcı merkezlerin konum ve saçıcı genliklerini, ölçülen frekans cevabının ters Fourier dönüşümünü alarak elde eden klasik görüntüleme teknikleri sınırlı frekans bandı ve gözlem aralığı için yeterli çözünürlük sağlayamaz. Menzil çözünürlüğü, ölçüm sisteminin band genişliği ile, çapraz menzil çözünürlüğü ise gözlem açısı ile sınırlıdır. Yüksek çözünürlüklü bir radar görüntüsü oluşturabilmek için geniş bandda ve geniş açı aralığında gözlem yapmak gerekir. Menzil ve çapraz menzil çözünürlük bağıntıları EK A da verilmiştir.

Fourier yaklaşımının yeterli çözünürlük sağlamadığı sınırlı veri durumunda saçıcı merkezlerin konum ve genlik bilgisi parametrik saçılım modelleme teknikleri kullanılarak elde edilebilir. Parametrik saçılım modelleme teknikleri klasik Fourier yaklaşımının tersine, sınırlı frekans-açı bölgesinden alınmış kısa veri kayıtları için yüksek çözünürlüklü radar görüntüsü verir. Ayrıca saçıcı merkezlerin konumlarını bulabilmek için maksimum nokta bulma algoritmaları gerekmez.

Dar bandlı işaret yaklaşımı altında sonlu sayıda saçıcı noktalardan oluşan bir hedeften geri saçılan alanlar kompleks değerli üstel fonksiyonların toplamı olarak verilebilir [15,16]. Bu durumda, görüntüleme problemi bu üstel fonksiyonlardan genlik ve konum bilgisinin çıkartılmasına indirgenir.

Geri saçılan alan değerleri, kartezyen koordinatlarda eşit aralıklarda örneklenerek,

$$f_x(k_1) = f_x(0) + k_1 \Delta f_x \quad (2.10.a)$$

$$f_y(k_2) = f_y(0) + k_2 \Delta f_y \quad k_1, k_2 = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.10.b)$$

şeklinde verilebilir. $f_x(0)$ ve $f_y(0)$ konumsal frekans başlangıç değerleri, Δf_x ve Δf_y artım aralıklarıdır. Hedeften geri saçılan toplam alan, ayrık kartezyen koordinatlarda,

$$G(k_1, k_2) = \sum_{k=1}^K A_k(k_1, k_2) e^{j4\pi/c(f_x(0)x_k + f_y(0)y_k)} z_{x_k}^{k_1} z_{y_k}^{k_2} \quad (2.11)$$

$$z_{x_k} = e^{j4\pi/c\Delta f_x x_k}$$

$$z_{y_k} = e^{j4\pi/c\Delta f_y y_k}$$

ile ifade edilir. Ölçüm dar bir frekans ve açı bölgesinde gerçekleştirildiğinden, $A_k(f_x, f_y)$ sabit kabul edilebilir [20] ve (2.11) denklemi,

$$G(k_1, k_2) = \sum_{k=1}^K G_k(0,0) z_{x_k}^{k_1} z_{y_k}^{k_2} \quad (2.12)$$

şeklinde yazılabilir. $G_k(0,0)$ konumsal frekans uzayındaki başlangıç değerleri için k saçıcı merkezden geri saçılan alandır ve

$$G_k(0,0) = A_k(f_x(0), f_y(0)) e^{j4\pi / c(f_x(0)x_k + f_y(0)y_k)} \quad (2.13)$$

ifadesi ile verilir. K adet ayırık saçıcı merkezden oluşan hedeften geri saçılan toplam alan,

$$G(k_1, k_2) = \sum_{k=1}^K G_k(0,0) z_{x_k}^{k_1} z_{y_k}^{k_2} + v(k_1, k_2) \quad (2.14)$$

şeklinde verilebilir. Ölçüm sisteminden kaynaklanan hata olarak tanımlanan $v(k_1, k_2)$ ortalaması=0 , varyansı=1 olan Gauss gürültüsü olarak alınır.

Bu çalışmada, geri saçılan alan örnekleri doğrusal öngörü yöntemi ile modellenerek, radar görüntülerinde klasik yaklaşımın ötesinde çözünürlük sağlanacaktır. Aşağıda, herhangi bir menzil ya da çapraz menzil konumu için 1-B doğrusal öngörü modeli verilmiştir.

2.3 1-B Doğrusal Öngörü Denklemlerinin Oluşturulması

2-B geri saçılan alan verisi durağan, rasgele, özbağımlı bir süreç olarak kabul edilerek, herhangi bir menzil ya da çapraz menzil konumu için 1-B doğrusal öngörü teknikleri ile modellenebilir [5,18]. Herhangi bir menzil ya da çapraz menzil konumu için, geri saçılan alan verisi,

$$G(k) = \sum_{l=1}^{d_y} a_{l,x} z_{y_l}^k + u_x(k) \quad (2.15)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

şeklinde yazılabilir. $G(k)$, f_y ekseninde örneklenmiş veri vektörü, d_y saçıcı sayısı, N ölçülen örnek sayısıdır. 1-B işaretler için, verilen bir noktanın değeri ileri yönde öngörü kullanılarak geçmiş örnek değerlerinden ya da geri yönde öngörü kavramı ile gelecekteki örnek değerlerinden kestirilebilir.

İleri yönde öngörü ile k . örnek değeri kendisinden önceki M ölçüm değeri kullanılarak,

$$\hat{G}^f(k) = -\sum_{i=1}^M a_x(i)G(k-i) \quad k = M, M+1, \dots, N-1 \quad (2.16)$$

yazılabilir. M öngörü derecesidir. Geri yönde öngörü kullanılması durumunda geri saçılan alanlar,

$$\hat{G}^b(k-M) = -\sum_{i=1}^M a_x^*(i)G(k+i-M) \quad k = M, M+1, \dots, N-1 \quad (2.17)$$

olarak verilir. $a(i)$ öngörü süzgecinin i . elemanıdır. $(*)$ kompleks eşleniği tanımlar. Bu durumda, ileri yönde öngörü hatası,

$$\begin{aligned} f(k) &= G^f(k) - \hat{G}^f(k) \\ &= G(k) + a_x(1)G(k-1) + a_x(2)G(k-2) + \dots + a_x(M)G(k-M) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Geri yönde öngörü hatası,

$$\begin{aligned} b(k) &= G^b(k-M) - \hat{G}^b(k-M) \\ &= G(k-M) + a_x^*(1)G(k+1-M) + a_x^*(2)G(k+2-M) + \dots + a_x^*(M)G(k) \end{aligned} \quad (2.19)$$

tanımlanır. $a_x(1), a_x(2), \dots, a_x(M)$ öngörü katsayıları öngörü hatasının karesel ortalamasını en aza indirecek şekilde seçilir.

$$\varepsilon = E[f^2(k)] = \min \quad (2.20)$$

ifadesinde $E[.]$ beklenen değer operatörü, $f(k)$ ise sürecin gerçek değeri ile öngörülen değeri arasındaki farktır (2.18) eşitliğinde her bir $a(i)$, $i = 1, 2, \dots, M$ katsayısına göre türev alınarak,

$$\frac{\partial E[f^2(k)]}{\partial a(i)} = 0 \quad (2.21)$$

diklik eşitlikleri elde edilir.

$$E[f(k)G(k-i)] = 0 \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2.22)$$

(2.22) denkleminde en iyi öngörücü için öngörü hatasının öngörü uzayına dik olduğu görülebilir. $f(k)$ ifadesi denklemde yerleştirilerek, öngörü katsayılarını verecek M adet doğrusal denklem elde edilir.

$$\sum_{j=0}^M a_j E[G(k-j)G(k-i)] = \sum_{j=0}^M R(i-j)a_j = 0 \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2.23)$$

bağıntısında $R(k)$, $G(k)$ sürecinin özilişki işlevidir ve $R(k) = E[G(i)G(i+k)]$ şeklinde verilir. Öngörü hatasının minimum değeri,

$$\sigma_e^2 = E[f^2(k)] = E[f(k)(G(k) - \hat{G}(k))] = \sum_{i=0}^M R(i)a(i) \quad (2.24)$$

bağıntıları birleştirilerek $(M+1) \times (M+1)$ boyutunda genişletilmiş normal denklemler elde edilir.

$$\begin{bmatrix} R(0) & R(1) & R(2) & \dots & R(p) \\ R^*(1) & R(0) & R(1) & \dots & R(p-1) \\ R^*(2) & R^*(1) & R(0) & \dots & R(p-2) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ R^*(p) & R^*(p-1) & R^*(p-2) & \dots & R(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_\varepsilon^2 \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

denklemleri çözülerek verilen öngörü değeri için hatayı en aza indirgeyen öngörü katsayıları ve öngörü hatası bulunabilir. Geri yönde öngörü süzgeci içinde benzer şekilde genişletilmiş normal denklemler oluşturulabilir.

$$\begin{bmatrix} R(0) & R(1) & R(2) & \dots & R(p) \\ R^*(1) & R(0) & R(1) & \dots & R(p-1) \\ R^*(2) & R^*(1) & R(0) & \dots & R(p-2) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ R^*(p) & R^*(p-1) & R^*(p-2) & \dots & R(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{a}_0 \\ \tilde{a}_1 \\ \tilde{a}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \tilde{a}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \sigma_\varepsilon^2 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

J $(p+1) \times (p+1)$ boyutunda değişim matrisidir ve

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

olarak tanımlanır. Yukarıda verilen eşitlikleri kullanarak geri yönde öngörü süzgeç katsayıları, ileri yönde öngörü katsayıları cinsinden yazılabilir.

$$\tilde{a} = J a^* \quad (2.28.a)$$

$$\tilde{a}_k = a_{M-k}^* \quad k = 0, 1, \dots, M \quad (2.28.b)$$

İleri ve geri yönde öngörü süzgeç katsayıları arasında (2.29.b) ile verilen ilişki nedeniyle sadece ileri yönde öngörü süzgeç katsayılarının hesaplanması yeterli olacaktır. Öngörücü katsayıları bulunduktan sonra sürecin aktarım işlevi

$$H(z) = \frac{1}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_M z^{-M}} \quad (2.29)$$

olarak yazılabilir ve sistemin kutupları,

$$A(z) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_M z^{-M} \quad (2.30)$$

karakteristik denklemi çözülerek elde edilir. AR sürecin güç spektrumu,

$$S(f) = \frac{P_M}{A(f)A^*(f)} = \frac{P_M}{\left| 1 + \sum_{k=1}^M a_k e^{-j2\pi f k T} \right|^2} \quad (2.31)$$

bağıntısıyla bulunur [5,39-42]. (2.31) bağıntısından menzil ya da çapraz menzil profilleri elde edilebilir.

2.4 1-B Doğrusal Öngörü Denklemlerinin En Küçük Kareler Yöntemi ile Çözümü

Uygulamada, özilişki matrisinin gerçek değerleri bilinmediğinden ölçüm değerlerinden kestirilmesi gerekir. LS yöntemi kullanılarak AR model parametreleri doğrudan ölçüm değerlerinden elde edilebilir [18,19]. LS yönteminde verilen N örnek değerden oluşan $G(1), G(2), \dots, G(N)$ dizisinden M öngörü derecesi olmak üzere $2(N - M)$ öngörü hatası bulunur. Bu hatalar denklem sistemi şeklinde düzenlenerek,

$$\begin{bmatrix}
 G(M-1) & G(M-2) & \dots & G(0) \\
 G(M) & G(M-1) & \dots & G(1) \\
 \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 G(N-2) & G(N-3) & \dots & G(N-1-M) \\
 G^*(1) & G^*(2) & \dots & G^*(M) \\
 G^*(2) & G^*(3) & \dots & G^*(M+1) \\
 \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\
 G^*(N-M) & G^*(N-M+1) & \dots & G^*(N-1)
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 a_x(1) \\
 a_x(2) \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 a_x(M)
 \end{bmatrix}
 = -
 \begin{bmatrix}
 G(M) \\
 G(M+1) \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 G(N-1) \\
 G^*(0) \\
 G^*(1) \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 G^*(N-1-M)
 \end{bmatrix}
 \quad (2.32)$$

yazılabilir ve matris formunda,

$$E_x a_x = -e_x \quad (2.33)$$

ile gösterilebilir. Burada a_x M boyunda bilinmeyen vektörü, e $2(N-M)$ boyunda vektör ve E_x $2(N-M)^2 \times (M+1)$ boyutunda Ölçüm değerlerini içeren matristir. Denklem sistemi en küçük kareler anlamında çözülerek öngörü katsayıları,

$$a_x = -(E_x^H E_x)^{-1} E_x^H e_x \quad (2.34)$$

elde edilir. $E_x^H E_x$ deterministik kovaryans matrisi olarak tanımlanır ve tersi alınarak doğrudan veri değerleri ile öngörücü katsayıları bulunur. Bulunan katsayılar (2.32) ifadesinde yerleştirilerek menzil üzerindeki güç dağılımı yani hedefin menzil profili çıkartılabilir. Değişik açı değerleri için elde edilen sonuçların uyumlu toplanmasıyla hedefin 2-B radar görüntüsü çıkartılabilir. Süzgeç katsayılarının doğrudan ölçülen işaretten bulunması en küçük kareler yönteminin temel avantajıdır. Ancak bu yöntemde,

- Matris tersi almak gereklidir.
- Her öngörü derecesi için denklemler yeniden oluşturularak çözülmelidir
- Elde edilen süzgeç yapıları kararsız olabilir.

2.5 2-B Doğrusal Öngörü Denklemlerinin Oluşturulması

2-B doğrusal modellemede, 2-B geri saçılan alan $G(k_1, k_2)$ özbağımlı bir süreç olarak modellenerek destek bölgesinde tanımlı komşu noktaların doğrusal bileşimiyle üretilebilir. Seçilen destek bölgesine bağlı olarak değişik nedensel modeller oluşturulabilir. 1-B sistemler, sistemin çıkışının gelecekteki giriş değerlerine bağlı olmaması durumunda nedensel olarak tanımlanır ve nedensel bir sistemin impuls yanıtı,

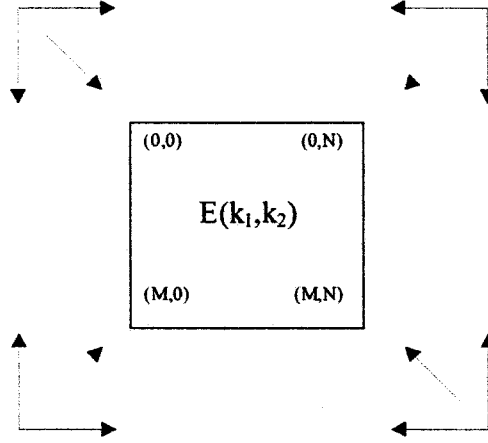
$$h(n) = 0, \quad n < 0 \quad (2.35)$$

bağıntısıyla verilir. 1-B sistemlerin aksine, nedensellik 2-B sistemler için sınırlayıcı bir koşul değildir, çünkü verilen bir anda 2-B işaret genelde mevcuttur ve istenilen herhangi bir yönde işlenebilir. 2-B, doğrusal ötelemeyele değişmeyen bir sistemde impuls yanıtı $h(n_1, n_2)$ nin sıfırdan farklı olduğu bölge destek bölgesi olarak adlandırılır. 2-B, doğrusal, ötelemeyele değişmeyen bir sistemin impuls yanıtı orijinden çekilen ve aralarındaki açı 180° den küçük olan bir bölge ile sınırlandırılmış sistemler kama destekli sistemler olarak adlandırılır. Kama destekli sistemler kullanılarak yinelemeli yapı oluşturulabilir [43]. Çeyrek düzlem destek bölgesi, kama destek bölgesinin özel bir durumudur, çeyrek düzlem destekli bir sistemin impuls cevabı çeyrek düzlemle sınırlandırılmıştır. Simetrik olmayan yarı-düzlem destek bölgesi de uygulamalarda sıkça karşılaşılan bir durumdur. 2-B da yinelemeli bir yapı kurabilmek için her hangi bir örneğin geçmiş ve gelecek değerlerinin bulunduğu uzayları tanımlamak gerekir. 1-B, nedensel, minimum fazlı bir süzgeç,

$$S_{yy}(z) = \sigma_\epsilon^2 B(z) B(z^{-1}) \quad (2.36)$$

denklemleriyle verilen spektral faktörizasyon teoremine göre iki farklı doğrultuda ilerleyen iki kararlı süzgece ayrıştırılabilir. Bu yaklaşımla 1-B işaretler için ileri ve geri yönde öngörü ve öngörü hata süzgeçleri tanımlanmıştır. Benzer şekilde 2-B çeyrek düzlem destek bölgesi sistemler de farklı yönde ilerleyen, nedensel dört adet süzgeç kullanılarak gerçekleştirilebilirler [44]. 2-B işaretler için öngörü hata

süzgeçlerinin biri ileri yönde, diğerleri de geri yönde hata süzgeçleri olacaktır. Bu süzgeçler, birinci çeyrek düzlem, ikinci-çeyrek düzlem, üçüncü çeyrek düzlem ve dördüncü çeyrek düzlem olarak adlandırılır. Şekil 2.1 de 2-B ileri ve geri-yönde öngörü hata süzgeçlerinin ilerleme yönleri gösterilmektedir.



Şekil 2.2 2-B hata süzgeçlerinin ilerleme yönleri

Destek bölgesinin çeyrek düzlemde tanımlı olması durumunda, modellenen alanın (k_1, k_2) noktasındaki örneği aşağıda verildiği gibi kestirilebilir.

1. Çeyrek düzlem ileri yönde öngörücü öngörülecek noktayı sürecin geçmiş değerler uzayında elde eder. Destek bölgesi içindeki elemanları kapsayan öngörü uzayı,

$$M_{FQ}^{(L)} = \left\{ G(k_1 - i, k_2 - j), \quad i, j \in D_{FQ}^{(L)} \right\} \quad (2.37)$$

ile verilebilir. Burada öngörü destek bölgesi,

$$D_{FQ}^{(L)} = \{(i, j) \text{ ve } i, j = 0, 1, \dots, L \text{ ve } (i, j) \neq (0, 0)\} \quad (2.38)$$

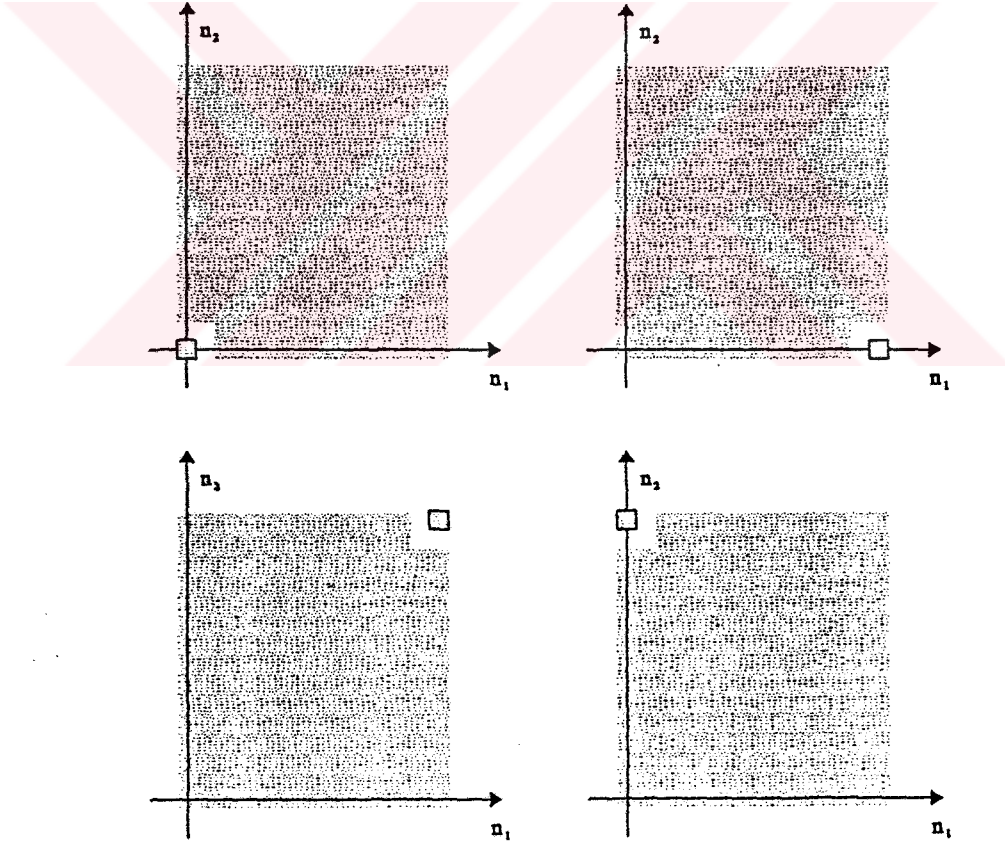
şeklinde tanımlanır. L öngörü derecesidir. 2-B destek bölgesi $(L+1) \times (L+1)$ noktadan oluşur. 1.çeyrek düzlem destek bölgesinde tanımlı 2-B doğrusal öngörücü,

$$\hat{G}_{FQ}(k_1, k_2) = \sum_{(i,j) \in D_{FQ}^{(N)}} a_{FQ}^{(L)}(i, j) G(k_1 - i, k_2 - j) \quad (2.39)$$

ile verilir. 1. çeyrek düzlem öngörücü parametreleri $a_{FQ}^{(L)}(i, j)$ karesel ortalama anlamında enküçükleştirmeye göre bulunurlar. 2-B öngörü hatası,

$$e_{FQ}^{(L)}(k_1, k_2) = G(k_1, k_2) - \hat{G}_{FQ}^{(L)}(k_1, k_2) \quad (2.40)$$

olarak tanımlanır. $G(k_1, k_2)$ ölçülen saçılan alan değerleri, $\hat{G}_{FQ}^{(L)}(k_1, k_2)$ ise 1. çeyrek düzlem destek bölgesi öngörücü tarafından öngörölmüş değerlerdir.



Şekil 2.3 Çeyrek düzlem destek bölgeleri

İleri yönde öngörü hatası gücü,

$$\varepsilon_{FQ}^{(L)} = E[(e_{FQ}^{(L)}(k_1, k_2))^2] \quad (2.41)$$

olarak yazılabilir. En iyi öngörücü katsayılarını elde etmek için öngörü hatasının karesel ortalamasının öngörücü katsayılarına göre türevi sıfıra eşitlenerek normal denklemler elde edilir.

$$\sum_{(k_1, k_2) \in D_{FQ}^{(L)}} \sum a_{FQ}^{(L)}(k_1, k_2) R(k_1 - i, k_2 - j) = r(-i, -j) \quad (i, j) \in D_{FQ}^{(L)} \quad (2.42)$$

eşitliği matrisel eşitlik biçiminde verilebilir.

$$Ra = r \quad (2.43)$$

$R \left[(L+1)^2 - 1 \right] \times \left[(L+1)^2 - 1 \right]$ boyutlu modellenen geri saçılan alan değerlerini veren 2-B sürecin özilişki matrisi, $a \left[(L+1)^2 - 1 \right] \times 1$ uzunluğunda ilgilenilen destek bölgesi için en iyi öngörücü katsayıları vektörü ve $r \left[(L+1)^2 - 1 \right] \times 1$ uzunluğunda öngörülen 2-B süreç ile geçmiş değerler uzayı arasındaki çapraz ilişkidir. (2.44) ifadesiyle verilen normal denklem çözülerek öngörücü katsayıları

$$a = R^{-1}r \quad (2.44)$$

olarak elde edilebilir.

3. Çeyrek düzlem geri yönde öngörücü, 1-B daki geri yönde öngörücünün 2-B karşılığıdır. Öngörü uzayı tamamen sürecin gelecekteki değerlerinden oluşur.

$$\tilde{M}_{FQ}^{(L)} = \left\{ G(k_1 - i, k_2 - j), \quad i, j \in \tilde{D}_{FQ}^{(L)} \right\} \quad (2.45)$$

Öngörü destek bölgesi,

$$\tilde{D}_{FQ}^{(L)} = \{(i, j) \mid i, j = 0, 1, \dots, L \text{ ve } (i, j) \neq (L, L)\} \quad (2.46)$$

değerlerinden oluşur. 3.çeyrek düzlem destek bölgesi için tanımlı 2-B doğrusal öngörücü,

$$\hat{G}(k_1 - L, k_2 - L) = \sum_{(i,j)} \sum_{\in \tilde{D}_{FQ}^{(L)}} \tilde{a}_{FQ}^{(L)} G(k_1 - i, k_2 - j) \quad (2.47)$$

3. çeyrek düzlem geri yönde öngörü hatası,

$$\tilde{e}_{FQ}^{(L)}(k_1, k_2) = G(k_1 - L, k_2 - L) - \hat{G}_{FQ}^{(L)}(k_1 - L, k_2 - L) \quad (2.48)$$

şeklinde verilir. 3.çeyrek düzlem geri yönlü öngörü hatasının karesel ortalaması öngörü katsayılarına göre enküçükleştirilerek 2-B üçüncü-çeyrek düzlem için normal denklemler aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\sum_{(k_1, k_2) \in \tilde{D}_{FQ}^{(L)}} \sum_{\in \tilde{D}_{FQ}^{(L)}} \tilde{a}_{FQ}^{(L)}(k_1, k_2) R(k_1 - i, k_2 - j) = r(L - i, L - j) \quad (i, j) \in \tilde{D}_{FQ}^{(L)} \quad (2.49)$$

denklemlerinden birinci ve üçüncü çeyrek düzlem öngörü katsayıları arasında,

$$\tilde{a}_{FQ}^{(L)}(i, j) = a_{FQ}^{(L)*}(L - i, L - j) \quad (2.50)$$

ilişkisi bulunduğu görülebilir. Bu nedenle sadece birinci çeyrek düzlem için bulunan normal denklemlerin çözülmesi yeterlidir.

2. Çeyrek düzlem öngörücünün 1-B karşılığı yoktur. 1-B işaretler tek bir doğrultuda ilerlerken, 2-B işaretler iki farklı doğrultuda oluşur. Bu nedenle 1-B işaretler için tanımlanan ileri ve geri yönlü iki öngörücü, 2-B işaretleri öngörmek için yeterli olmayacaktır. Çeyrek düzlem destekli 2-B süzgeç, dört farklı doğrultuda ilerleyen dört süzgece ayrıştırılabilir. 2. çeyrek düzlem destek bölgesi geri yönlü öngörücü için öngörü uzayı,

$$M_{SQ}^{(L)} = \left\{ G(k_1 - i, k_2 - j), \quad i, j \in D_{SQ}^{(L)} \right\} \quad (2.51)$$

ve destek bölgesi,

$$D_{SQ}^{(L)} = \{(i, j) \mid i, j = 0, 1, \dots, L \text{ ve } (i, j) \neq (L, 0)\} \quad (2.52)$$

olarak tanımlanır. Bu durumda, ikinci çeyrek düzlem öngörücü,

$$\hat{G}_{SQ}(k_1 - L, k_2) = \sum_{(i,j) \in D_{SQ}^{(L)}} a_{SQ}^{(L)} G(k_1 - i, k_2 - j) \quad (2.53)$$

ikinci çeyrek düzlem geri yönde öngörü hatası,

$$e_{SQ}^{(L)}(k_1, k_2) = G(k_1 - L, k_2) - \hat{G}_{SQ}^{(L)}(k_1 - L, k_2) \quad (2.54)$$

öngörücü katsayılarına göre enküçükleştirilerek

$$\sum_{(k_1, k_2) \in D_{SQ}^{(L)}} \sum a_{SQ}^{(L)}(k_1, k_2) R(k_1 - i, k_2 - j) = r(L - i, -j) \quad (i, j) \in D_{SQ}^{(L)} \quad (2.55)$$

elde edilen normal eşitliğin çözümü ile ikinci çeyrek düzlem öngörücü katsayıları $a_{SQ}^{(L)}$ bulunur.

4. Çeyrek düzlem model geri yönde öngörücü için öngörü uzayı ve öngörü destek bölgesi,

$$\tilde{M}_{SQ}^{(L)} = \left\{ G(k_1 - i, k_2 - j), \quad i, j \in \tilde{D}_{SQ}^{(L)} \right\} \quad (2.56)$$

$$\tilde{D}_{SQ}^{(L)} = \{(i, j) \mid i, j = 0, 1, \dots, L \text{ ve } (i, j) \neq (0, L)\} \quad (2.57)$$

bağıntılarıyla tanımlanır. Dördüncü çeyrek düzlem geri yönde öngörücü,

$$\hat{G}_{SQ}(k_1, k_2 - L) = \sum_{(i,j)} \sum_{\in \tilde{D}_{SQ}^{(L)}} \tilde{a}_{SQ}^{(L)} G(k_1 - i, k_2 - j) \quad (2.58)$$

şeklinde tanımlanır. Diğer öngörücülere benzer olarak, dördüncü çeyrek düzlem için normal eşitlikler aşağıdaki gibi verilir.

$$\sum_{(k_1, k_2) \in \tilde{D}_{SQ}^{(L)}} \tilde{a}_{SQ}^{(L)}(k_1, k_2) R(k_1 - i, k_2 - j) = r(-i, L - j) \quad (i, j) \in \tilde{D}_{SQ}^{(L)} \quad (2.59)$$

(2.51) denklemi

$$\tilde{a}_{SQ}^{(L)}(i, j) = a_{SQ}^{(L)*}(L, L - j) \quad (2.60)$$

ikinci ve dördüncü çeyrek düzlem öngörücüleri için de sağlandığından, sadece ikinci çeyrek düzlem katsayılarının hesaplanması yeterli olacaktır. Sonuç olarak, verilen herhangi bir öngörü derecesi L için (2.42) ve (2.55) bağıntılarıyla verilen normal denklemler iki ayrı denklem sistemi şeklinde doğrudan matris tersi alınarak çözülebilir. Her öngörü derecesi L için normal denklemler yeniden oluşturulur.

2.6 2-B Doğrusal Öngörü Denklemlerinin En Küçük Kareler Yöntemi ile Çözülmesi

2-B öngörü katsayıları 1-B de olduğu gibi doğrudan ölçüm değerleri kullanılarak en küçük kareler yöntemiyle bulunabilir [23]. Öngörü için 1. Çeyrek düzlem model kullanılması durumunda f_x ve f_y eksenleri üzerinde ileri yönde öngörü uygulanarak (k_1, k_2) noktasındaki örnek değeri,

$$\hat{G}(k_1, k_2) = - \sum_{i=0}^L \sum_{j=0}^L a_{ij} G(k_1 - i, k_2 - j) \quad (2.61)$$

$$k_1, k_2 = 1, L + 1, \dots, N - 1$$

3. Çeyrek düzlem model kullanılarak f_x ve f_y eksenleri üzerinde geri yönde öngörü ile (k_1, k_2) noktası aşağıdaki gibi bulunur.

$$\hat{G}(k_1, k_2) = -\sum_{i=0}^L \sum_{\substack{j=0 \\ i+j \neq 0}}^L a_{ij}^* G(k_1 + i, k_2 + j) \quad (2.62)$$

$$k_1, k_2 = 0, 1, \dots, N - L - 1$$

(2.61) ve (2.62) ifadeleri,

$$Ea = -e \quad (2.63)$$

matrisel eşitliği ile birleştirilebilir. E $[2(N-L)^2] \times [(L+1)^2 - 1]$ boyutunda bir matris, a $[(L+1)^2 - 1] \times 1$ boyunda bir vektör ve e $[2(N-L)^2] \times 1$ boyunda bir vektördür. Denklemin en küçük kareler anlamında çözümü

$$a = -(E^H E)^{-1} E^H e \quad (2.64)$$

bağıntısıyla bulunur. İkinci çeyrek düzlem model kullanılması durumunda ise (k_1, k_2) noktasındaki örnek değeri f_x ekseninde ileri yönde, f_y ekseninde ise geri yönde öngörü ile bulunur.

$$\hat{G}(k_1, k_2) = -\sum_{i=0}^L \sum_{\substack{j=0 \\ i+j \neq 0}}^L g_{ij} G(k_1 - i, k_2 + j) \quad (2.65)$$

$$k_1 = 0, 1, \dots, N - L - 1$$

$$k_2 = L, L + 1, \dots, N - 1$$

Dördüncü çeyrek düzlem modelde ise (k_1, k_2) noktasındaki örnek değeri f_x ekseninde geri yönde, f_y ekseninde ileri yönde öngörü kullanılarak

$$\hat{G}(k_1, k_2) = - \sum_{i=0}^L \sum_{\substack{j=0 \\ i+j \neq 0}}^L g_{ij}^* G(k_1 + i, k_2 - j) \quad (2.66)$$

$$k_1 = 0, 1, \dots, N - L - 1$$

$$k_2 = L, L + 1, \dots, N - 1$$

(2.65)-(2.66) denklemleri birleştirilerek g katsayıları için en küçük kareler çözümü,

$$g = -(\tilde{E}^H \tilde{E})^{-1} \tilde{E}^H \tilde{e} \quad (2.67)$$

yazılır. 2-B öngörü denklemlerinin en küçük kareler anlamında çözümü 2 adet $[2(N - L)^2] \times [(L + 1)^2 - 1]$ boyutunda matris tersi alınmasını gerekli kılar. Ayrıca öngörü derecesi L in her değeri için dört çeyrek düzlem için verilen denklem sistemleri yeniden oluşturularak çözüm aranmalıdır.

3. 2-B KOMPLEKS KAFES ÖNGÖRÜ SÜZGEÇLERİ İLE GERİ SAÇILAN ALANLARIN MODELLENMESİ

3.1 1-B Doğrusal Öngörü Denklemlerinin Burg Yöntemi ile Çözümü

3.1.1 Levinson Algoritması

Öngörü denklemlerinin en küçük kareler anlamında çözülmesi verilen her öngörü derecesi için iki adet denklem sistemi oluşturularak, bu denklem sistemlerinin sözde ters alma teknikleri ile çözülmesini gerektirir. Ayrıca, bu yöntemde oluşturulan süzgeçler kararsız olabilir. Bu türden olumsuzlukların üstesinden gelebilmek için Burg tarafından öngörü dereceleri arasındaki geçişi Levinson özyinelemesine dayanan, kafes yapısında iteratif bir algoritmayla sağlayan bir yaklaşım önerilmiştir. İleri ve geri yöndeki hata süzgeçlerinin katsayıları Levinson bağıntısını sağladıklarından, Burg yönteminde kararlılık koşulu her zaman sağlanır.

Levinson algoritmasında, genişletilmiş normal denklemleri doğrudan çözmek yerine $m = 1, m = 2, \dots, m = M$ öngörü dereceleri için en iyi doğrusal öngörücüler belirlenir.

Öngörü hatası her aşama için

$$\begin{aligned} f^{(1)}(k) &= G(k) + a_{11}G(k-1) \\ f^{(2)}(k) &= G(k) + a_{21}G(k-1) + a_{22}G(k-2) \\ &\vdots \\ f^{(M)}(k) &= G(k) + a_{M1}G(k-1) + \dots + a_{MM}G(k-M) \end{aligned} \quad (3.1)$$

şeklinde verilir. $(1, a_{11}), (1, a_{21}, a_{22}), \dots, (1, a_{M1}, a_{M2}, \dots, a_{MM})$ katsayıları $m = 1, 2, \dots, M$ dereceleri için en iyi öngörü katsayılarını gösterir. Levinson algoritması m . derece öngörü katsayılarını $(m-1)$. derece öngörü katsayılarından

yararlanarak oluşturan iteratif bir algoritmadır. İstenilen dereceye ulaşılan kadar daha düşük dereceli bütün öngörücüler hesaplanır. m . derece ileri yönde öngörü hata süzgecinin ağırlık katsayı vektörü,

$$\mathbf{a}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{m-1} \\ 0 \end{bmatrix} + \Gamma_m \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{a}_{m-1}^{B^*} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

şeklinde güncellenir. m . derece geri yönde öngörü hata süzgecinin katsayı ağırlık vektörü $\mathbf{a}_m^{B^*}$ ye ilişkin derece güncellemesi ise,

$$\mathbf{a}_m^{B^*} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{a}_{m-1}^{B^*} \end{bmatrix} + \Gamma_m^* \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{m-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

olarak yapılır. Γ_m yansıma katsayısı olarak adlandırılır. Başlangıç koşulu olarak

$$a_{m-1,0} = 1, \quad a_{m-1,m} = 0 \quad (3.4)$$

alınır.

3.1.2 1-B Kafes Öngörü Süzgeçleri

İleri ve geri yönde öngörü süzgeçleri Levinson özyinelemesi kullanılarak kafes öngörü süzgeci olarak tanımlanan tek bir yapıda birleştirilebilir. (3.2) denklemiyle verilen m . dereceden ileri yönde öngörü hata süzgecini ele alalım. Bu süzgecin girişi $G(k), G(k-1), \dots, G(k-M)$ dizisi olacaktır. $m+1$ elemanlı bu giriş dizisini aşağıdaki gibi göstermek mümkündür [45].

$$\mathbf{G}_{m+1}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_m(k) \\ G(k-M) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

veya

$$\mathbf{G}_{m+1}(k) = \begin{bmatrix} G(k) \\ \mathbf{G}_m(k-1) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

(3.2) ile verilen Levinson eşitliğinin sol tarafı $\mathbf{a}_m^H$ ile çarpılarak

$$f^{(m)}(k) = \mathbf{a}_m^H \mathbf{G}_{m+1}(k) \quad (3.7)$$

bulunur. Burada $f^{(m)}(k)$ daha önce de belirtildiği gibi m . dereceden ileri yönde öngörü hata süzgecinin çıkışındaki ileri yönde öngörü hatasıdır. Eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim için,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{m-1}^H & 0 \end{bmatrix} \mathbf{G}_{m+1}(k) &= \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{m-1}^H & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{G}_m(k) \\ G(k-1) \end{bmatrix} = \\ &= \mathbf{a}_{m-1}^H \mathbf{G}_m(k) = f^{(m-1)}(k) \end{aligned} \quad (3.8)$$

yazılabilir. $f^{(m-1)}(k)$, $(m-1)$. dereceden ileri yönde öngörü hata süzgecinin çıkışındaki ileri yönde öngörü hatasıdır. Eşitliğin sağ tarafındaki ikinci terim ise,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{a}_{m-1}^{BT} \end{bmatrix} \mathbf{G}_{m+1}(k) &= \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{a}_{m-1}^{BT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G(k) \\ \mathbf{G}_m(k-1) \end{bmatrix} = \\ &= \mathbf{a}_{m-1}^{BT} \mathbf{G}_m(k-1) = b^{(m-1)}(k-1) \end{aligned} \quad (3.9)$$

bulunur. $b^{(m-1)}(k-1)$, $(m-1)$. dereceden geri yönde öngörü hata süzgecinin çıkışındaki geciktirilmiş geri yönde öngörü hatasıdır. $\mathbf{a}^B$ notasyonu $\mathbf{a}$ öngörü süzgeç katsayılarının ters sırada dizildiğini göstermektedir. Yukarıdaki eşitliklerden elde edilen sonuçlar birleştirilerek, ileri yönde öngörü hata süzgecinin derece güncellemesi,

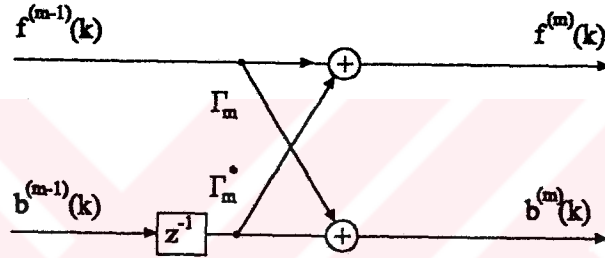
$$f^{(m)}(k) = f^{(m-1)}(k) + \Gamma_m^* b^{(m-1)}(k-1) \quad (3.10)$$

olarak gerçekleştirilir. Benzer eşitlikler geri yönde öngörü hata süzgeci için de tanımlanarak,

$$b^{(m)}(k) = b^{(m-1)}(k-1) + \Gamma_m f^{(m-1)}(k) \quad (3.11)$$

ifadesiyle geri yönde öngörü hata süzgecinin derece güncellemesi yapılabilir. (3.10) ve (3.11) bağıntıları matris formunda yazılarak 1-B kafes öngörü süzgecinin matematiksel tanımı aşağıdaki gibi verilir.

$$\begin{bmatrix} f^{(m)}(k) \\ b^{(m)}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_m^* \\ \Gamma_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f^{(m-1)}(k) \\ b^{(m-1)}(k-1) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$



Şekil 3.1 1-B kafes süzgeç yapısının m . adımı

Şekil 3.1 de 1-B kafes süzgecin m . adımı gösterilmektedir. 1-B işaretler için şekilde verilen kafes modülü arka arkaya eklenerek istenilen derecede öngörü süzgeci oluşturulabilir.

3.1.3 Burg algoritmasının adımları

Burg metodunda süzgeç katsayılarını bulmak için ileri ve geri yönde tanımlanan m . derece için toplam öngörü hatası,

$$e_m = \sum_{k=1}^{N-m} |f^{(m)}(k)|^2 + \sum_{k=1}^{N-m} |b^{(m)}(k)|^2 \quad (3.13)$$

enküçükleştirilmek istenir. Başlangıç koşulu olarak öngörü hata alanlarının ilk değerleri için,

$$f^{(0)}(k) = G(k), \quad b^{(0)}(k) = G(k) \quad (3.14)$$

alınır. (3.13) ile verilen hatayı enküçükleştiren yansıma katsayısı,

$$\Gamma_m = - \frac{2 \sum_{k=m+1}^N f^{(m-1)}(k) b^{*(m-1)}(k-1)}{\sum_{k=m+1}^N |f^{(m-1)}(k)|^2 + |b^{(m-1)}(k-1)|^2} \quad (3.15)$$

olarak bulunur. Hata alanlarının güncellenmesi,

$$f^{(m)}(k) = f^{(m-1)}(k) + \Gamma_m b^{(m-1)}(k-1) \quad (3.16.a)$$

$$b^{(m)}(k) = b^{(m-1)}(k-1) + \Gamma_m^* f^{(m-1)}(k) \quad (3.16.b)$$

$$k = m+1, m+2, \dots, M$$

şeklinde yapılır. Γ_m her öngörü derecesi için (3.13) ile verilen hatayı en aza indirir. m . derecedeki katsayılar,

$$a_{m,m} = \Gamma_m \quad (3.17.a)$$

$$a_{m,i} = a_{m-1,i} + a_{m,m} a_{m-1,m-1}^*, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.17.b)$$

bağıntıları ile bulunur. Burg algoritması 1. derece model ile başlar. Her aşama için öngörü katsayılarını hesaplayarak istenilen öngörü derecesine ulaşır. Levinson yinelemesiyle bulunan kutuplar birim daire içine düştüğünden Burg yöntemi ile bulunan hata süzgeçleri karardır. Bu özellik, Burg metodunun 5. Bölümde göreceğimiz gibi ölçüm aralığı dışındaki verinin öngörülmesi için kullanılmasına neden olmuştur.

Burg yönteminde öngörü hata süzgeçleri 1-B olarak tasarlandığından, bu yöntemle 2-B geri saçılan alan verisi ancak yatay ya da dikey yönde genişletilebilir. 2-B veri matrisinin 1-B diziler şeklinde sütun ve satırlarının ayrı ayrı işlenmesi yaklaşımı nokta saçıcılarından oluşan bir hedeften geri saçılan alan verisinin (f_x, f_y) uzayında ayrıştırılabilir olmasına dayanır. Oysa karmaşık yapıya sahip gerçek hedefler için bu varsayım bir yaklaşıklıklaştır. 2-B geri saçılan alan verisinin 2-B işaret işleme teknikleri ile işlenmesi daha gerçekçi bir yaklaşım olacaktır. Bölüm 3.2 de geri saçılan alanların modellenmesi için kompleks formu ilk kez bu çalışmada önerilen 2-B kafes süzgeç yapısına dayalı bir yöntem sunulmuştur.

3.2 2-B Doğrusal Öngörü Denklemlerinin Yinelemeli Olarak Çözülmesi için Önerilen 2-B Yöntem

3.2.1 Giriş

1-B kafes süzgeçte model derecesinin bir derece arttırılması model destek bölgesine bir nokta eklerken, 2-B kafes süzgeç yapısında N süzgeç derecesini göstermek üzere $O(N)$ nokta eklenir. Bu noktaların tanımlanmasında 1-B durumun aksine herhangi bir doğal sıra olmadığından pek çok 2-B kafes süzgeç yapısı oluşturulabilir [46-52].

2-B kafes süzgeç yapıları oluşturmak için yapılan ilk ve önemli çalışmalardan biri çeyrek düzlem destek bölgesi üç parametrelili kafes süzgeç modelidir [47]. Bu model basit bir algoritmaya sahip olması ve pek çok uygulamada iyi sonuçlar vermesine rağmen, her bir derece artışta sadece 3 parametre tanımladığından, 1. dereceden büyük AR alanları tam olarak modelleyemez. Çünkü yansıma katsayılarının destek bölgesindeki eleman sayısından az olması enformasyon kayıplarına neden olur.

Genişletilmiş süzgeç modelinde ise, geri yönde öngörü hata alanları yani yansıma katsayıları arttırılarak enformasyon kaybı azaltılmaya çalışılmıştır. Bu yapı ile artan derecelerde sabit sayıda yeni parametre destek bölgesine eklendiğinden, destek bölgesindeki nokta sayısı dereceyle karesel olarak artan tüm 2-B özyinelemeli alanların modellenmesi mümkün değildir [50].

Karesel olarak artan sayıdaki yansıma katsayılarını elde edebilmek için, yardımcı yansıma alanları tanımlanmıştır. Bu alanlar kullanılarak 3 parametrelili kafes süzgeç

yapısı genişletilmiş ve her derecedeki özyinelemeli alanları tam olarak modelleyen kafes yapısı oluşturulmuştur [51].

Bu tez çalışmasında kompleks formu ilk kez tanımlanan kafes yapısında ise, 2-B destek bölgesini oluşturan noktalar yatay ve düşey olarak 1-B dizi şeklinde sıralanır. 2-B kafes yapısı 1-B kafes süzgeçlerin uygun şekilde birleştirilmesiyle elde edilir. Bu yöntem ile hem çeyrek düzlem hem de simetrik olmayan yarı düzlem destek bölgeci süreçler modellenabilir [52].

2-B dik kafes yapısı 1-B kafes yapısının uzantısı olarak gerçekleştirilmiştir [52]. Yöntem verilen 2-B genişletilmiş normal denklemden kafes parametrelerini kullanarak öngörü hata süzgeci için katsayıları hesaplamak için Levinson algoritmasının tam çözümünü ortaya koymaktadır. Sunulan kafes yapısı çeyrek düzlem ve simetrik olmayan yarı düzlem uygulanabilir. 2-B dik kafes yapısı verilen öngörü destek bölgesindeki eleman sayısı kadar kafes aşaması içerir. Her kafes aşaması kafes basamaklarından oluşur ve bu basamakların sayısı verilen her bir aşama için basamak sayısı=(destek noktası sayısı+1)-aşama sayısı kadardır. 2-B kafes yapılarındaki aşama kavramı 1-B kafes yapılarındaki derece kavramına karşılık gelir. Böylece her aşamaya ilişkin basamaklar tamamlandığında, 1-B yapıya benzer şekilde ileri ve geri yönde hata alanları elde edilir.

Tezde radar hedefinden geri saçılan alanların 2-B dik kafes yapıları kullanılarak özyinelemeli olarak modellenmesi önerilmiştir. Özyinelemeli modelin katsayıları kafes katsayılarından elde edilir ve bu katsayılar kullanılarak hedefi oluşturan saçıcı merkezlerin konumları saptanabilir. 2-B kafes süzgeçleri gerçel veriler için tasarlandığından, 2-B kompleks değerli geri saçılan alanları modelleyebilmek için kafes yapısı kompleks formda yeniden düzenlenmiştir. Kompleks kafes süzgeç yapısı oluştururken karşılaşılan sorun 1-B ileri ve geri yönde kafes öngörü hata süzgeçlerinin katsayılarının 1-B işaretler için sağladığı özelliklerin doğrudan 2-B ye genişletilememesinden kaynaklanır. 1-B işaretler için geri yönde öngörü hata süzgeç katsayıları Levinson eşitliği nedeniyle ileri yönde öngörü süzgeç katsayılarının kompleks eşleniklerinin ters sırada dizilmişleri olarak elde edilir. Oysa söz konusu 2-B kafes süzgeç yapısı için tanımlanan ileri ve geri yönde süzgeç katsayıları arasında aynı özellik bulunmaz. Dolayısıyla, her aşamada tanımlanan kompleks hata ileri ve geri yönde öngörü süzgeç katsayıları için ayrı olarak indirgenmelidir.

Bu yöntem Burg yönteminin 2-B genelleştirilmesi olarak düşünülebilir. Önerilen yeni yaklaşımla 2-B modellemede en küçük kareler yaklaşımının sakıncaları ortadan kaldırılmıştır.

2-B kafes algoritması adımları aşağıdaki gibi verilebilir:

Adım 1. İlk koşul olarak ölçüm verisi ileri ve geri yönde öngörü hata alanlarına eşitlenir

Adım 2. İleri ve geri yönde öngörü hata alanları arasındaki çapraz ilişkiler hesaplanır.

Adım 3. İleri ve geri yönde öngörü hata güçleri bulunur.

Adım 4. İleri ve geri yönde yansıma katsayıları hesaplanır.

Adım 5. İleri ve geri yönde öngörü alanları güncellenir.

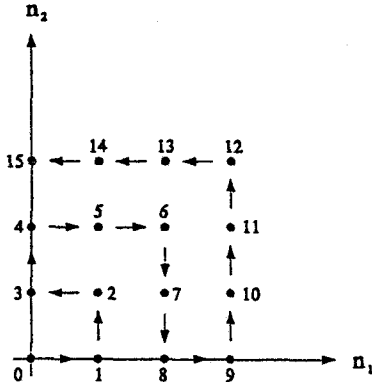
Adım 6. İleri ve geri yönde öngörü katsayı ağırlıkları bulunur.

Adım 7. Bir sonraki kafes aşamasına ilişkin hesaplamalar için adım 2 ye geri dönülür.

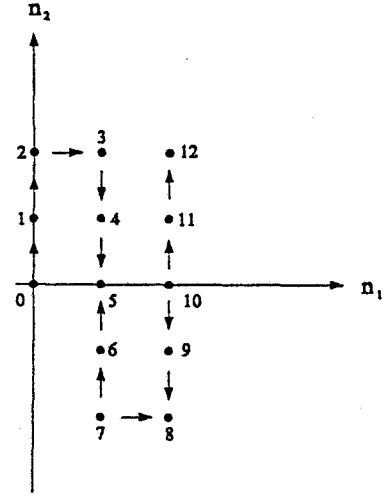
3.2.2 2-B Dik Kompleks Kafes Öngörü Süzgeçleri

Önerilen 2-B kafes yapısı çeyrek düzlem yada simetrik olmayan yarı düzlem destek bölgesi kullanılarak gerçekleştirilebilir. İşlem kolaylığı sağlaması açısından destek bölgesi içindeki elemanlar yatay ve düşey yönler kullanılarak 1-B dizi şeklinde sıralanır ve 0 dan M ye kadar numaralandırılır. Şekil 3.2 de çeyrek düzlem ve simetrik olmayan yarı düzlem modelleri için olası sıralamalar verilmiştir. Seçilen sıralamaya bağlı olarak ileri yönde öngörücü birinci çeyrek düzlem modeline, geri yönde öngörücü ise ikinci ya da dördüncü çeyrek düzlem modeline karşı gelir. Destek bölgesi içindeki sıralama aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$G_{p,q}(k_1, k_2) = [G((k_1, k_2) - p) \ G((k_1, k_2) - p - 1) \cdots G((k_1, k_2) - q)]^T \quad (3.18)$$



(a)



(b)

Şekil 3.2 2-B destek bölgesi için olası sıralamalar: a) çeyrek düzlem, b) simetrik olmayan yarı düzlem

$G((k_1, k_2) - i)$, den i eleman sonra gelen örneği göstermektedir. m . derece ileri yönde öngörü hatası $G(k_1, k_2)$ nin 2-B destek bölgesindeki sıralamayla belirlenen $G((k_1, k_2) - i)$, $1 \leq i \leq m$ değerlerinden öngörülmesi olarak tanımlanır ve

$$f_0^{(m)}(k_1, k_2) = a_0^{(m)T} G_{0,m}(k_1, k_2) \quad (3.19)$$

ile gösterilir. İleri yönde öngörü süzgeç ağırlık katsayıları

$$a_0^{(m)} = [1 \quad a_0^{(m)}(1) \quad a_0^{(m)}(2) \cdots a_0^{(m)}(m)]^T \quad (3.20)$$

yazılabilir. Aynı şekilde, m . derece geri yönde öngörü hatası da $G((k_1, k_2) - m)$ ile gösterilen örneğin $G((k_1, k_2) - i)$, $m-1 \geq i \geq 0$ örnek noktaları kullanılarak öngörülmesi olarak tanımlanabilir ve

$$b_m^{(m)}(k_1, k_2) = g_m^{(m)T} G_{0,m}(k_1, k_2) \quad (3.21)$$

olarak verilir. m . derece geri yönde öngörü süzgeç katsayıları,

$$\mathbf{g}_m^{(m)} = [g_m^{(m)}(m) \quad g_m^{(m)}(m-1) \cdots g_m^{(m)}(1) \quad 1]^T \quad (3.22)$$

yazılabilir. İleri ve geri yönde öngörü hata alanlarının tanımlanmasında kullanılan üst indis öngörü süzgecinin derecesi yani destek bölgesindeki eleman sayısını, alt indis ise öngörülen elemanı temsil eder. (2.14) denklemiyle verilen toplam geri saçılan alan $G(k_1, k_2)$ 2-B dik kafes süzgeç girişine $1 \leq k_1, k_2 \leq N$ için uygulanır. Öngörü hata alanlarının başlangıç değerleri olarak

$$f_p^{(0)}(k_1, k_2) = b_p^{(0)}(k_1, k_2) = G((k_1, k_2) - p) \quad (3.23)$$

$$p = 0, 1, 2, \dots, M.$$

alınır. Algoritma 0.dereceden başlar ve önceki derecelerde elde edilen katsayılardan yararlanarak M . derece öngörü süzgecinin katsayılarını yinelemeli olarak bulur. Önerilen yöntemle birinci ve ikinci çeyrek düzlem katsayılarını aynı anda elde edebilmek için Şekil 3.2.a da gösterilen destek bölgesi dizilimi seçilmiştir. (3.20) denklemiyle gösterilen katsayılar birinci çeyrek düzlem öngörücü katsayılarını, (3.22) denklemiyle verilen geri yönde öngörü hata katsayıları da ikinci çeyrek düzlem öngörücünün katsayılarını verecektir. n . adındaki ileri ve geri yönde öngörü hata alanları,

$$\begin{bmatrix} f_{p-n}^{(n)}(k_1, k_2) \\ b_p^{(n)}(k_1, k_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_{b_p}^{(n)*} \\ \Gamma_{f_{p-n}}^{(n)*} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{p-n}^{(n-1)}(k_1, k_2) \\ b_p^{(n-1)}(k_1, k_2) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$p = 1, 2, \dots, M \text{ ve } n = 1, 2, \dots, p$$

bağıntısıyla verilir. İleri ve geri yönde yansıma katsayıları $\Gamma_{b_p}^{(n)}$ ve $\Gamma_{f_{p-n}}^{(n)}$ öngörü hata alanlarını öngörü süzgeç katsayılarına göre enküçükleştirerek bulunur ve

$$\Gamma_{b_p}^{(n)} = - E[f_{p-n}^{(n-1)*} b_p^{(n-1)}] / E[b_p^{(n-1)} b_p^{(n-1)*}] \quad (3.25.a)$$

$$\Gamma_{f_{p-n}}^{(n)} = - E[f_{p-n}^{(n-1)} b_p^{(n-1)*}] / E[f_{p-n}^{(n-1)} f_{p-n}^{(n-1)*}] \quad (3.25.b)$$

ile verilir. (*) kompleks eşleniği gösterir. $A_0^{(m)}(z_1, z_2)$ ve $G_m^{(m)}(z_1, z_2)$ birinci ve ikinci çeyrek düzlem destekli öngörü süzgeçlerinin hata aktarım işlevlerini gösterir ve

$$\begin{bmatrix} A_{p-n}^{(n)}(z_1, z_2) \\ G_p^{(n)}(z_1, z_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_{b_p}^{(n)*} \\ \Gamma_{f_{p-n}}^{(n)*} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{p-n}^{(n-1)}(z_1, z_2) \\ G_p^{(n-1)}(z_1, z_2) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$p = 1, 2, \dots, M \text{ ve } n = 1, 2, \dots, p$$

olarak yazılabilir. 2-B hata aktarım işlevleri,

$$A_{p-n}^{(n)}(z_1, z_2) = \mathbf{a}_{p-n}^{(n)T} \mathbf{O}_{p-n,n}(z_1, z_2) \quad (3.27.a)$$

$$G_p^{(n)}(z_1, z_2) = \mathbf{g}_p^{(n)T} \mathbf{O}_{p-n,n}(z_1, z_2) \quad (3.27.b)$$

şeklinde de verilebilir. $\mathbf{a}_{p-n}^{(n)}$ ve $\mathbf{g}_p^{(n)}$ öngörü süzgeçlerinin ağırlık katsayıları ve $\mathbf{O}_{p-n}^{(n)}(z_1, z_2)$ sıralama vektörüdür ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\mathbf{O}_{0,m}(z_1, z_2) = [1 \quad \delta_1(z_1, z_2) \quad \dots \quad \delta_m(z_1, z_2)]^T \quad (3.28)$$

$\delta_i(z_1, z_2)$ kullanılan noktanın 2-B destek bölgesi içindeki yerini belirtir ve

$$\delta_p(z_1, z_2) = \frac{Z[y((k_1, k_2) - p)]}{Y(z_1, z_2)} \quad (3.29)$$

$$p = 0, 1, \dots, M$$

ifadesiyle tanımlanır. Öngörü hata süzgeç katsayıları aşağıdaki gibi güncellenebilir.

başlangıç değerleri olarak,

$$\mathbf{a}_p^{(0)} = \mathbf{g}_p^{(0)} = [1] \quad (3.30)$$

$$p = 1, 2, \dots, M$$

alınır ve katsayı ağırlıkları aşağıda verildiği gibi güncellenir.

$$\mathbf{a}_{p-n}^{(n)} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{p-n}^{(n-1)} \\ 0 \end{bmatrix} + \Gamma_{b_p}^{(n)*} \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{g}_p^{(n-1)} \end{bmatrix} \quad (3.31.a)$$

$$\mathbf{g}_p^{(n)} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{g}_p^{(n-1)} \end{bmatrix} + \Gamma_{f_{p-n}}^{(n)*} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{p-n}^{(n-1)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.31.b)$$

$$p = n, n+1, \dots, M$$

Bu kafes yapısı ile 2-B destek bölgesi Şekil 3.2.a da verilen sıralama ile 1-B diziye indirgenir. Bu durumda ileri yönde öngörü hata süzgeci katsayıları birinci çeyrek düzlemin, geri yönde öngörü hata süzgeci katsayıları da ikinci çeyrek düzlem modelin katsayılarını verir. Birinci ve ikinci çeyrek düzlem modelin öngörü katsayıları ile, üçüncü ve dördüncü çeyrek düzlem katsayıları arasında (2.50) ve (2.60) ile verilen ilişki nedeniyle, üçüncü çeyrek düzlem destek bölgesi öngörü hata süzgecinin katsayıları $\mathbf{a}_0^{(M)*}$ ve dördüncü çeyrek düzlem öngörü hata süzgecinin katsayıları da $\mathbf{g}_M^{(M)*}$ olarak bulunur.

4. 2-B KOMPLEKS KAFES ÖNGÖRÜ SÜZGEÇLERİ İLE YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ ISAR GÖRÜNTÜLEME

4.1 Giriş

Sonlu sayıda saçıcı merkezden oluştuğu kabul edilen bir hedefin radar görüntüsü bu saçıcı merkezlerin konum ve genlik bilgilerini içerir. Radar görüntüsünün kalitesi cisme olan optik benzerliğiyle değil, saçınım merkezlerine ilişkin bilgileri vermesindeki doğruluk oranı ile ölçülür. Radar görüntüleme algoritmalarının amacı saçınım merkezlerinin konum ve şiddetlerini elde etmektir. Tez çalışmasında bahsedilen bilgileri çıkartmak için dördüncü ve beşinci bölümlerde kompleks kafes süzgeç yapısına dayalı iki değişik yaklaşım önerilmekte ve oluşturulan algoritmalar hem yapay hem de deneysel hedefler için bulunan sonuçlar ile desteklenmektedir.

1-B öngörü yaklaşımıyla radar görüntüleme, 1-B geri saçılan alan verisinin spektrumunun tepeleri yani öngörü süzgeçlerinin hata aktarım işlevlerinin sıfırları ile saçıcıların konumları arasında bire bir ilişki olmasına dayanır. Benzer varsayım, 2-B geri saçılan alan verisi için yapılacak olursa, hata aktarım işlevlerinin sıfırlarından hedefi oluşturan saçıcı merkezlerin konumlarının saptanabileceği ortaya çıkar.

4.2 Çeyrek Düzlem Model için Hata Aktarım İşlevlerinin Elde Edilmesi

Çeyrek düzlem öngörü hata süzgeci aktarım işlevleri birinci ve ikinci çeyrek düzlem için sırasıyla,

$$A_{FQ}^{(L)}(z_1, z_2) = \mathbf{Z}_1^T \mathbf{A}_{FQ}^{(L)} \mathbf{Z}_2 \quad (4.1.a)$$

$$A_{SQ}^{(L)}(z_1, z_2) = \mathbf{Z}_1^T \mathbf{A}_{SQ}^{(L)} \mathbf{Z}_2 \quad (4.1.b)$$

olarak tanımlanır. Burada birinci ve ikinci çeyrek düzlem öngörü hata süzgeçlerinin katsayı ağırlıkları,

$$A_{FQ}^{(L)} = \begin{bmatrix} 1 & a_{FQ}^{(L)}(0,1) & & a_{FQ}^{(L)}(0,L) \\ a_{FQ}^{(L)}(1,0) & a_{FQ}^{(L)}(1,1) & & a_{FQ}^{(L)}(1,L) \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ a_{FQ}^{(L)}(L,0) & a_{FQ}^{(L)}(L,1) & & a_{FQ}^{(L)}(L,L) \end{bmatrix} \quad (4.2.a)$$

$$A_{SQ}^{(L)} = \begin{bmatrix} a_{SQ}^{(L)}(0,0) & a_{SQ}^{(L)}(0,1) & & a_{SQ}^{(L)}(0,L) \\ a_{SQ}^{(L)}(1,0) & a_{SQ}^{(L)}(1,1) & & a_{SQ}^{(L)}(1,L) \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ 1 & a_{SQ}^{(L)}(L,1) & & a_{SQ}^{(L)}(L,L) \end{bmatrix} \quad (4.2.b)$$

$$Z_i = [1 \quad z_i^{-1} \quad z_i^{-2} \quad \quad z_i^{-L}]^T \quad i = 1,2 \quad (4.2.c)$$

bağıntıları ile verilir. Üçüncü çeyrek düzlem hata aktarım işlevleri ise aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{FQ}^{(L)}(z_1, z_2) &= Z_1^T J A_{FQ}^{(L)} J Z_2 \\ &= Z_1^T \tilde{A}_{FQ}^{(L)} Z_2 \\ &= z_1^{-L} z_2^{-L} A_{FQ}^{(L)}(z_1^{-1}, z_2^{-1}) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Benzer şekilde, dördüncü çeyrek düzlem hata aktarım işlevi de, ikinci çeyrek düzlem öngörücü katsayılarından yararlanarak bulunabilir.

$$\tilde{A}_{SQ}^{(L)}(z_1, z_2) = z_1^{-L} z_2^{-L} A_{SQ}^{(L)}(z_1^{-1}, z_2^{-1}) \quad (4.4)$$

4.3 Hedefin Konum Bilgisinin Elde Edilmesi

Önerilen kompleks 2-B kafes süzgeç yapısı için Şekil 3.2.a da verilen sıralamanın seçilmesi durumunda birinci ve ikinci çeyrek düzlem hata aktarım işlevleri aynı yapı içerisinde ileri ve geri yönde öngörü süzgeçlerinin hata aktarım işlevleri olarak elde edilir.

Hata öngörü süzgecinin sıfırları saçıcı merkezlerin konumlarını belirler. (z_{1k}, z_{2k}) hata aktarım işlevinin k . sıfırı olsun.

$$z_{1k} = c_k e^{j\alpha_k} \quad \text{ve} \quad z_{2k} = d_k e^{j\beta_k} \quad (4.5)$$

olarak verilebilir. (4.5) denklemlerinden k . saçıcının konumu,

$$x_k = \frac{\alpha_k c}{4\pi\Delta f_x}, \quad y_k = \frac{\beta_k c}{4\pi\Delta f_y} \quad (4.6)$$

bağıntısıyla bulunur. Hata aktarım işlevlerinin sıfırlarını ayrı ayrı hesaplamak yerine,

$$P(x, y) = \frac{1}{\left| 1 + \sum_{i=0}^L \sum_{j=0}^L A_{FQ}^{(L)}(i, j) z_1^{-i} z_2^{-j} \right|^2 + \left| 1 + \sum_{i=0}^L \sum_{j=0}^L A_{SQ}^{(L)}(i, j) z_1^{-i} z_2^j \right|^2} \quad (4.7)$$

$$z_1 = e^{j4\pi/c\Delta f_x x} \quad z_2 = e^{j4\pi/c\Delta f_y y}$$

fonksiyonu tanımlanarak (x, y) domeninde saçıcı merkezlerin yerini veren hedef görüntüsü elde edilebilir. (4.7) ifadesinde $A_{FQ}^{(L)}$ L . derece, birinci çeyrek düzlem öngörücü katsayılarını, $A_{SQ}^{(L)}$ L . derece ikinci çeyrek düzlem öngörü katsayılarını

verir. 2-B kompleks kafes yapısı ile çeyrek düzlem için konum bilgisi içeren radar görüntüsü,

$$P_{QP}(x, y) = \frac{1}{\left| A_0^{(M)}(z_1, z_2) \right|^2 + \left| G_M^{(M)}(z_1, z_2) \right|^2} \quad (4.8)$$

$$z_1 = e^{j4\pi/c\Delta f_x x}, \quad z_2 = e^{j4\pi/c\Delta f_y y}$$

fonksiyonundan bulunabilir. $M = (L + 1)^2 - 1$ 2-B destek bölgesindeki örnek sayısıdır. Geri saçılan alanlar 2-B simetrik olmayan yarı düzlem destek bölgesi öngörü süzgeçleri kullanılarak da modellenenebilir. 2-B destek bölgesindeki sıralamanın Şekil 3.2.b de gösterilen şekilde seçilmesi durumunda sadece ileri yönde hata aktarım işlevi, saçıcı konumlarını belirlemek için yeterli olacaktır. Bu durumda saçıcı merkezlerin konumlarını veren fonksiyon $P_{ASHP}(x, y)$,

$$P_{ASHP}(x, y) = \frac{1}{\left| A_0^{(M)}(z_1, z_2) \right|^2} \quad (4.9)$$

şeklini alacaktır.

Hata aktarım işlevlerinin sıfırları saçıcı konumlarını verdiği için, $P(x, y)$ fonksiyonu çizdirilirken saçıcı merkeziyle karşılaşıldığında payda terimi çok küçük değer alır ve fonksiyon tepe değeri oluşturur. Hedef bölgesi Δf kartezyen koordinatlardaki frekans artımı ve c ışık hızı olmak üzere,

$$\frac{-c}{4\Delta f} < x, y < \frac{c}{4\Delta f} \quad (4.10)$$

şeklinde sınırlandırılır

4.4. Hedefin Genlik Bilgisinin Elde Edilmesi

Yukarıda açıklanan doğrusal öngörücülere dayalı görüntüleme yöntemiyle, saçıcı noktaların konumları kestirilir, ancak saçıcıların şiddeti hakkında bilgi edinilemez. Saçıcı sayısı ve konumları belirlendikten sonra , saçıcı noktaların genlik bilgisi en küçük kareler çözümüyle bulunabilir [23]. K' hedefi oluşturduğu varsayılan nokta saçıcı sayısı ve $(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$ k. saçıcı için bulunan konum olmak üzere,

$$G(k_1, k_2) \cong \sum_{k=1}^{K'} G_k(0,0) e^{j4\pi/c(\Delta f_x \hat{x}_k^{k_1} + \Delta f_y \hat{y}_k^{k_2})} \quad (4.11)$$

$$k_1, k_2 = 0, 1, \dots, N-1$$

bağıntıları matrisel eşitlik şeklinde ,

$$Vq = f \quad (4.12)$$

olarak yazılabilir. Burada V $N^2 \times K'$ boyutunda bir matris, q K' boyunda ve f N^2 boyunda bir vektördür. $N^2 \gg K'$ olduğundan bilinmeyen saçıcı genlikleri q için en küçük kareler çözümü,

$$q = (V^H V)^{-1} V^H f \quad (4.13)$$

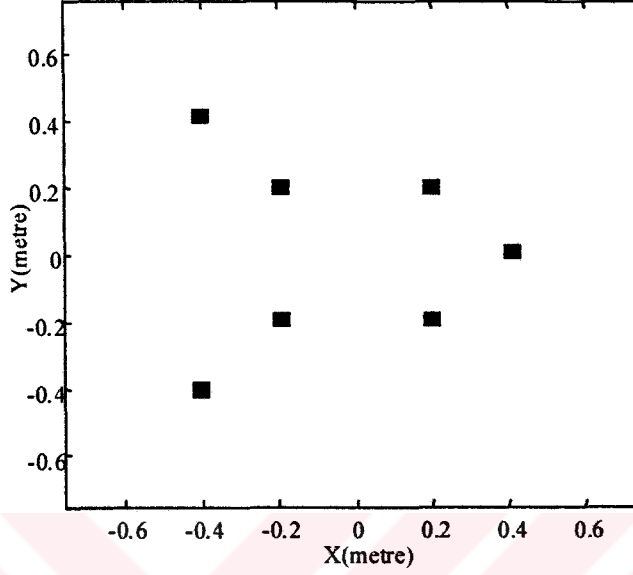
ile verilebilir.

4.5 Sayısal Uygulama Sonuçları

4.5.1 Yapay hedef için sayısal uygulama sonuçları

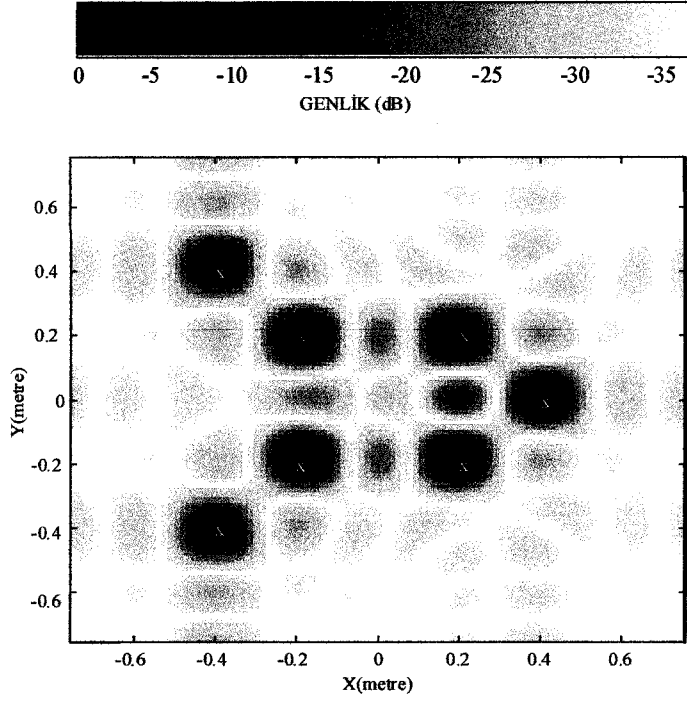
Önerilen yöntem $K = 7$ adet saçıcı merkezden oluşan bir hedeften geri saçılan alanları modellemek için kullanılmıştır. Hedef bölgesi $1.2m \times 1.2m$ lik bir alanı kapsamaktadır. Yapay veri, frekans bandının $8.5 - 9.5GHz$ görüş açısının ise $\pm 3^\circ$ aralığında değiştirildiği varsayımı altında, (f_x, f_y) konumsal frekans uzayında elde

edilmiştir. Frekans artım aralığı olarak $\Delta f_x = \Delta f_y = 100\text{MHz}$ seçilmiştir. Veri boyutu $N = 11$ dir. Seçilen hedef dağılımı Şekil 4.1 de görülmektedir.

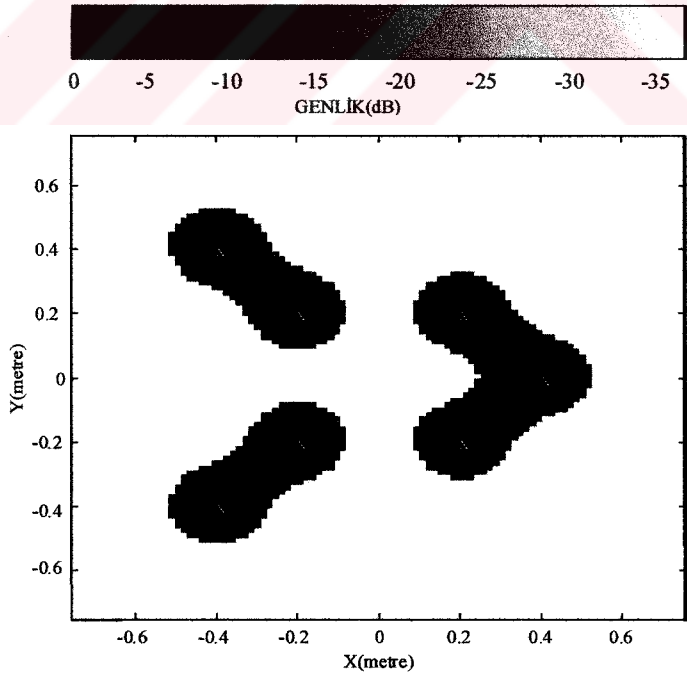


Şekil 4.1 Yapay hedef dağılımı.

Kartezyen koordinatlardaki geri saçılan alan verisinin 2-B Ters Hızlı Fourier dönüşümüne dayanan klasik ISAR görüntüleme yaklaşımının seçilen sınırlı frekans ve aç bantı için yeterli çözünürlük sağlayamadığı sonuçlardan görülebilir. Hedefi oluşturan saçıcı merkezlerin gerçek konumları “x” işareti ile gösterilmiştir. Şekil.4.2 üniform ağırlıklı Ters Fourier dönüşümü sonucu elde edilmiş radar görüntüsünü göstermektedir. Şekilde yüksek seviyeli yan lobların etkisi gözlenebilir. Yan lobları bastırmak için, veri ters Fourier dönüşümü alınmadan Hamming penceresi kullanılarak pencerelenmiştir. Şekil 4.3 de yan lob etkisinin azaldığı ancak çözünürlüğün de birlikte azaldığı görülmektedir. Hedef bölgesindeki 7 adet saçıcı merkez sezilememektedir. Klasik yaklaşımla en yüksek çözünürlük, pencerelenmemiş veriden elde edilir, ancak bu durumda yan lob etkisi nedeniyle kuvvetli saçıcıların yakınındaki zayıf şiddetteki saçıcılar Fourier dönüşümünün harmonikleri arasında seçilemeyebilir.



Şekil 4.2 Yapay hedef için üniform ağırlıklı ters Fourier dönüşümü ile oluşturulan radar görüntüsü (gürültüsüz durum).

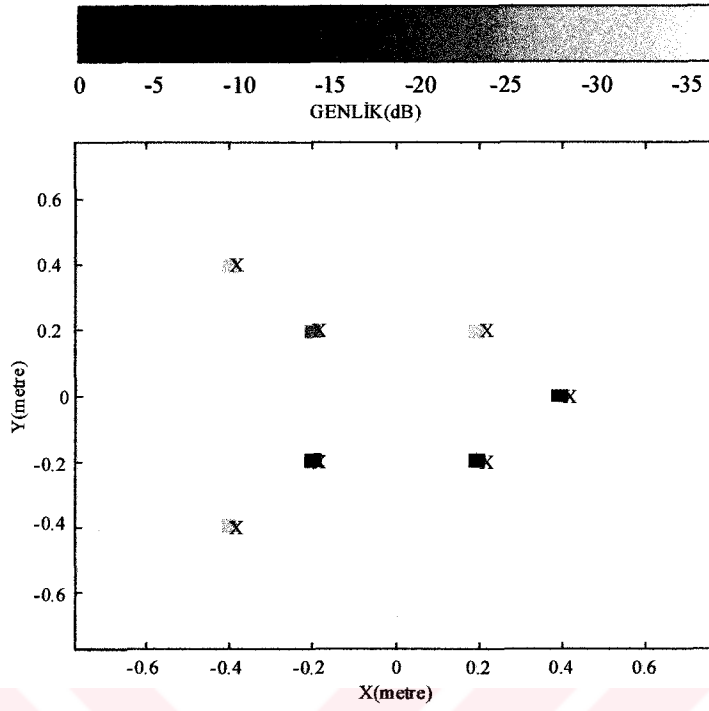


Şekil 4.3 Yapay hedef için Hamming ağırlıklı ters Fourier dönüşümü ile oluşturulan radar görüntüsü (gürültüsüz durum).

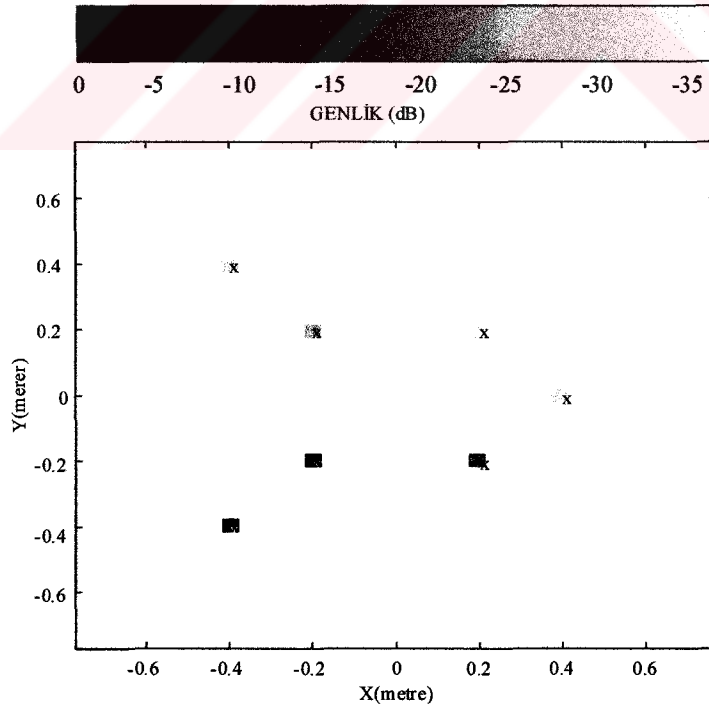
L öngörü derecesinin uygun seçimi doğrusal öngörü yöntemlerinde büyük önem taşır. Öngörü derecesinin büyük seçilmesi durumunda daha çok saçıcı noktadan oluşan karmaşık hedefler görüntülenebilir, ancak derecenin gereğinden büyük seçilmesi işlem yükünü arttırmanın yanısıra spektrum tepelerinde ayrılmaya neden olur ki bu da gerçekte varolmayan saçıcı merkezlerin sezilmesine neden olur. Pratikte $L, N=3L$ olacak şekilde seçilebilir.

Şekil 4.4 de, ölçüm gürültüsünün olmadığı durum için öngörü denklemlerinin en küçük kareler çözümünden elde edilen öngörü katsayılarından (4.8) denklemiyle tanımlanan $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun çizimleri verilmiştir. Bu yaklaşım fonksiyon tepeleri ile saçıcı merkezlerin konumları arasında bire bir ilişki olmasına dayanır. Fonksiyonun tepeleri saçıcı merkezlerin konumlarını verirken, saçıcı şiddetleri hakkında bilgi çıkartılamaz. Genlik bilgisinin çıkartılması için (4.11)-(4.13) ile verilen ek işlemlerin yapılması gerekir. Benzetimde tüm saçıcı merkezlerin şiddeti eşit alınmış, problem sadece konum bilgisinin çıkarımına indirgenmiştir.

Şekil 4.5 de yapay veriye ölçüm sisteminden kaynaklanan gürültüyü modelleyecek şekilde Gauss gürültüsü eklenmesi durumu için en küçük kareler yöntemi ile elde edilen konum görüntüsü görülebilir. Gürültüsüz durum için saçıcı merkezlerin konumları tam doğrulukla saptanırken, gürültülü veriden oluşturulan görüntüdeki tepe değer genlikleri kimi saçıcılar için çok küçük değerler alır ve her deneme için farklılık gösterir. Yine de fonksiyon tepeleri konum bilgisini sağladığından, yapay veri için en küçük kareler çözümü iyi sonuç vermektedir. Ancak, birinci ve ikinci çeyrek düzlem öngörü katsayılarını elde edebilmek için 2 adet denklem sisteminin çözümü gerekir ve her öngörü derecesi için öngörü denklemleri yeniden oluşturularak çözülmelidir.



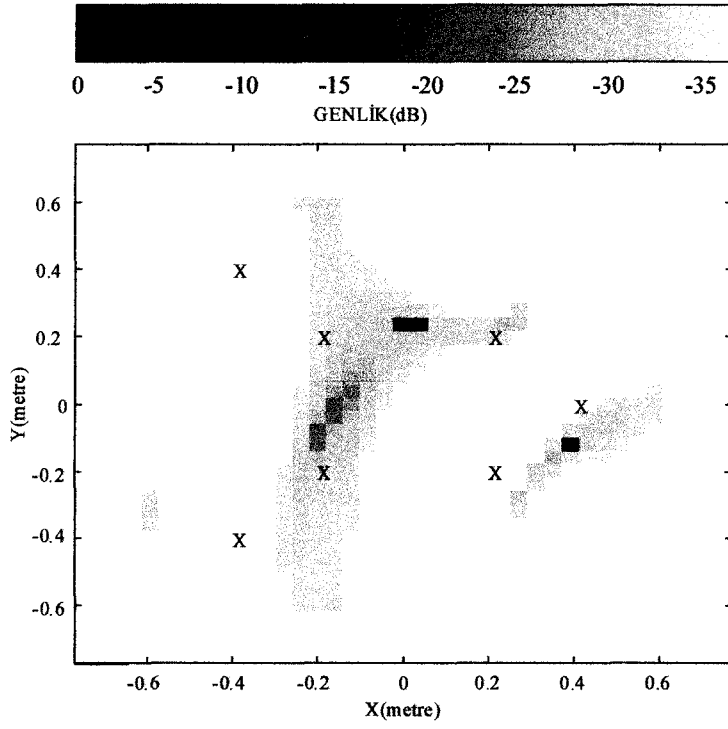
Şekil 4.4 En küçük kareler çözümünden elde edilen öngörü katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi (gürültüsüz durum).



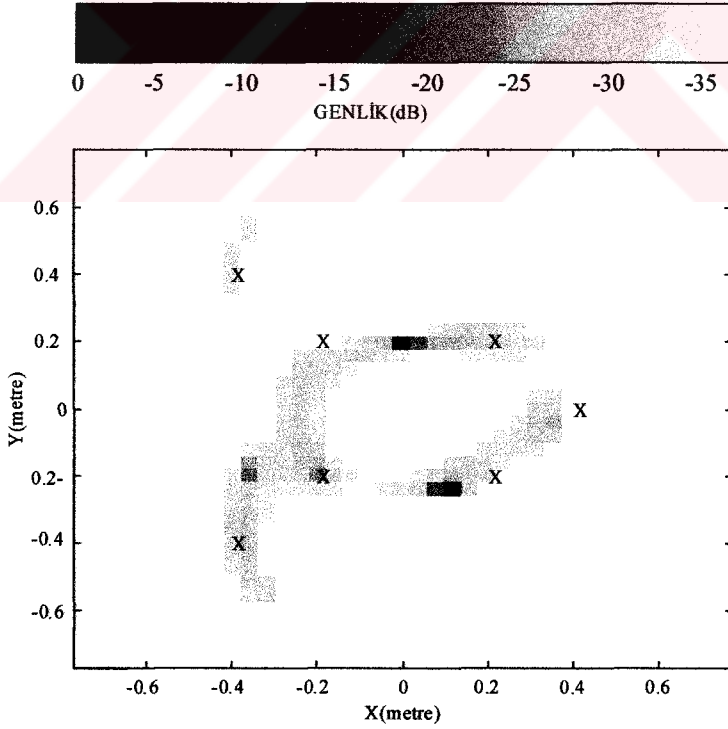
Şekil 4.5 En küçük kareler çözümünden elde edilen öngörü katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi ($S / N = 10dB$).

Şekil 4.6-4.8 de öngörü denklemlerinin 2-B dik kompleks kafes süzgeç kullanılarak yinelemeli olarak çözülmesiyle bulunan öngörü katsayıları ile çizdirilen konum görüntüleri verilmektedir. Yapay olarak elde edilen geri saçılan alan verisi 2-B dik kafes yapısının girişine uygulanmıştır. Bu benzetimde $L = 1,2,3$ öngörü dereceleri için 2-B kompleks kafes süzgeç yapısı oluşturulmuştur. 1. Derece çeyrek düzlem kafes süzgecinin destek bölgesi 3 eleman içerir. Kafes süzgeç yapısı bölüm 3.2 de anlatıldığı gibi 3 aşamadan oluşur, 1 aşamada 3, 2 aşamada 2, 3. aşamada ise 1 adet basamak (1-B kafes modülü) bulunur. 2. derece çeyrek düzlem kafes yapısı ise destek bölgesinde 8 eleman içerdiğinden 8 aşama ve her aşamada 8-aşama sayısı kadar kafes modülü kullanılarak oluşturulur. Benzer şekilde destek bölgesinde $((N+1)^2 - 1)$ adet eleman içeren N . derece kafes süzgeç yapısı ise $(N+1)^2 - 1$ aşama ve her aşamada $((N+1)^2 - \text{aşama})$ sayısı kadar basamak içerir. 2-B kafes modeli her yeni öngörü derecesi için bir önceki derecede elde edilen öngörü hata alanları kullanılarak oluşturulduğundan, öngörü derecesinin değiştirilmesi durumunda eski aşamaların tekrar hesaplanması gerekmez. Ayrıca destek bölgesindeki sıralamanın Şekil 3.2.a da gösterildiği gibi seçimi ile 1. ve 2. Çeyrek düzlem model katsayıları 2-B kafes süzgecin ileri ve geri yönde öngörücü katsayılarına karşı gelir.

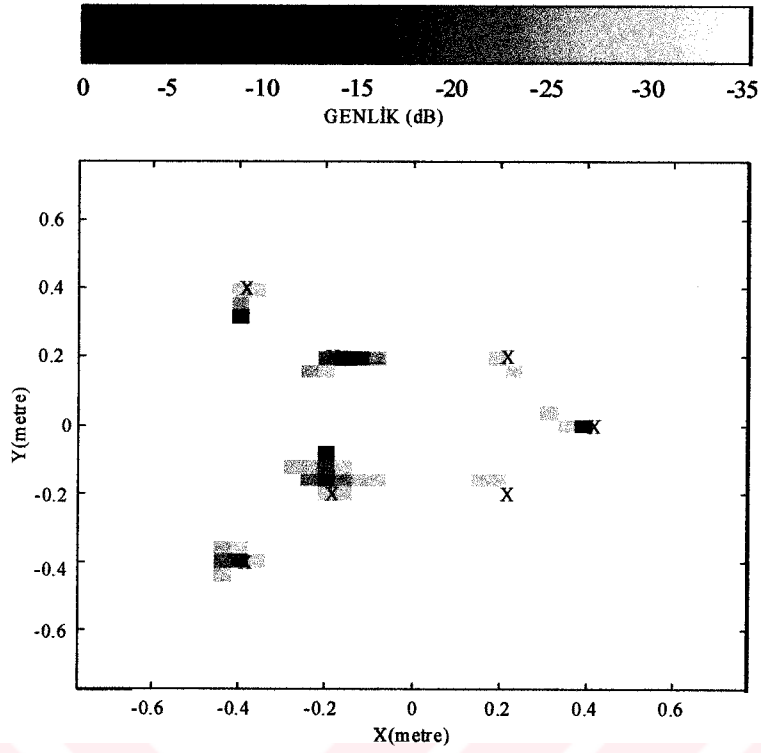
Şekil 4.6-4.8 de verilen görüntülerden öngörü derecesi arttıkça sonuçlarda belirgin bir iyileşme olduğu gözlemlenmektedir. $L = 3$ için yeterli çözünürlük sağlandığından daha yüksek dereceler için sonuç verilmemiştir. Kullanılan giriş verisi 11×11 boyutunda olduğundan daha yüksek öngörü derecesi için kartezyen koordinatlardaki frekans adımı küçültülerek verilen frekans-açı aralığında daha çok sayıda örnek almak gerekir. Ancak daha fazla örnek değeriyle çalışılması durumunda hem yöntemin işlem yükü artacak hem de interpolasyon etkisi nedeniyle Fourier dönüşümünün sağladığı çözünürlük iyileşecektir. Verilen giriş matrisi için en yüksek öngörü derecesi $L = 3$ olarak elde edilebilir. Şekil 4.9-4.11 de Gauss gürültüsü eklenmiş veri için elde edilen sonuçlar görülmektedir. Beklendiği gibi kafes süzgeç modeli gürültüden etkilenmemektedir.



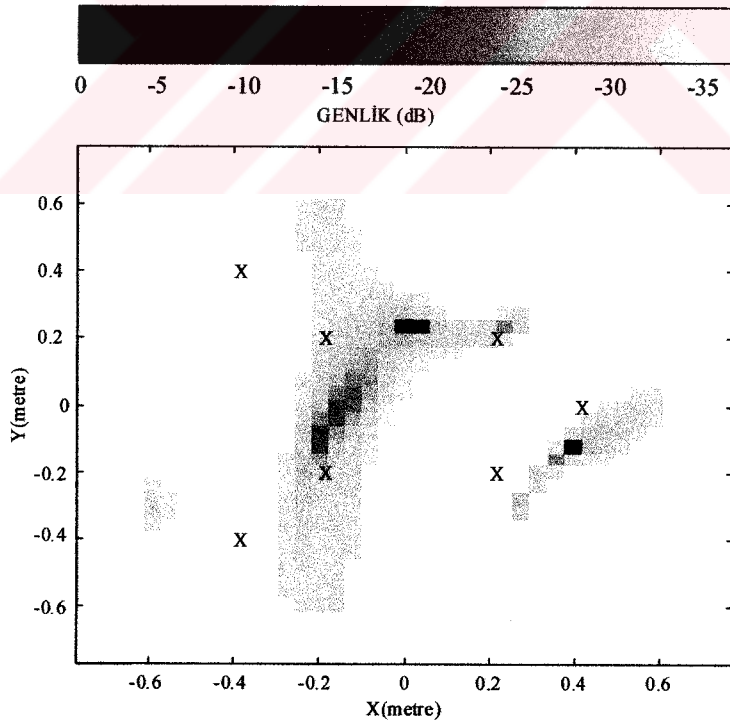
Şekil 4.6 1. derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{QP}(x,y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi (gürültüsüz durum).



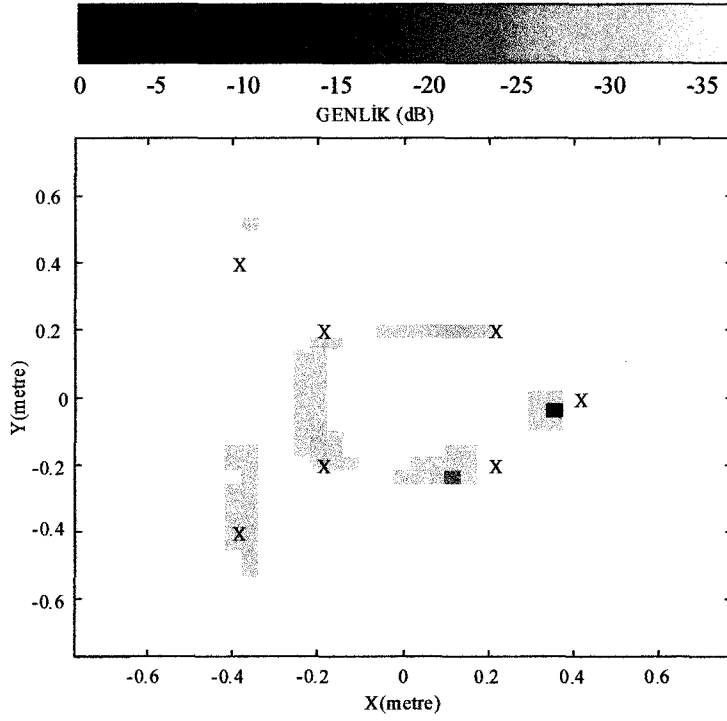
Şekil 4.7 2. derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{QP}(x,y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi (gürültüsüz durum).



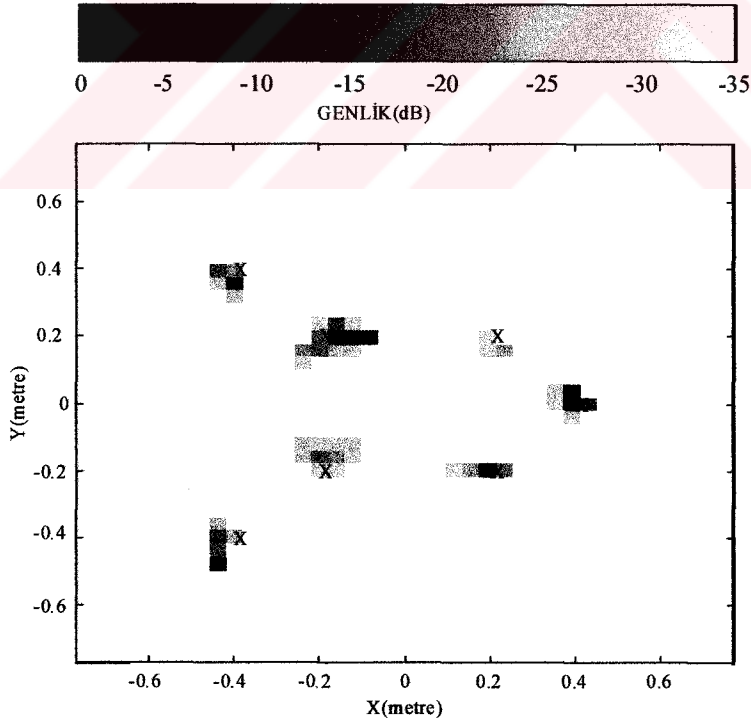
Şekil 4.8 3. derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi (gürültüsüz durum).



Şekil 4.9 1. derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi ($S/N = 10dB$).



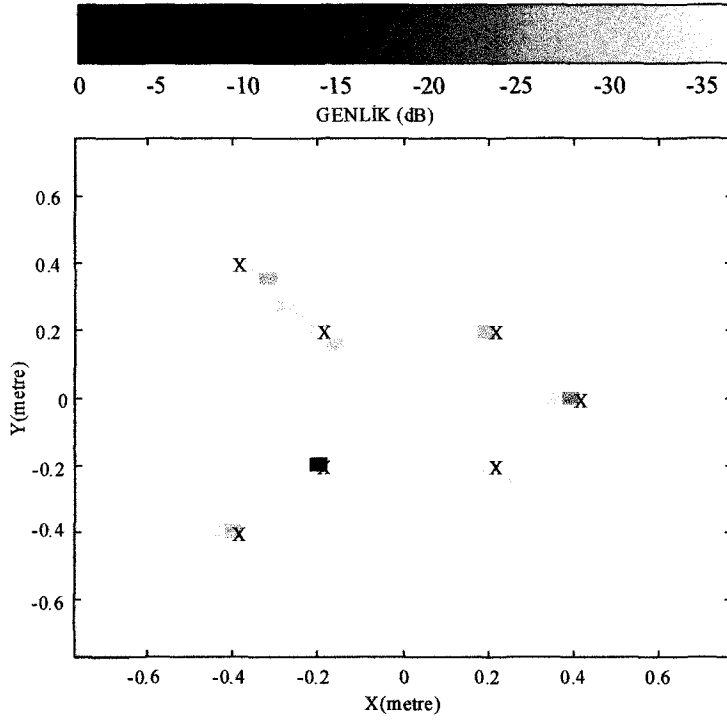
Şekil 4.10 2. derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi ($S/N = 10dB$)



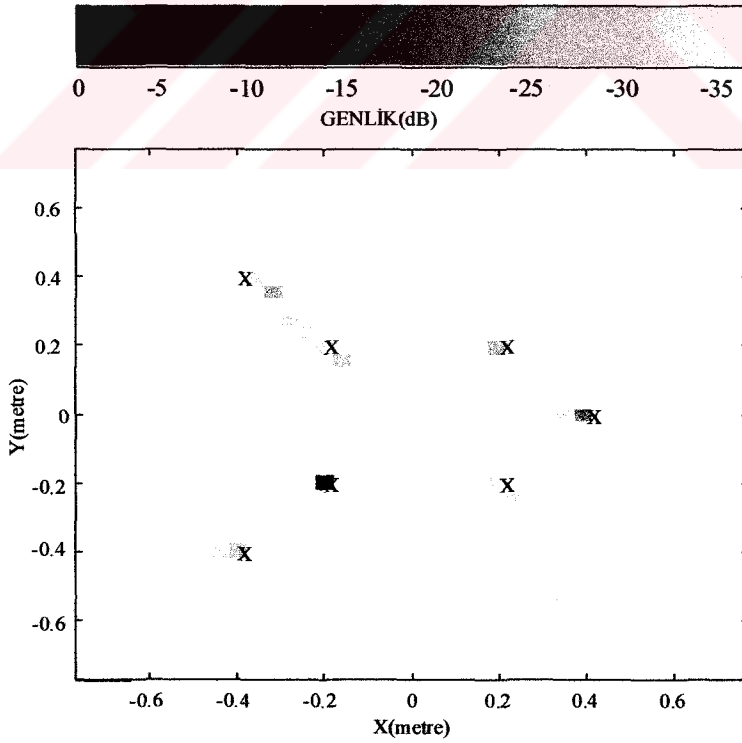
Şekil 4.11 3. derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi ($S/N = 10dB$).

2-B kafes süzgeç yapısı destek bölgesindeki elemanların 1-B dizi şeklinde sıralanmasına dayandığından, önerilen yöntem simetrik olmayan yarı düzlem destek bölgesi öngörü problemine de uyarlanabilir. Çeyrek düzlem modelde, sonuç için birinci ve ikinci çeyrek düzlem modellerin yani ileri ve geri yönde hata aktarım işlevlerinin birleştirilmesi gerekir. Simetrik olmayan yarı düzlem model kullanılması durumunda P fonksiyonunu çizimi için sadece ileri yönde hata aktarım işlevi yeterli olacaktır. Ancak konum görüntüsünün sadece ileri yönde hata aktarım işlevi kullanılarak bulunması simetrik olmayan yarı düzlem modeline üstünlük sağlamaz, çünkü destek bölgesi için Şekil 3.2.a da verilen sıralamanın seçilmesi durumunda birinci ve ikinci çeyrek düzlem öngörütüler aynı anda ek işlem yükü getirmeden elde edilmektedir.

Aynı dereceden simetrik olmayan yarı düzlem destek bölgesi elemanlarının sayısı, çeyrek düzlem destek bölgesi eleman sayısından fazladır. Örnek olarak üçüncü derece çeyrek düzlem modelin destek bölgesinde 15, üçüncü derece simetrik olmayan yarı düzlem modelin destek bölgesinde ise 24 adet eleman bulunur. 2-B kafes yapısı M destek bölgesindeki eleman sayısı olmak üzere $M(M+1)/2$ 1-B kafes modülü kullanılarak oluşturulabilir. Üçüncü derece çeyrek düzlem 2-B dik kafes yapısı 120, simetrik olmayan yarı düzlem model ise 300 adet 1-B kafes modülü kullanılarak oluşturulur. Ayrıca simetrik olmayan yarı düzlem destek bölgesi, verilen herhangi bir öngörü derecesi için çeyrek düzleme oranla daha büyük olduğundan daha büyük boyutlu alanları modelleyebilir. Kısa veri kayıtlarının modellenmesi için çeyrek düzlem model daha uygundur. Giriş verisi boyutu $N = 30$ olarak alınarak, gürültüsüz ve toplamsal Gauss gürültüsü eklenmiş veri için elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 de gösterilmiştir. Uygun sonuçlar elde edilmesine karşılık hem modellenecek alanı daha büyük seçme hem de yapının daha yüksek sayıda kafes modülü kullanarak gerçekleştirilmesi nedeniyle simetrik olmayan yarı düzlem destek bölgesinin kullanımı problemimiz için uygun değildir.



Şekil 4.12 3. derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{ASHP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi (gürültüsüz durum).



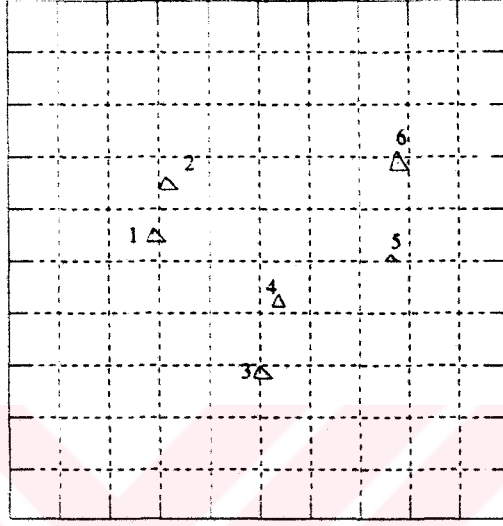
Şekil 4.13 3. derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{ASHP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi ($S/N = 10dB$).

4.5.2 Deneysel hedef için uygulama sonuçları

Kafes süzgeç algoritmasının deneysel veri için de başarımı incelenmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan yapay veri, 2. Bölümde anlatıldığı gibi, hedefin nokta saçıcılarından oluştuğu ve bu saçıcıların yansıtma fonksiyonunun frekanstan bağımsız olduğu kabulü altında oluşturulmuştur. Yeteri kadar yüksek frekans bölgesinde ve dar bandlı işaretler ile çalışılması durumunda bu varsayım yapılabilir [18]. Gerçekte saçıcıların yansıtma fonksiyonu frekansa bağımlılık gösterdiğinden, ölçüm verisi kullanılması durumunda yukarıda belirtilen yaklaşımlar algoritmanın başarımını etkilemektedir. Bu nedenle, önerilen herhangi bir algoritmanın gerçek başarımı deneysel hedefler kullanılarak anlaşılabilir.

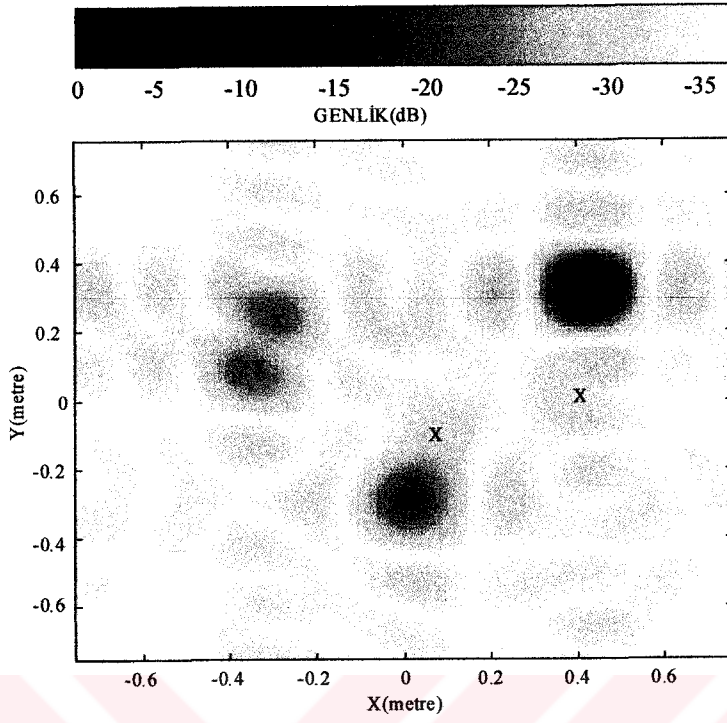
Bu tez çalışmasında, deneysel veri olarak Ohio-State Üniversitesi, Electrosience Laboratuvarı'ndan sağlanan ve 6 adet saçıcı merkezden oluşan deneysel hedeften geri saçılan alan ölçüm değerleri kullanılmıştır. Şekil 4.14 de geometrisi verilen hedef 1.2m x 1.2m lik bir alana yerleştirilmiş, 6 köşeli yansıtıcıdan oluşmaktadır. Yansıtıcı #6 en geniş, yansıtıcı #5 ise en küçük yansıtma yüzeyine sahiptir. Yansıtıcı #4 boyut olarak yansıtıcı #5 e yakındır. Diğer yansıtıcılar hemen hemen aynı boyutlardadır. Geri saçılan alan değerleri 50 MHz lik frekans artım aralıklarıyla 2-18 GHz aralığında ve görüş açısı da 0.25° lik açısal artımlarla $\pm 10^\circ$ aralığında değiştirilerek elde edilmiştir.

Ölçüm verisi Hızlı Fourier dönüşüm algoritmasının kullanılabilmesi için interpolasyonla kartezyen (dik) koordinat sistemine aktarılmıştır. Verilen hedef için ölçüm verisi (f_x, f_y) konumsal frekans uzayında f_x , 8.5–9.5GHz ve f_y , ± 0.5 GHz aralığında değişmektedir. Konumsal frekans artım aralığı her iki ekseninde $\Delta f_x = \Delta f_y = 100$ MHz seçilmiştir.

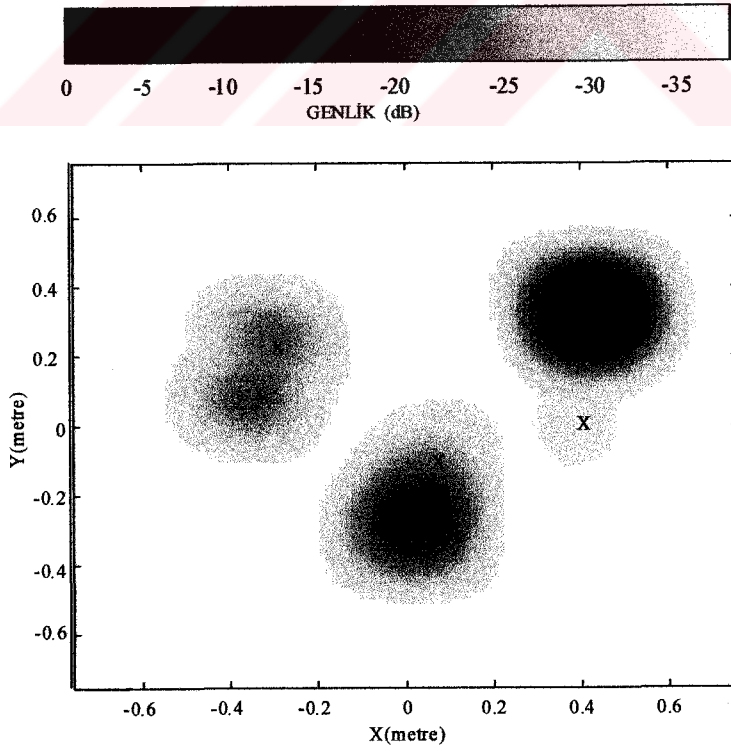


Şekil 4.14 Deneysel hedef dağılımının geometrisi

Konumsal frekans uzayında tanımlanmış geri saçılan alan verisinden eşit ağırlıklı ve Hamming ağırlıklı ters Fourier dönüşümü alınarak elde edilen ISAR görüntüleri sırasıyla Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 da verilmiştir. Beklendiği gibi, eşit ağırlıklı Fourier dönüşümü kullanılması durumunda yüksek yan lobların etkisiyle kuvvetli saçıcıların yakınındaki zayıf saçıcılar sezilememiştir. Saçıcı #4 ve saçıcı#5 konumları Şekil 4.15 de görüldüğü gibi belirlenememektedir. Yan lob etkisi azaltmak için Hamming ağırlıklı Fourier dönüşümü kullanılması yani frekans domeni verisinin dönüşüm öncesi pencerelenmesi işlemi ise çözünürlüğün daha da azalmasına neden olmuştur. Şekil 4.16 da saçıcı merkez olabilecek 3 bölge görülmektedir. Oluşturulan radar görüntüsünden saçıcı merkezlerin sayı ve konumlarını saptamak mümkün değildir.



Şekil 4.15 Deneysel hedef için üniform ağırlıklı ters Fourier dönüşümü ile oluşturulan radar görüntüsü



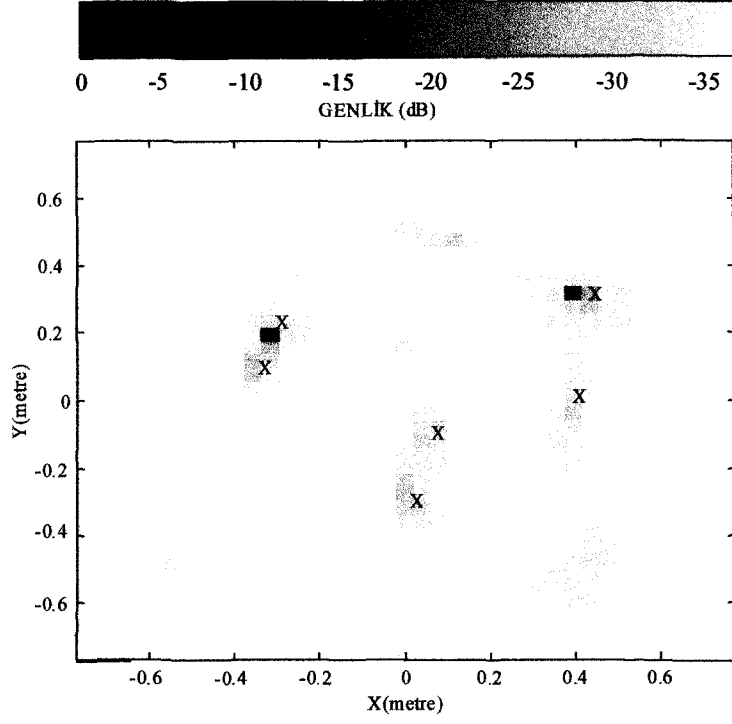
Şekil 4.16 Deneysel hedef için Hamming ağırlıklı ters Fourier dönüşümü ile oluşturulan radar görüntüsü

Şekil 4.17 de en küçük kareler çözümüyle elde edilen hedef görüntüsü verilmiştir. En küçük kareler çözümünde öngörü katsayıları doğrudan matris tersi alma yöntemleriyle bulunduğundan, bu yöntem gürültüye çok duyarlıdır. Yapay hedef için yöntem iyi bir başarımla gösterirken, deneysel hedef için ölçüm sisteminden kaynaklanan gürültü etkisi nedeniyle başarımla azalmıştır. Şekil 4.17 de gürültü nedeniyle saçıcı sayısından fazla tepe değeri gözlenmektedir. Gerçek saçıcıları gürültü nedeniyle oluşan tepelerden ayırt edebilmek için tekil özdeğerlere ayrıştırma (SVD) yöntemi kullanılarak işaretten kaynaklanan tepeler keskinleştirilip, gürültüden kaynaklanan tepeler bastırılabilir. Öngörücü katsayıları, doğrudan matris tersi alma yöntemleri yerine SVD yöntemi ile aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

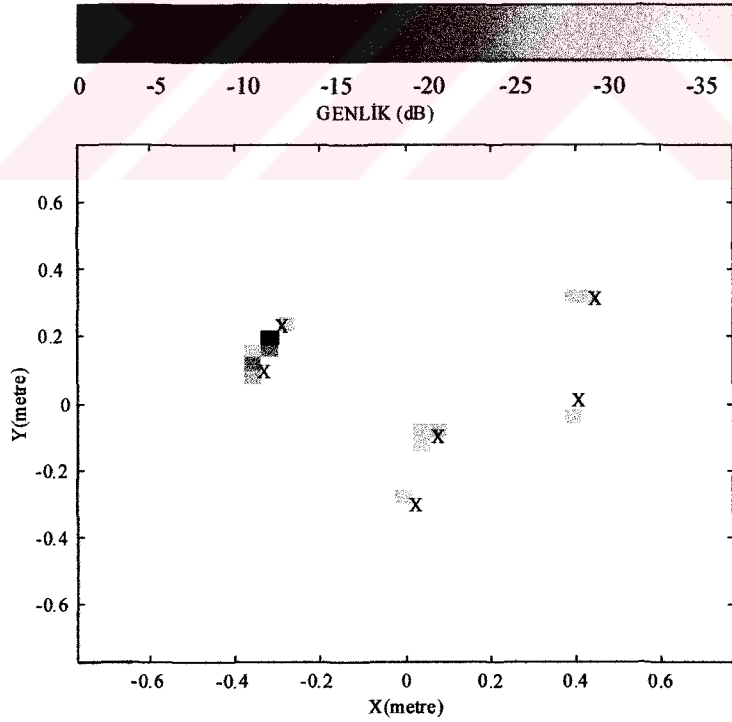
$$a = -\sum_{k=1}^{K'} \frac{(U_i^H r)}{\lambda_i} U_i \quad (4.14)$$

λ_i , özilişki matrisi R' nin özdeğerleridir ve U_i , λ_i özdeğerine karşı gelen özvektörlerdir. K' hedefi oluşturduğu varsayılan nokta saçıcı sayısıdır. Gerçek hedefler için nokta saçıcı sayısı bilinmediğinden, SVD algoritmasında özilişki matrisinin özdeğerleri incelenerek K' değeri kestirilir. En büyük K' özdeğerin geri saçılan alanları, geri kalanların da gürültüyü tanımladıkları kabul edilir. (4.14) bağıntısıyla verilen katsayılar kullanılarak $P(x, y)$ çizdirilirse, gerçek saçıcı konumlarını veren görüntü elde edilir, gürültü nedeniyle oluşan tepeler bastırılır.

Ancak uygulamada, özilişki matrisinin işareti ve gürültüyü temsil eden özdeğerleri arasında belirgin bir fark bulunmayabilir. Bu durumda K' sayısı ek algoritmalar yardımıyla kestirilmeye çalışılır ve görüntüleme metodunun işlem yükü artar. Şekil 4.18 de, $K' = 6$ seçilmesi durumunda, SVD algoritmasıyla bulunan öngörü katsayılarından hesaplanan konum görüntüsü verilmiştir. Görüldüğü gibi, saçıcı merkez sayısının bilinmesi durumunda SVD yöntemi iyi sonuç vermektedir. Ancak, daha karmaşık yapıdaki hedefler için K' sayısının kestirilmesi zorlaşacağından, SVD algoritmasının başarımının etkileneceği açıktır.

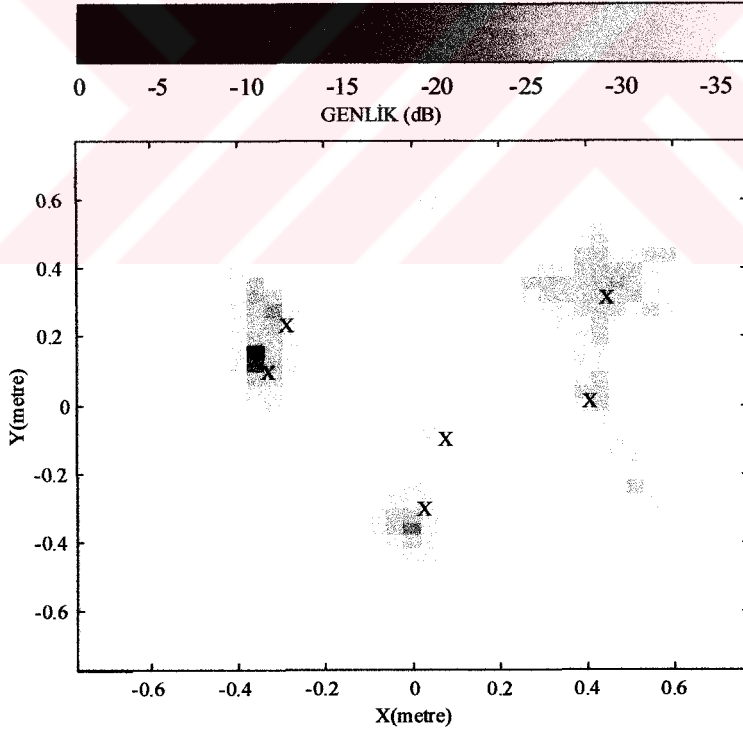


Şekil 4.17 Deneysel hedef için en küçük kareler çözümünden elde edilen öngörü katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi.



Şekil 4.18 Deneysel hedef için SVD yönteminden elde edilen öngörü katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi.

Yukarıda anlatılan SVD algoritmasına dayanan yaklaşım, işaret ve gürültüden kaynaklanan özdeğerleri ayrıştırabilmek için saçıcı merkezlerin sayısı gibi hedef hakkında ön bilgiye ihtiyaç duyar. Kafes süzgeç algoritması ise hedef hakkında herhangi bir ön bilgi gerektirmez. Önerilen görüntüleme metodu için en uygun olduğu gözlenen üçüncü derece çeyrek düzlem destekli kafes süzgeç çıkışı Şekil 4.19 da gösterilmiştir. Klasik Fourier yöntemine göre, geliştirilen kafes öngörü süzgeçlerine dayalı algoritma ile hem menzil hem de çapraz menzil için çözünürlüğün iyileştiği görülmektedir. Kafes süzgeç çözümü gürültüden etkilenmediği için doğrudan matris tersi alma yaklaşımından daha iyi sonuç verir. Tekil özdeğerlere ayrıştırma metodu daha iyi sonuç vermesine rağmen hedef hakkında ön bilgiye ihtiyaç duyar, ön bilgi olmayan durumlarda ve gürültü ve işaret ile ilgili özdeğerler arasındaki ayrım yeterince açık değilse, algoritma yanlış saçıcı merkezler oluşturabilir ya da bazı saçıcılar saptanamayabilir.



Şekil 4.19 Deneysel hedef için 3. derece kafes süzgeç katsayıları ile $P_{QP}(x, y)$ fonksiyonunun grilik seviyesi çizimi.

Tablo 4.1 ve Tablo 4.2 de sırasıyla yapay ve deneysel hedef için yöntemlerin hata başarımları verilmiştir. Hata,

$$e = \frac{\sum_{x,y=1}^N (P_{real}(x,y) - P_{QP}(x,y))^2}{N^2} \quad (4.15)$$

şeklinde tanımlanmıştır. $P_{real}(x,y)$ gerçek hedef dağılımını göstermektedir.

Tablo 4.1 de yapay hedef için en küçük kareler yaklaşımının en iyi sonucu verdiği görülmektedir. Verilen örnek için, SVD algoritmasının kullanılması gerekmemektedir. Kafes süzgeç algoritması için öngörü derecesindeki artımla birlikte hatanın azaldığı görülmektedir. Birinci derece kafes süzgeç yapısı, geri saçılan alanları yeterince modelleyemediğinden hata değeri Fourier metodundan büyük çıkmıştır.

Tablo 4.2 de deneysel hedef için en büyük hata değerini beklendiği gibi Fourier dönüşümüne dayanan klasik metodun verdiği görülmektedir. En küçük kareler çözümünün hata değeri deneysel hedef için kafes süzgeç yapısına dayanan yeni algoritmadan daha büyüktür. Hata değeri, SVD algoritması kullanılarak indirgenmiş ise de, daha önce belirttiğimiz gibi SVD hedef hakkında saçıcı sayısı gibi ön bilgi gerektirir.

Tablo 4.1
Yapay hedef için hata değerleri

Yöntem	S/N=20 dB	S/N=10 dB
Hamming ağırlıklı Ters Fourier dönüşümü	0.1392	0.1395
En küçük kareler çözümü	0.0066	0.0092
Kafes süzgeç, öngörü derecesi L=1	0.2012	0.2249
Kafes süzgeç, öngörü derecesi L=2	0.1078	0.1466
Kafes süzgeç, öngörü derecesi L=3	0.0256	0.0296

Tablo 4.2 Deneysel hedef için hata değerleri

Yöntem	Hata
Hamming ağırlıklı Ters Fourier dönüşümü	0.23
En küçük kareler çözümü	0.0677
Tekil değerlere ayrıştırma (SVD)	0.0224
Kafes süzgeç, öngörü derecesi L=3	0.0375

Tablo 4.3 de incelenen yöntemlerin işlem yükleri verilmiştir. Fourier dönüşümünün kullanıldığı klasik yaklaşım en az işlem yüküne sahiptir. Önerilen kafes süzgeç yapısına dayalı yeni yöntemin işlem yükü ise [52] de belirtilen indirgenmiş yapılar kullanılarak SVD algoritması ile aynı seviyeye çekilebilir.

Tablo 4.3 Yöntemlerin işlem yükü

Yöntem	İşlem yükü
Hızlı Fourier dönüşümü	$O(N^2 \log_2 N^2)$
En küçük kareler çözümü	$O(N^3)$
Tekil değerlere ayrıştırma (SVD)	$O(6N^3)$
Kafes süzgeç yapısı	$O(N^4 / 2)$
İşlem miktarı indirgenmiş kafes süzgeç yapısı	$O(N^3)$

5. 2-B VERİ GENİŞLETME İLE YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ ISAR GÖRÜNTÜLEME

5.1 Giriş

4. Bölümde sınırlı frekans bandı ve gözlem açısı aralığından elde edilmiş geri saçılan alanlardan yüksek çözünürlüklü görüntü elde etmek için 2-B dik kafes öngörü süzgeçlerine dayanan yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Kafes yapısıyla elde edilen öngörü süzgeçleri kullanılarak, geri saçılan alanlar modellenmiş ve modelin güç spektrumunu çizdirilerek hedefi oluşturan saçıcı merkezlerin konumları belirlenmiştir. Ancak bu yaklaşım ile doğrudan hedefin ISAR görüntüsü elde edilemez. Saıcıların konum ve genlik bilgisini içeren radar görüntüsü oluşturabilmek için gerçekleşmesi gereken işlem adımları aşağıda verilmiştir:

- Model parametreleri kestirilerek, 2-B konum bilgisi içeren görüntü oluşturulur.
- 2-B tepe bulma algoritmalarıyla saçıcı merkezlerin konumları saptanır.
- En küçük kareler yaklaşımı kullanılarak saptanan konumlar için saçıcı şiddetleri bulunur.

Bu nedenle sınırlı veri için ölçüm aralığı dışındaki verinin öngörü katsayıları kullanılarak kestirilmesine dayanan ikinci bir yaklaşım önerilebilir. Veri model parametreleri kullanılarak istenen frekans ve açı bandını kapsayacak şekilde genişletilir ve ters Fourier dönüşümü alınarak yüksek çözünürlükte hedef görüntüsü elde edilir. Fourier dönüşümü genlik bilgisini koruduğundan bu yaklaşımla saçıcı konum ve şiddetleri ek işleme adımlarına gerek kalmaksızın elde edilebilir.

5.2 1-B Veri Genişletme

Verilen herhangi bir 1-B süreç, 1-B öngörü teknikleri kullanılarak geçmiş değerlerinin doğrusal kombinasyonu (ileri yönde öngörü) ya da gelecek değerleri

cinsinden (geri yönde öngörü) elde edilebilir. 1-B işaretler için öngörü katsayıları Bölüm 3 de anlatıldığı gibi Burg yöntemi ya da her öngörü derecesi için matris tersi almaya dayanan Kovaryans yöntemi kullanılarak bulunur [18]. Öngörü katsayıları kullanılarak veri ölçüm bölgesi dışındaki değerleri kapsayacak şekilde genişletilebilir. 1-B geri saçılan alan verisi $G(k)$ aşağıda verildiği gibi ölçüm sınırları dışına genişletilebilir [18].

$$G_x(k) = \begin{cases} \sum_{i=1}^L a_i^* G(k+i), & k < N_1 \\ G(k-N_1), & N_1 \leq k \leq N_1 + N \\ -\sum_{i=1}^L a_i G(k-i), & N_1 + N < k < N_2 \end{cases} \quad (5.1)$$

$G_x(k)$ genişletilmiş veri dizisi, L öngörü derecesi, N ise ölçüm aralığındaki örnek sayısıdır. N_1 ve N_2 ise gerçek ölçüm değerlerinin genişletilmiş dizi içerisindeki ilk ve son indis değerleridir.

5.3. 2-B Veri Genişletme

2-B doğrusal modelleme teknikleri kullanılarak 2-B durağan süreç $G(k_1, k_2)$ komşu noktalarının doğrusal bileşimiyle üretilebilir. Çeyrek düzlem destek bölgesi öngörü süzgeçleri kullanılması durumunda (k_1, k_2) noktasındaki örnek değeri şekilde gösterildiği gibi dört adet öngörü süzgeci kullanılarak bulunabilir. Genişletilmiş verinin yer aldığı konumsal frekans uzayı Şekil 5.1.a da gösterildiği gibi alt bölgelere ayrıştırılır. Ölçüm değerleri genişletilmiş veri matrisinin ortasına yerleştirilir. Her alt bölge için destek bölgesi en fazla sayıda ölçülmüş veriyi kapsayan model seçilerek 2-B veri Şekil 5.1.b de görüldüğü gibi ortadan kenarlara doğru genişletilir

A Bölgesi: Ölçüm verisi genişletilmiş veri matrisinin ortasına yerleştirilir.

$$G_x(k_1, k_2) = G(k_1 - M_1, k_2 - N_1), \quad M_1 \leq k_1 \leq M_1 + M \text{ ve } N_1 \leq k_2 \leq N_1 + N \quad (5.2)$$

B Bölgesi: Örnek değerleri üçüncü çeyrek düzlem modeli ile f_x ve f_y üzerinde geri yönde öngörü ile bulunur.

$$G_x(k_1, k_2) = \sum_{i=0}^L \sum_{\substack{j=0 \\ i=j \neq 0}}^L a_{ij}^* G(k_1 + i, k_2 + j), \quad (5.3)$$

$$1 \leq k_1 \leq M_1 \quad \text{ve} \quad N_1 \leq k_2 \leq N_1 + N/2$$

$$1 \leq k_1 \leq M_1 \quad \text{ve} \quad 1 \leq k_2 \leq N_1$$

$$M_1 \leq k_1 \leq M_1 + M/2 \quad \text{ve} \quad 1 \leq k_2 \leq N_1$$

C Bölgesi: Örnek değerleri dördüncü çeyrek düzlem modeli ile f_x üzerinde geri ve f_y üzerinde ileri yönde öngörü ile bulunur.

$$G_x(k_1, k_2) = \sum_{i=0}^L \sum_{\substack{j=0 \\ i=j \neq 0}}^L g_{ij}^* G(k_1 + i, k_2 - j), \quad (5.4)$$

$$1 \leq k_1 \leq M_1 \quad \text{ve} \quad N_1 + N/2 \leq k_2 \leq N_1 + N$$

$$1 \leq k_1 \leq M_1 \quad \text{ve} \quad N_1 + N \leq k_2 \leq N_2$$

$$M_1 \leq k_1 \leq M_1 + M/2 \quad \text{ve} \quad N_1 + N \leq k_2 \leq N_2$$

D Bölgesi: Örnek değerleri birinci çeyrek düzlem model kullanılarak f_x ve f_y üzerinde ileri yönde öngörü ile hesaplanır.

$$G_x(k_1, k_2) = \sum_{i=0}^L \sum_{\substack{j=0 \\ i=j \neq 0}}^L a_{ij} G(k_1 - i, k_2 - j), \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} M_1 + M \leq k_1 \leq M_2 & \quad \text{ve} \quad N_1 + N/2 \leq k_2 \leq N_1 + N \\ M_1 + M \leq k_1 \leq M_2 & \quad \text{ve} \quad N_1 + N \leq k_2 \leq N_2 \\ M_1 + M/2 \leq k_1 \leq M_1 + M & \quad \text{ve} \quad N_1 + N \leq k_2 \leq N_2 \end{aligned}$$

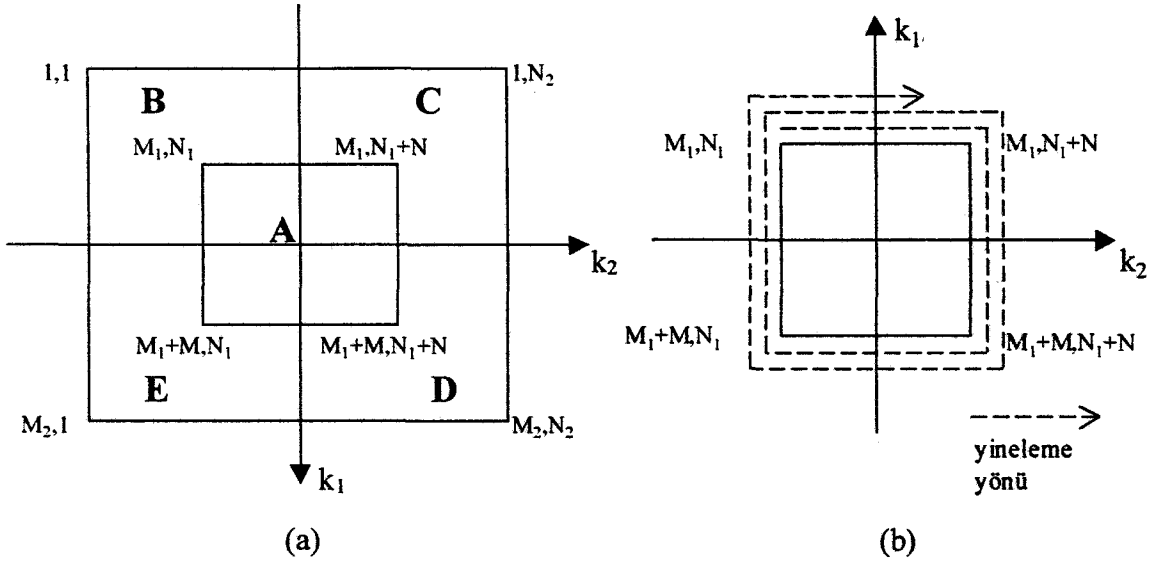
E Bölgesi: Örnek değerleri ikinci çeyrek düzlem model kullanılarak f_x üzerinde ileri ve f_y üzerinde geri yönde öngörü ile hesaplanır.

$$G_x(k_1, k_2) = \sum_{i=0}^L \sum_{\substack{j=0 \\ i=j \neq 0}}^L g_{ij} G(k_1 - i, k_2 + j), \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} M_1 + M/2 \leq k_1 \leq M_1 + M & \quad \text{ve} \quad 1 \leq k_2 \leq N_1 \\ M_1 + M \leq k_1 \leq M_2 & \quad \text{ve} \quad 1 \leq k_2 \leq N_1 \\ M_1 + M \leq k_1 \leq M_2 & \quad \text{ve} \quad N_1 \leq k_2 \leq N_1 + N/2 \end{aligned}$$

1-B genişletme yönteminde olduğu gibi M_1 ve N_1 2-B ölçüm verisinin genişletilmiş veri matrisindeki ilk elemanlarının indisi M_2 ve N_2 ise son elemanlarının indisi. Öngörü süzgeçlerinin ilerleme yönleri Şekil 5.1.b de gösterilmiştir.

Önerilen 2-B veri genişletme yöntemi yukarıda anlatıldığı gibi verilen bir öngörü derecesi için ölçüm aralığı dışındaki değerleri öngörebilir. Ancak 2-B kafes süzgeç yapılarında, 1-B Burg yönteminin aksine kararlılık garanti edilemediğinden, öngörü katsayılarının kararlılığı sağlayacak şekilde değiştirilmesi gerekebilir.



Şekil 5.1 Ölçüm verisinin 2-B uzayda genişletilmesi: a) 2-B uzayın alt bölgelere ayrıştırılması, b) öngörünün ilerleme yönü.

5.4. 2-B Kafes Öngörü Süzgeçlerinin Kararlı Duruma Getirilmesi

1-B sistemler için birim daire dışına düşen kutuplar kararsızlığa neden olur. Bu durumda sonlu giriş için sonlu çıkış elde edilemez. Kararlılığı sağlayacak algoritmalarla bu kutuplar birim daire içine çekilmelidir. 1-B kararlılık sağlamak için bir yaklaşım bu kutupların eşlenikleri ile değiştirilmeleridir.

Ancak 2-B hata aktarım işlevinin payda terimi, her zaman sonlu polinomlara ayrıştırılıp kutuplar çekilemez. Bu nedenle 1-B için geçerli olan kararlı duruma getirme algoritmaları doğrudan 2-B genişletilemez. Tezde ileri ve geri yöndeki hata aktarım işlevlerini kararlı duruma getirmek için Düzlemsel en küçük kareler tersi (Planar least-square inverse) metodunun kullanılması önerilmiştir [43]. Hata aktarım işlevi $H(z_1, z_2) = 1/A(z_1, z_2)$ olan bir sistem, $H_s(z_1, z_2)$ kararlı sistemin hata aktarım işlevi olmak üzere, $|H_s(z_1, z_2)| = |H(z_1, z_2)|$ koşulunu sağlayacak şekilde kararlı duruma getirilmek isteniyor ise, $|A_s(w_1, w_2)| \approx |A(w_1, w_2)|$ koşulunu sağlayacak şekilde $A_s(w_1, w_2)$ sonlu polinomu bulunabilir. $a(n_1, n_2)$ $N_1 \times N_2$ elemandan oluşan birinci çeyrek düzlem destek bölgesine sahip süreç olsun ve $i(n_1, n_2)$, $a(n_1, n_2)$ nin tersi olarak tanımlanması durumunda,

$$a(n_1, n_2) * i(n_1, n_2) = \delta(n_1, n_2) \quad (5.7)$$

koşulunu sağlar.(5.7) ifadesinin z dönüşümü alınarak,

$$A(z_1, z_2)I(z_1, z_2) = 1 \quad (5.8)$$

yazılabilir. $i(n_1, n_2)$ sonsuz uzunlukta bir süreç olacaktır. $i(n_1, n_2)$ yerine $M_1 \times M_2$ noktalı birinci çeyrek düzlem destek bölgesinde tanımlı $c(n_1, n_2)$ süreci kullanılması durumunda yapılan yaklaşıklığın getireceği hata,

$$e(n_1, n_2) = \delta(n_1, n_2) - a(n_1, n_2) * c(n_1, n_2) \quad (5.9)$$

yazılabilir. $c(n_1, n_2)$, (5.9) denkleminde verilen hata teriminin en küçük kareler çözümünden kestirilebilir.

$$\varepsilon = \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} e^2(n_1, n_2) \quad (5.10)$$

$c(n_1, n_2)$, $a(n_1, n_2)$ sürecinin düzlemsel en küçük kareler tersi olarak adlandırılır ve

$$C(z_1, z_2) \approx \frac{1}{A(z_1, z_2)} \quad (5.11)$$

bağıntısını sağlar. Shank konjektürüne göre $c(n_1, n_2)$ herhangi bir birinci çeyrek düzlem destek bölgesi $a(n_1, n_2)$ sürecinin düzlemsel en küçük kareler tersi olmak üzere, aktarım işlevi $1/C(z_1, z_2)$ olan birinci çeyrek düzlem destek bölgesi bir süreç kararlıdır. $c(n_1, n_2)$ in düzlemsel en küçük kareler tersi hesaplanarak $N_1 \times N_2$ noktalı birinci çeyrek düzlem destek bölgesi $d(n_1, n_2)$ süreci elde edilebilir. Hata aktarım işlevi $1/D(z_1, z_2)$ olan yeni süzgeç kararlıdır ve $D(z_1, z_2) \approx A(z_1, z_2)$ ve kararlı sistemin hata aktarım işlevi

$$H_s(z_1, z_2) = 1/D(z_1, z_2) \quad (5.12)$$

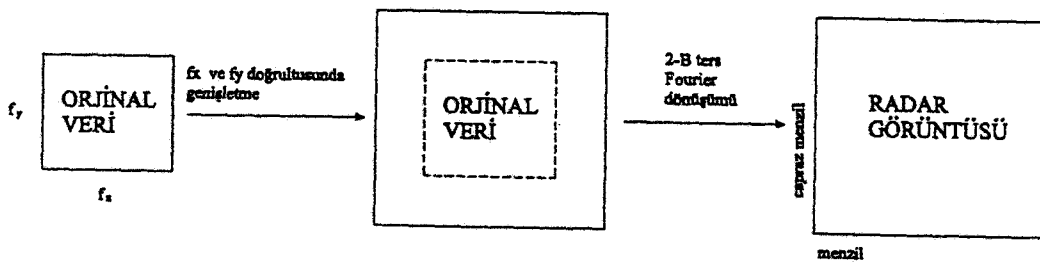
olarak bulunur. Yukarıda anlatılan yaklaşım kullanılarak, ileri ve geri yönde hata

süzgeçlerinin aktarım işlevleri kararlı duruma getirilir ve (5.3)-(5.6) bağıntılarında değiştirilmiş öngörü süzgeç ağırlık katsayıları kullanılarak B, C, D, E alt bölgelerindeki geri saçılan alan değerleri öngörülebilir.

5.5 2-B Veri Genişletme Algoritmasının Adımları

2-B veri genişletme algoritmasının adımları aşağıdaki gibi gösterilebilir.

- Verilen frekans ve gözlem açısı aralığı için 2-B geri saçılan alan değerleri konumsal frekans uzayında elde edilir.
- Dört çeyrek düzlem için de öngörü modelleri oluşturulur.
- 2-B kompleks kafes süzgeç algoritması kullanılarak öngörü hata süzgeçlerinin katsayı ağırlıkları hesaplanır.
- Elde edilen öngörü katsayıları kararlılığı sağlayacak şekilde değiştirilir.
- Her alt bölge için en uygun model seçilerek ölçüm aralığı dışındaki veri değerleri kestirilir.
- Genişletilmiş geri saçılan alan değerlerinin pencereleme işleminden sonra Ters Fourier dönüşümü alınarak hedefin yüksek çözünürlükte ISAR görüntüsü elde edilir.



Şekil 5.2 2-B veri genişletme algoritması.

5.6. Sayısal Uygulama Sonuçları

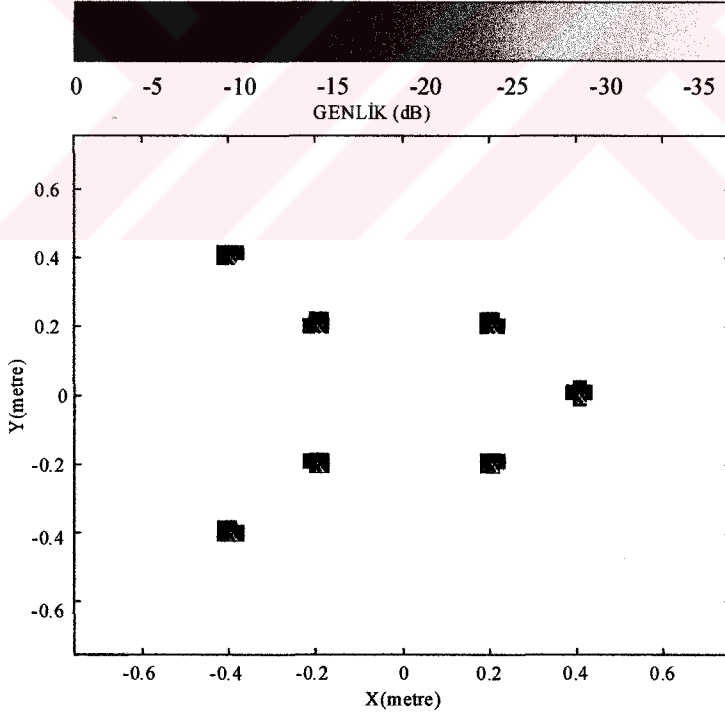
5.6.1 Yapay hedef için sayısal uygulama sonuçları

Önerilen 2-B kafes süzgeç yapısına dayalı veri genişletme algoritması Şekil 4.1 de gösterilen yapay hedef için denenmiştir. Frekans bandının $8.5-9.5\text{ GHz}$, görüş açısının ise $\pm 3^\circ$ aralığında değiştirildiği varsayımı altında oluşturulan geri saçılan alan değerleri dar frekans band ve açı aralığı için elde edilen ölçüm değerleri olarak düşünülmüştür. Bu durum (f_x, f_y) konumsal frekans uzayında f_x in, $8.5-9.5\text{ GHz}$ ve f_y nin $\pm 0.5\text{ GHz}$ aralığında değişmesine karşılık gelir. Geniş band ve açı aralığı için geri saçılan alan değerleri ise, f_x , $7-11\text{ GHz}$ ve f_y , $\pm 2\text{ GHz}$ aralığında değiştirilerek elde edilmiştir. Frekans artım aralığı $\Delta f_x = \Delta f_y = 100\text{ MHz}$ seçilmiştir ve veri boyutu $N = 40$ dir. Şekil 5.3 de geniş band ve açı aralığı için klasik Fourier yaklaşımı ile elde edilen ISAR görüntüsü verilmiştir. Beklendiği gibi, Fourier yöntemi geniş frekans ve gözlem aralığından alınan geri saçılan alan değerlerinden yeterli çözünürlükte radar görüntüsü oluşturmaktadır.

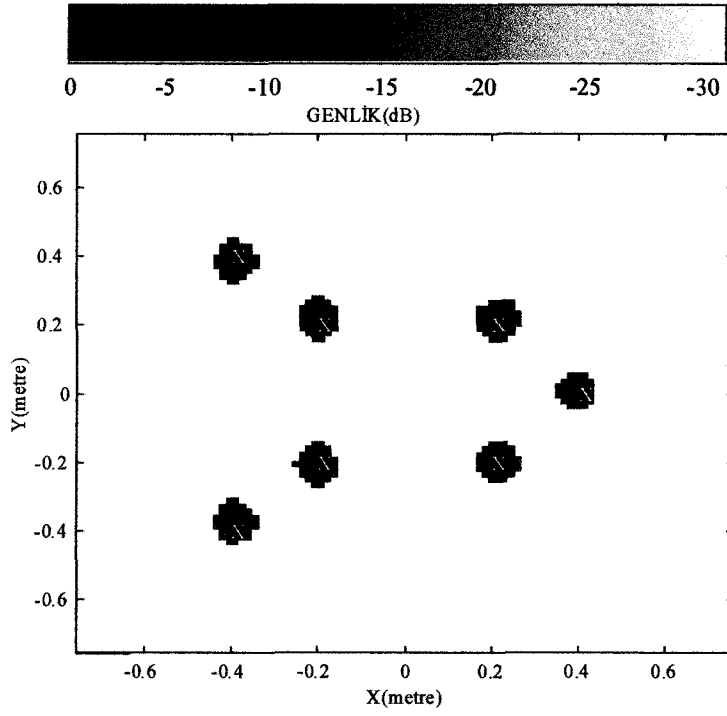
Şekil 5.4 de 1-B klasik veri genişletme yaklaşımı ile oluşturulmuş radar görüntüsü verilmiştir. Dar frekans ve gözlem açı aralığı için elde edilen veri, Burg yöntemi ile önce satırlar, sonra sütunlar üzerinde (5.1) bağıntısı kullanılarak genişletilmiştir. Genişletme faktörü verinin f_x, f_y eksenleri üzerindeki genişletilme oranını göstermektedir. Elde edilen genişletilmiş veri matrisi, Hamming penceresi ile pencerelenerek 2-B ters Fourier dönüşümü alınmıştır. Burg metodu ile hedefi oluşturan 7 adet saçıcı merkez seçilebilmektedir, ayrıca yan lobların bozucu etkisi de bastırılmıştır.

Şekil 5.5 de önerilen 2-B veri genişletme yöntemiyle elde edilen radar görüntüsü görülmektedir. Her iki yöntem de verilen örnek için yeterli çözünürlüğü sağlamıştır. Şekil 5.6-5.7 de geri saçılan alan örneklerine toplamsal Gauss gürültüsü eklenmesi durumunda her iki yöntem için elde edilen radar görüntüleri verilmiştir. Önerilen 2-B veri genişletmeye dayanan yöntemin hata başarımının daha iyi olduğu sonuçlardan gözlenmektedir. 1-Burg yöntemi ile saçıcı merkezlerin genlik değerleri doğru olarak bulunamamasına rağmen, önerilen yöntem ile genlik bilgisinin korunduğu gözlenmektedir.

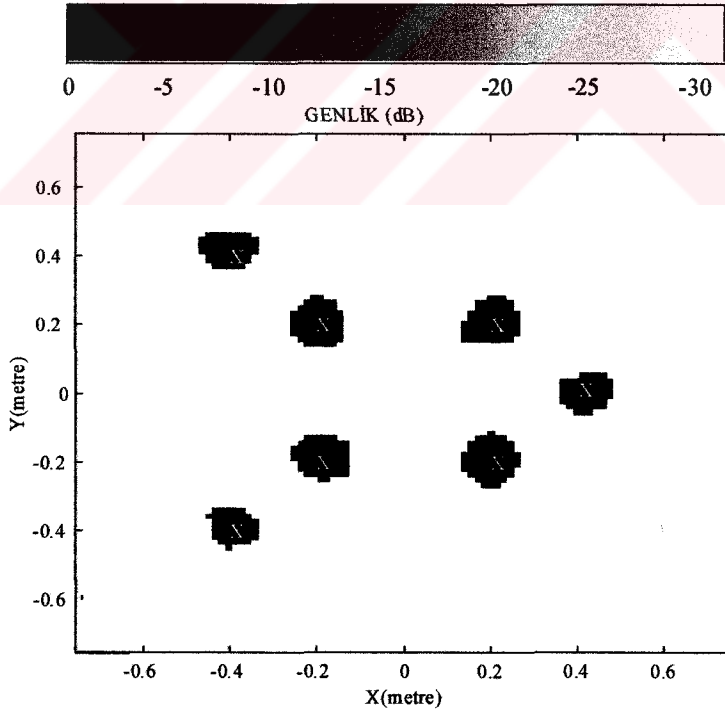
Yapay hedef için, geri saçılan alanlar nokta hedef modelinden oluşturulduğundan verinin (f_x, f_y) düzleminde ayrıştırılabilir olduğu kabulüne dayanan satır ve sütunların ayrı ayrı işlenmesi yaklaşımı iyi sonuç vermektedir. Ancak Burg yönteminin işlem yükü, giriş veri matrisinin büyüklüğüne ve genişletme çarpanına bağlıdır. Her satır ve sütun için farklı model oluşturularak veri genişletilir. Satır/sütun üzerindeki işlemler tamamlandığında, sütun/ satır sayısı artacağından genişletme faktörü atırıldıkça yöntemin işlem yükü de artar. Oysa önerilen 2-B genişletme algoritmasında giriş veri matrisi aynı anda işlenerek 4 çeyrek düzlem modeli için öngörü katsayıları saptanır, daha sonra bu katsayılar kullanılarak veri ortadan kenarlara doğru, Şekil 5.1.b de gösterildiği gibi istenilen genişletme faktörü oranında genişletilebilir.



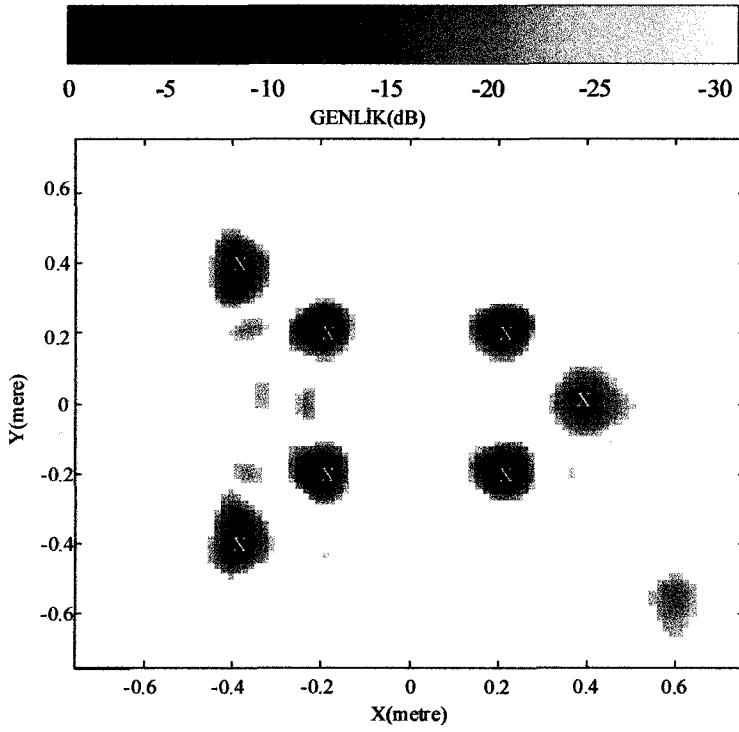
Şekil 5.3 Yapay hedef için geniş frekans bandı ve gözlem açısı aralığından klasik yöntem ile oluşturulan radar görüntüsü (gürültüsüz durum).



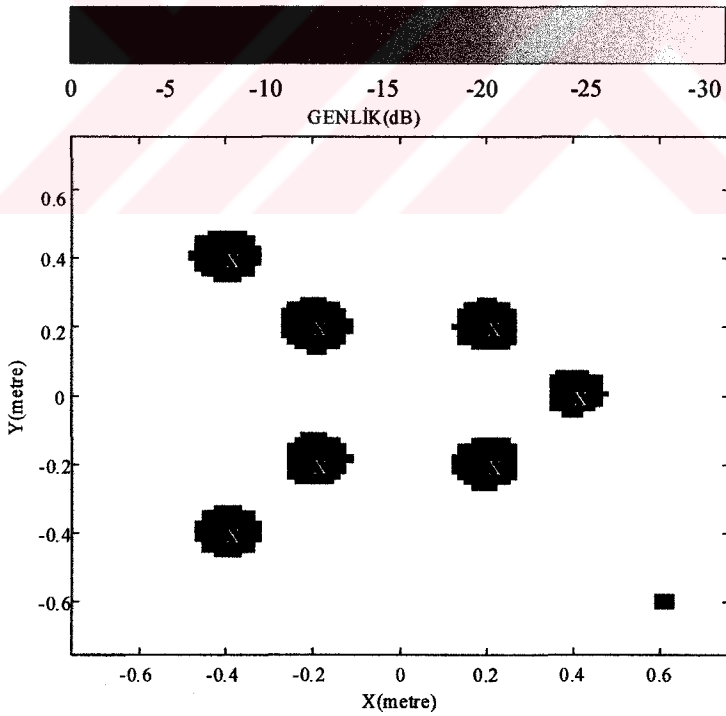
Şekil 5.4 Yapay hedef için genişletilmiş veriden oluşturulan radar görüntüsü (Burg yöntemi, genişletme faktörü = 4, gürültüsüz durum).



Şekil 5.5 Yapay hedef için genişletilmiş veriden oluşturulan radar görüntüsü (2-B kafes öngörü süzgecine dayalı yeni yöntem, genişletme faktörü = 4, gürültüsüz durum)



Şekil 5.6 Yapay hedef için genişletilmiş veriden oluşturulan radar görüntüsü (Burg yöntemi, genişletme faktörü = 4, $S/N = 10$ dB).



Şekil 5.7 Yapay hedef için genişletilmiş veriden oluşturulan radar görüntüsü (2-B kafes öngörü süzgeciye dayalı yeni yöntem, genişletme faktörü = 4, $S/N = 10$ dB)

Veri genişletmeye dayanan yüksek çözünürlüklü radar görüntüleme algoritmalarında ölçüm bölgesi dışındaki örnek değerleri kullanılan 1-B ya da 2-B öngörü süzgeçlerinin destek bölgesi içine düşen örnek değerlerinden elde edilir. Genişletme faktörünün büyütülmesi daha geniş frekans bandı ve gözlem açısı aralığından elde edilen verinin kullanılmasına karşı geldiğinden, ulaşılacak çözünürlük oranı genişletme faktörü ile doğru orantılıdır. Ancak, genişletme faktörü arttıkça öngörülen ölçüm değerleri bilinen ölçüm değerleri yerine daha önce öngörülmüş değerler kullanılarak bulunacağından bu durum algoritmanın performansına sınırlama getirecektir. Seçilen örnek için genişletme faktörü >4 durumu için öngörülen örneklerin ek iyileştirme getirmediği, aksine bozucu etki yarattığı gözlenmiştir.

Tablo 5.1 ve 5.2 de sırasıyla 1-B ve 2-B genişletme algoritmalarının işlem yükü ile hata başarımları verilmiştir.

Tablo 5.1 1-B ve 2-B veri genişletme yöntemlerinin işlem yükü

	Kafes modülü sayısı	AR model sayısı	AR parametre sayısı
Burg yöntemi(genişletme faktörü= 2)	$(N+2N)L$	$2(N+2N)$	$2(N+2N)L$
Burg yöntemi(genişletme faktörü= 4)	$(N+4N)L$	$2(N+4N)$	$2(N+4N)L$
2-B kafes öngörü süzgeci ($L=3$)	$((L+1)^2-1)(L+1)^2/2$	4	$4*((L+1)^2-1)$

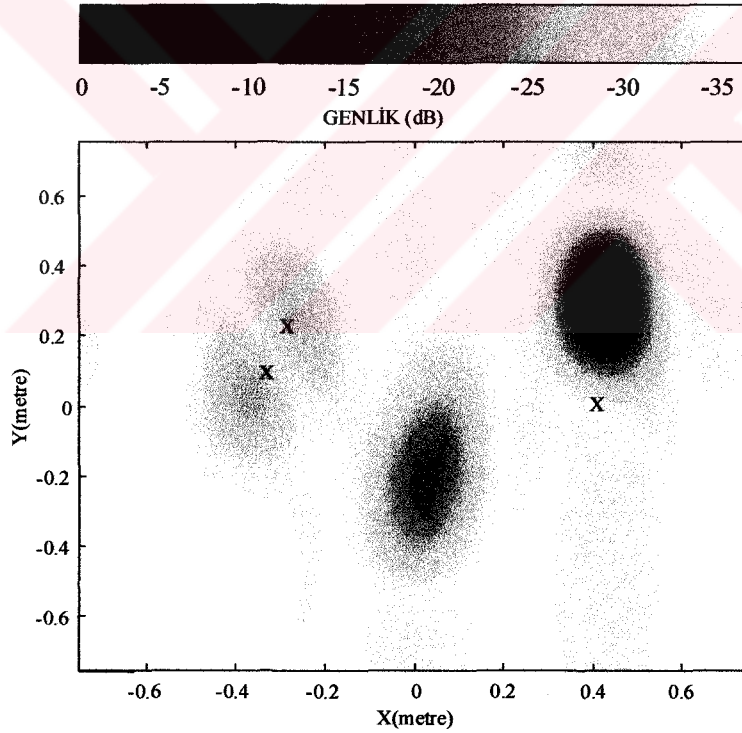
Tablo 5.2 Yapay hedef için hata değerleri

Yöntem	Hata
Geniş band	0.0031
Sınırlı band	0.1631
Burg yöntemi (1-B veri genişletme, $L=3$)	0.0199
Kafes öngörü süzgeci (2-B veri genişletme, $L=3$)	0.0228

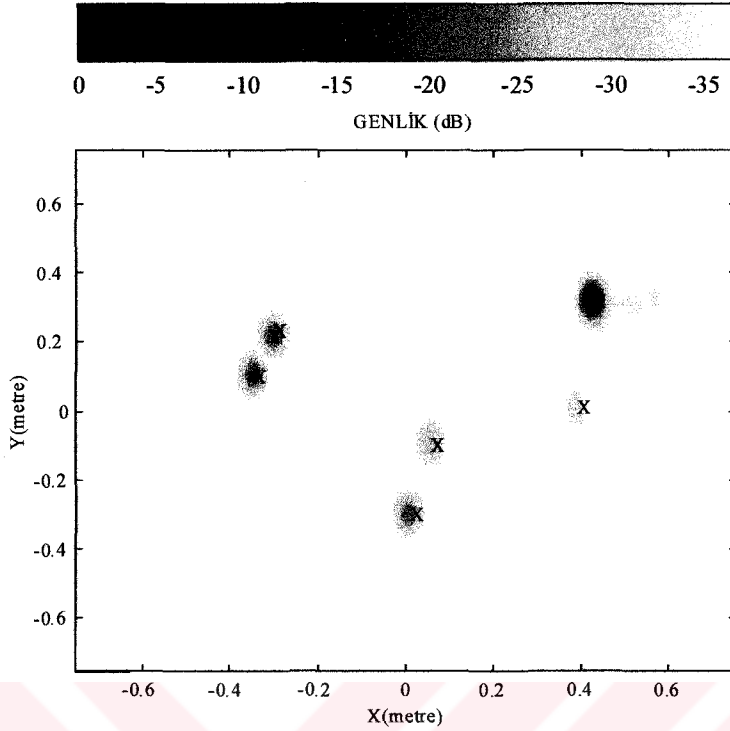
5.6.2 Deneysel hedef için uygulama sonuçları

Önerilen yöntemin deneysel hedefler için başarımını incelemek amacıyla $\pm 2^\circ$ görüş açısı ve 11.2–12.8 GHz frekans aralığında ölçülmüş geri saçılan alan değerleri dik koordinat sistemine aktararak ters Fourier dönüşümü alınmıştır. Frekans artım aralığı $\Delta f_x = \Delta f_y = 100 \text{ MHz}$ ve veri boyutu $N = 16$ dir.

Seçilen hedef dağılımı için Şekil 5.8 da görüldüğü gibi Fourier yaklaşımı hedefi oluşturan 6 adet saçıcıyı ayıramamaktadır. Şekil 5.9 de, geri saçılan alan değerleri görüş açısı $\pm 10^\circ$ ve frekans 8.8–15.2 GHz aralığında değiştirilerek elde edilen geniş band sonucu verilmiştir. 6 adet saçıcı merkezin konum ve şiddetleri doğru olarak belirlenmiştir.

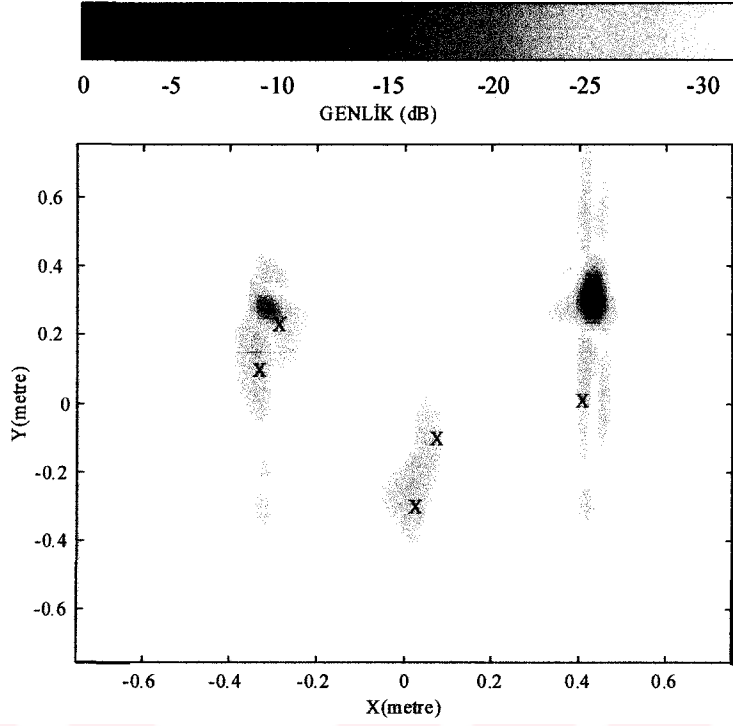


Şekil 5.8 Deneysel hedef için dar frekans bandı ve gözlem açısı aralığından klasik yöntem ile oluşturulan radar görüntüsü

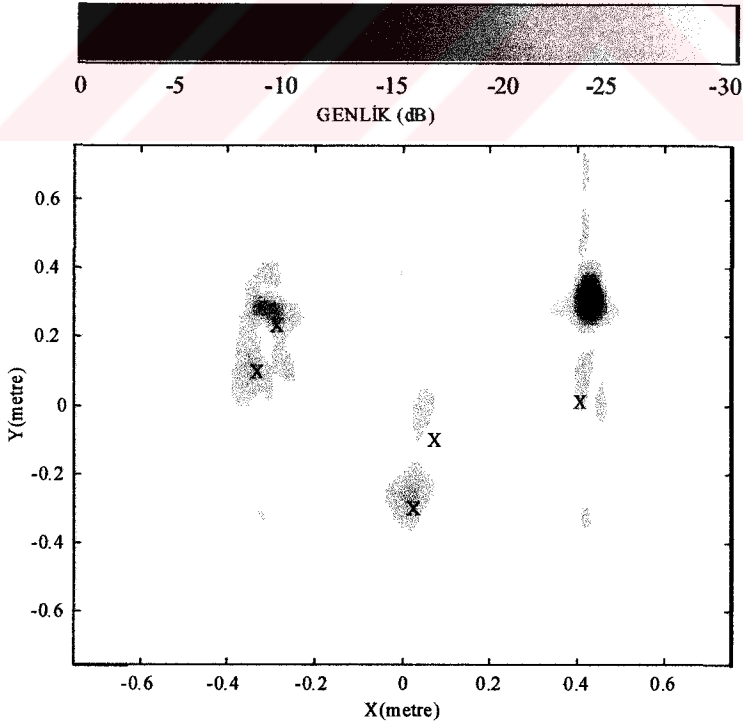


Şekil 5.9 Deneysel hedef için geniş frekans bandı ve gözlem açısı aralığından klasik yöntem ile oluşturulan radar görüntüsü

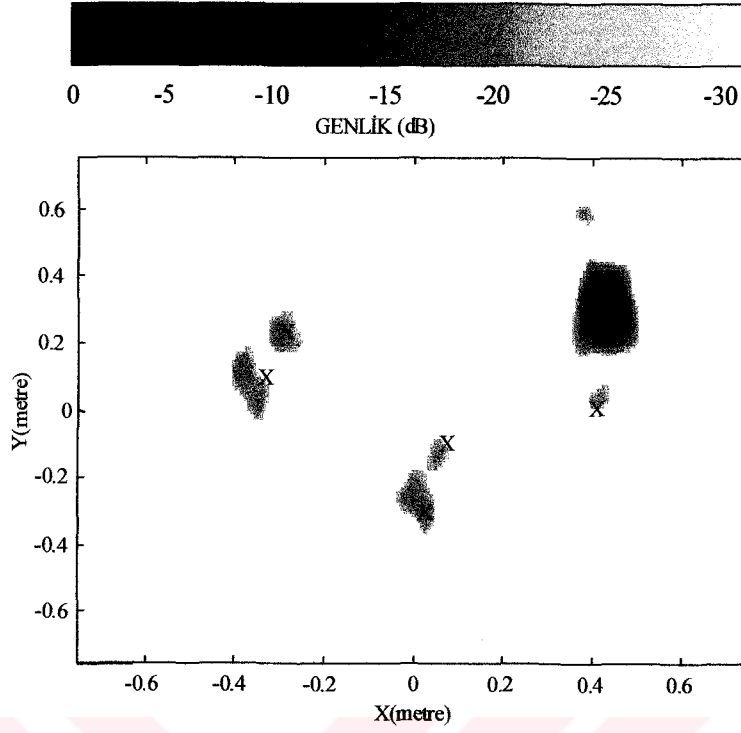
Dar banddan elde edilen geri saçılan alan değerlerinin Burg algoritmasıyla genişletilmesi sonucu elde edilen ISAR görüntüsü Şekil 5.10 da verilmiştir. Deneysel veri için, nokta hedef modelinden üretilen yapay veriye göre Burg yönteminin başarımı azalmaktadır. Genişletme faktörü=4 seçilmiştir. Öngörü derecesi $L = 3$ için saçıcı merkezler ayrılamamıştır. Şekil 5.11 de görüldüğü gibi, Burg metodu $L = 8$ için saçıcı #4 ve #3 ü ayırabilmiştir. Ayrıca saçıcı #4 ün konumu doğru saptanamamış ve görüntüde spektral çizgi ayrılmasından (spectral line splitting) kaynaklanan bozucu etkiler görülmektedir. Şekil 5.12 de önerilen 2-B veri genişletme yöntemiyle elde edilen ISAR görüntüsü verilmiştir. Geri saçılan alanlar $L = 3$ için, destek bölgesi 15 eleman içeren üçüncü derece kompleks kafes süzgeci ile modellenmiş, öngörü model katsayıları kararlı duruma getirilerek gözlem bölgesi dışındaki veri öngörülmüştür. Genişletilmiş veriden pencereleme ve ters Fourier dönüşümü sonucunda elde edilen görüntü 6 adet saçıcı merkezin konum ve şiddetini doğru olarak vermektedir.



Şekil 5.10 Deneysel hedef için ölçüm verisi genişletilerek oluşturulan radar görüntüsü (Burg yöntemi, öngörü derecesi =3, genişletme faktörü =4)



Şekil 5.11 Deneysel hedef için ölçüm verisi genişletilerek oluşturulan radar görüntüsü (Burg yöntemi, öngörü derecesi =8, genişletme faktörü =4)



Şekil 5.12 Deneysel hedef için ölçüm verisi genişletilerek oluşturulan radar görüntüsü (2-B kafes süzgeç yöntemi, öngörü derecesi =3, genişletme faktörü =4)

Bu çalışmada yapay veri nokta hedef modelinden, saçıcı merkezlerin yansıtıcılık fonksiyonunun frekanstan bağımsız olduğu varsayımı altında üretilmiştir. Bu nedenle, 2-B yapay geri saçılan alan verisi (f_x, f_y) konumsal frekans uzayında ayrıştırılarak, satır ve sütunları ayrı olarak 1-B modellenenmiştir. Yapay veri için 1-B modelleme bozucu etki yaratmamıştır. Ancak deneysel veri için saçıcıların yansıtıcılık fonksiyonunun frekanstan bağımsız kabul edilmesi ancak bir yaklaşıktır. EK B de hedefi oluşturan saçıcı noktaların yansıtıcılık fonksiyonunun frekansa bağlı olduğu model verilmiştir. Deneysel hedef için elde edilen ölçüm verisi bu modele uyduğundan, 2-B veri matrisinin satır ve sütunlarının ayrı ayrı işlenmesi hata getirmektedir. Deneysel hedef için elde edilen sonuç, tez çalışmasında önerilen ölçüm verisinin 2-B genişletilmesi yaklaşımının daha uygun olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.3 de deneysel veri için 1-B ve 2-B veri genişletme yöntemlerinin hata başarımı verilmiştir. 2-B kompleks kafes yapısı ile veri matrisinin 2-B genişletilmesine dayanan yeni yöntemin en yüksek hata başarımına sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 5.3 Deneysel hedef için hata değerleri

Yöntem	Hata
Geniş band	0.011
Sınırlı band	0.23
Burg yöntemi (1-B veri genişletme, L=3)	0.0467
Burg yöntemi (1-B veri genişletme, L=8)	0.0291
Kafes öngörü süzgeci(2-B veri genişletme, L=3)	0.0182

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında ISAR görüntüleme radarlarında frekans bandının sınırlı ve gözlem açı aralığının küçük olması durumunda, ölçülen geri saçılan alana ait kompleks işaret değerleri, 2-B özyinelemeli bir süreç olarak modellenmiştir. Elde edilen model parametreleri kullanılarak Fourier dönüşümüne dayanan klasik görüntüleme yaklaşımlarına oranla daha yüksek çözünürlükte ISAR görüntülerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Önerilen modelleme yöntemi öngörü katsayılarının, bu çalışmada ilk kez tanımlanan 2-B kompleks kafes süzgeç yapısı ile bulunmasına dayanmaktadır. Önerilen 2-B dik kafes süzgeç yapısı, Burg yönteminin 2-B genelleştirilmesi olarak düşünülebilir. Yöntemde, 2-B destek bölgesindeki elemanlar seçilen sıralamaya bağlı olarak 1-B diziye indirgenmiş ve istenilen 2-B destek bölgesi 1-B kafes yapılarının ardarda eklenmesiyle oluşturulmuştur. Kafes süzgeç yapısı dik hata alanları oluşturduğundan derece güncelleme işlemi matris tersi alınmasını gerektirmez.

Diğer araştırmacılar tarafından yapılmış çalışmalarda varolan yaklaşımlar, 2-B öngörü denklemlerinin doğrudan matris tersi alınarak çözülmesi ya da 2-B veri matrisinin satır ve sütunlarının ayrı ayrı 1-B yöntemler ile işlenmesiyle sınırlıdır. Bu çalışmada önerilen ve 2-B öngörü denklemlerinin kafes yapısı ile yinelemeli olarak çözülmesine dayanan yaklaşım tamamen yenidir. Kompleks değerli geri saçılan alanları modellemek için kullanılan 2-B kompleks kafes yapısı da ilk defa olarak bu çalışmada tanımlanmıştır. Ayrıca, verinin 2-B öngörü süzgeçleri ile 2-B olarak genişletilmesi de bu tezin orijinal bulguları arasındadır.

Tez çalışmasında, yapay veri olarak, görüntülenecek cismin nokta saçıcı modelinden hesaplanan geri saçılan alan örnekleri kullanılmıştır. Bu model, yeteri kadar yüksek frekans bölgesinde ve dar bandlı işaret varsayımı altında hedefin sonlu sayıda saçıcıdan oluştuğu ve bu saçıcıların yansıtıcılıklarının frekanstan bağımsız olduğu kabulüne dayanmaktadır. Bu nedenle, 2-B geri saçılan alan değerleri 2-B konumsal frekans uzayında f_x ve f_y doğrultusunda ayrıştırılabilir ve verinin satır ve

sütunlarını ayrı ayrı 1-B tekniklerle işlemek hata getirmez. Oysa, deneysel veri için ayrıştırılabilirlik söz konusu değildir. Tezde yüksek çözünürlüklü ISAR görüntüsü oluşturmak için iki farklı yeni yöntem önerilmiştir. İlk yöntem, hedefi oluşturan saçıcı merkezlerin konumları ile hata aktarım işlevinin sıfırları arasında bire bir ilişki olmasına dayanmaktadır. Hata aktarım işlevleri çizdirilerek saçıcı noktaların konumları saptanmıştır. 2-B öngörü destek bölgesi 1-B dizi şeklinde düzenlendiğinden, yöntem hem çeyrek düzlem hem de simetrik olmayan yarı düzlem destek bölgesi modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çeyrek düzlem için konum bilgisi veren fonksiyon, ileri ve geri yöndeki hata aktarım işlevlerinin birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Simetrik olmayan yarı düzlem model için konum bilgisi, ileri yönde hata aktarım işlevinden bulunmuştur. Destek bölgesindeki sıralamanın uygun seçilmesi sonucunda, birinci ve ikinci çeyrek düzlem model katsayıları aynı kafes yapısı içinde ileri ve geri yönde öngörü süzgeçlerinin ağırlık katsayıları olarak elde edilmiştir. Simetrik olmayan yarı düzlem, destek bölgesinde daha çok eleman içerdiğinden, kafes yapısı daha çok 1-B kafes modülü kullanılarak oluşturulmaktadır. Destek bölgesi daha büyük olduğundan, öngörü katsayılarına yakınsayabilmek için daha büyük boyutta giriş verisi gerekmektedir. Bu nedenlerle ele alınan problem için çeyrek düzlem yaklaşımının daha uygun olduğu görülmüştür.

Öngörü denklemlerinin en küçük kareler yöntemiyle çözülmesi durumunda, bu yaklaşım gürültüye duyarlı olduğundan özellikle ölçüm gürültüsünün söz konusu olduğu deneysel veriler için spektrumda gürültüden kaynaklanan tepeler oluşmakta ve yanlış konumlarda saçıcıların sezilmesine neden olmaktadır. Öngörü denklemleri SVD yöntemi ile çözülerek gürültüden kaynaklanan tepe değerleri bastırılıp işaretten kaynaklanan tepeler keskinleştirilebilir. Ancak bu durumda saçılan alanların kovaryans matrisinin işaret ve gürültüyü temsil eden özdeğerleri arasındaki ayrımın farkedilebilir düzeyde olması gerekir ya da hedef hakkında saçıcı noktaların sayısı gibi ön bilgiye gerek duyulmaktadır. Tez çalışmasında önerilen ve kafes süzgeç yapısına dayanan yaklaşım ise hedef hakkında ön bilgi gerektirmez, istenilen öngörü seviyesine ulaşıncaya kadar her seviye için elde edilen sonuçlar görüntülenerek görüntülerdeki iyileşme gözlenebilir. Kafes yapısının dik olması nedeniyle matris tersi gerektirmez ve gürültüden etkilenmez. Yöntem doğrudan matris tersi alma yaklaşımına göre daha doğru sonuç verir. Özellikle, hedef hakkında ön bilgi olmadığı ya da az sayıda nokta saçıcının toplamı olarak modellenemeyen karmaşık hedefler

için uygundur. Ayrıca kafes süzgeç algoritmasının performansı giriş verisinin boyutuyla orantılı olarak arttığından büyük boyutlu gerçek hedefler (uçak, gemi) için yöntemin başarımının daha da artacağı açıktır.

Yukarıda anlatılan birinci yöntemde, hedefi oluşturan saçıcı merkezlerin konumları bulunurken, saçıcı genlikleri hakkında bilgi edinilemez. Bu nedenle tez çalışmasında önerilen ikinci yeni yüksek çözünürlüklü görüntüleme yönteminde, ölçüm bölgesi dışında bulunan veriler, 2-B destek bölgesi kullanılarak öngörülmüştür. Bu algoritmada, ilk kez diğer araştırmacılarca yapılandan farklı olarak, sınırlı bantlı veri 2-B olarak genişletilmiştir. Bu verinin Ters Fourier dönüşümü alınmış ve genlik bilgisi içeren yüksek çözünürlüklü ISAR görüntüsü elde edilmiştir. Literatürde raslanan diğer genişletme algoritmaları, geri saçılan alan değerlerinin satır ve sütunlar üzerinde ayrı ayrı öngörü yapılarak genişletilmesine dayanan 1-B tekniklerdir. Tarafımızdan önerilen 2-B genişletme yöntemi ise, giriş verisinin satır ve sütunlarının ayrı ayrı modellenmesi yerine, tüm verinin aynı anda 2-B olarak modellenmesini sağlar. Gerçek ölçüm değerleri genişletilmiş veri matrisinin ortasına yerleştirilerek veri istenilen frekans ve açı aralığını kapsayacak şekilde istenildiği oranda arttırılabilir. Elde edilen sonuçlardan, özellikle gerçek veri için metodun başarımının 1-B Burg yöntemine göre daha iyi olduğu; saçıcıların konum ve genlik bilgilerinin doğru olarak elde edilebildiği görülmektedir. Önerilen yöntemin işlem yükü 1-B veri genişletme yöntemlerinden daha azdır. Ancak, 2-B kafes süzgeç yapısında kararlılık garanti edilemediğinden, genişletme adımı öncesinde öngörü katsayılarının kararlı duruma getirilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında klasik Fourier yöntemlerinin yeterli çözünürlük sağlayamadığı sınırlı veri problemi için, yüksek çözünürlüklü ISAR görüntüsü sağlamak amacı ile geri saçılan alan verileri ilk kez önerdiğimiz 2-B kompleks kafes algoritmasıyla modellenmiştir. Model katsayıları kullanılarak iki yeni yüksek çözünürlüklü ISAR görüntüleme yöntemi ortaya konmuştur. Önerilen 2-B yüksek çözünürlüklü görüntüleme algoritmaları, yapay ve deneysel veri için denenmiş ve hem klasik Fourier yaklaşımına, hem de lineer öngörü yöntemleri ile radar görüntüleme konusunda yapılmış çalışmalara göre daha yüksek çözünürlüklü radar görüntüleri elde edilmiştir. Bu görüntüler, önerilen yeni yöntemlerin başarısını açıkça göstermektedir.

İleri dönemde yapılacak çalışmalarla bu tezde önerilen görüntüleme yaklaşımı aşağıdaki gibi geliştirilebilir. Bunlar aşağıda özetlenmiştir.

- Büyük boyutlu cisimlerin modellenmesi durumunda, kafes süzgeç yapısının yüksek öngörü dereceleri için gerçekleştirilmesi gerekebilir. Bu durumda algoritmanın işlem yükünü azaltmak amacı ile, hata alanlarının ötelemeyle değişmeme özelliğine dayanarak, seçilen destek bölgesi dizilimine bağlı olarak, gereken kafes modül sayısı azaltılabilir.
- Geri saçılan alanlar değişik özyinelemeli 2-B kafes yapıları kullanılarak modellenenabilir. Tezde önerilen yapı 1-B kafes birimlerinden oluştuğundan, basit bir algoritmaya sahiptir ve yapı çıkışındaki ileri ve geri yöndeki öngörü hata alanları tam olarak dikleştirildiğinden en iyi sonucu vermektedir, ancak işlem yükü daha fazladır. Diklik koşulu yumuşatılarak parametre sayısı azaltılmış yapılar elde edilebilir. Bu yapılarda diklik koşulu sağlanamadığından doğrudan çözüme oranla çok daha küçük boyutta olsa da yine matris tersi almak gerekecektir.
- Geri saçılan alanlar ARMA model katsayıları ile modellenerek radar görüntüleri tezde önerilen iki farklı görüntüleme yöntemi kullanılarak elde edilebilir.
- Elde edilen 2-B AR ve ARMA model katsayıları hedef tanıma ve sınıflama problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Kafes süzgeç yapısı alt derecelerin yeniden hesaplanmasına gerek duymadan öngörü derecesini güncelleyebildiğinden, yeterli doğrulukta karar elde edilinceye kadar öngörü derecesi artırılabilir.
- 2-B kafes parametreleri veri sıkıştırma uygulamalarında kullanılabilir.
- Görüntüleme sistemi Wiener süzgeçleme süreci olarak düşünülerek, hedefe gönderilen işaret sistem girişi, hedeften saçılan alanlar sistem çıkışı olmak üzere süzgecin aktarım işlevinden hedef bilgisi çıkartılabilir. Bu yaklaşım sistem girişinin bileşik kestirime (Joint-process estimation) eşdeğerdir.
- ISAR görüntüleme için bu tezde geliştirilen algoritmalar X ışınli ve mikrodalga tomografi problemlerine uyarlanarak, bu problemlerin çözümünde klasik Fourier

yöntemlerine oranla daha yüksek çözünürlükte sonuçlar elde edilebilir. Daha küçük gözlem aralıklarından elde edilecek veri için iyi sonuçlar beklenebilir ve öngörü derecesi adım adım artırılarak sonuçlardaki iyileşme gözlenebilir.

- Gerek radar, gerek tomografi görüntüleme problemleri klasik Fourier yaklaşımı dışında zaman domeninde matrisel denklem sistemi şeklinde modellenmektedir. Bu denklem sistemlerinin tanımında eksik veri kullanıldığından doğrudan matris tersi alma yöntemleriyle kabul edilebilir nitelikte hedef görüntüsü elde edilemez. Faz değişim matrisi özyinelemeli süreç olarak modellenip, model katsayılarından giriş verisinin Cholesky ayrışımı tanımlanır ve hedef bilgisi matris tersi gerektirmeden çıkartılabilir [53].
- Kafes yapısı, girişine verilen işareti dik bileşenlerine ayırdığından, bu çıkışlar kullanılarak denklem sistemlerinin LMS gibi uyarlamalı algoritmalarla çözüldüğü problemler için daha hızlı yakınsama sağlanabilir.
- Kafes yapıları uyarlamalı tasarlanarak giriş verisine bağlı olarak hedef görüntülerindeki değişim gözlenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Carrara, W.G., Goodman R.S., Majeski, R.M., 1995. Spotlight Synthetic Aperture Radar, Artech House, Norwood.
- [2] Munson D.C., O'Brien, D., and Jenkins W.K., 1983. A tomographic formulation of spotlight-mode synthetic aperture radar, Proc IEEE, 71, 917-925
- [3] Soumekh, M., 1986. Image reconstruction techniques in tomographic imaging systems, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, ASSP-34, 952-962.
- [4] Mensa, D.L., Halevy, S., Wade G., 1983. Coherent Doppler tomography for microwave imaging, Proc. IEEE, 71, 254-261.
- [5] Mensa, D.L., 1991. High Resolution Radar Cross-section Imaging, Artech House, Norwood.
- [6] Wehner, D.R., 1995. High Resolution Radar, Artech House, Norwood.
- [7] Hua, Y., Baqai, F., Zhu, Y., Heilbronn, 1993. Imaging of point scatterers from stepped frequency ISAR data, IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, 29, 195-205.
- [8] Dural, G., Moffat D.L., 1994. ISAR imaging to identify basic scattering mechanisms, IEEE Trans. on Antennas and Propagat., 42, 1, 99-110.
- [9] Rihaczek, A.W., Hershkowitz, S.J., 1996. Radar Resolution and Complex-image analysis, Artech House. Inc.
- [10] Mitchell, R.L., 1976. Radar Signal Simulation, Artech House.
- [11] Walton, E.K., 1987. Comparison of Fourier and maximum entropy techniques for high resolution scattering studies, Radio Sci., 22, 350-356.
- [12] Yamada H. et al., 1991. Superresolution techniques for time domain measurements with a network analyzer, IEEE Trans. Antennas Propagat., 39, 177-183.
- [13] Tufts D.W., Kumaresan R., 1982. Estimation of frequencies of multiple sinusoids: Making linear prediction perform like maximum likelihood., Proc. IEEE, 70, 975-989.
- [14] Hurst, M.P., Mittra, R., 1987. Scattering center analysis via Prony's method, IEEE Trans. Antennas and Propagat., 35, 986-988.

- [15] **Carriere, R., Moses, R.L.**, 1992. High resolution radar target modelling using a modified Prony estimator, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 40, 1, 13-18.
- [16] **Dural, G., Sezgin, S.**, 2000. Radar görüntüleme üzerine karşılaştırmalı bir çalışma, *IEEE SIU-2000*, 8. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı, Antalya, 196-201.
- [17] **Odendaal J.W., Barnard E., Pistorius W.I.**, 1994. Two-dimensional superresolution radar imaging using the MUSIC algorithm, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 42, 1386-1391.
- [18] **Odendaal J.W., Gupta I.J., Walton E.K.**, 1994. Enhanced Radar Imaging, Tech. Rep. 727721-2, Ohio State Univ. ElectroSci. Lab.
- [19] **Strang, G.**, 1988. *Linear Algebra and Its Applications*, Harcourt Brace Jovanovich, Inc., San Diego.
- [20] **Makhoul J.**, 1975. Linear prediction : A tutorial review, *Proc. IEEE*, 63, 561-580.
- [21] **Walton E., Moghaddar A.**, 1991. High resolution imaging of radar targets using narrow band data, *Proc. IEEE AP Soc. Int. Symp.*, London, ON, Canada, 1020-1024.
- [22] **Walton E.K., Moghaddar A., Demattio C.**, 1991. Superresolution radar target imaging, *Proc. Antenna Meas. Techniques Assoc. Symp*, Boulder ,CO., 12.3-12.6.
- [23] **Gupta, I.J.**, 1994. High resolution radar imaging using linear prediction, *IEEE Trans. Antennas Propagation*, 42, 31-37
- [24] **Kim K.T., Kim S.W., Kim H.T.**, 1998. Two-dimensional ISAR imaging using full polarisation and super-resolution processing techniques, *IEE Proc.-Radar, Sonar Navig.*, 145, 240-246.
- [25] **Gupta I.J., Beals M.J., Moghaddar A.**, 1994. Data extrapolation for high resolution radar imaging, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 42, 11, 1540-1545.
- [26] **Gandhe A., Gupta I. J.**, 1997. A comparison of various radar imaging techniques, Tech. Rep. 727723-11, Ohio State Univ. ElectroSci. Lab.
- [27] **Nuthalapati R.M.**, 1992. High Resolution reconstruction of ISAR images, *IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems*, 28, 12, 887-899.
- [28] **DeGraaf, S.R.**, 1998. SAR imaging via modern 2-D spectral estimation methods, *IEEE Trans. on Image Processing*, 7, 729-761.
- [29] **Zhu, Z.D., Ye, Z.R., Wu, X.Q., Yin J., and She, Z.S.**, 1995. Superresolution range-Doppler imaging, *IEE Proc. Radar, Sonar Navig.*, 1, 25-32.

- [30] Erer, I., Kartal, M., 2000. 2D Data extrapolation in ISAR imaging by lattice filters, EUSAR2000, Germany., 435-438.
- [31] Ziskind, I., Wax, M., 1989. Maximum Likelihood localization of multiple sources by alternating projection, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, 36, 1553-1560.
- [32] Tu, M., Gupta, I.J., Walton, E.K., 1997. Application of maximum likelihood estimation to radar imaging, IEEE trans. On Antennas and Propagation, 1, 20-27.
- [33] Barbarossa, S., and Farina, A., 1994. Space-time-frequency processing of synthetic aperture radar signal, IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems, 2, 341-358.
- [34] Chen, D., and Qian, S., 1999. Joint time frequency analysis, IEEE Signal Processing Mag., 2, 52-67
- [35] Qian, S., Chen, D., 1996. Joint Time-Frequency Analysis Methods and Applications, Prentice Hall, New Jersey. Propagation, 1, 20-27.
- [36] Kaiser, G., 1996. Physical wavelets and radar: A variational approach to remote sensing, IEEE Antennas and Propagation Mag., 1, 15-24.
- [37] Li, J., Stoica P., 1996. An adaptive filtering approach to spectral estimation and SAR imaging, IEEE Trans. Signal Process., 44, 1469-1484.
- [38] Erer, I., Kartal, M., Günel, T., 1997. Mikrodalga görüntüleme probleminin çözümü için optimizasyon yaklaşımı, SIU, Muğla.
- [39] Orfanidis, S.J., 1990. Optimum Signal Processing: An Introduction, McGraw-Hill, Inc.
- [40] Kay S.M., 1988. Modern Spectral Estimation Theory and Applications, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- [41] Marple, S.L., 1987. Digital Spectral Analysis with Applications, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- [42] Kay S.M., and Marple, S.L., 1981. Spectrum Analysis- A modern perspective, Proc IEEE, 69, 11, 917-925.
- [43] Lim S. J., 1990. Two-Dimensional Signal and Image Processing, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [44] Ekstrom, M.P., Woods, J.W., 1976. Two-dimensional spectral factorization with applications in recursive digital filtering, IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Process., ASSP-24, 117-128.
- [45] Haykin, S., 1986. Adaptive Filter Theory, Prentice-Hall, New Jersey.

- [46] Therrien. C.W., 1981. Relation between 2-D and multichannel linear prediction, IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Processing, ASSP-29, 454-456.
- [47] Parker, S.R., Kayran, A.H., 1984. Lattice parameter autoregressive modeling of 2-D fields-Part I: The quarter-plane case, IEEE Trans.Acoust., Speech, Signal Processing, ASSP-32, 872-885.
- [48] Lev-Ari, H., Parker, S.R., 1985. Lattice filter models of two dimensional fields, Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, Trampa, FL.
- [49] Lev-Ari, H., Parker, S.R., 1986. Stable and efficient 2-D lattice filter, Proc. IEEE Symp. Circuits Syst. San Jose, CA, 695-698.
- [50] Ertüzün, A., Kayran, A.H., Panayırçı, E., 1992. An improved 2-D lattice filter and its entropy relations, Signal Processing, 28, 1, 1-24.
- [51] Kayran, A.H., Parker, S.R., 1997. Optimum quarter-plane autoregressive modeling of 2-D fields using four field lattice approach, IEEE Trans. Signal Processing, 45, 2363-2373.
- [52] Kayran, A.H., 1996. Two dimensional orthogonal lattice structures for autoregressive modeling of random fields, IEEE Trans. Signal Process., SP-44,(4), 963-978.
- [53] Kartal, M., Erer, I., 2000. Dik kafes kestirimcilerle YAR görüntüleme, IEEE SİU-2000, 8. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı, Antalya, 335-340.

EK A

Menzil ve çapraz menzil çözünürlüğü

Radar görüntüleme tekniklerinde önemli bir ölçüt olan çözünürlük kavramı, birbirine yakın saçıcı noktaları ayırt edebilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Darbe modülasyonlu bir radar sisteminde çözünürlük darbe süresi ve anten demet genişliğine bağlıdır. Radarın bakış doğrultusunda (menzil) yer alan cisimlerin ayırt edilebilirliği darbe süresini kısa tutulmasıyla artarken, anten açıklığına paralel doğrultudaki (çapraz menzil) cisimleri ayırt edebilmek için dar demet genişliği gerekir.

Anten demet genişliği boyutuyla ters orantılı olduğundan uzak mesafelerden uygun çapraz menzil çözünürlüğü elde edebilmek için gerçekleşmesi imkansız boyutlarda anten açıklığı gerekir. Gerçek fiziksel boyutlardaki bir antenin sağlayabileceği çözünürlüğü çok daha küçük boyutlardaki bir anten ile elde etmek mümkündür. Anten gerçekleşmesi istenen açıklık boyunca hareket ettirilerek belirli zaman aralıklarında ölçümler yapılır. Elde edilen değerlerin uyumlu olarak birleştirilmesiyle büyük bir açıklık yapay olarak gerçekleşmiş olur. Bu yöntemle dayanan radar sistemleri “yapay açıklıklı radar sistemleri” olarak adlandırılır. Bu sistemlerde hedef ile radar arasında bağlı bir hareket söz konusudur. Hedefin sabit radarın hareketli olduğu SAR yapıları bağlı hareketin niteliğine göre doğrusal (stripmap, scan) yada dairesel (spotlight modu) olarak ayrılır. Tezin konusu olan ISAR sistemde ise, SAR sistemlerin aksine radar sabit tutulurken hedef radar etrafında dairesel dönme hareketi yapmaktadır. Bu nedenle ISAR için verilen algoritma ve sonuçlar spotlight modunda çalışan SAR sistemleri için de geçerli olacaktır.

Hedefin τ darbe süreli bir işaret ile aydınlatıldığı düşünülecek olursa, hedef üzerindeki iki farklı noktanın birbirinden ayırt edilebilmesi için bu noktalardan yansıyan işaretler birbiri ile girişimde bulunmamalıdır. Bu koşul altında menzil doğrultusundaki çözünürlük c ışık hızı ve B işaretin band genişliği olmak üzere

$$\Delta R = c\tau/2 = c/2B \quad (A.1)$$

ile verilebilir. Menzil çözünürlüğünü arttırabilmek için radar darbelerini mümkün olduğunca kısa seçmek gerekir. Darbe işareti üzerine uygulanan modülasyon ile işaretin band genişliği değiştirilebilir. Benzer şekilde çapraz menzil doğrultusunda farklı hedef noktalarını ayırt edebilmek için anten demeti her ölçüm aralığında yalnız bir çapraz menzil çözünürlük hücresi içermelidir. $\Delta\theta$ hedef noktasının yapay açıklığı gördüğü açı olmak üzere, çapraz menzil çözünürlüğü,

$$\Delta x = \lambda/2\Delta\theta \quad (A.2)$$

olarak yazılabilir. (2) denkleminde görüldüğü gibi yapay açıklık artırılarak çapraz menzil çözünürlüğü iyileştirilebilir. Ancak yapay açıklık boyunca yapılan ölçümler sırasında hedefin hareketli olması nedeniyle saçıcılar çözünürlük hücreleri arasında yer değiştirir. Bu yer değiştirme görüntüde bozulmalara neden olur. Bu nedenle ölçüm zamanının kısa tutulması istenir ve bu kısıtlama çapraz-menzil çözünürlüğünü sınırlandırır.



EK B

Frekansa bağımlı saçıcı modeli

Hedefi oluşturan saçıcıların yansıtma fonksiyonlarının frekansa bağımlı olması durumunda, saçılan alan değerleri

$$E(f_n) = \sum_{k=1}^M A_k \left(j \frac{f_n}{f_1}\right)^{\alpha_k} e^{-j2\pi f_n t_k} \quad (\text{B.1})$$

şeklinde bulunur. $E(f_n)$, f_n frekansında toplam geri saçılan alandır.

$$f_n = f_1(n-1)\Delta f, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (\text{B.2})$$

M saçıcı sayısı, A_k yansıtıcılık fonksiyonunun f_1 başlangıç frekansındaki değeri, N frekans bölgesindeki örnek sayısı, Δf frekans artımı, t_k konum bilgisi içeren zaman gecikmesi terimi ve α_k frekansa bağımlılığı gösteren parametredir. $\alpha_k = 0$ alınarak, nokta saçıcı modeli elde edilebilir.

Oluşturulan model, açılı bilgisi de kullanılarak 2-B duruma getirilebilir.

ÖZGEÇMİŞ

1968 yılında İstanbul'da doğan Işın Yazgan ERER, orta ve lise öğrenimini Özel Notre Dame de Sion Fransız Kız Lisesi'nde tamamlamıştır. 1987 yılında İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümüne girmiş, 1991 yılında bu bölümden mezun olmuştur. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği programında yüksek lisans öğrenimine başlamış, 1993 yaz dönemi sonunda bu programı bitirerek 1993-94 kış yarıyılında doktora programına başlamıştır. Halen doktora öğrenimine tez çalışmasıyla devam eden ERER, 1991 yılında araştırma görevlisi olarak girdiği İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektromagnetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Anabilim Dalı'ndaki görevine devam etmektedir. Işın Yazgan ERER evli ve bir çocuk annesidir.

