

**YAPAY AÇIKLIKLI RADARLARIN
KARIŞTIRILMASI**

**JAMMING OF SYNTHETIC APERTURE
RADARS**

SERDAR ÇAKAL

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2007

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **ELEKTRONİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Salim KAYHAN

Üye : Prof. Dr. Adnan KÖKSAL

Üye : Doç. Dr. Engin TUNCER

Üye : Yrd. Doç.Dr. Semih BİNGÖL

Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ

ONAY

Bu tez/...../..... tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Erdem YAZGAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAPAY AÇIKLIKLI RADARLARIN KARIŞTIRILMASI

Serdar Çakal

ÖZ

Yapay Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar (SAR)) radarın aydınlattığı bölgeye ait yansıtıcılık fonksiyonunun iki boyutlu veya üç boyutlu yüksek çözünürlüklü haritalarını elde etmeyi sağlayan bir radar sistemidir.

Bu çalışmada, 1980'li yıllardan itibaren, özellikle hızlı bilgisayarların geliştirilmesi ile kullanımı artan görüntüleme radarlarında görüntü oluşturma problemi ve karıştırma tekniklerinin bu radarlara etkileri araştırılmıştır.

Bu kapsamda, yapay açıklıklı radar sayısal yeniden oluşturma teknikleri ve bilinen iki tip görüntüleme modu olan Noktasal – ışık SAR (Spotlight SAR) ve Şerit – haritalama SAR (Stripmap SAR) incelenmiş, noktasal – ışık SAR algoritmaları bilgisayar simülasyonları ile çalışılarak görüntüleme gerçekleştirilmiştir. Sonrasında görüntüleme radarlarına uygulanabilen çeşitli karıştırma tedbirleri üzerinde çalışılmış ve yine bilgisayar simülasyonları ile karıştırmanın SAR görüntüleri üzerine etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Radar Sistemleri, Yapay Açıklıklı Radar, Karıştırma Teknikleri, Elektronik Karşı Tedbirler

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü.

JAMMING OF SYNTHETIC APERTURE RADARS

Serdar ÇAKAL

ABSTRACT

Synthetic Aperture Radar is a radar sistem that provides getting two or three dimensioned high resolution mappings of the reflectivity function regarding to the sector illuminated by the radar.

As from 1980s, the usage of imaging radars have increased especially by developing of powerful computers. In this study, the imaging issue of these radars and the effect of the jamming techniques on these radars have been investigated.

In this scope, Synthetic Aperture Radar digital reconstruction techniques and the two type imaging modes called as “Spotlight SAR” and “Stripmap SAR” have been investigated. The imaging has been realized by studying the Spotlight SAR algorithms with computer simulations. After that, various electronic countermeasures which can be applied to these radars have been studied and their effect on the radar image has been investigated by using computer simulations.

Keywords: Radar Systems, Synthetic Aperture Radar, Jamming Techniques, Electronic Countermeasures,

Advisor: Asst.Prof. Yakup ÖZKAZANÇ, Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering

TEŞEKKÜR

Yazar, bu çalıőmanın gerçekleőmesinde katkılarından dolayı, aşağıda adı geçen kiői ve kuruluőlara içtenlikle teşekkür eder.

Sayın Yrd.Doç.Dr. Yakup ÖZKAZANÇ (tez danıőmanı), çalıőmanın sonuca ulaőtırılmasında ve karőtılaőtılan güçlüklerin aőtılmasında yn gösterici olmuőtur.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
EKLER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. YAPAY AÇIKLIKLI RADAR.....	2
2.1. Yapay Açıklıklı Radar.....	3
2.2. Yapay Açıklıklı Radar Kullanım Alanları.....	5
2.3. Yapay Açıklıklı Radarda Görüntüleme.....	6
2.4. SAR Geometrisi ve Tasarım Özellikleri.....	7
3. SAR GÖRÜNTÜ OLUŞTURMA PRENSİPLERİ VE ALGORİTMALARI.....	13
3.1. Yapay Açıklıklı Radarlarda Görüntüleme.....	13
3.1.1. Radar menzil görüntüleme.....	13
3.1.2. Radar menzil görüntüleme.....	15
3.3. Genel Yapay Açıklıklı Radar Modeli.....	17
3.3.1. Fourier dönüşümleri.....	19
3.3.2. Görüntü oluşturma teknikleri.....	20
3.3.2.1. Uzamsal frekans aradeğerlemesi ile sayısal yeniden Oluşturma.....	21
3.3.2. Menzil yığınlama ile görüntü oluşturma.....	26
3.3.2.1. Hızlı – zaman yavaş – zaman uyumlu süzme.....	27
3.3.2.2. Yavaş-zaman hızlı-zaman uyumlu süzme.....	29
3.3.3. Zaman bölgesinde ilintilendirme ve geri izdüşüm ile sayısal yeniden oluşturma.....	30
3.3.3.1. Zaman bölgesinde ilintilendirme.....	30
3.3.3.2. Geri izdüşüm.....	31
3.4. Yapay Açıklıklı Radar Tipleri.....	32
3.4.1. Noktasal - ışık yapay açıklıklı radar.....	32
3.4.1.1. Mekanik olarak huzme – yönlendirmeli noktasal – ışık SAR.....	33
3.4.1.2. Elektronik olarak huzme-yönlendirmeli noktasal – ışık SAR.....	37
3.4.1.3. SAR işaretinin izgesel analizi.....	40
3.4.1.4. Çözünürlük.....	44
3.4.1.5. İşaret işleme.....	46
3.4.1.6. Sayısal noktasal – ışıklandırma.....	51
3.4.1.7. Uzamsal frekans aradeğerlemesiyle SAR yeniden oluşturma Algoritması.....	58
3.4.2. Şerit – haritalama yapay açıklıklı radar.....	62
4. SAR SİSTEMLERİNİN KARIŞTIRILMASI.....	64
4.1. Elektronik Harp.....	64
4.1.1. Elektronik destek tedbirleri (ESM).....	64
4.1.2. Elektronik karşı tedbirler (ECM).....	64
4.1.2.1. Aktif karşı tedbirler.....	65
4.1.2.2. Pasif karşı tedbirler.....	66
4.1.3. Elektronik karşı karşı tedbirleri (ECCM).....	66

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
4.2. Görüntüleme Radarlarına Karşı Elektronik Karıştırma Tedbirleri.....	66
4.2.1. Gürültü Karıştırma Tipleri.....	67
4.2.2. Aldatıcı karıştırma.....	73
4.2.3. Karıştırıcı etkinliği.....	75
4.2.3.1. Algılanan karıştırıcı gücü.....	75
4.2.3.2. SAR için işaret gürültü oranı.....	76
4.2.3.3. Gürültü karıştırma için işaret karıştırıcı oranı.....	79
4.2.3.4. Tekrarlayıcı karıştırma için işaret karıştırıcı oranı.....	80
4.2.4. Karıştırma tedbirleri ile ilgili literatür araştırması.....	81
5. YAPAY AÇIKLIKLIL RADAR KARIŞTIRMA SİMULASYONLARI.....	83
5.1. Gürültü Karıştırma ile Görüntüleme.....	83
5.1.1. Noktasal gürültü karıştırması simülasyonları.....	85
5.1.2. Baraj gürültü karıştırması simülasyonları.....	86
5.1.3. Rastgele darbe karıştırması simülasyonları.....	88
5.2. Aldatma Karıştırması (Tekrarlayıcı Karıştırma).....	90
6. SONUÇLAR.....	94
KAYNAKLAR.....	95
EK.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	102

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Yapay açıklıklı radar geometrisi [Mahafza,2000].....	8
Şekil 2.2. Doppler geometrisi [Mahafza,2000].....	11
Şekil 3.1. Menzil görüntüleme sistem geometrisi [Soumekh,1999].....	14
Şekil 3.2. Çapraz görüntüleme sistem geometrisi [Soumekh,1999].....	16
Şekil 3.3. SAR görüntüleme sistem geometrisi [Soumekh,1999].....	18
Şekil 3.4. Tek bir hedef yansıtıcı için $s(t,u)$ işaretinin grafiksel gösterimi ([Soumekh,1999]'den değiştirilerek).....	19
Şekil 3.5. $f(x,y)$ için marjinal Fourier dönüşümleri gösterimi [Soumekh,1999].....	20
Şekil 3.6. $s(t,u)$ için marjinal Fourier dönüşümleri gösterimi [Soumekh,1999].....	20
Şekil 3.7. SAR uzamsal frekans eşleşmesi ([Soumekh,1999]'den değiştirilerek).....	22
Şekil 3.8. Genel SAR, uzamsal frekans aradeğerlemesi ile görüntü oluşturma algoritması blok şema gösterimi [Soumekh,1999].....	26
Şekil 3.9. Genel SAR, menzil yığınlama, hızlı – zaman yavaş – zaman uyumlu süzme algoritması ile görüntü oluşturma blok şema gösterimi [Soumekh,1999].....	28
Şekil 3.10. Genel SAR, menzil yığınlama, yavaş – zaman hızlı – zaman uyumlu süzme algoritması ile görüntü oluşturma blok şema gösterimi [Soumekh,1999].....	29
Şekil 3.11. Genel SAR, geri izdüşüm ile görüntü oluşturma blok şema gösterimi [Soumekh,1999].....	31
Şekil 3.12. Mekanik huzme – yönlendirme noktasal – ışık SAR geometrisi [Soumekh,1999].....	34
Şekil 3.13. Elektronik huzme – yönlendirme noktasal – ışık SAR geometrisi [Soumekh,1999].....	38
Şekil 3.14. Yan – dik bakış ve yan –dik olmayan bakış ile n.inci hedef noktasal – ışık SAR işareti 2 boyutlu izge destek bandı [Soumekh,1999].....	41
Şekil 3.15. Hedef fonksiyonu $F[k_x,k_y]$ 'nin n.inci hedef için izge destek bandı [Soumekh,1999].....	45
Şekil 3.16. Uzamsal frekans bandından Fourier dönüşümü alınmış hedef fonksiyonu (n.inci hedef) ([Soumekh,1999]'den değiştirilerek).....	45
Şekil 3.17. Sayısal noktasal – ışıklandırma algoritmasının blok şema gösterimi ([Soumekh,1999]'den değiştirilerek).....	55
Şekil 3.18. Uzamsal frekans aradeğerlemesiyle SAR yeniden oluşturma algoritması blok şeması.....	58
Şekil 3.19. Uydu ile fotoğrafı çekilmiş bir bölge görüntüsü.....	62
Şekil 3.20. SAR görüntüsü.....	62
Şekil 4.1. Noktasal karıştırma işareti ve radar bandı frekans – zaman alanı gösterimi.....	68
Şekil 4.2. Baraj karıştırma işareti ve radar bandı frekans – zaman alanı gösterimi.....	69
Şekil 4.3. Baraj karıştırma verici yapısı.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.4. Taranmış gürültü/sürekli dalga karıştırması frekans – zaman ve genlik – zaman diyagramı gösterimi [Neri,2001].....	71
Şekil 4.5. Rasgele darbe karıştırmasının frekans – zaman ve genlik – zaman alanlarında gösterimi.....	72
Şekil 4.6. Rastgele darbe karıştırıcı yapısı.....	73
Şekil 4.7. Tekrarlayıcı darbe karıştırma verici yapısı.....	74
Şekil 4.8. Karıştırma sistem geometrisi ([Walter,1993]'dan değiştirilerek).....	75
Şekil 5.1. Karıştırıcı işaretinin SAR görüntü oluşturma algoritmasında eklenişinin gösterimi.....	83
Şekil 5.2. SAR hedef alan gerçek görüntüsü.....	84
Şekil 5.3. Karıştırmasız SAR simülasyon görüntüsü.....	84
Şekil 5.4. Düşük güçte noktasal gürültü karıştırmasına maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.....	85
Şekil 5.5. Yüksek güçte noktasal gürültü karıştırmasına maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.....	86
Şekil 5.6. Düşük güçte baraj karıştırmaya maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.....	87
Şekil 5.7. Yüksek güçte baraj karıştırmaya maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.....	87
Şekil 5.8. Düşük güçte rastgele darbe karıştırmasına maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.....	88
Şekil 5.9. Yüksek güçte rastgele darbe karıştırmasına maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.....	89
Şekil 5.10. Düşük güç tekrarlayıcı darbe karıştırmasına maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.....	91
Şekil 5.11. Yüksek güç tekrarlayıcı darbe karıştırmasına maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.....	91
Şekil 5.12. Tümüyle tekrarlayıcı darbe karıştırmasına maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.....	92

EKLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
SAR Uzamsal Frekans Aradeğerlemesi İle Sayısal Yeniden Oluşturma MATLAB Kaynak Kodu.....	97

1. GİRİŞ

Yapay Açıklıklı Radar, her türlü hava koşulunda yüksek çözünürlüğe sahip görüntüler elde edebilen bir radar türü olup, yirminci yüzyılın mühendislik alanında gerçekleştirilen en önemli icatlarından birisi olarak kabul edilmektedir. SAR, uçak ya da uydu platformlarında kullanılan, arazilerin ve buna benzer yüzeylerin üzerlerinde yer alan hedeflerin yüksek çözünürlüklü haritalarının elde edilmesini sağlayan bir radar sistemidir. Bu haritalar, hedefin radar işaretleri kullanılarak eş zamanlı yayılım ile aydınlatılması ve geri yansıyan yankı işaretlerinin işlenmesi yoluyla elde edilmektedir [Mahafza,2000].

SAR sistemi, verinin elde edilmesi ve işlenmesi açısından yüksek seviyede duyarlı elektronik donanım, söz konusu verinin yüksek çözünürlüklü görüntülere dönüştürülebilmesi amacıyla ileri matematik ve fizik prensipleri içeren bir radar sistemi olarak yorumlanabilir.

Gabor'un dalga cephesi yeniden oluşturma teorisi (wavefront reconstruction theory), SAR teorik prensiplerinin merkez noktası olarak kabul edilmektedir. Bu teori aynı zamanda birçok görüntüleme sistemlerinin de temelini oluşturmaktadır. Söz konusu bu teori, görüntüleme sistemlerinin başlangıcı sayılan 1950, 1960 yıllarında geliştirilmiştir. Ancak, o yıllarda yüksek hızlı işlemcilerin ve gelişmiş işaret işleme algoritmalarının olmayışı, bu teori içerisinde yer alan görüntüleme yöntemlerinin gelişmesinde büyük engel teşkil etmiştir. İlk SAR radarları, hedeften yansıyan yankıları optik (analog) işlemciler kullanarak işleyen ve görüntü oluşturulması için Frensel yaklaşımlarını kullanan radarlardı [Cutrona,1966]. 1970'li yılların sonlarında uzay platformlarında da kullanılan bu SAR sistemlerindeki görüntüleme yapısı menzil – Doppler (range - doppler) görüntüleme olarak da bilinmektedir [Brown,1969]. 1970'lerde, yüksek çözünürlüklü noktasal – ışık SAR görüntüleme radarları için, yüzey dalga (plane – wave) yaklaşımını kullanan bir başka SAR görüntüleme yöntemi olan kutupsal biçim işleme (polar – format processing) ortaya atılmıştır [Ausherman,1984]. Edinilen teorik ve pratik bilgi ile SAR görüntüleme yakın tarihe kadar bu yöntemlere bağlı kalınarak şekillendirilmiş durumdadır. Yüksek çözünürlüklü modern SAR sistemleri açısından bakılacak olursa, bu yöntemlerin kimisi eksik

temellere dayanmakta kimisi ise pratikte uygulanamaz durumdadır [Soumekh,1999].

Sayısal işaret işleme yöntemlerinin kullanıldığı dalga cephesi yeniden oluşturma teorisine dayanan ilk SAR görüntüleme sistemleri ile 1980'lerin başında tanışıldığı bilinmektedir. [Soumekh,1999] bu sistemlerin getirdiği yenilikleri şöyle yorumlamıştır.

“SAR dalga cephesi yeniden oluşturma teorisi sadece SAR görüntülemesi için bir yol değil aynı zamanda SAR işaretlerinin fonksiyonel özelliklerinin açığa çıkarılmasını sağlayan bir yöntemdir. Örneğin kutupsal biçim işleme yöntemi, radar bandının fiziksel anten açıklığı huzme açısıyla doğru orantılı olduğunu söylerken, SAR dalga cephesi yöntemi, yavaş – zaman Doppler bandı, sadece fiziksel anten radar huzme açısı açıklığına değil, fiziksel anten huzme açısı açıklığı ile sentetik açıklık bakış açısının toplamına eşittir.”

Bunun gibi birkaç örneğe bakıldığında, SAR işaretin özelliklerinin menzil – Doppler ya da kutupsal biçim işleme yöntemleriyle tam anlamıyla yakalanamadığı görülmektedir. 1970'lerden sonra yapılan ve verinin menzil – Doppler görüntüleme ya da kutupsal – biçimde işleme teknikleri ile toplanması ve dalga cephesi tekniği ile görüntülenmesi denemelerinin çoğunda elde edilen SAR verisinde katlama hataları (aliasing) ile karşılaşmıştır. Ancak, şu an ki gelişmiş sayısal işaret işleme ve görüntü işleme algoritmalarıyla, düzgün ve katlama hatalarından arındırılmış görüntü oluşturma mümkün olabilmektedir.

1990'lardan sonra SAR görüntülemeye büyük önem arz eden çözünürlük değerleri çoklu frekans kullanımı ile çok iyi değerlere yükseltilmiş, veri hızları artırılmış ve çok kanallı antenlerin kullanımı ile uzamsal işaret işlemeye imkan kılınmıştır. Bu özellik görüntüleme radarlarına, hareketli hedef gösterici (Moving Target Indicator (MTI)), hareket eden hedeflere ait pozisyon hatalarını düzeltme gibi ekstra özellikler kazandırmıştır. Daha yüksek verime ve güvenilirliğe sahip faz diziliimli antenlerle (phased – array antennas) tek radarda değişik operasyonel modlarda (Şerit – haritalama, noktasal – ışık ...vb.) çalışılabilmiştir [Klemm,1997].

Bu tez çalışmasında günümüz bilgisayarlarının getirdiği avantajlar ile kullanımı kolaylaşan ve yaygınlaşan yapay açıklıklı radarlarda kullanılan dalga cephesi

yeniden oluşturma teknikleri incelenmiştir. Bu kapsamda, Yapay açıklı radar çeşitlerinden noktasal – ışık SAR modeli, sayısal görüntü oluşturma tekniklerinden uzamsal frekans alanında aradeğerleme (digital reconstruction via spatial frequency domain interpolation) tekniği kullanılarak MATLAB bilgisayar yazılımı ile simüle edilmiştir. Sonrasında, bu radarlar elektronik harp açısından değerlendirilmiş, elektronik karşı tedbirleri kullanılarak bilgisayar simülasyonları ile bu tedbirlerin noktasal – ışık SAR görüntülemesine etkileri incelenmiştir.

Çalışmamızın birinci bölümünde SAR sisteminin tanıtımı yapılmakta, tarihsel gelişimi ve bu güne kadar geliştirilen görüntü oluşturma tekniklerine değinilmektedir. İkinci blmde, yapay açıklıklı radar temellerinden, bu radarların kullanım alanları, geometrisi ve tasarım özelliklerinden bahsedilmektedir. nc blmde, Genel SAR modeli ile birlikte sayısal görüntü oluşturma algoritmaları anlatılmakta, ayrıca iki tip görüntüleme modu şerit – haritalama SAR (stripmap SAR) ve noktasal – ışık SAR (spotlight SAR)'dan noktasal – ışık SAR ayrıntılı bir biçimde işlenmektedir. Dördüncü blmde, SAR sistemleri elektronik harp açısından değerlendirilmekte, bu kapsamda, çeşitli gürültü ve aldatma karıştırmalarının SAR sistemlerine etkilerinden bahsedilmektedir. Beşinci blmde, ise bir önceki blmde bahsedilen karıştırma tekniklerinin bilgisayar simülasyonları ile SAR görüntüsüne olan etkileri gözlemlenmektedir. Son olarak altıncı blmde, yapılan çalışmaların sonuçları tartışılmakta ve gelecek çalışmalardan bahsedilmektedir.

2. YAPAY AÇIKLIKLI RADAR TEMELLERİ

2.1. Yapay Açıklıklı Radar

İnsan görüntüleme yapısına bir göz attığımızda, gözlerin birer sensör beyinin ise bir işlemci olarak değerlendirilebileceğini görmekteyiz. İnsanoğlu icat ettiği bazı cihazlarla bu yetisini geliştirme olanağına sahiptir. Bir yeri görüntülemek ya da görüntüyü yakalamak her iki durumda da daha büyük bir lens açıklığı daha büyük bir radar anten açıklığı veya daha büyük akustik dönüştürücü açıklığı gerektirmektedir [Soumekh,1999]. İyi bir görüntüleme hedef alan üzerindeki yansıtıcıların ne kadar iyi ayırtedilebildiği ile ilgilidir. Darbe modülasyonlu radarlarda bu ayırtedilebilirlik yani çözünürlük darbe süresi ve anten huzme genişliği ile sınırlıdır. Ne kadar kısa süreli bir darbe kullanılırsa menzil alanında o derece yansıtıcılar iyi çözülebilir. Antenin huzme genişliği, anten boyutları ile ters orantılı olduğundan bakış açısına dik alandaki yansıtıcıların çözünürlüğü boyutlar büyüdükçe artmaktadır. Uzak mesafelerden yüksek çözünürlüğe ihtiyaç olunan hedeflerin çözümü için çok büyük boyutlu antenlere gerek duyulmaktadır. Bu fiziksel açıklığa sahip antenlerin gerçekleştirilmesi güç, kullanımı ise problemlidir [Ölçer,1995].

Geleneksel radarlarda yaşanan bu görüntüleme problemine ilk olarak 1951'de Carl Wiley şu şekilde bir çözüm getirmiştir [Soumekh,1999]. Hareketli bir platforma konulan bir radar ile belirli zaman aralıklarıyla ölçüm alınarak, ölçüm alınan süre boyunca platformun katettiği yola eşdeğer uzunluktaki bir antenin oluşturacağı çözünürlükten çok daha iyi bir çözünürlük elde edilebilir. Bu aşağıdaki örnekte daha iyi anlaşılmaktadır.

Geleneksel radarlarda, D (çapı) 1 metre ve λ (dalga boyu) 1 metre olan bir radarın $R = 1000$ metre uzaklıktaki enine ya da başka bir deyişle çapraz - menzil (cross - range) çözünürlüğü:

$$\frac{R\lambda}{D} = 1000 \text{ metre} \quad (2.1)$$

olarak bulunur. Görülüyor ki çözünürlük çok düşüktür. SAR teorisi ve sinyal işleme yöntemleri bakımından probleme yaklaşıldığında, bu 1 metrelik radar anten

açıklığına sahip radar, $D_{\text{eff}}=1000$ (etkin yapay radar açıklığı) metrelik bir sanal açıklık boyunca hareket ettirilirse elde edilen çözünürlük:

$$\frac{R\lambda}{D_{\text{eff}}} = 1 \text{ metre} \quad (2.2)$$

olarak elde edilmektedir.

Bu radar sistemlerinde yukarıda bahsedildiği gibi radar hareketli bir platform üzerine yerleştirilir ve hedef bölge bu radar ile aydınlatılır. Bu tür radarlar yapay açıklıklı radar sistemleri olarak anılır. Radar sabit tutulup hareketli platformlar izlenilmek istenildiğinde kullanılan radarlar ise ters yapay açıklıklı radar (Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR)) sistemleri olarak adlandırılır. Her iki durumda da hareket söz konusu olduğundan dolayı gerekli anten açıklığı yapay olarak elde edilir [Orhan,2001].

2.2. Yapay Açıklıklı Radar Kullanım Alanları

Radar sistemleri denilince akla gelen ilk şey bu cihazların askeri amaçlar için kullanılan cihazlar olduğudur. Ancak, araştırıldığında görülmektedir ki SAR askeri amaçların yanında sivil amaçlı bir çok faydalı alanda da kullanılmaktadır. Bu alanlar:

- Gezegen yüzeylerinin topografik haritalarının çıkarılması
- Okyanus zeminlerinin topografik haritalarının çıkarılması
- Havadan keşif
- Yeraltı kaynaklarının araştırılması
- Gözetleme ve hava trafik kontrolü
- Otomatik uçak inişi
- Maden arama çalışmaları
- Ormanlık arazide gizlenmiş hedeflerin tespiti

- Gömülü tarihi eserlerin tespiti
- Füze ya da güdümlü mermilerin tespit ve takibi
- Yer hedeflerinin tespit ve takibi
- Medikal görüntüleme

olarak sınıflandırılabilir.

2.3. Yapay Açıklıklı Radarda Görüntüleme

SAR sistemleri, gözlemlenmek istenen hedef alan bilgisini içeren çok boyutlu bir görüntüyü elde etmek amacıyla, işaret işleme yöntemlerinin kullanıldığı bir sistemdir. Bu sebepten SAR sistemi, görüntüleme maksadıyla çok boyutlu bir veri tabanı ortamını sağlamaktadır. İki boyutlu bir SAR görüntülemeyi gerçekleştirmek için, radar hareket istikametine dik olan x – eksenini boyunca yer alan hedeflere ait veri, radar menzil görüntüleme prensipleri ile, radar istikametiyle aynı eksen olan y – eksenini boyunca yer alan hedeflere ait veri ise Doppler prensipleri kullanılarak elde edilmekte ve veri tabanı böylece şekillenmektedir [Soumekh,1999].

SAR sistemleri ile oluşturulan yüzey hedeflerinin kalitesi elde edilen çözünürlük hücresinin boyutuyla ilgilidir. İki boyutlu görüntülemeyi düşünecek olursak, bir çözünürlük hücresinin boyutu onu oluşturan x – eksenini bileşeni olan menzil ve y – eksenini bileşeni olan çapraz – menzil çözünürlüklerinin boyutları ile doğru orantılıdır. [Mahafza,2000] bir çözünürlük hücresine etkiyen faktörleri şöyle sıralamıştır:

- Görüntülenmek istenen hedefin boyutları
- Sinyal işleme sisteminin yetenekleri ve hızı
- Maliyet
- İstenen çözünürlük seviyesi

Bu faktörlerin hepsi birbiriyle yakın ilişki içerisinde olup tümünü aynı anda etkin bir biçimde elde etmek güçtür. Dolayısıyla aralarında bir ödünleşim vardır. Bu

sebepten kullanım alanına göre bazı özelliklerden feragat edilerek diğer özelliklerin etkin kullanımına daha fazla önem verilmektedir.

Radar haritaları piksellerden oluşmaktadır. Bu piksel boyutları hedef üzerinde radar özellikleriyle ilişkili olan çözünürlük hücresi boyutlarıyla belirlenmektedir. Her bir çözünürlük hücresine denk gelen yansıtıcılık, radar haritasında piksel yoğunluğu olarak karşımıza çıkmaktadır.

SAR görüntüleme nokta hedef (point target) ve genişlemiş hedef (extended target) olmak üzere iki tip hedeften söz edilmektedir. Nokta hedefler, tipik olarak insan yapımı nesnelere olup dikine ve oldukça pürüzsüz yüzeylere (radar ışareti dalga boyu ile karşılaştırıldığında) sahiptirler. Böyle yüzeyler genellikle köşe yansıtıcı biçiminde olmakta ve gelen radar enerjisini geldiği yönün tersinde büyük oranda yansıtmaktadırlar. Bu yüzeyler güçlü radar ışareti dönüşü veya radar görüntüsünde yüksek yoğunluk arz etmektedirler. Radar görüntüsü yüksek yoğunluktaki piksellerin bir paternini göstermekte ve radar yorumlayıcısı nesnelere kimliğini kontrast farklarından belirleyebilmektedir.

Genişlemiş hedefler ise çözünürlük hücresi içerisinde görüntülenecek asıl nesne dışında kalan cisimler olup, tipik olarak doğal orijinli ve değişken pürüzlülük derecelerinde tezahür etmektedirler [Walter,1993]. Bu hedefler SAR söz konusu olduğunda, parazit (clutter) olarak tanımlanmaktadır. Bu parazitler görüntülenen alanın yansıtıcılık fonksiyonunu tanımladıklarından görüntüleme radarları için önemli bir faktördür [Shenghua,2004].

2.4. SAR Geometrisi ve Tasarım Özellikleri

SAR görüntülerinde kalitenin ölçüsünün büyük ölçüde çözünürlük hücresinin boyutlarına bağlı olduğunu söylemiştik. Menzil çözünürlüğü bilindiği üzere,

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} \quad (2.3)$$

Şekil 2.1'de görüldüğü üzere eğik yapı için menzil çözünürlüğü,

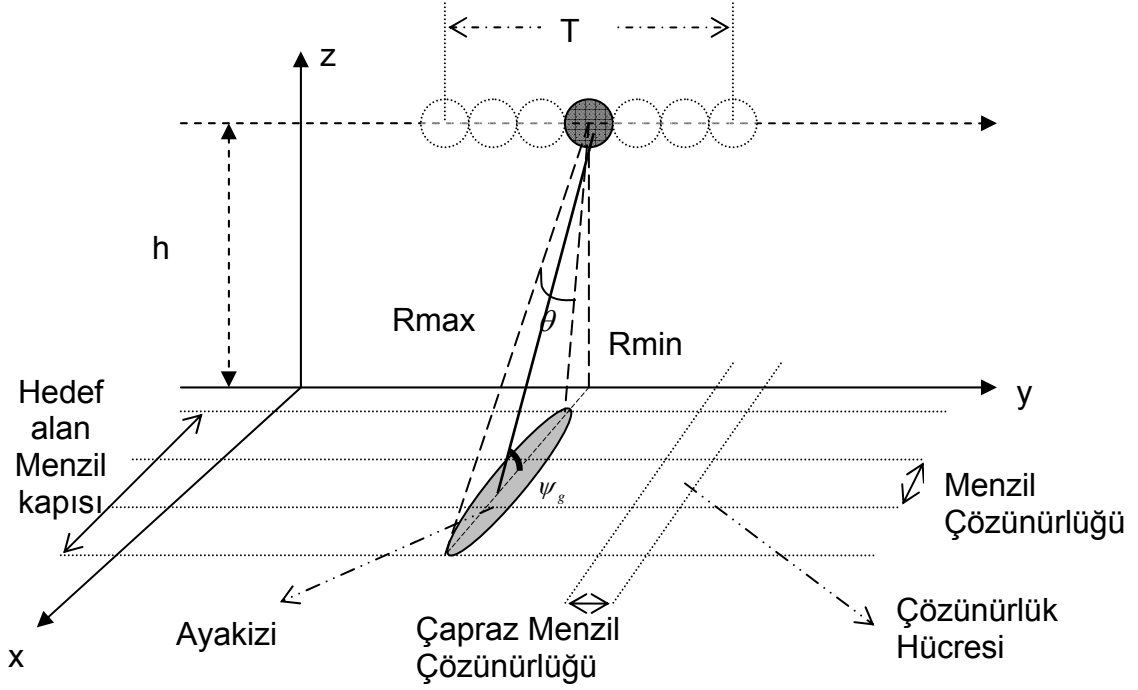
$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} \sec \psi_g \quad (2.4)$$

şeklinde olup, burada:

c : ışık hızını,

τ : radar darbe genişliğini ve

ψ_g : radar huzmesinin yatayla yaptığı açığı ifade etmektedir.



Şekil 2.1. Yapay açıklıklı radar geometrisi [Mahafza,2000]

Gerçek dizi anten için R menziline 3dB huzme açıklığında çapraz – menzil çözünürlüğü,

$$\Delta A_R = \theta R \quad (\Delta A_R = R \tan \theta \approx R\theta) \quad (2.5)$$

şeklinde yazılıp, burada:

λ : dalga boyunu,

L : anten açıklığını,

$\theta \approx \frac{\lambda}{L}$: ise huzme genişliğini ifade edilmektedir.

Böylece gerçek dizi anten çapraz – menzil çözünürlüğü,

$$\Delta A_R = \frac{\lambda}{L} R \quad (2.6)$$

şeklinde yazılmaktadır. Yapılan matematiksel analizler göstermektedir ki etkin yapay açıklık gerçek dizi anten açıklığının iki katına eşittir. Dolayısıyla yapay açıklıklı radar için çapraz – menzil çözünürlüğü,

$$\Delta A_R = \frac{\lambda}{2L} R \quad (2.7)$$

olarak kabul edilmektedir.

Çapraz – menzil çözünürlüğü, ayak izi (footprint) içerisinde Doppler değişiminin sağladığı avantaj sayesinde büyük ölçüde artırılabilir [Mahafza,2000]. Radar sistemi hareket halindeyken yer üzerindeki sabit bir hedef noktaya göre radyal hızı hedef yönünde değişim arz etmektedir. Dolayısıyla geri dönen yankılarda Doppler kaymaları bulunmaktadır. Doppler kaymaları pratikte, eşit aralıklara sahip eş evreli darbelerin yollanması ve her bir menzil selesinin (range bin) zaman geçmişinin FFT'sinin hesaplanmasıyla ölçülmektedir. Bu yaklaşım en yaygın ve kolay yollardan biridir [Webb,1998].

$R(t)$ radarın hedef noktaya göre menzil fonksiyonu, v_R radarı taşıyan platform hızı olsun. Bu durumda elde edilen Doppler kayması,

$$f_D = -\frac{2R'(t)}{\lambda} = -\frac{2v_R}{\lambda} \quad (2.8)$$

olarak yazılmaktadır.

SAR sisteminde radar darbe tekrar frekansı (Pulse Repetition Frequency,(PRF)) menzil ve Doppler belirsizliklerine (ambiguities) olanak vermeyecek şekilde seçilmelidir. Maksimum PRF, menzil belirsizliğini engelleyecek derecede küçük, minimum PRF, Doppler belirsizliğini engelleyecek derecede büyük olmalıdır. Ayak izi içerisinde, radara en uzak noktadan yansıyan yankı, kendinden bir sonraki darbe, radardan yayınlanmadan önce radar alıcısı tarafından alınmalıdır. SAR için belirsiz olmayan (unambiguous) menzil değeri,

$$R_u = \frac{c}{2f_r} = R_{\max} - R_{\min} \quad (2.9)$$

şeklinde olup, burada:

f_r : radar darbe tekrar frekansını (PRF),

R_{\max} : maksimum hedef alan uzaklığını,

R_{\min} : ise minimum hedef alan uzaklığını ifade etmektedir.

Burada maksimum PRF,

$$f_{r\max} \leq \frac{c}{2(R_{\max} - R_{\min})} \quad (2.10)$$

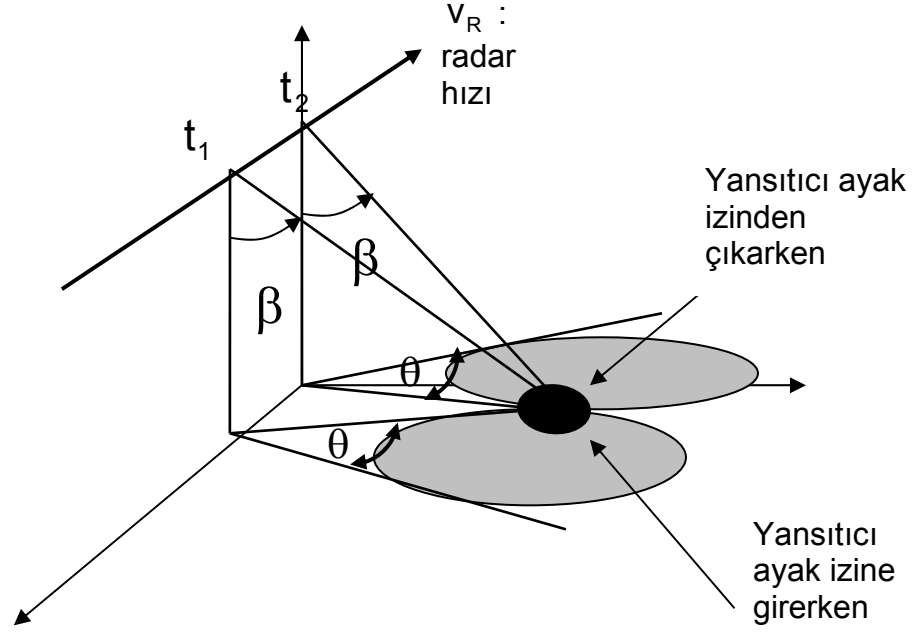
olarak verilir.

SAR minimum PRF, ayak izi içerisindeki beklenen maksimum Doppler yayılımından daha büyük olmalıdır [Mahafza,2000].

Şekil 2.2.'deki geometri düşünülecek olursa, β radar huzmesinin, radarın yere göre normali ile yaptığı açı olmak üzere, nokta yansıtıcısı için elde edilebilecek maksimum ve minimum Doppler frekansları sırasıyla,

$$t_1 \text{ zamanında } f_{D_{\max}} = \frac{2v_R}{\lambda} \cos\left(90 - \frac{\theta}{2}\right) \sin\beta \quad (2.11)$$

$$t_2 \text{ zamanında } f_{D_{\min}} = \frac{2v_R}{\lambda} \cos\left(90 + \frac{\theta}{2}\right) \sin\beta \quad (2.12)$$



Şekil 2.2. Doppler geometrisi [Mahafza,2000]

Doppler yayılımı ise,

$$f_{D_{\max}} - f_{D_{\min}} = \frac{2v_R}{\lambda} \theta \sin \beta \quad (2.13)$$

olarak bulunmaktadır. Yukarıdaki sonuçlar ışığında belirsiz olmayan menzil ve Doppler ölçümleri için PRF aşağıdaki eşitsizliği sağlamalıdır.

$$\frac{2v_R}{\lambda} \theta \sin \beta \leq f_r \leq \frac{c}{2(R_{\max} - R_{\min})} \quad (2.14)$$

[Mahafza,2000], daha iyi bir çözünürlük değerini elde etmeyi şu şekilde açıklamıştır.

“Bir ayak izi içerisinde aynı menzilde bulunan birbiri ardına sıralanmış yansıtıcıları, sadece Doppler geçmişleri farkı baz alınarak çözmek mümkündür.”

Buradan hareketle, k.ıncı menzil selesinde, birbirine yakın iki hedef yansıtıcı için minimum Doppler yayılımı (Bkz. Eş. 2.13.),

$$\Delta f_{d_{\min}} = f_{D_{\max}} - f_{D_{\min}} = \frac{2v_R}{\lambda} \Delta \theta \sin \beta_k \quad (2.15)$$

şeklinde yazılmakta olup burada:

$\Delta f_{d_{min}}$: hedefler iki ayrı Doppler filtresinde gözükcek şekilde minimum Doppler frekansını,

$\Delta\theta$: iki yansıtıcı arası açı farkını ve

β_k : k.ıncı menzil selesi radar normali açısını ifade etmektedir.

Her bir Doppler filtresinin bant genişliği, eş evreli işlem zamanının tersine olacağından, $L = v_R T_{islem}$ (T_{islem} : eşevreli işlem zamanı) olmak üzere çapraz – menzil genişliği,

$$\Delta A_R = \Delta\theta R_k = \frac{\lambda}{2L \sin\beta_k} R_k \quad (2.16)$$

şeklinde hesaplanır.

3. SAR GÖRÜNTÜ OLUŞTURMA PRENSİPLERİ VE ALGORİTMALARI

3.1. Yapay Açıklıklı Radarlarda Görüntüleme

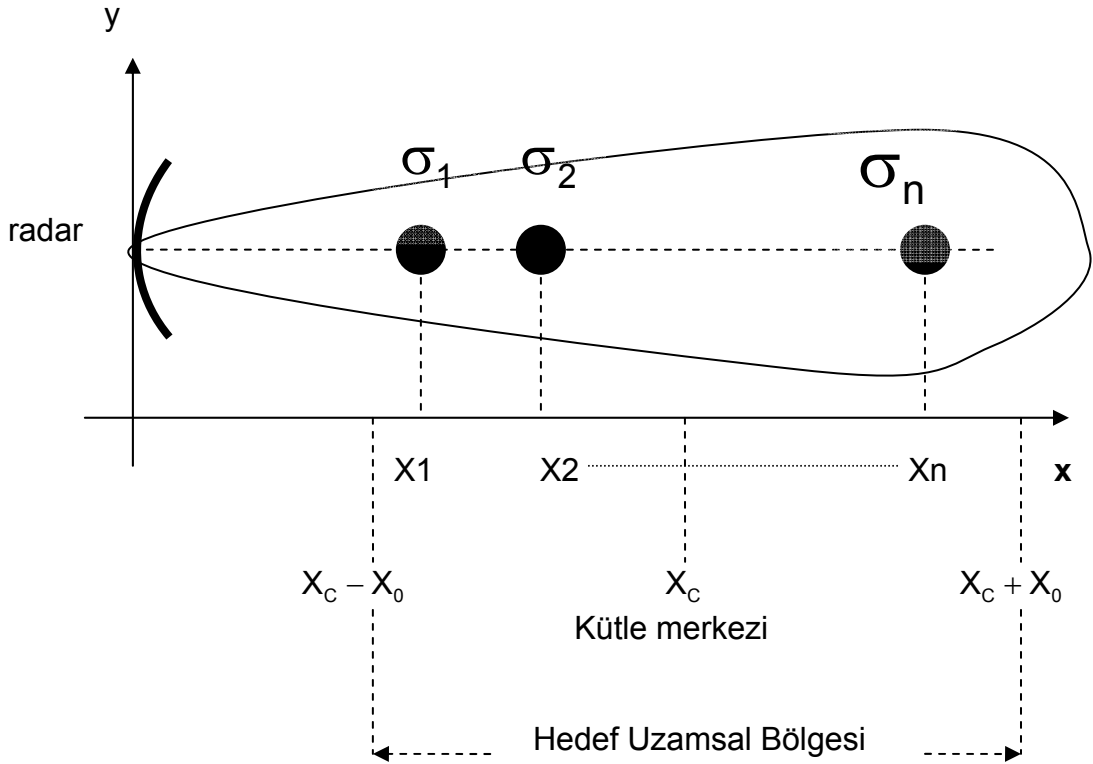
SAR sistemleri menzil, çapraz – menzil eksenlerinde hedef alanın yansıtıcılığını gösteren haritalar üretmektedir. Elde edilen menzil çözünürlüğü radar sisteminin kullandığı frekans bandı ve sinyal işleme teknikleri ile ilgiliyken, çapraz – menzildeki çözünürlüğü ise kullanılan antenin genişliği ve kullanılan işaretin dalga boyu ile ilgilidir. İyi bir menzil çözünürlüğünü elde etmek için radar sistemlerinde darbe sıkıştırma teknikleri kullanılmaktadır. Çapraz – menzil için iyi bir çözünürlük ise daha büyük bir radar anten açıklığı ile mümkün olmaktadır. Bu açıklık radar sistemi hareketinin bize sağladığı avantajlar kullanılarak sağlanabilmektedir [Mahafza,2000].

3.1.1. Radar menzil görüntüleme

Menzil görüntüleme (range imaging), radar anteni bakış istikameti üzerinde bulunan hedeflerin mevkilerini, onlardan yansıyor gelen yankıların gecikme zamanlarından çıkararak yapılan görüntülemedir. Menzil görüntüleme sadece hedeflerin mevkilerini tespit etmeyip aynı zamanda onların biçimleri hakkında da bizlere bilgi vermektedir. Farklı hedefler, radar açısından bakıldığında, farklı radar kesit alanlarına sahip olacağından, bu hedeflerden yansıyor gelen yankıların da şiddetleri farklı olacaktır. Buradan yola çıkılarak, hedefler hakkında bilgi sahip olunabilmektedir.

Radar vericisinden yayımlanan işaretin süresi yankıların şiddetine etki eden en önemli faktörlerden biridir. Yayımlanan enerji, işaret darbe süresiyle doğru orantılı olacağından, uzun süreli darbeler, hedeften yansıyan yankılarında daha güçlü olmasına neden olacaktır. Ancak, darbe süresi uzun olduğundan birbirine yakın olan hedefler çözülemeyebilecektir. Tam tersi düşünüldüğünde, amaç çözünürlükse kısa darbeler bu amacı gerçekleştirmektedir ama bu sefer de yeterli işaret gürültü ya da işaret karıştırıcı oranı (signal to noise ratio (SNR), signal to jammer ratio (SJR)) sağlanamayabilecektir. Bu problemler darbe sıkıştırma (pulse compression) teknikleri ile çözüme kavuşturulmuştur.

Şekil 3.1.'de x – eksenini menzili ve y – eksenini de çapraz – menzili ifade etmektedir. Burada yer alan hedef uzamsal alanının aynı zamanda radar yayılım paterninin görebildiği alandır. X_c kütle merkezi olup, şekilden anlaşıldığı gibi radarın uzamsal bölgesi ortalaması değildir. Radar operatörü, gerçekte bu alan hakkında yaklaşık bir önbilgiye sahiptir.



Şekil 3.1. Menzil görüntüleme sistem geometrisi [Soumekh,1999]

Genel amaç hedef alanı en iyi şekilde görüntülemek olduğundan, hedefler arası çözünürlük büyük önem taşımaktadır. Menzil görüntüleme radar işaret değişimi miktarı çözünürlükle doğru orantılı olduğundan verici işaretinde radar bandındaki tüm frekans değerlerini kullanmamız gerekmektedir. SAR verisini oluşturmak için çeşitli radar işaretleri kullanılabilir. Bunlardan biri ve en çok kullanılan geniş banda sahip darbe işaretlerini, 'chirp' tipi darbeleri kullanmaktır. Bir diğer çok kullanılan yöntem ise frekans atlama (frequency hopping) yöntemidir. Her yöntemin bir diğerine göre avantajı ya da dezavantajı vardır. Buradaki avantaj ve dezavantajlarda, kullanılan donanım ve yazılım yapısının etkisi büyüktür [Soumekh,1999].

Şekil 3.1.'de x – eksenini boyunca $p(t)$ verici işareti ile tek boyutlu görüntüleme yapmak istendiğinde, n adet hedeften yansıyan ve alıcıya gelen işaretler,

$$s(t) = \sum_n \sigma_n p\left(t - \frac{2x_n}{c}\right) \quad (3.1)$$

şeklinde olup, burada:

t : zamanı,

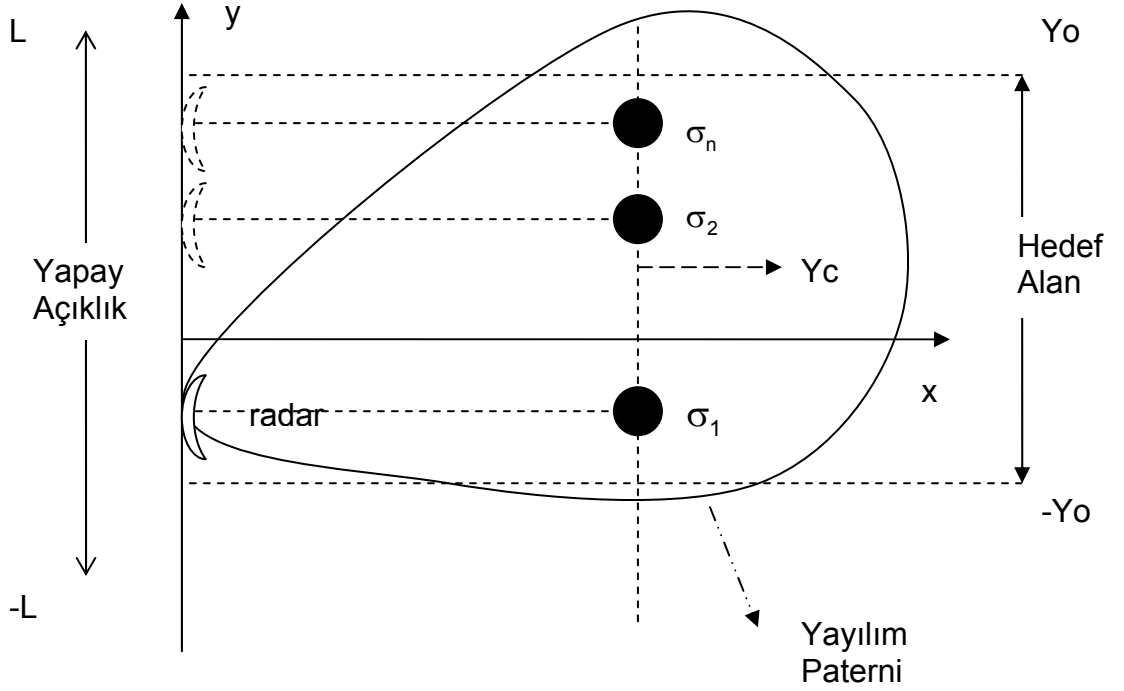
σ_n : hedef yansıtıcılığını ve

x_n : hedeflerin mevkilerini ifade etmektedir.

Buradan da görüldüğü gibi, alıcıya dönen radar işareti yalnızca hedefin menzili hakkında değil aynı zamanda yansıtıcılığı hakkında da veri içermektedir.

3.1.2. Çapraz menzil görüntüleme

Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi, bilinmeyen radar yansıtıcılıklarına sahip bir grup hedef y – eksenini boyunca belli bir genişlik $(-Y_0, Y_0)$ 'te (Y_0 : hedef alan çapraz – menzil genişliği) sıralanmaktadır. Sadece çapraz görüntüleme incelendiğinden bu hedeflere ait menzil sabit X_c olacaktır. Menzil görüntüleme olduğu gibi operatör Y_c (Y_c : çapraz – menzil kütle merkezi) için de tahmini bilgilere sahiptir.



Şekil 3.2. Çapraz görüntüleme sistem geometrisi [Soumekh, 1999]

Radar $(0, u)$ koordinatında hareketli bulunmakta olup, u , yapay açıklık konumu olarak tanımlanmaktadır. Radarı taşıyan platform bu yapay açıklık üzerindeki her pozisyonunda hedef bölgeyi $p(t)$ işareti ile aydınlatmakta ve hedeften yansıyıp geri dönen yankıları kaydetmektedir. Bilindiği üzere radar taşıyan platform sürekli bir hareket yapısına sahiptir. Bu konuyu darbe SAR Sistemleri için yorumlayacak olursak, radarı taşıyan platform hedef alanı görüntülemekte iken durmakta, işaret verisi ve alışı yapmakta ve sonrasında yapay açıklıktaki bir sonraki u pozisyonuna ilerlemektedir.

Radar, yapay açıklık üzerinde $(0, u)$ pozisyonunda iken (x_n, y_n) (x_n : n .inci hedef menzil noktası, y_n : n .inci çapraz – menzil noktası) noktasındaki bir hedef için uzaklık,

$$\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2} \quad (3.2)$$

ve u değerinin yapay açıklık boyunca değiştiği göz önüne alınarak bu hedeften yansıyıp dönen yankıların toplamı,

$$s(t,u) = \sum_n \sigma_n p \left[t - \frac{2\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2}}{c} \right] \quad (3.3)$$

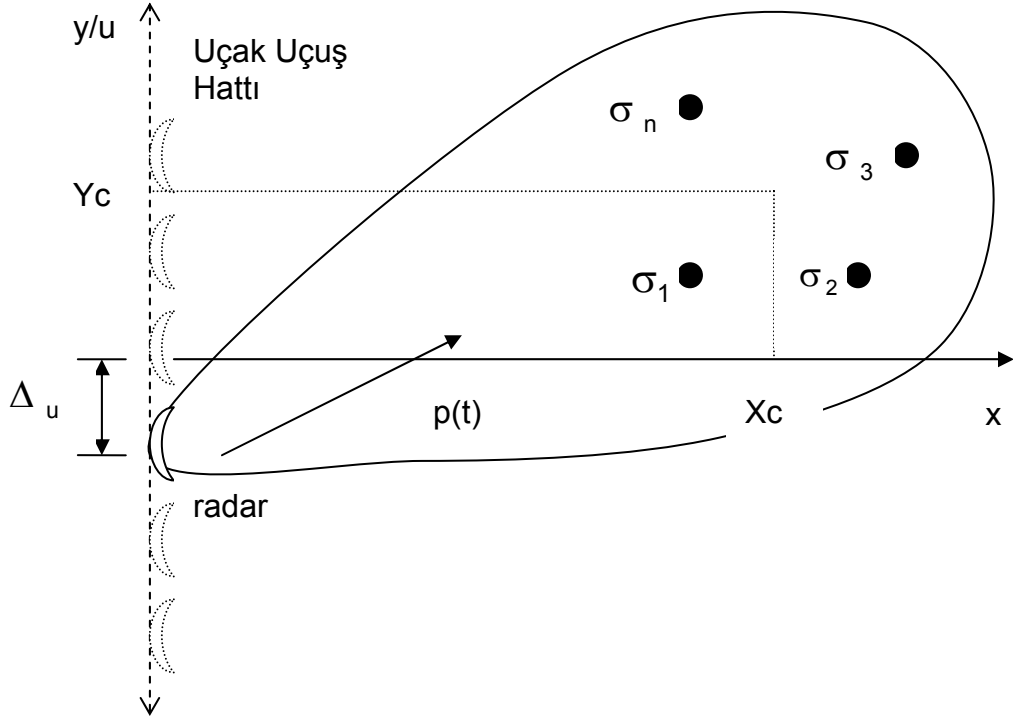
şeklinde olup, burada c , ışık hızını ifade etmektedir.

3.3. Genel Yapay Açıklıklı Radar Modeli

Yapay açıklıklı radar hedef bir bölgenin menzil, çapraz menzil ve irtifa boyutlarıyla ilişkili olarak yansıtıcılığını görüntüleme yarayan bir sistemdir. Genel yapay açıklıklı radar modelinde menzil ve irtifa değerleri birleştirilerek, görüntüleme problemi basite indirgenmiş ve böylece analizler kolaylaştırılabilmiştir.

Çok boyutlu görüntüleme probleminde dikkat edilmesi gereken en önemli konulardan biri de, hedef alınan bölgedeki her bir çözünürlük hücresi için, yansıtıcılığın radarda kullanılan frekansa, radarın hedefe olan uzaklığına ve radarın hedef hücrelerine bakış açısına göre değiştiğidir. Bu çalışmada Genel yapay açıklıklı radar modelinde görüntüleme problemi çözülürken yansıtıcılık değerlerinin, yukarıda bahsedilen frekans, hedefe olan uzaklık ve bakış açısına göre değişmediği düşünülmüştür.

Basit anlamda, Şekil 3.3.'te geometrisi görünen genel yapay açıklıklı radar görüntüleme modelini düşünecek olursak, hedef bölgemiz, içerisinde bilinmeyen yansıtıcılıklara sahip sabit yansıtıcılar bulunan iki boyutlu bir bölge olarak düşünülebilir. Radar $(0,u)$ 'da hareketli ve hedef bölgeyi geniş bant $p(t)$ işareti ile aydınlatmaktadır. Radar yayılım paterni tüm yönlü (omnidirectional) olarak kabul edilmektedir.



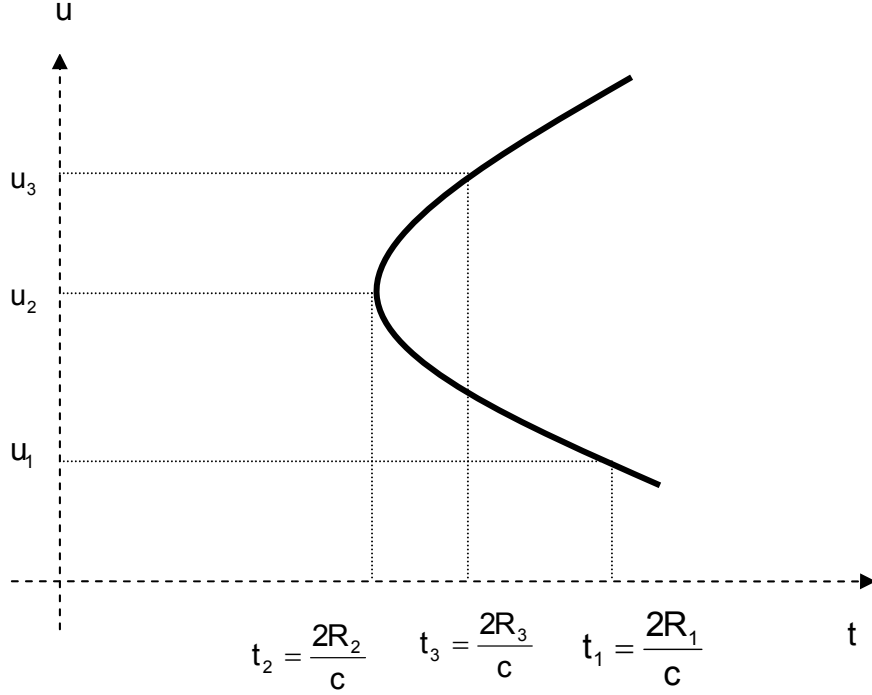
Şekil 3.3. SAR görüntüleme sistem geometrisi [Soumekh,1999]

Hedef bölgenin, menzil ve çapraz – menzil boyutlarına göre yansıtıcılık fonksiyonu $f(x,y)$ ile, her bir çözünürlük hücresinden t zamana ve u radar hareket yoluna göre yansıyan radar yankıları $s(t,u)$ ile gösterilmektedir. $s(t,u)$ fonksiyonu için t ve u olmak üzere iki değişkenden bahsedilmektedir. t bilinen zaman olup analizler boyunca hızlı – zaman olarak, u ise radar hareketini gösteren değişken olduğundan analizlerde yavaş – zaman olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.3. düşünüldüğünde, u yolu boyunca tüm yansıtıcılardan yansıyan yankıların toplamı,

$$s(t,u) = \sum_n \sigma_n p \left[t - \frac{2\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2}}{c} \right] \quad (3.4)$$

olarak yazılır.

Şekil 3.4. incelenecek olursa radarın u yolundaki hareketi esnasında gönderdiği işaretlerin gidiş – geliş gecikmesi hedefin yakınlığına göre değişiklik göstermektedir. Dolayısıyla hedefe en yakın noktada gidiş – geliş gecikmesi en az, hedefe en uzak noktada ise gecikme en fazla olacaktır.



Şekil 3.4. Tek bir hedef yansıtıcı için $s(t,u)$ işaretinin grafiksel gösterimi ([Soumekh,1999]'den değiştirilerek).

Tüm u yolu boyunca tek yansıtıcı için, gidiş – geliş gecikmeleri bir hiperbol eğrisi arz etmektedir. Bu gösterim bize iki boyutlu SAR işareti yapısını anlamamıza yardımcı olmaktadır.

3.3.1. Fourier dönüşümleri

SAR görüntüleme genel olarak iki boyutlu Fourier dönüşümleri kullanılmaktadır. Eş. 3.5.'te gösterilen SAR işareti $s(t,u)$ 'unun t hızlı – zaman göre Fourier dönüşümü,

$$s(w,u) = P(w) \sum_n \sigma_n \exp[-j2k\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2}] \quad (3.5)$$

bu işaretin u yavaş – zamana göre Fourier dönüşümü ise,

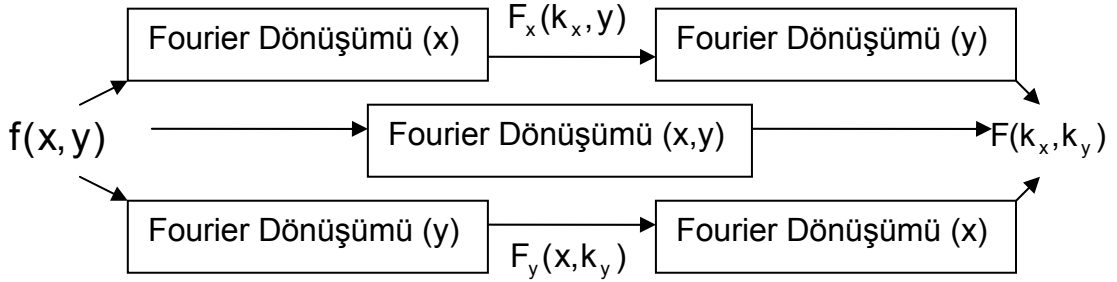
$$S(w,k_u) = P(w) \sum_n \sigma_n \exp\left[-j\sqrt{4k^2 - k_u^2} x_n - jk_u y_n\right] \quad (3.6)$$

şeklinde yazılmaktadır [Soumekh,1999]. Burada:

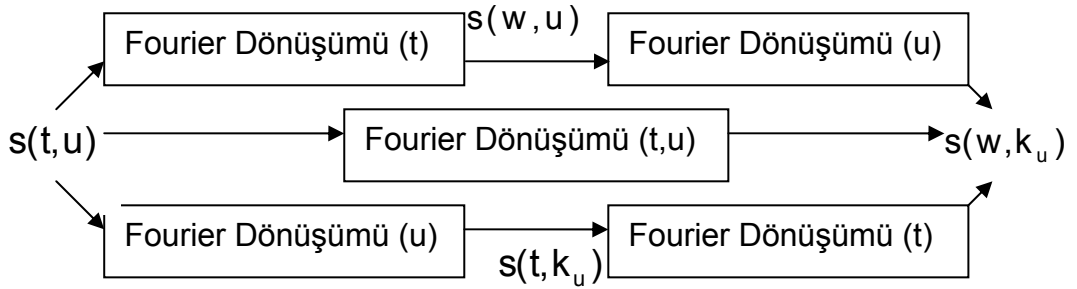
$P(w)$: $p(t)$ verici işaretinin hızlı – zaman Fourier dönüşümünü,

$k = \frac{w}{c}$: hızlı – zaman dalga sayısını ve

k_u : $k_u \in [-2k, 2k]$ olmak üzere yavaş – zaman frekans alanını ifade etmektedir.



Şekil 3.5. $f(x,y)$ için marjinal Fourier dönüşümleri gösterimi [Soumekh,1999]



Şekil 3.6. $s(t,u)$ için marjinal Fourier dönüşümleri gösterimi [Soumekh,1999]

(Bu Fourier dönüşümleri yazılırken ölçümlerin sonsuz alanda yapıldığı ve yavaş hareket eden genlik fonksiyonlarının ihmal edildiği varsayılmıştır.)

3.3.2. Görüntü oluşturma teknikleri

Eş. 3.6.'daki $\sqrt{4k^2 - k_u^2}$ ve k_u , (w, k_u) 'na bağlı birer fonksiyon olduklarından,

$$k_x(w, k_u) = \sqrt{4k^2 - k_u^2} \quad (3.7)$$

$$k_y(w, k_u) = k_u, \quad (3.8)$$

şeklinde gösterilmektedir. Burada:

k_x : x boyutu frekans alanını,

k_y : y boyutu frekans alanını ifade etmektedir. Bu ifadelerde birlikte Eş. 3.6. aşağıdaki şekilde yazılmaktadır.

$$S(w, k_u) = P(w) \sum_n \sigma_n \exp[-jk_x x_n - jk_y y_n] \quad (3.9)$$

Pratik olarak, yeniden oluşturma bilinen bir yöntem olan uyumlu süzme (matched - filtering) ile aşağıdaki şekilde gerçekleştirilebilir.

$$F[k_x, k_y] = P^*(w) S(w, k_u), \quad (F[k_x, k_y] : k_x \text{ ve } k_y \text{ alanı hedef fonksiyonu}) \quad (3.10)$$

1960'lı yıllarda geliştirilen 'Dalga Cephesi Yeniden Oluşturma' teorisi yukarıda bahsedilen yaklaşımdan hareketle geliştirilmiştir. Ancak, bu yaklaşımın gerçekleştirilmesi gerçek manada hızlı ve güçlü bilgisayar teknolojilerinin geliştirilmesi sayesinde sağlanmıştır. Gelişmiş teknoloji sayesinde ileri işaret işleme algoritmaları kolayca çözülebilmektedir. Dalga cephesi yeniden oluşturma teorisi ileri bir işaret işleme yapısına sahip olduğundan, zaman içerisinde çeşitli işaret işleme yaklaşımları geliştirilmiştir. Bunlar aşağıda sıralandığı gibidir:

- Uzamsal frekans aradeğerlemesi ile sayısal yeniden oluşturma (Digital reconstruction via spatial frequency interpolation)
- Menzil yığınlama ile sayısal yeniden oluşturma (Digital reconstruction via range stacking)
- Zaman bölgesinde ilintilendirme ve geri izdüşüm ile sayısal yeniden oluşturma (Digital reconstruction via time – domain correlation and backprojection)

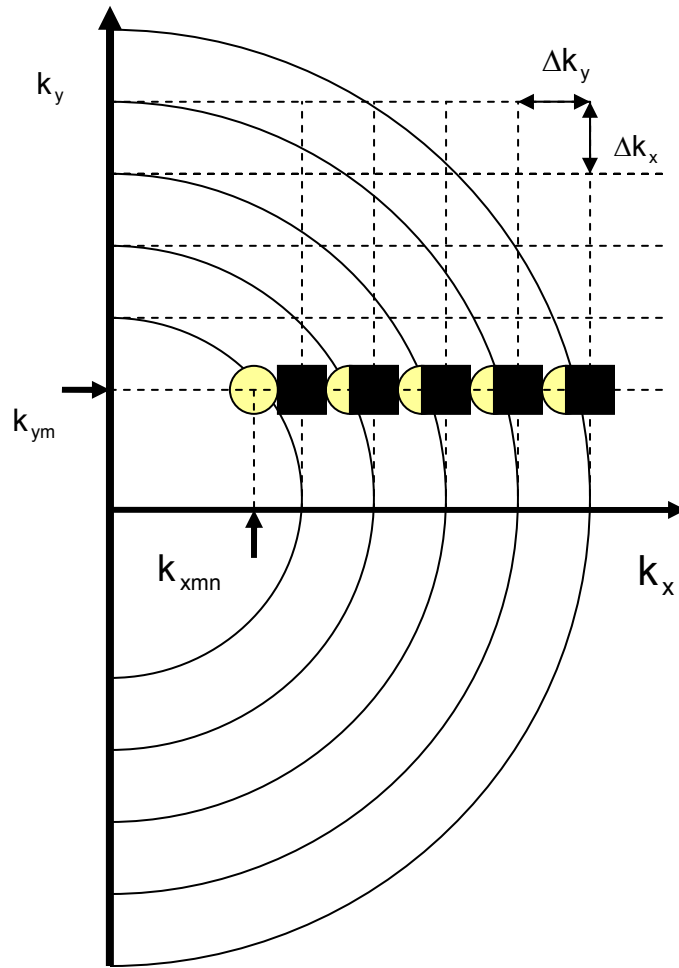
Şimdi bu yöntemleri sırasıyla inceleyelim.

3.3.2.1. Uzamsal frekans aradeğerlemesi ile sayısal yeniden oluşturma

Genel SAR yeniden oluşturmada yukarıda Eş. 3.7., Eş. 3.8. ve sonuç olarak Eş. 3.9.'da görüldüğü gibi, (w, k_u) alanından (k_x, k_y) alanına eşleme olanağı

sağlanmaktadır. Pratikte, SAR sistemi, (w, k_u) alanında dikdörtgensel ızgarada, $S(w, k_u)$ örneklerinin eşit aralıklarla yer almasına olanak sağlarken, (w, k_u) alanından (k_x, k_y) alanına doğrusal olmayan eşleme nedeniyle (k_x, k_y) alanında elde edilen veritabanı eşit olmayan örneklerden oluşmaktadır.

Eş. 3.7. ve Eş. 3.8.'deki eşitliklere göre $k_y = k_u$ doğrusal olarak eşleşmiş fakat k_x için doğrusallık sağlanamamıştır. Şekil 3.7.'de görüldüğü gibi (k_x, k_y) bir çember fonksiyonu arz etmektedir.



Şekil 3.7. SAR uzamsal frekans eşleme ([Soumekh,1999]'den değiştirilerek)

Dolayısıyla örnekler, k_y alanında eşit aralıklarla, k_x alanında ise eşit olmayan aralıklarla sıralanmışlardır. Bu (k_x, k_y) alanında doğrusal olmayan bir durumu göstermektedir.

k_x ve k_y alanları sırasıyla n ve m adet örneğe sahip olsunlar. Sabit bir

$$k_{ymn} = k_{um} = m\Delta k_u, \quad (3.11)$$

değerinde, problem eşit aralıklı olmayan k_x alanı örneklerinden tek – boyutlu aradeğerleme halini almaktadır. Bu noktadaki k_x örneği ise,

$$k_{xmn} = \sqrt{4k_n^2 - k_{um}^2} \quad (3.12)$$

şeklinde olup, burada:

Δk_u : yavaş – zaman frekans alanı örnek aralığını,

k_{ymn} : k_y matrisi (m,n) örneğini,

k_{um} : k_u vektörü m.inci örneğini,

k_{xmn} : k_x matrisi (m,n) örneğini ve

k_n : k vektörü n.inci örneğini ifade etmektedir. k_n 'ler eşit aralıklarla dizilmiş dalga sayısı örnekleridir.

$$k_n = \frac{w_n}{c}, \quad (w_n : \text{frekans vektörü n.inci örneği}) \quad (3.13)$$

SAR işaretleriyle aydınlatılan hedef bölge, radar uçuş hattı boyunca ayak izi bölgesi orta değeri X_c ve Y_c olmak üzere $x \in [X_c - X_0, X_c + X_0]$, $y \in [Y_c - Y_0, Y_c + Y_0]$ olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla Eş. 3.10.'da tanımlanan $F[k_x, k_y]$ veritabanı k_x ve k_y alanında bant – geçirgen bir işarettir. Aradeğerleme için bu işaret aşağıdaki şekilde temel – banda çekilir.

$$F_b[k_x, k_y] = F[k_x, k_y] \exp(jk_x X_c + jk_y Y_c) \quad (3.14)$$

Eş. 3.10.'da verdiğimiz yöntemin dışında iki boyutlu uyumlu süzme yöntemiyle de $F_b[k_x, k_y]$ veritabanı oluşturulabilmektedir. Ayak izi orta noktası referans nokta olduğu düşünülüp, buradaki birim hedef noktasından yansıyan ve Eş. 3.15.'de

formülize edilen yankı, referans işaret olarak alınmaktadır. SAR hedef fonksiyonu, SAR işaretinin dürtü fonksiyonu bu referans işaret olan süzgeçten geçirilmesiyle Eş. 3.16.'da gösterildiği gibi elde edilmektedir.

$$s_0(t,u) = p \left[t - \frac{2\sqrt{X_c^2 + (Y_c^2 - u)^2}}{c} \right] \quad (3.15)$$

$$F_b[k_x, k_y] = S(w, k_u) S_0^*(w, k_u) \quad (3.16)$$

Burada:

$s_0(t,u)$: hedef alan merkez noktasında bulunan birim hedeften yansıyan yankıyı,

$S_0^*(w, k_u)$: $s_0(t,u)$ işaretinin iki boyutlu Fourier dönüşümünün karmaşık eşleniğini ifade etmektedir.

Eşit aralıklı örnekler için aradeğerleme

Eşit aralıklı dizilmiş örnekler olan $k_{xn} = n\Delta k_x$ verisi için aradeğerleme denklemi,

$$F(k_x, k_{ymn}) = \sum_n F(n\Delta k_x, k_{ymn}) h(k_x - n\Delta k_x) \quad (3.17)$$

şeklinde olup, burada:

k_{xn} : k_x vektörü n.inci örneğini,

Δk_x : k_x vektörü örnek aralığını,

$h(k_x)$: ise aradeğerleme fonksiyonunu ifade etmektedir.

Genelde aradeğerleme amacıyla ideal alçak geçiren filtre yapısını gerçekleyen sinc fonksiyonu kullanılmaktadır. Bant sınırlı işaretler için bu fonksiyon kullanıldığında hatasız sonuç elde edilmektedir. Ancak, bu yöntem çok fazla işlem gerektirdiğinden pratikte uygulaması bulunmamaktadır. Sinc fonksiyonu bu yüzden Hanning ve Hamming gibi adaptasyon filtreleriyle kullanılmaktadır [Orhan,2001].

Bu işlemde hesaplama kolaylığı sağlamak maksadıyla pencere kullanılabilir. Bu kapsamda, yeni aradeğerleme denklemi aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$F[k_x, k_{ymn}] = \sum_{|k_x - n\Delta k_x| \leq N_s \Delta k_x} F[n\Delta k_x, k_{ymn}] h_w(k_x - n\Delta k_x) \quad (3.18)$$

Burada:

$h_w(k_x)$: pencere fonksiyonu ve aradeğerleme fonksiyonu çarpımını,

N_s : aradeğerleme fonksiyonu yan – lob sayısını ifade etmektedir.

Eşit aralıklı olmayan örnekler için aradeğerleme:

Sabit k_{um} için k_x 'in doğrusal olmayan aşağıdaki gibi bir dönüşüme sahip olduğu bilinmektedir.

$$k_x = g_m(w) = \sqrt{4k^2 - k_{um}^2}, \quad (3.19)$$

k_{xmn} değerleri Eş. 3.19. için eşit olmayan aralıklarla dizilmiş veri olmakla birlikte, bunlar hızlı – zaman verisi k için eşit aralıklı dizilmiş verilerdir. Böylece,

$$k_{xmn} = g_m(n\Delta w) \quad (3.20)$$

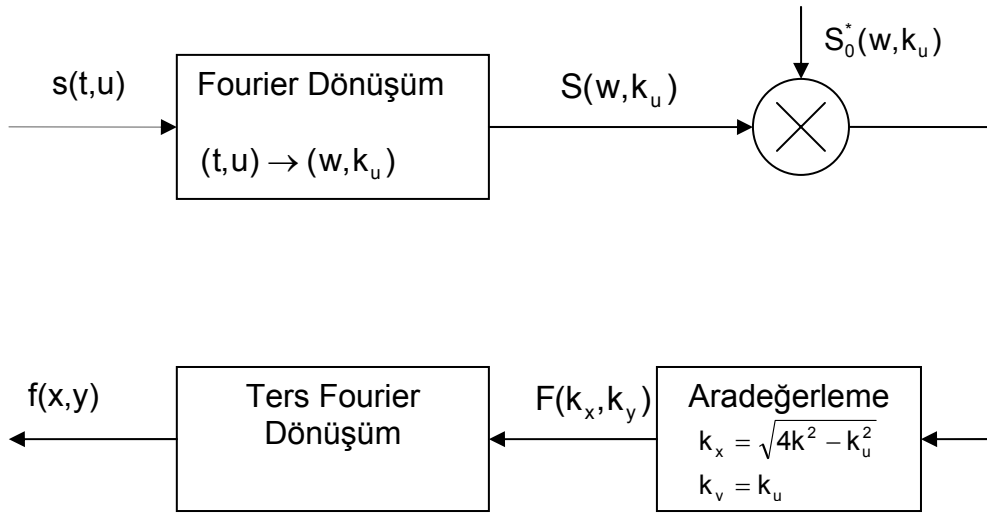
ve neticesinde aradeğerleme fonksiyonu,

$$F[k_x, k_{ymn}] = \sum_{|k_x - k_{xmn}| \leq N_s \Delta k_x} J(n\Delta w) F[k_{xmn}, k_{ymn}] h_w(k_x - k_{xmn}) \quad (3.21)$$

şeklinde yazılır. Burada:

$$J(n\Delta w) = \frac{dg_m(n\Delta w)}{dw} = \frac{4k}{c\sqrt{4k^2 - k_{um}^2}} \quad (3.22)$$

ise k den k_x 'e dönüşümün Jacobian'ıdır. Bu Jacobian'ın genlik değeri, SAR işareti yavaş – zamanda Fourier transformu alınırken elde edilen yavaş – salınımlı ek işaret tarafından silinir. Şekil 3.7.'de görüldüğü gibi kareler şeklinde eşit aralıklarla dizilmiş olan $F[k_x, k_{ymn}]$ değerleri, eşit olmayan aralıklarla dizilmiş olan ve daireler şeklinde gösterilen $F[k_{xmn}, k_{ymn}]$ değerlerinden aradeğerleme yapılarak elde edilmektedir. Şekil 3.8.'de Uzamsal frekans aradeğerlemesi ile görüntü oluşturma algoritması özetlenmektedir.



Şekil 3.8. Genel SAR, uzamsal frekans aradeğerlemesi ile görüntü oluşturma algoritması blok şema gösterimi [Soumekh, 1999]

3.3.2. Menzil yığınlama ile görüntü oluşturma

Uzamsal frekans alanı hedef fonksiyonunun ters Fourier dönüşümünün aşağıdaki şekilde olduğunu düşününelim.

$$f(x, y) = \int \int_{k_y, k_x} F_b(k_x, k_y) \exp(jk_x x + jk_y y) dk_x dk_y \quad (3.23)$$

Eş. 3.23.'de gösterilen hedef fonksiyonunun sağ tarafını ölçülmüş SAR işareti cinsinden yazmaya çalışalım. Eş. 3.16., Eş. 3.23.'de yerine konulursa,

$$f(x, y) = \int \int_{k_y, k_x} P^*(w) \exp(j\sqrt{4k^2 - k_u^2} X_c + jk_u Y_c) S(w, k_u) \exp(jk_x x + jk_y y) dk_x dk_y \quad (3.24)$$

ve Eş. 3.24.'de (k_x, k_y) 'den (w, k_u) alanına dönüştürülme işlemi uygulanırsa aşağıdaki gibi bir hedef fonksiyonu elde edilmektedir.

$$f(x, y) = \int_{k_u} \int_w P^*(w) \exp(j\sqrt{4k^2 - k_u^2} X_c + jk_u Y_c) S(w, k_u) \\ \times \exp(j\sqrt{4k^2 - k_u^2} x + jk_u y) J(w, k_u) dw dk_u \quad (3.25)$$

Burada,

$$J(w, k_u) = \frac{4k}{c\sqrt{4k^2 - k_u^2}} \quad (3.26)$$

(k_x, k_y) alanından (w, k_u) alanına dönüştürmenin Jacobian'ıdır. Bu fonksiyon yavaş – değişkenli bir işaret olduğundan analizlerimizde ihmal edebilmekteyiz.

SAR yeniden oluşturmayı x_i (menzil selelerinde) değerlerinde ele alalım. Sabit bir x_i değerinde Eş. 3.25. tekrar yazılacak olursa aşağıdaki gibi bir yeniden oluşturma algoritması elde edilmektedir.

$$f(x_i, y) = \int_{k_u} \int_w P^*(w) \exp(j\sqrt{4k^2 - k_u^2} X_c + jk_u Y_c) S(w, k_u) \\ \times \exp(j\sqrt{4k^2 - k_u^2} x_i + jk_u y) dw dk_u \quad (3.27)$$

Burada $f(x_i, y)$, x_i menzil selesi hedef fonksiyonları toplamı olup, bu eşitliği gerçekleştirmek için iki yöntem kullanılmaktadır.

3.3.2.1. Hızlı – zaman yavaş – zaman uyumlu süzme

$(X_c + x_i, Y_c)$ 'de yer alan birim yansıtıcıdan yansıyan ve Eş. 3.28.'de gösterilen yankı işareti referans işaretimiz olsun.

$$s_{oi}(t, u) = p \left[t - \frac{2\sqrt{(X_c + x_i)^2 + (Y_c - u)^2}}{c} \right] \quad (3.28)$$

Bu işarete (t, u) alanlarında iki boyutlu Fourier dönüşümü uygulandığında,

$$S_{oi}(w, k_u) = P(w) \exp \left[-j \sqrt{4k^2 - k_u^2} (X_c + x_i) - j k_u Y_c \right] \quad (3.29)$$

elde edilmektedir. Eş. 3.27. tekrar düzenlenecek olursa hedef fonksiyonu,

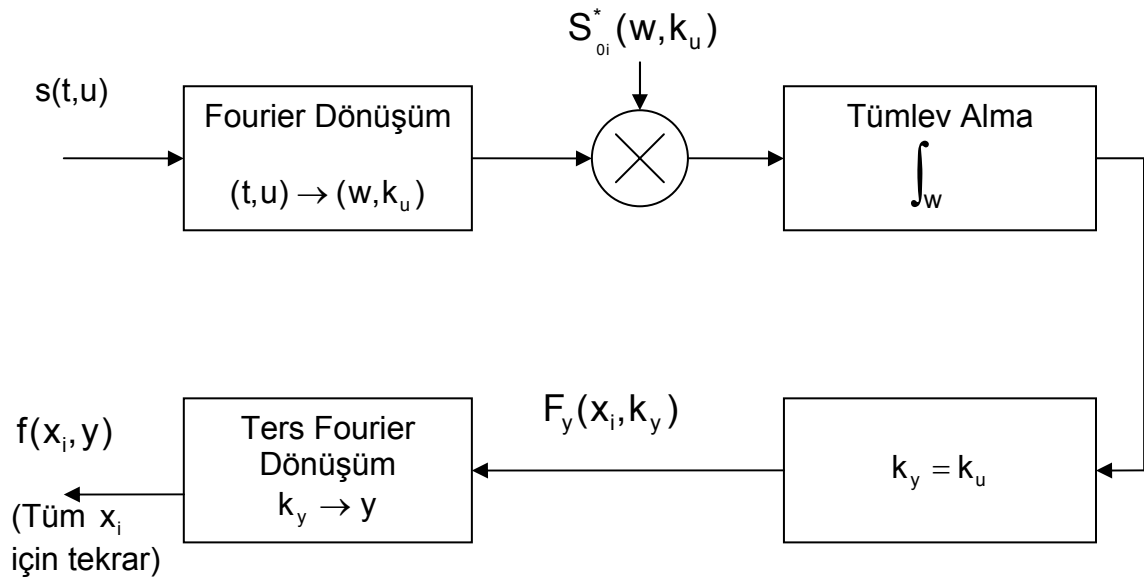
$$f(x_i, y) = \int_{k_u} \left[\int_w S_{oi}^*(w, k_u) S(w, k_u) dw \right] \exp(jk_u y) dk_u \quad (3.30)$$

şeklinde yazılabilir.

$$F_y(x_i, k_y) = \mathfrak{F}_y[f(x_i, y)] \quad (3.31)$$

$$F_y(x_i, k_y) = \int_w S_{oi}^*(w, k_u) S(w, k_u) dw \quad (3.32)$$

Yukarıda Eş. 3.32.'de gösterilen fonksiyon, Eş. 3.30.'un y alanına göre marjinal Fourier dönüşümüdür. Şekil 3.9.'da da görülebileceği gibi SAR işareti $S(w, k_u)$, ilk olarak x_i değerindeki uyumlu süzgeçten geçirilmekte, sonra mümkün olan tüm frekans değerleri üzerinden tümlevi alınmakta ve son olarak çıkan işarete Ters Ayırık Fourier Dönüşümü (Inverse Discrete Fourier Transform, (IDFT)) uygulanmaktadır. Eş. 3.32.'un IDFT'si alındığında, $f(x_i, y)$ elde edilmekte, bu işlem bütün x_i değerleri için uygulanırsa görüntü oluşturma sağlanmış olmaktadır.



Şekil 3.9. Genel SAR, menzil yığınlama, hızlı – zaman yavaş – zaman uyumlu süzme algoritması ile görüntü oluşturma blok şema gösterimi [Soumekh,1999]

3.3.2.2. Yavaş-zaman hızlı-zaman uyumlu süzme

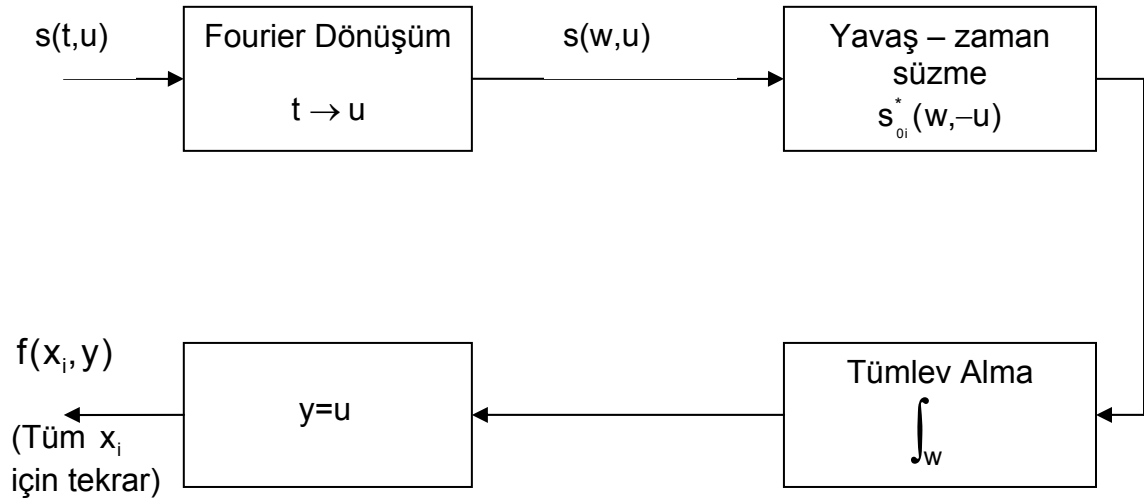
Eş. 3.30.'daki eşitlikte tümlev sırası değiştirilirse,

$$f(x_i, y) = \int_w \left[\int_{k_u} S_{0i}^*(w, k_u) S(w, k_u) \exp(jk_u y) dk_u \right] dw \quad (3.33)$$

elde edilmektedir. Bu eşitlik içerisindeki tümlev, IDFT'yi göstermektedir. Eş. 3.33. düzenlenerek tekrar yazılacak olursa,

$$f(x_i, y) = \int_w [s(w, u) * s_{0i}^*(w, -u)] dw \quad (3.34)$$

şeklinde elde edilir. Görülmektedir ki, x_i değerinde $s(w, u)$, dürtü yanıtı $s_{0i}(w, -u)$ olan uyumlu süzgeçten geçirilmekte ve sonrasında mevcut tüm frekanslar üzerinden tümlevi alınmaktadır.



Şekil 3.10. Genel SAR, menzil yığınlama, yavaş - zaman hızlı - zaman uyumlu süzme algoritması ile görüntü oluşturma blok şema gösterimi [Soumekh,1999]

Bu bölümde uygulanan menzil yığınlama yöntemi aradeğerleme gerektirmediğinden kırpma hatalarından sıkıntı çekmemektedir. Üstelik k_x alanında bulunan Ayrık Fourier Dönüşümü (Discrete Fourier Transform,(DFT)) sarma hatalarını da içermemektedir.

(k_x, k_y) alanında yer alan hedef fonksiyonunun destek bölgesi (k_{xc}, k_{yc}) $((k_x, k_y)$ alanları merkez frekansları) merkezli bant geçiren bir bölgedir. SAR işareti de bant – geçiren bir bölgede yer aldığından bu yöntemde örtüşmesiz eş evreli temel – bant verinin elde edilmesi için ek olarak verinin (k_x, k_y) alanında da temel – bant kaydırılması gerekmektedir [Soumekh,1999].

3.3.3. Zaman bölgesinde ilintilendirme ve geri izdüşüm ile sayısal yeniden oluşturma

SAR görüntüme iki boyutlu uyumlu süzme yerine, SAR işaretinin kaydırma – değişen süzgeç ile evrişimi ile de elde edilebilmektedir. Bu prensibi uygulayan ‘Zaman Bölgesinde İlintilendirme (Time Domain Correlation)’ ve ‘Geri İzdüşüm (Backprojection)’ adında iki yöntem bulunmaktadır.

3.3.3.1. Zaman bölgesinde ilintilendirme

Hedef fonksiyonunu (x_i, y_i) iki boyutlu örneklerle oluşturmaya çalışalım. (x_i, y_i) ’nin oluşturduğu ızgara üzerinde, Zaman Bölgesi İlintilendirici (Time Domain Correlator, (TDC)) işlemcisi SAR izini, yavaş ve hızlı zamanlarda ölçülen SAR verisi sayesinde herhangi bir noktada ilintilendirmektedir. Çıkan sonuç ise yansıtıcılığın o noktadaki ölçüsüdür. Izgaranın bahse konu noktasındaki izden yansıyan yankı işareti,

$$p \left[t - \frac{2\sqrt{x_i^2 + (y_j - u)^2}}{c} \right] \quad (3.35)$$

ve görüntüleme algoritma eşitliği,

$$f(x_i, y_j) = \int_u \int_t s(t, u) p^* \left[t - \frac{2\sqrt{x_i^2 + (y_j - u)^2}}{c} \right] dt du = \int_u \int_t s(t, u) p^* [t - t_{ij}(u)] dt du \quad (3.36)$$

şeklinde olup, burada, $t_{ij}(u)$ ızgara (i, j) noktasından gidiş – geliş gecikmesini ifade etmektedir. Yeniden oluşturma uzamsal (x, y) alanı ayrık değerleri için, düzgün

ızgara (x_i, y_i) 'lerde gerçekleştirilir. Sayısal hataların azaltılması için ölçülen SAR işareti, hızlı ve yavaş zamanlarda yukarı örneklenir.

Pratikte Eş. 3.36.'daki iki boyutlu tümlev alma işlemi, ayırık veriler kullanıldığından toplama ile yapılmaktadır. Bunun sonucu olarak, iki boyutlu ayırık toplama işlemi diğer yöntemlere göre fazla zaman tüketmektedir. Aynı işlem bilindiği gibi diğer yöntemlerde hızlı DFT ile daha kısa sürelerde gerçekleştirilmektedir.

3.3.3.2. Geri izüşüm

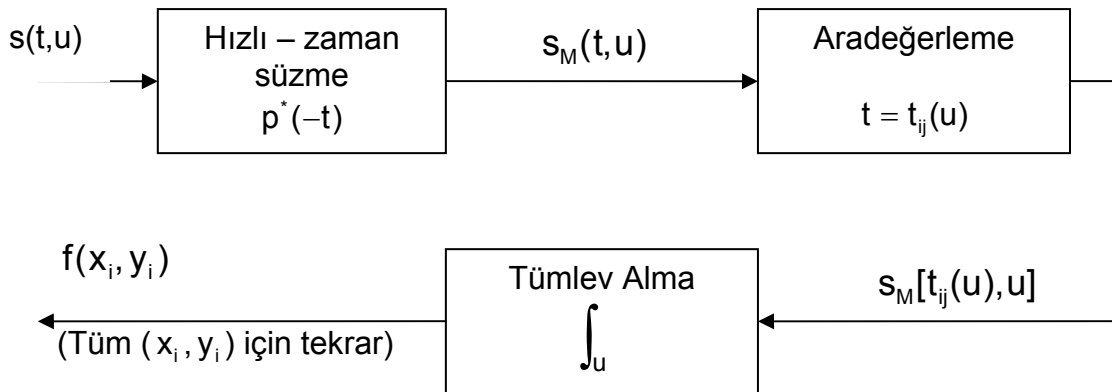
Hızlı zamanda uyumlu süzgeçten geçirilmiş SAR işareti,

$$s_M(t, u) = s(t, u) * p^*(-t) \quad (3.37)$$

olup burada $s_M(t, u)$ iki boyutlu SAR verisinin verici işaretinin zamanda tersinin eşleştiğini ifade etmektedir. Bu ifade Eş. 3.36. içerisine yazılırsa,

$$f(x_i, y_j) = \int_u s_M \left[\frac{2\sqrt{x_i^2 + (y_j - u)^2}}{c}, u \right] du \quad (3.38)$$

şeklindeki hedef fonksiyonu elde edilmektedir. Eş. 3.38.'den görülebileceği gibi, her bir u değeri için, (x_i, y_i) 'de hedef fonksiyonun oluşturulması amacıyla, bu nokta ile ilgili hızlı – zaman selelerinde yer alan bilgi eşzamanlı olarak SAR verisine eklenmektedir. Şekil 3.11.'de geri izdüşüm ile görüntü oluşturma algoritması blok şema ile özetlenmiştir.



Şekil 3.11. Genel SAR, geri izdüşüm ile görüntü oluşturma blok şema gösterimi [Soumekh, 1999]

Bu yöntemin adının Geri izdüşüm olmasının sebebi, verilen yapay açıklık yeri u için, hızlı zaman verisi $s_M(t,u)$, (x_i, y_i) izinden gelen işareti yalıtma amacıyla hızlı zamanda geri iz düşütürülmesidir [Soumekh,1999].

Bu yöntemin pratikte gerçekleştirilmesi için $s_M(t,u)$ işaretinin ayırık hızlı – zaman örnekleri,

$$s_M \left[\frac{2\sqrt{x_i^2 + (y_j - u)^2}}{c}, u \right] \quad (3.39)$$

elde etmek için aradeğerlenmelidir. Eğer yeterli derecede doğru aradeğerlendirici kullanılmazsa, bu işlem yüksek – çözünürlük bilgisinin kaybolmasıyla sonuçlanabilmektedir.

3.4. Yapay Açıklı Radar Tipleri

Temel olarak iki yapay açıklıklı radar modeli mevcuttur. Bunlar sırasıyla,

- Noktasal – ışık yapay açıklıklı radar (Spotlight SAR)
- Şerit – haritalama yapay açıklıklı radar (Stripmap SAR)

şeklinde olup, Aşağıda bu radar tipleri sırasıyla incelenmiştir. Yazılım çalışmalarında kullanıldığından noktasal – ışık SAR modeli daha kapsamlı ele alınmıştır.

3.4.1. Noktasal - ışık yapay açıklıklı radar

Bu radar tipinde radar bir doğru boyunca hareket etmekte ve anten elektronik ya da mekanik olarak çevrilmek suretiyle anten huzmesi devamlı olarak merkezi (X_c, Y_c) olan hedef bölge üzerinde tutulmaya çalışılmaktadır. Noktasal - ışık SAR'ı, Şerit-haritalama SAR'dan ayıran en önemli özellik budur. Bu özellik analog ışıklandırma (analog spotlighting) olarak tanımlanmaktadır. (İleriki bölümlerde bu işlemin sayısal olarak da gerçekleştirilmesini sağlayan sayısal noktasal – ışıklandırma (digital spotlighting) işlemi ayrıntılı olarak işlenmektedir.) Şerit - haritalama SAR sisteminde radar anteninin bakışı sabit ve anten bir işaret alış-veriş periyodu boyunca menzil alanında sabit bir şerit üzerinde olmaktadır.

Noktasal - ışık SAR, şerit - haritalama SAR'a nazaran daha modern bir radar olmakla birlikte bu noktasal - ışık SAR, şerit - haritalama SAR'a tercih edilir anlamına gelmemelidir. İki tip radarında kendine has özellikleri vardır. Şerit - haritalama görüntülemeye çok büyük alanlar hedeflenirken, noktasal - ışık görüntülemeye daha küçük alanlar ve yüksek - çözünürlük bilgisi hedeflenmiştir. Bir noktasal - ışık SAR sistemi ile elde edilen veri, taklit edilmeye çalışılan yapay açıklıkla elde edilen verinin çoğu özelliğini taşımaktadır. SAR sistemi 2L açıklığındaki bir fiziksel antenin çözünürlük özelliklerini tam olarak taşıırken, aynı özellik şerit - haritalama SAR sistemi için geçerli değildir [Soumekh,1999].

3.4.1.1. Mekanik olarak huzme - yönlendirmeli noktasal - ışık SAR

Bu veri tanımlama modelinde radar anteni sabit örüntülü bir huzmeye yapısına sahiptir ve örüntü maksimum enerjisini dikine ışıtmaktadır.

(X_0, Y_0) bilindiği gibi sırasıyla menzil ve çapraz-menzil alanlarında yarı - huzme genişlikleridir. Bu değerler çeşitli faktörlere göre şekillenmektedir. Bunlar, hedef bölge menzili, radar tipi ve boyutları ve radar frekansı olarak sayılabilir.

Düzlemsel radar anteni için;

$$X_0(w) = \frac{R_c \lambda}{D_x} \quad (3.40)$$

$$Y_0(w) = \frac{R_c \lambda}{D_y} \quad (3.41)$$

şeklinde olup, burada:

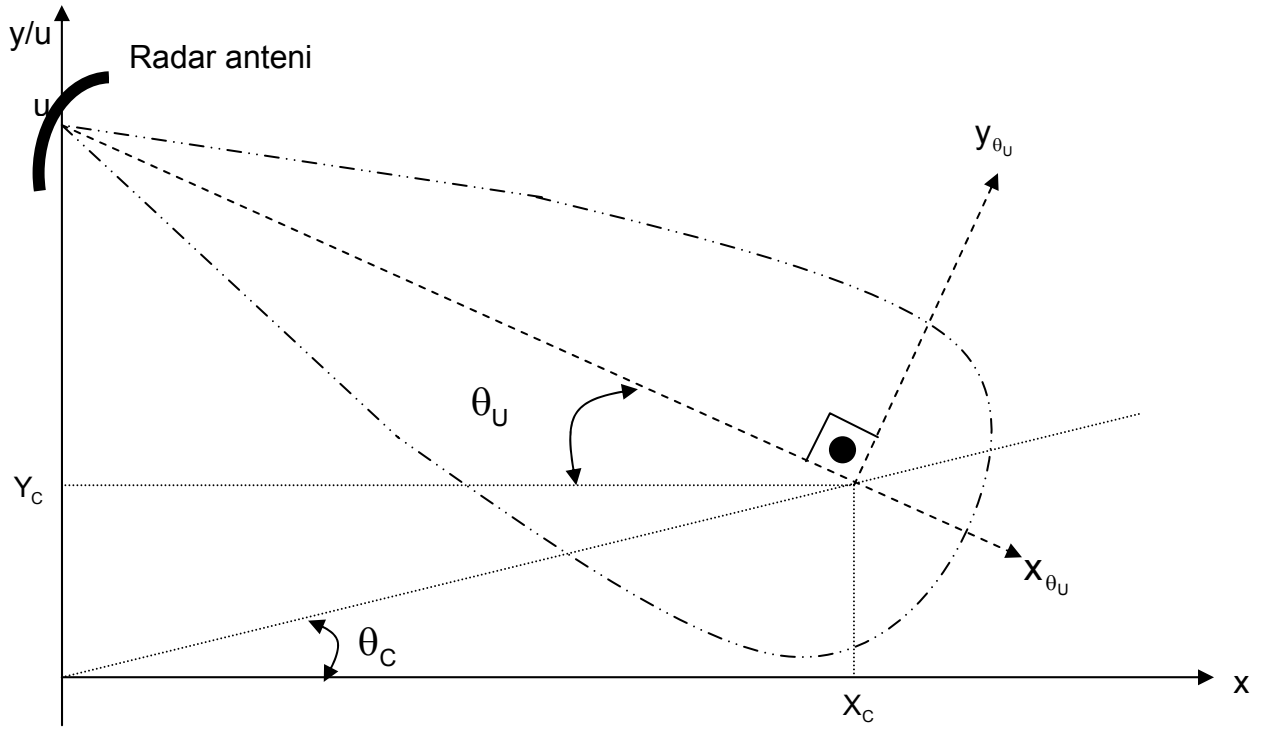
R_c : radarın hedef alan merkezine olan uzaklığını,

λ : radar işareti dalga boyunu,

D_x : antenin x yöndeki açıklık değerini,

D_y : antenin y yöndeki açıklığını ifade etmektedir.

Görölmektedir ki yukarıda bahsedilen yarı – huzme genişlikleri radar frekansıyla değişmektedir. Yüksek frekanslı radarlarda, taşıyıcı frekansı, bant genişliğinden çok büyük olduğundan Eş. 3.40. ve Eş. 3.41.’ da yer alan dalga boyu değeri sabit olacak şekilde, λ_c (dalga boyu merkez değeri) olarak alınabilir. Mekanik huzme yönlendirme Şekil 3.12.’de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi radar platformu u boyunca ilerlerken anten ana – huzmesini hedef alanın merkezi üzerinde tutacak şekilde döndürölmektedir.



Şekil 3.12. Mekanik huzme – yönlendirme noktasal – ışık SAR geometrisi [Soumekh,1999]

Hedef nokta üzerinde yer alan $(x - X_c, y - Y_c)$ eksenini, döndürölme sonrası aşağıda gösterildiği gibi değişiklik göstermektedir.

$$\begin{bmatrix} x_{\theta_U} \\ y_{\theta_U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_U & \sin \theta_U \\ -\sin \theta_U & \cos \theta_U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - X_c \\ y - Y_c \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Burada:

θ_U : radar huzmesinin x eksenini ile yaptığı açığı,

$x_{\theta_u}, y_{\theta_u}$: ise yeni eksenlere göre hedef koordinatını ifade etmektedir.

Görülmektedir ki $(x_{\theta_u}, y_{\theta_u})$ uzamsal koordinat bilgileri yapay açıklık, u , değerine göre değişiklik göstermektedir. Ancak, yan – dik bakış açısı (broadside) ile hedefe yaklaşım dışındaki yaklaşımlarda hedef bölgesi uzamsal koordinatları için aynı durum söz konusu değildir. Yan – dik bakış dışındaki bakışlar (squint) için uzamsal koordinatlar aşağıda olduğu gibi bulunmaktadır.

$$\begin{bmatrix} x_{\theta_c} \\ y_{\theta_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - X_c \\ y - Y_c \end{bmatrix}$$

Mekanik olarak döndürülmemiş verici – alıcı çalışan radar anteni için genlik paterni,

$$a(w, x, y - u) = A \left[w, \frac{2k(y - u)}{r} \right] \quad (3.43)$$

şeklinde yazılmakta olup r burada değişken olan uzaklık değerini ifade etmektedir. Şekil 3.12. incelendiğinde mekanik yönlendirme yapıldığında, $(x_{\theta_u}, y_{\theta_u})$ değişken alanı huzmeye daima dik bakışlı olduğundan Eş. 3.43., mekanik döndürülmüş ve huzmesi hedef merkez alanına yönlendirilmiş radar anteni için Eş. 3.42.'deki bilgiler eklenerek tekrar düzenlenmelidir. Düzenleme sonucu, mekanik yönlendirilmiş genlik paterni aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$a_s(w, u; x, y) \approx A \left[w, \frac{2k(y_{\theta_u} - 0)}{r} \right] \quad (3.44)$$

$$a_s(w, u; x, y) = A \left[w, \frac{2k[(-x + X_c) \sin \theta_u + (y - Y_c) \cos \theta_u]}{r} \right] \quad (3.45)$$

Huzme yönlendirmesi olmayan radar anteni için radar anteni genlik paterni eşitlik Eş. 3.43.'de gösterilmiştir. Bu patern (w, k_u) alanında $A(w, k_u)$ olarak yazılabilmekte, huzme – yönlendirmeli radar anteni için bu genlik paterni $A_s(w, k_u; x, y)$ şeklinde yazılabilmektedir. $A_s(w, k_u; x, y)$ paterni $A(w, k_u)$ 'den farklı olarak hedef koordinatlarına göre değişiklik göstermektedir.

Ölçülen SAR işareti sonuç olarak aşağıdaki şekilde yazılmaktadır.

$$s(w, u) = P(w) \sum_n a_n(w, x_n, y_n - u) a_s(w, u; x, y) \exp(-jk \sqrt{x^2 + (y - u)^2}) \quad (3.46)$$

Burada, $a_n(w, x_n, y_n - u)$ işareti, (x_n, y_n) koordinatlarında yer alan hedef genlik paternidir. u alanında Fourier dönüşümü yapıldığında SAR işareti,

$$S(w, k_u) = P(w) \sum_n A_n(w, k_u) A_s(w, k_u; x_n, y_n) I_n(w, k_u) \exp(-j\sqrt{4k^2 - k_u^2} x_n - jk_u y_n) \quad (3.47)$$

olarak yazılır. Eşitlikte yer alan,

$A_n(w, k_u)$: n.inci hedef için yavaş – zaman genlik paternini,

$A_s(w, k_u; x_n, y_n)$: n.inci hedef için mekaniki olarak döndürülmüş radar anteni yavaş –zaman genlik paternini ve

$$I_n(w, k_u) = \begin{cases} 1 & \text{for } k_u \in [2k \sin \theta_n(-L), 2k \sin \theta_n(L)] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.48)$$

n.inci hedefin görünebilir olduğu, yavaş – zaman frekans alanını tanımlayan dikdörtgensel pencereyi göstermektedir. $S(w, k_u)$ işareti uyumlu süzgeçten geçirilerek, aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned} F[k_x(w, k_u), k_y(w, k_u)] &= P^*(w) S(w, k_u) \\ &= |P(w)|^2 \sum_n A_n(w, k_u) A_s(w, k_u; x_n, y_n) I_n(w, k_u) \\ &\quad \times \exp[-jk_x(w, k_u) x_n - jk_y(w, k_u) y_n] \end{aligned} \quad (3.49)$$

(k_x, k_y) alanı örnekleri doğrusal olmayan örnekler içerdiğinden ve DFT için uygun yapıya sahip olmadığından $w \rightarrow k_x$ alanına dönüşümde aradeğerleme yapılması gerekmektedir.

Eş. 3.49.'un IDFT'si ile elde edilen hedef fonksiyonu $f(x, y)$ 'nin, $A_s(w, k_u; x_n, y_n)$ radar genlik paterninin faz değeri büyüdükçe, ızgara üzerindeki yayılımı artmaktadır. Bu faz değerini elemek için $A_s(w, k_u; x_n, y_n)$, (x, y) 'ye bağımlı uyumlu süzgeçten geçirilebilmektedir.

SAR görüntüleme, ayak izi ve radar platformu uçuş yolu, hedefe olan uzaklığa nispeten çok küçük olduğundan, θ_u değerinin değişimi ihmal edilebilmekte ve yerine hedef merkezine olan açı değeri θ_c yazılabilmektedir. Genlik paterninin frekans değeri ile çok fazla değişmediği dar – bant noktasal – ışık SAR sistemleri için, yeniden oluşturulmuş (x, y) noktasındaki hedef yansıtıcı için genlik paterni değeri aşağıda olduğu gibi yazılabilir.

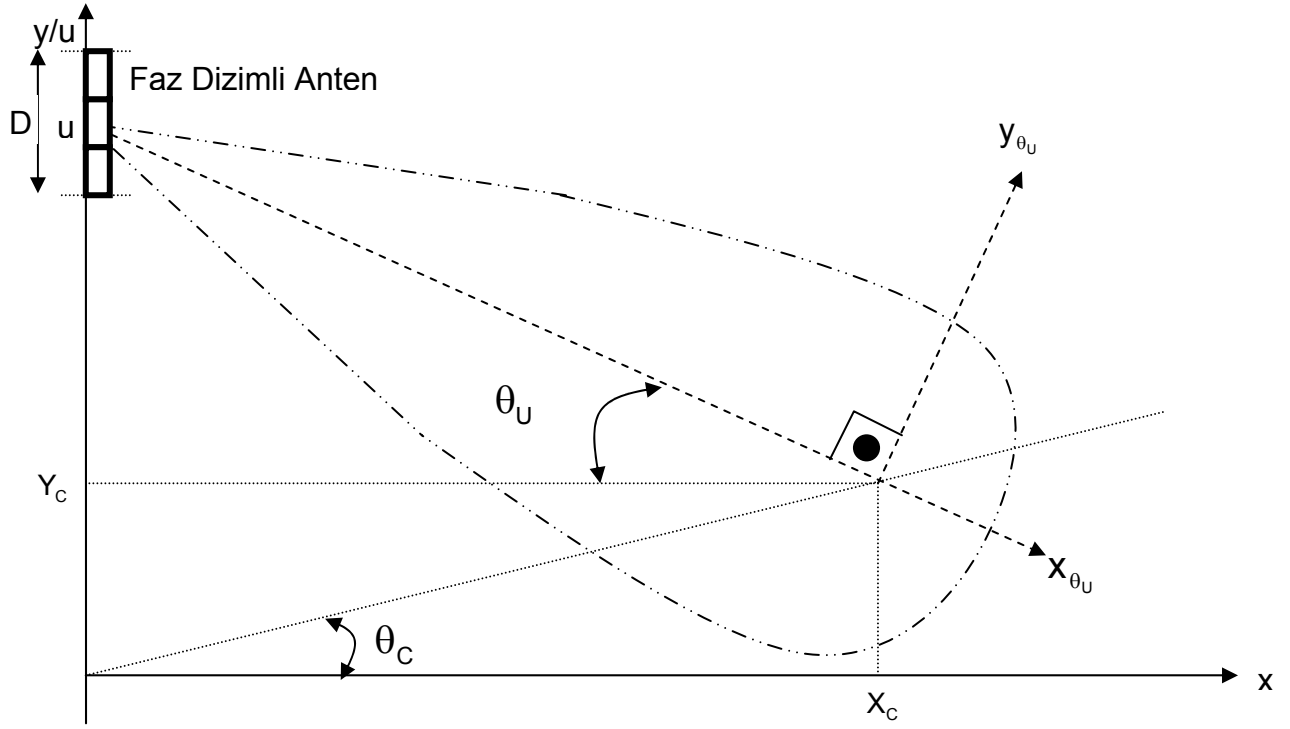
$$A \left[w, \frac{2k[(-x + X_c) \sin \theta_c + (y - Y_c) \cos \theta_c]}{r} \right] \quad (3.50)$$

3.4.1.2. Elektronik olarak huzme-yönlendirmeli noktasal – ışık SAR

Bu yöntemde, SAR anteni doğrusal dizi antenlerden oluşmakta ve huzme yönlendirmesi, dizi anteni elemanlarına uygulanan fazların değiştirilmesi yoluyla sağlanmaktadır.

Radarımızın $(0, u)$ 'da ve dizi elemanlarının toplam uzunluğunun D olduğunu düşünelim. $v \in [-D/2, D/2]$ (v : dizi elemanı mevkisi) olmak üzere, dizi elemanlarının yeri uçuş yolu boyunca $(0, u + v)$ olarak verilebilir. Dizi element merkezinde yer alan eleman için verici yayılımı paterni $h_{eT}(w, x, y)$ ile ifade edilecek olursa, dizinin diğer elemanları için bu ifade $h_{eT}(w, x, y - u - v)$ yazılır.

Şekil 3.13.'de görüldüğü gibi hedef bölgeyi aydınlatmak amacıyla $(0, u + v)$ 'daki dizi elemanına $\exp(-jk \sin \theta_u v)$ şeklinde bir faz uygulanmaktadır.



Şekil 3.13. Elektronik huzme – yönlendirme noktasal – ışık SAR geometrisi [Soumekh,1999]

(x,y) yansıtıcısı için, toplam yayılım paterni,

$$h_{sT}(w, x, y - u) = \int_{D/2}^{-D/2} h_{eT}(w, x, y - u - v) \exp(-jk \sin \theta_U v) \quad (3.51)$$

şeklinde yazılıp burada:

$h_{sT}(w, x, y - u)$: faz dizimli anten verici modu yayılım paternini,

$$h_{eT}(w, x, y - u - v) = a_{eT}(w, x, y - u - v) \exp\left[-jk \sqrt{x^2 + (y - u - v)^2}\right] \quad (3.52)$$

yalnız bir dizi elemanı için yayılım paternini ve

$a_{eT}(w, x, y - u - v)$: faz dizimli anten elemanı verici modu genlik paternini ifade etmektedir.

Eş. 3.52.'de gerekli düzenlemeler yapılacak olursa, toplam yayılım paterni aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$h_{sT}(w, x, y - u) = h_{eT}(w, x, y - u) D \operatorname{sinc}\left(\frac{kDy}{2X_c}\right) \quad (3.53)$$

Bir faz – dizilimli anten için verici – alıcı modu yayılım paterni,

$$\begin{aligned} h_s(w, x, y - u) &= h_{sT}(w, x, y - u) h_{sR}(w, x, y - u) \\ h_s(w, x, y - u) &= D^2 \operatorname{sinc}^2\left(\frac{kDy}{2X_c}\right) h_{eT}(w, x, y - u) h_{eR}(w, x, y - u) \\ h_s(w, x, y - u) &= D^2 \operatorname{sinc}^2\left(\frac{kDy}{2X_c}\right) h_e(w, x, y - u) \end{aligned} \quad (3.54)$$

şeklinde olup, burada:

$h_{sR}(w, x, y - u)$: faz dizilimli anten alıcı modu yayılım paternini,

$h_{eR}(w, x, y - u)$: faz dizilimli anten elemanı verici modu yayılım paternini,

$h_e(w, x, y - u)$: ise faz dizilimli anten elemanı verici – alıcı modu yayılım paternini ifade etmektedir. Bu durumda elektroniki huzme – yönlendirme için SAR işareti,

$$s(w, u) = P(w) \sum_n a_n(w, x_n, y_n - u) h_s(w, u; x_n, y_n) \quad (3.55)$$

olup, u alanında bu işaretin Fourier Dönüşümü alındığında,

$$\begin{aligned} S(w, k_u) &= P(w) \sum_n A_n(w, k_u) A_e(w, k_u; x_n, y_n) J_n(w, k_u) \\ &\quad \times \exp[-jk_x(w, k_u)x_n - jk_y(w, k_u)y_n] \end{aligned} \quad (3.56)$$

olarak elde edilmektedir. $A_e(w, k_u; x_n, y_n)$ burada faz dizilimli anten elemanı verici – alıcı modu genlik paternini ifade etmektedir. $S(w, k_u)$ işareti aynı şekilde uyumlu süzgeçten geçirilmektedir. Uyumlu süzme sonrası elde edilen hedef fonksiyonu aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} F[k_x(w, k_u), k_y(w, k_u)] &= |P(w) A_e(w, k_u)|^2 \sum_n A_n(w, k_u) J_n(w, k_u) \\ &\quad \times \exp[-jk_x(w, k_u)x_n - jk_y(w, k_u)y_n] \end{aligned} \quad (3.57)$$

Mekanik huzme – yönlendirmesine nispeten $A_e(w, k_u)$ uyumlu süzmesi de gerçekleşmektedir. Fakat her bir dizi elemanının boyu tüm boya ve yapay açıklığa nazaran çok küçük olduğundan, fazla faz farkı ve genlik salınımları meydana gelmemekte, bundan dolayı $A_e(w, k_u)$ için uyumlu süzmeye gerek duyulmayabilmektedir.

(k_x, k_y) alanı örnekleri doğrusal olmayan örnekler içerdiğinden ve IDFT için uygun yapıya sahip olmadığından $w \rightarrow k_x$ alanına dönüşümde aynı şekilde aradeğerleme yapılması gerekmektedir.

3.4.1.3. SAR işaretinin izgesel analizi

İzgesel destek aralığı belirlenmesinde iki ayrı analiz gerçekleştirilmektedir. ‘Bükük Radar Açıklığı (Curved Radar Aperture)’, ‘Düzlemsel Radar Açıklığı (Planar Radar Aperture)’.

Bu analizler, özellikle geniş – bant noktasal – ışık SAR sistemlerinde yararlıdır. Dar – bant noktasal – ışık SAR sistemlerinde bükük radar açıklığı için yapılan analizler aynı zamanda düzlemsel radar açıklığı için de yeterli durumdadır [Soumekh,1999].

Analizler ilk olarak tek hedef üzerinden yapılacak daha sonra tüm hedefler için düşünülerek izgesel destek aralığı belirlenmektedir.

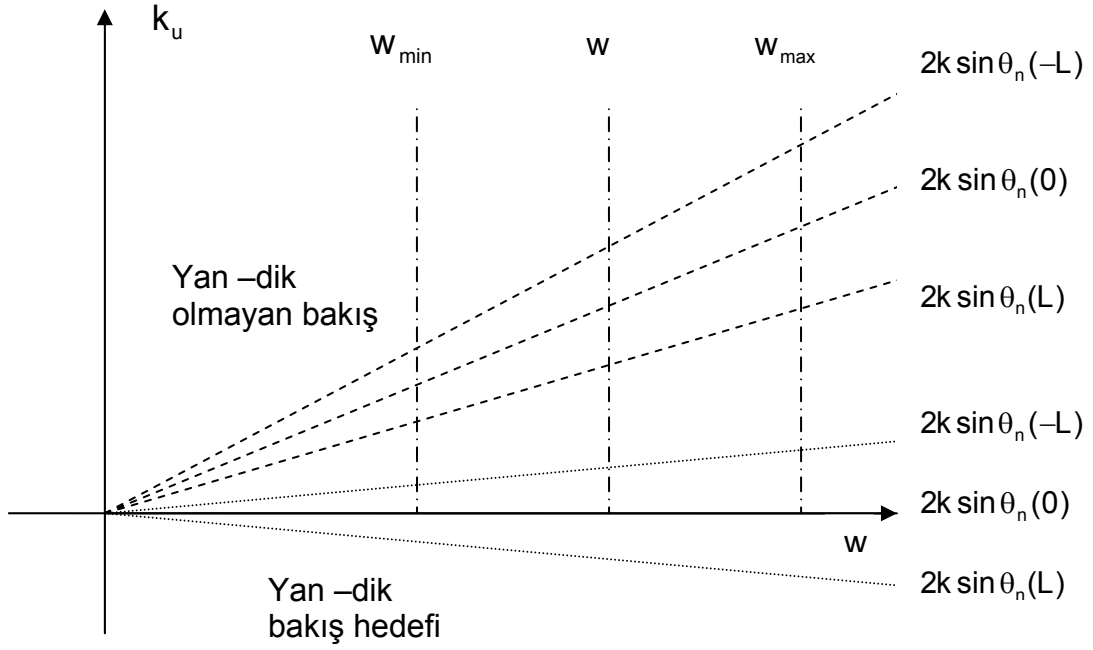
Hedef analizlerinde radar ve hedef genlik paternleri sabit kabul edilmektedir.

Tek hedef analizi (bükük açıklık)

Yavaş – zaman ve hızlı – zaman frekans alanında bir tek hedeften elde edilen SAR işareti,

$$S_n(w, k_u) = \sigma_n P(w) I_n(w, k_u) \exp(-j\sqrt{4k^2 - k_u^2} x_n - jk_u y_n) \quad (3.58)$$

olarak yazılır. Verilen bir hızlı-zaman frekansı için bir tek hedef hızlı-zaman frekans alanı bandı, $I_n(w, k_u)$ işaretinin yavaş-zaman frekans alanı destek bandı tarafından belirlenmektedir. $I_n(w, k_u)$ ’nın destek bandı, Eş. 3.48.’te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Yan - dik bakış ve yan - dik olmayan bakış ile n.inci hedef noktasal - ışık SAR işareti 2 boyutlu izge destek bandı [Soumekh,1999]

Tek hedef analizi (Düzlemsel açıklık) :

Düzlemsel modelde, çapraz-menzilde radar yarı - huzme genişliği hızlı zaman frekansına aşağıdaki şekilde bağlıdır.

$$Y_0(w) = \frac{R_c \lambda}{D_y} \quad (3.59)$$

Bu durumda hedef alanı $[Y_c - Y_{0min}, Y_c + Y_{0min}]$ ve

$$Y_{0min} = \frac{R_c \lambda_{min}}{D_y} = \frac{R_c 2\pi}{D_y k_{max}} \quad (3.60)$$

olduğundan dolayı, bu hedef alanı içerisinde yer alan bir yansiyıcı bütün radar frekanslarında görünmektedir. Eğer hedef alan genişliği $[Y_c - Y_{0max}, Y_c + Y_{0max}]$ ise

$$Y_{0max} = \frac{R_c \lambda_{max}}{D_y} = \frac{R_c 2\pi}{D_y k_{min}} \quad (3.61)$$

olduğundan dolayı bu alan içerisinde herhangi bir yansıtıcı, radar hızlı – zaman bandının bir bölümünde gözükmemektedir.

$$Y_0(w) \approx \frac{R_c \lambda_c}{D_y} \quad (3.62)$$

Dar – bant genişlikli noktasal - ışık SAR'larda Eş. 3.62.'de görüldüğü gibi çapraz – menzil genişliği frekansla birlikte değişmemektedir. Bu bize büyük açıklık için elde edilen sonuçların aynı zamanda düzlemsel açıklığı olan dar-bant noktasal - ışık SAR için de kullanılabileceğini göstermektedir.

Hedef alanı (büyük açıklık) :

Y_0 yukarıda gösterildiği gibi radar frekansı ile değişmektedir. Verilen frekansta k_u alanındaki SAR işareti için, Doppler destek bandı, tek hedef için belirlenen destek bantları toplamına eşittir.

$$\Omega_s = \bigcup_{x_n \in [X_c - X_0, X_c + X_0]} \bigcup_{y_n \in [Y_c - Y_0, Y_c + Y_0]} \Omega_n = [2k \sin \theta_{\min}, 2k \sin \theta_{\max}] \quad (3.63)$$

u boyunca hareket eden radar için L , $(X_0, Y_0) \ll R_c$ durumu hesaba katılıp, eşitlikte yer alan bakış açısı değerleri yerlerine yerleştirildiğinde, işaretin izgesel desteği aşağıdaki şekilde yazılmaktadır.

$$\Omega_s \approx \left[2k \sin \theta_c - 2k \frac{Y_0 + L}{X_c} \cos^2 \theta_c, 2k \sin \theta_c + 2k \frac{Y_0 + L}{X_c} \cos^2 \theta_c \right]$$

$$\Omega_s \approx \left[2k \sin \theta_c - 2k \frac{Y_0 + L}{X_{cc}}, 2k \sin \theta_c + 2k \frac{Y_0 + L}{X_{cc}} \right] \quad (3.64)$$

$$X_{cc} = \frac{X_c}{\cos^2 \theta_c} \quad (\text{Değiştirilmiş ortalama menzil}) \quad (3.65)$$

Belirtmek gerekir ki, SAR işareti izgesel desteği hızlı – zaman frekans değeri, çapraz – menzil ve yapay açıklık değeri ile doğru orantılı, menzil değeri ve anten ile merkez hedef noktası arasındaki açı ile ters orantılıdır. Y_0 aynı şekilde frekans

ile değişmediğinden çapraz – menzilde sabit bir hedef alanı, bütün frekanslarda radara görünebilmektedir [Soumekh,1999].

Hedef alanı (düzlemsel açıklık) :

Tek hedef analizlerinden anlaşıldığı gibi hedef alanın çapraz – menzil genişliği frekans ile değişiklik göstermektedir. Y_0 ’nun aldığı değere göre bazı hedef noktaları tüm radar frekanslarında yapılan bilgi toplam işleminde grnebilmekte bazıları ise bazı frekanslarda gözlemlenememektedir. Düzlemsel açıklık için olan $Y_0(w)$ yukarıda elde ettiğimiz bükük açıklık için olan izgesel destekte yerine yerleştirilirse, düzlemsel açıklık için olan izgesel destek aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\Omega_s \approx \left[2k\sin\theta_c - 2k\frac{L}{X_{cc}} - \frac{4\pi}{D_y}, 2k\sin\theta_c + 2k\frac{L}{X_{cc}} + \frac{4\pi}{D_y} \right] \quad (3.66)$$

$$\Omega_s \approx \left[2k\sin\theta_c - 2k\left(\frac{L}{X_{cc}} + \frac{\lambda}{D_y}\right), 2k\sin\theta_c + 2k\left(\frac{L}{X_{cc}} + \frac{\lambda}{D_y}\right) \right] \quad (3.67)$$

Biliyoruz ki $\frac{\lambda}{D_y}$ bir düzlemsel radar için huzme açıklığı, $\frac{L}{X_{cc}}$ ise bu huzmenin hedef bakış aısısıdır.”Görülüyor ki düzlemsel radar açıklığı için, noktasal – ışık SAR işaretinin yavaş – zaman izgesel açıklığı, fiziksel radarın huzme genişliği ve yapay açıklığın huzme genişliği bakış açısı toplamıyla doğru orantılıdır.

Eşitlik Eş. 3.67.’e göre izgesel desteğin frekans ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

Eşitlik Eş. 3.66.’da ise frekanstan bağımsız bir bileşen $\pm \frac{4\pi}{D_y}$ görülmektedir.

Radar bu izgesel destek alanında $2k\sin\theta_c$ merkez yavaş – zaman frekansı etrafında $\pm \frac{4\pi}{D_y}$ kadar Doppler kayması arz etmektedir.

3.4.1.4. Çözünürlük

(w, k_u) alanından (k_x, k_y) alanına eşleme aşağıdaki iki fonksiyon ile gerçekleştirilmektedir.

$$k_x(w, k_u) = \sqrt{4k^2 - k_u^2} \quad (3.68)$$

$$k_y(w, k_u) = k_u \quad (3.69)$$

Şekil 3.13.'de görüldüğü üzere n.inci hedef için izge desteği (k_x, k_y) alanının $\theta_n(0)$ kadar çevrilmesiyle elde edilmiştir. Alan çevirim aşağıdaki gibi gerçekleştirilmektedir.

$$\begin{bmatrix} k_{x_n} \\ k_{y_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_n(0) & \sin \theta_n(0) \\ -\sin \theta_n(0) & \cos \theta_n(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

Burada:

$\theta_n(0)$: radar $(0, u)$ 'dayken x eksenine ile yaptığı açığı,

k_{x_n} : n.inci hedef için menzil frekans alanını,

k_{y_n} : n.inci hedef için çapraz – menzil frekans alanını ifade etmektedir.

Şekil 3.15.'de n.inci hedef için izge destek bandı yaklaşık olarak aşağıda Eş. 3.71. ve Eş. 3.72.'te olduğu gibi bulunur.

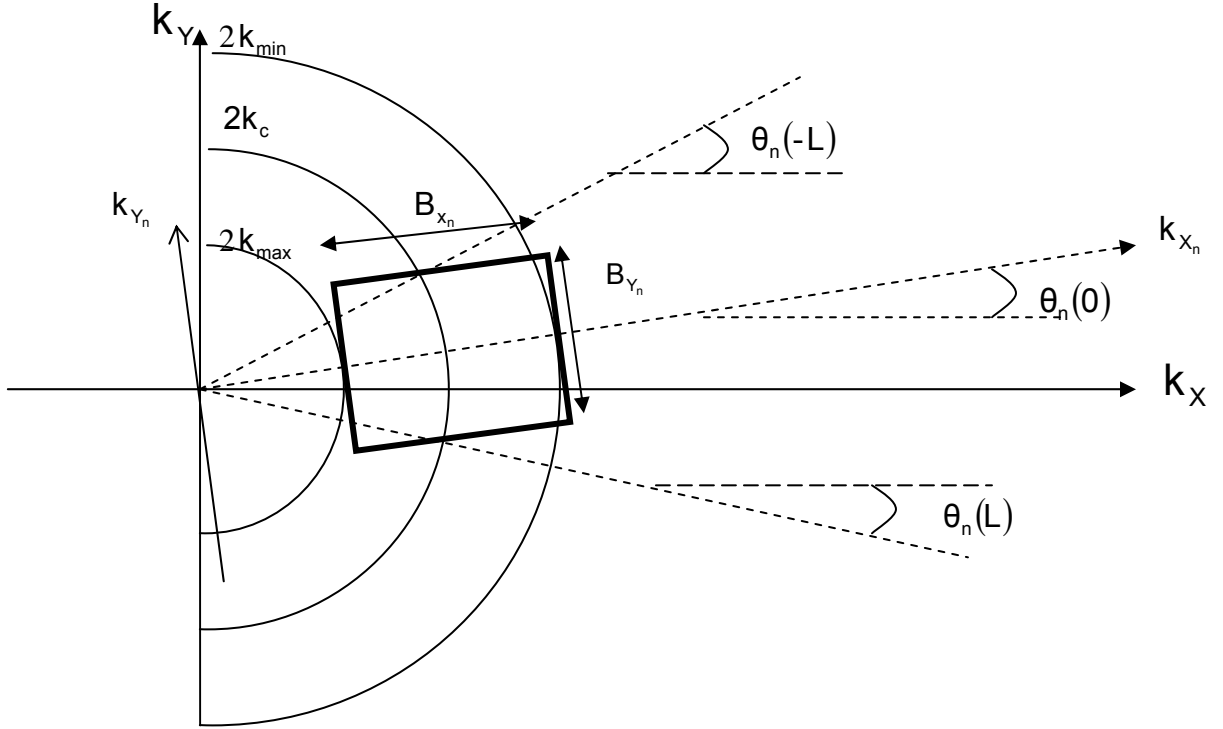
$$B_{x_n} = 2(k_{\max} - k_{\min}) \quad (3.71)$$

$$B_{y_n} = 2k_c [\sin \theta_n(-L) - \sin \theta_n(-L)] \quad (3.72)$$

Burada:

B_{x_n} : n.inci hedef için k_{x_n} izge desteğini,

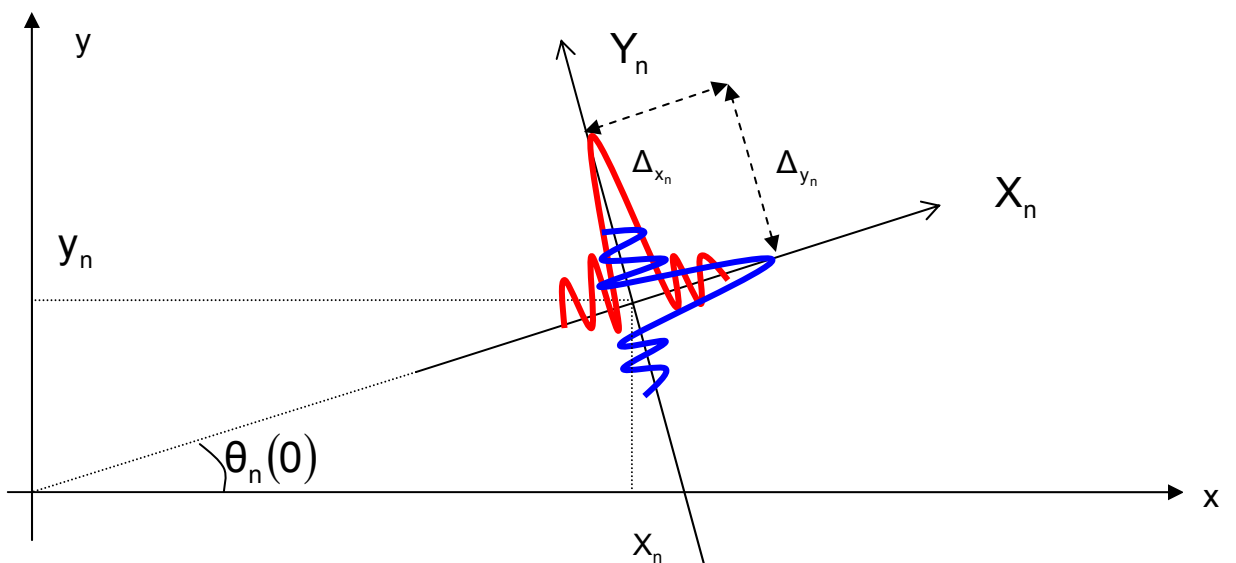
B_{y_n} : n.inci hedef için k_{y_n} izge desteğini ifade etmektedir.



Şekil 3.15. Hedef fonksiyonu $F[k_x, k_y]$ 'nin n.inci hedef için izge destek bantı [Soumekh,1999]

Şekil 3.15.'de görülen dikdörtgen bant gösteriminin ters Fourier dönüşümü alınacak olursa Eş. 3.71. ve Şekil 3.16.'de görüldüğü gibi iki boyutlu ayrılabilir sinc fonksiyonu elde edilir.

$$\text{sinc}\left(\frac{B_{x_n} X_n}{2\pi}\right) \text{sinc}\left(\frac{B_{y_n} Y_n}{2\pi}\right) \quad (3.73)$$



Şekil 3.16. Uzamsal frekans bandından Fourier dönüşümü alınmış hedef fonksiyonu (n.inci hedef) ([Soumekh,1999]'den değiştirilerek)

Bu iki boyutlu sinc örüntüsü (x_n, y_n) 'de yer alan ideal yansıtıcı için (Hedef ve radar genlik örüntüleri sabittir) noktasal – ışık SAR sistemlerinin nokta yayılı fonksiyonunu göstermektedir. Uzamsal frekans bandları B_{y_n}, B_{x_n} (B_{x_n} sadece düzlemsel açıklıkta) hedef noktası yeri ile değişiklik gösterir. Bu yüzden bu nokta yayılı fonksiyonu 'kaydırma – değişen (shift - varying)' olarak da tanımlanabilmektedir [Soumekh,1999].

Sinc fonksiyonlarının diğer bir değişle nokta yayılı fonksiyonlarının genişlikleri sırasıyla;

$$\Delta_{x_n} = \frac{2\pi}{B_{x_n}} = \frac{\pi c}{2w_0} \quad (3.74)$$

$$\Delta_{y_n} = \frac{2\pi}{B_{y_n}} \approx \frac{r_n \lambda_c}{4L \cos \theta_n(0)} \quad (3.75)$$

Eş. 3.74. ve Eş. 3.75.'deki değerler menzil ve çapraz-menzil çözünürlük değerleri olarak alınabilir. Şu unutulmamalıdır ki bu değerler hedef noktasının yerine göre değişiklik arz etmektedir.

Yukarıdaki sonuçlar dar – bant noktasal – ışık SAR sistemleri için iyi bir yaklaşım olarak algılanabilir. Şekil 3.15.'de görüldüğü gibi uzamsal frekans bandı (hedef izge desteği) dikdörtgensel bir yapı yaklaşımı ile modellenenmiştir. Geniş – bant sistemlerde bu modelleme geçerli değildir. Kaydırma – değişen nokta yayılı fonksiyon iki boyutlu sinc örüntüleri şeklinde modellenememektedir [Soumekh,1999].

3.4.1.5. İşaret işleme

Hızlı – zaman işaret örnekleme ve işleme

Bu analizlerde $Y_c \geq 0$ olarak kabul edilmektedir. Genel SAR geometrisi düşünüldüğünde radarın herhangi bir cisme minimum uzaklığı,

$$r_{\min} = \begin{cases} X_c - X_0 & Y_c - Y_0 - L \leq 0 \text{ ise} \\ \sqrt{(X_c - X_0)^2 + (Y_c - Y_0 - L)^2} & \text{diğer} \end{cases} \quad (3.76)$$

olup, radara ilk ulaşan yankı gecikmesi,

$$T_s = \frac{2r_{\min}}{c} \quad (3.77)$$

maksimum uzaklık,

$$r_{\max} = \sqrt{(X_c + X_0)^2 + (Y_c + Y_0 + L)^2} \quad (3.78)$$

ve yankı işleme süresi,

$$T_f = \frac{2r_{\max}}{c} + T_p \quad (3.79)$$

olup T_p radar darbe genişliğidir. Noktasal aydınlatılan hedef alan içerisinde yer alan tüm yansıtıcıların görünebilmesi için yansıyan SAR işaretine ait zaman örneklerinin $[T_f, T_s]$ aralığında elde edilmesi gerekmektedir. u nun her pozisyonu için bir zaman aralığı belirlenebilir, dolayısıyla elde edilecek örneklerin sayısı azaltılabilir ve işaret veri tabanı bu şekilde oluşturulabilir. Ancak, veri toplama işlemlerinden sonra gerçekleştirilen DFT operasyonlarında gerekli olan, genel bir zaman aralığıdır.

Hızlı – zaman örnekleme aralığı:

Radarı işareti taban – bant genişliği $\pm w_0$ olmak üzere ‘Nyquist’ ölçütünü sağlayan hızlı – zaman örnekleme aralığı,

$$\Delta t \leq \frac{\pi}{w_0} \quad (3.80)$$

ve gereken hızlı – zaman örnek adedi,

$$N = 2 \left\lceil \frac{T_f - T_s}{2\Delta t} \right\rceil \quad (3.81)$$

şeklinde yazılır. SAR işlem süresi başlangıç ve bitiş zaman değerleri elde edilen örnek sayısına göre aşağıdaki şekilde tekrar yazılmalıdır.

$$T_f = T_s + (N - 1)\Delta t \quad (3.82)$$

$$T_s = T_f - (N - 1)\Delta t \quad (3.83)$$

Uyumlu süzme için hızlı – zaman referans noktası:

SAR görüntülemeye hızlı – zaman alanında yapılacak olan uyumlu süzme için kullanılacak olan referans işareti genelde hedef alanın merkez noktasından gelen yankı işareti olarak alınır. Radarın $u = 0$ pozisyonunda olduğu düşünülürse, (X_c, Y_c) 'de olan hedef alan merkezinden olan uzaklığı R_c , bu noktadan gelen yankı işareti ise,

$$p_o(t) = p(t - T_c) \quad (3.84)$$

olacaktır. Burada:

$$T_c = \frac{2R_c}{c} : \text{hızlı – zaman referans noktası olarak tanımlanmaktadır.}$$

Buradan sonra, SAR verisi elde edilen bu referans işareti ile evrişime tabi tutularak uyumlu süzme gerçekleştirilir.

Kullanıcı, hedef alan menzil genişliği nispi değerlerine ve darbe süresine göre hızlı – zaman referans noktası için farklı değerler seçebilmektedir [Soumekh,1999].

Belli bir frekansta u alanı için kullanılan Nyquist örnekleme aralığı,

$$\Delta_u \leq \frac{\pi}{k(\sin\theta_{\max} - \sin\theta_{\min})} \approx \frac{X_{cc}\lambda_{\min}}{4(Y_0 + L)} \quad (3.84)$$

olarak yazılmaktadır. Düzlemsel radar açıklığı için hedef alan bölgesindeki tüm yansıtıcıların radar alıcısına görünmesi için dalga boyu değeri Eş. 3.84.'de minimum seçilmiştir. Y_0 değerinin değişmediği durumlarda dalga boyu düzlemsel radar ya da bükük radar açıklığı için aynıdır. X_0 ve X_{cc} değerleri karşılaştırılabilir

birbirine yakın değerler ise Eş. 3.84.'deki X_{cc} değeri minimum uzaklık değeri, r_{min} , ile değiştirilmelidir. Yavaş – zaman için alınan örnek sayısı,

$$M = 2 \left\lceil \frac{L}{\Delta_u} \right\rceil \quad (3.85)$$

olarak yazılır.

Yukarıdaki analizler görüldüğü üzere taban – bant'ta yapılmış analizlerdir. Noktasal – ışık SAR'larda yavaş – zaman alan işareti bant – geçirgen bir yapıya sahip olup, frekans alanı,

$$k_u = 2k \sin \theta_c \quad (3.86)$$

etrafında yoğunlaşmıştır. Analizlerin gerçekleştirilmesi amacıyla bu yavaş – zaman işareti aşağıdaki şekilde taban – banda çekilir.

$$s_b(w,u) = s(w,u) * \exp(-j2k \sin \theta_c u) \quad (3.87)$$

Eş. 3.87.'te yer alan üstel işaret, frekansa göre değişmektedir. Bu taban – banda çekilme işleminde kullanılan işaret frekans alanında sabit alınırsa sayısal görüntü oluşturmada kullanıcıya işaret işleme zamanlarında kolaylık sağlayacağı şüphesizdir. Bu durum dar – bant işaretlerde uygulanabilmektedir. $k_c \approx k$ olduğundan yukarıdaki eşitlikte k yerine k_c yazılabilir. Böylece yavaş – zaman frekans kaydırması tüm frekanslar için eşit olmuş olacaktır.

Gerçekte, ortak bir yavaş – zaman Doppler taşıyıcısı ile taban – bant'a dönüştürülen SAR işareti yavaş – zaman Doppler bandı, genellikle taban – bant işareti $s_b(w,u)$ 'nin sahip olduğu banttan daha büyüktür. Bundan dolayı, genel bir dönüştürücü işaret kullanmak için yavaş – zaman örnekleme aralığı aşağıdaki şekilde seçilmektedir.

$$\Delta_u \leq \frac{2\pi}{k_{u_{max}} - k_{u_{min}}} \quad (3.88)$$

$$k_{u_{min}} = \min[2k_{max} \sin \theta_{min}, 2k_{min} \sin \theta_{min}] \quad (3.89)$$

$$k_{u_{max}} = 2k_{max} \sin \theta_{max} \quad (3.90)$$

Eş. 3.84.'de bulunan örnekleme zaman aralığı bu durumda kullanılacak olursa, oluşacak taban – bant işaretinde sarma hataları ile karşı karşıya kalınacaktır. Bu işarete katlanma hataları söz konusu olmadığından Doppler alanı SAR işareti taban – bant işareti olan $s_b(w,u)$ 'nin katlanma olmayan örneklerinden tekrar oluşturulabilir.

Doppler alanı SAR işareti olan $S_b(w,k_u)$ 'na bu durumda sıfır – ekleme yapılır. Sıfır – ekleme ile $s_b(w,u)$ işaretinin örnekleri yukarı – örneklenmiş bir durum alır. Bu örnekler daha sonra $k_u = 2k_c \sin\theta_c$ işareti kullanılarak yavaş –zaman Doppler alanı taban - bant işareti oluşturulur.

Radardarbe tekrar frekansının yavaş – zaman sıkıştırma ile azaltılması:

SAR işaretinin yavaş – zaman'da sıkıştırılması,

$$s_c(w,u) = s(w,u) * s_0^*(w,u) \quad (3.91)$$

Şeklinde gerçekleştirilir. Burada $s_0(w,u)$ işareti hedef alan bölgesi merkezindeki birim yansıtıcıdan yansıyan yankının hızlı – zaman alanında Fourier dönüşümüdür. Bu işaret analizler için uyumlu süzmede kullanılan, gönderilen işaretimizin hızlı – zamanda tersinin karışık eşleniği yerine referans işaret olarak alınmaktadır. Bilinen hızlı – zaman frekansı w 'da, yavaş – zaman sıkıştırılmış SAR işareti için Nyquist örnekleme aralığı,

$$\Delta_{uc} \leq \frac{R_c \lambda}{4Y_0 \cos\theta_c} = \frac{X_{cc} \lambda}{4Y_0} \quad (3.92)$$

Radardar bandında en kısıtlayıcı yavaş – zaman örnekleme aralığı için dalga boyu en az seçilmelidir. Yavaş – zaman sıkıştırılmış SAR işareti için maksimum kısıtlayıcı örnekleme aralığı, $s(w,u)$ için yavaş – zaman örnekleme aralığı Δ_u hakkında var olan kısıtlamadan daha az kısıtlamaya sahiptir [Soumekh,1999]. Eş. 3.92.'deki yavaş – zaman aralığı kullanılarak yapılan veri toplama için, gönderilen darbelerin sayısı,

$$M_c = 2 \left\lceil \frac{L}{\Delta_{uc}} \right\rceil \quad (3.93)$$

şeklinde yazılmaktadır.

Veri toplama işleminin yukarıda Eş. 3.88.'de belirtilen örnekleme aralığı ile yapıldığını düşünelim. $\Delta_{uc} > \Delta_u$ olduğundan ve SAR işareti daha küçük bir örnek aralığı gerektirdiğinden elde edilen işaret katlanma hatası göstermektedir. Bir sonraki aşamada $i_c = 1, 2, \dots, M_c$ için katlanma hatalı SAR işareti aşağıdaki şekilde yavaş – zaman'da sıkıştırılmaktadır.

$$s_c(w, i_c \Delta_{uc}) = s(w, i_c \Delta_{uc}) * \exp(j2k\sqrt{X_c^2 + (Y_c - i_c \Delta_{uc})^2}) \quad (3.94)$$

Elde edilen bu yavaş – zaman işareti katlanma hatalarından bağımsızdır. Bu işaret,

$$\frac{\Delta_{uc}}{\Delta_u} = \frac{Y_0 + L}{Y_0} \quad (3.95)$$

olacak şekilde yukarı örneklenmektedir. Bu durumda örneklerin yerleşimi $i = 1, 2, 3, \dots, M$ olacaktır. Elde edilen sıkıştırılmış ve sonrasında yukarı örneklenmiş işaret, sıkıştırmanın tersi olarak açılarak aşağıdaki gibi katlanma hatalarından bağımsız SAR işareti haline dönüşmektedir.

$$s(w, i \Delta_u) = s_c(w, i \Delta_u) * \exp(-j2k\sqrt{X_c^2 + (Y_c - i \Delta_u)^2}) \quad (3.96)$$

Bu method radar işareti PRF'ini yükseltmektedir [Soumekh, 1999].

3.4.1.6. Sayısal noktasal - ışıklandırma

Sıkıştırılmış SAR işareti Doppler alanı üzerinde süzme yöntemiyle çapraz – zaman kapılama uygulanabilmektedir. Geniş – bant işaretlerde SAR verisi içerisinde aynı mantıkla hedef alanında özgül bir hedef alanına ait yansıtıcılar seçilerek çıkarılabilir. Noktasal - ışıklandırma ile kastedilen SAR'ın ana lobunun hedef alan üzerinde aydınlattığı yerdir. Fakat radarlar ana lob kadar yan loblara da sahip olduklarından bu lobların istenmeyen etkilerinden kurtulmak gerekmektedir. Bir

görüntüleme çapraz – menzil genişliği, Y_0 , ana – lob genişliği baz alınarak seçilecek olursa bu yan loblar aracılığıyla aktarılacak olan veri katlanma hatalarına maruz kalacaktır. Böyle işaretler genel olarak, oluşturulan SAR görüntüsü üzerinde arka plan parazit yankılara sebep olmaktadır. Bu söz konusu yankılar görüntü kalitesini düşürmekte ve bazı durumlarda da faz bilgisini bozmaktadır [Soumekh,1999]. Bu yaklaşım ile daha önce bahsedilen analog noktasal ışıklandırma işlemi, sayısal olarak da gerçekleştirilmektedir.

Çapraz – menzil kapılama:

Genel SAR hedef alanı, yavaş – zaman Doppler alanındaki sıkıştırılmış SAR işareti, $S_c(w, k_u)$ için, n.inci hedef yansıtıcı izi,

$$k_u = \frac{2k \cos \theta_c (y_n - Y_c)}{r_n} \quad (3.97)$$

değerinde oluşmaktadır. Dar – menzil aydınlatma genişliği ve dar huzme genişliği düşünüldüğünde $(\frac{1}{r_n} \approx \frac{1}{R_c})$ bu ifadeyi,

$$k_u \approx \frac{2k(y_n - Y_c)}{X_{cc}} \quad (3.98)$$

şeklinde yazmak mümkündür. Eş 3.98.'de görüldüğü gibi k_u , y_n ile doğrusal bir şekilde değişmektedir.

Sayısal noktasal – ışıklandırma için,

$$S_c(w, k_u) = 0 \quad (|k_u| > \frac{2kY_0}{X_{cc}} \text{ olduğunda}) \quad (3.99)$$

olacak şekilde bir süzgeç kullanılmalıdır.

Menzil ve çapraz – menzil kapılama:

Yukarıda Eş. 3.99.'daki süzgeç dar – menzil aydınlatma genişliği ve dar – huzme genişliği baz alınarak elde edilmiştir. Bu yaklaşım dışındaki durumlarda bu süzgeç

geçerli olamamaktadır. Bu durumda sıkıştırılmış SAR verisi üzerinde Eş 3.99.'da belirtilen süzgeç kullanılırsa,

$$\frac{|y_n|}{r_n} > \frac{Y_0}{X_{cc}} \quad (3.100)$$

$$|\sin\theta_n(0)| > \frac{Y_0}{X_{cc}} \quad (3.101)$$

ile bazı hedeflerin izleri reddedilmektedir. Bu problem (t, k_u) alanında yapılacak analizlerle çözülebilir. Bunun için kutupsal biçim işleme temelinde yer alan sıkıştırılmış SAR verisinden ham SAR verisini elde etme işlemi kullanılabilir.

Yan - dik pozisyona yakın durumda, dar – bant ve dar – huzme genişliği yaklaşımlı kutupsal format işleme ile elde edilmiş hedef fonksiyonu,

$$F(k_x, k_y) = s_c(w, u) \quad (3.102)$$

olarak bulunmaktadır. Burada:

$$k_x = 2k \cos \theta_c \text{ ve}$$

$$k_y = 2k_c \sin \theta_c - 2k_c \frac{\cos^2 \theta_c}{R_c} u \quad (3.103)$$

şekindedir. Eş 3.103.'te görülmektedir ki (x, y) alanındaki SAR hedef fonksiyonu $f(x, y)$, $s_c(w, u)$ işaretinin Fourier dönüşümü alınarak elde edilebilmektedir.

Kutupsal format işleme ile elde edilen SAR görüntüsünde, $[\theta_n(0), r_n]$ kutupsal koordinatlarında oluşan n.inci hedef izi,

$$t_n \approx \frac{2r_n}{c} \quad (3.104)$$

$$k_{un} \approx 2k_c \sin[\theta_n(0) - \theta_c] \quad (3.105)$$

noktasında görünmektedir. kutupsal biçim işleme şeklinde adlandırılan bu durum, sıkıştırılmış yavaş – zaman verisinin Fourier dönüşümü ile elde edilmiştir.

Uzamsal alanda $[\theta_n(0), r_n]$ 'den Eş. 3.104. ve Eş. 3.105.'e dönüşüm, $\theta_n(0) - \theta_c = \phi_n$ ve $\phi_n = \arcsin\left(\frac{k_{un}}{2k_c}\right)$ olmak üzere,

$$x_n = \frac{ct_n}{2} \cos(\phi_n + \theta_c) \quad (3.106)$$

$$y_n = \frac{ct_n}{2} \sin(\phi_n + \theta_c) \quad (3.107)$$

şeklinde kartezyen koordinatlarda gösterilebilmektedir. Sayısal noktasal – ışıklandırma için (t, k_u) alanında kutupsal formatta işlenmiş görüntü,

$$\left| \frac{ct}{2} \cos(\phi + \theta_c) - X_c \right| < X_0 \quad (3.108)$$

$$\left| \frac{ct}{2} \sin(\phi + \theta_c) - Y_c \right| < Y_0 \quad (3.109)$$

özelliğindeki süzgeçten geçirilmelidir. Süzgeçte kullanılan ϕ açısal yavaş – zaman frekans alanı dar – bantlı SAR sistemleriyle kullanımı ile uyumludur. Söz konusu sayısal noktasal – ışıklandırma süzgeci Eş. 3.110.'daki şekilde ifade edilmektedir [Soumekh, 1999].

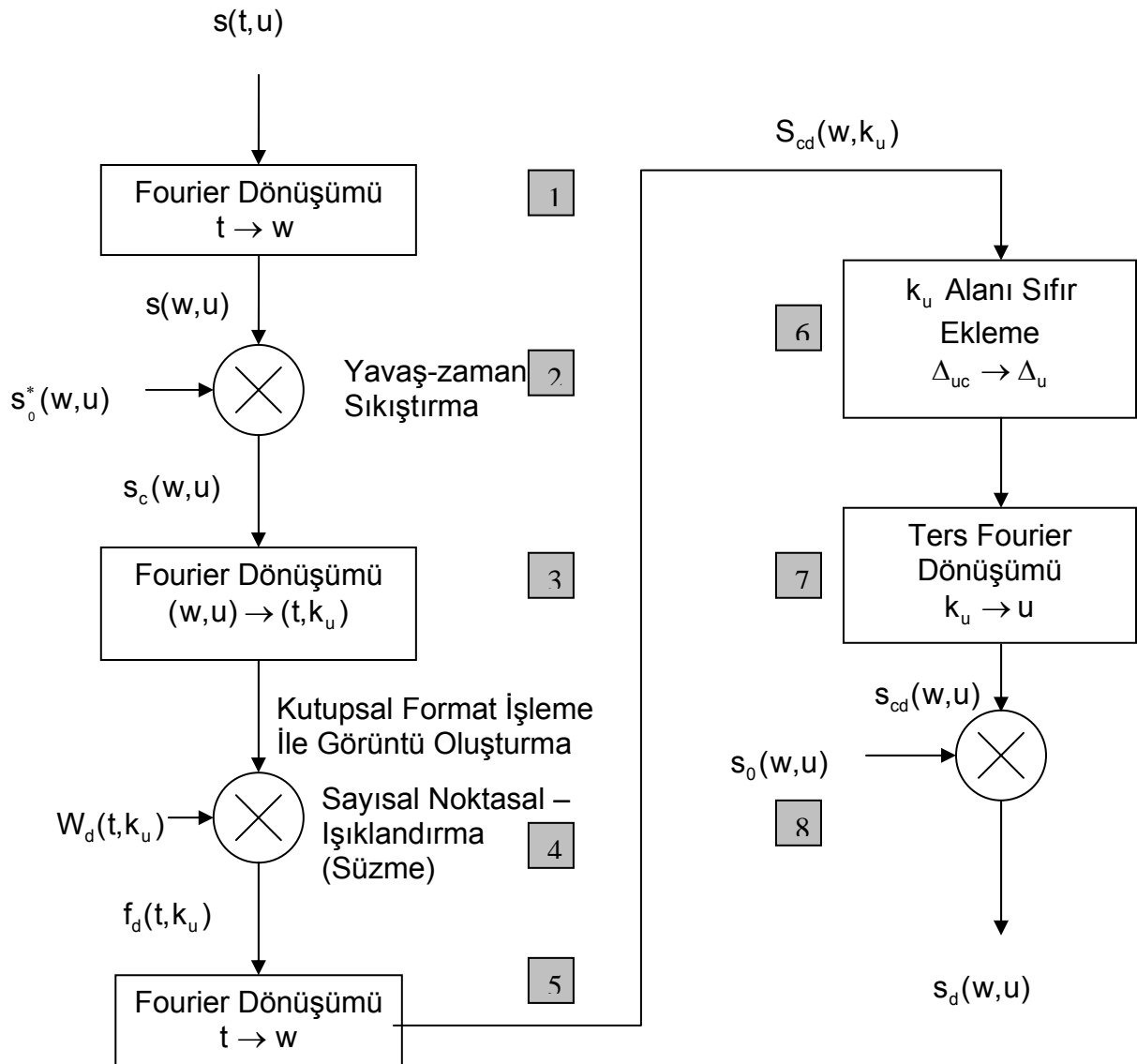
$$W_d(t, k_u) = \begin{cases} 1 & \text{for } \left| \frac{ct}{2} \cos(\phi + \theta_c) - X_c \right| < X_0 \text{ and } \left| \frac{ct}{2} \sin(\phi + \theta_c) - Y_c \right| < Y_0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.110)$$

Sayısal noktasal – ışıklandırma süzmesi, SAR işareti $S_c(w, k_u)$, (w, ϕ) alanına dönüştürülerek yapıldığında daha iyi sonuç vermektedir [Soumekh, 1999]. Bunun için sabit frekansta, $S_c(w, k_u)$, k_u alanından ϕ alanına aradeğerleme yapılarak dönüştürülür, elde edilen bu veri DFT ile (t, ϕ) alanına çevrilir ve sonrasında süzgeç ile süzülür. Süzme işleminden sonra işlemlerin sırasıyla tersi yapılır. (t, ϕ) alanındaki SAR verisi Fourier dönüşüm ile (w, ϕ) alanına çevrilir. (w, ϕ) alanındaki bu veri, sonrasında (w, k_u) alanına dönüşüm için $\phi = \arcsin(k_u / 2k)$ ile geniş – bant eşleme yapılarak aradeğerlemeye tabi tutulur ve sonuç olarak sıkıştırılmış ve sayısal noktasal ışıklandırılmış SAR verisi, $S_{cd}(w, k_u)$, elde edilmiş olur.

Görülmektedir ki geniş – bant SAR sistemleri için tek boyutlu aradeğerlemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Dar – bant yaklaşımı kullanılarak yapılan sayısal noktasal - ışıklandırma, görüntü üzerinde kenarlarda bir miktar bozulma meydana gelmektedir. Bunlar büyük alanlar için problem olmasa da küçük alanlarda bu problemden kurtulmak için daha büyük sayısal noktasal – ışıklandırma süzgeci kullanılmaktadır [Soumekh,1999].

Sayısal noktasal – ışıklandırma algoritması:

Şekil 3.17.'de dar – bant yaklaşımli sayısal noktasal – ışıklandırma algoritmasının blok diyagramı görülmektedir. Bu algoritmada yer alan aşamalar aşağıda açıklanmaktadır.



Şekil 3.17. Sayısal noktasal – ışıklandırma algoritmasının blok şema gösterimi ([Soumekh,1999]'dan değiştirilerek)

Adım – 1. Toplanan SAR verisine, hızlı – zamanda Fourier dönüşümü uygulanmaktadır.

Adım – 2. Fourier dönüşümü alınmış SAR verisi $s(w,u)$, referans işaret ile çarpılarak yavaş – zaman darbe sıkıştırma işlemi yapılmaktadır. Burada kullanılan referans işaret,

$$s_0(w,u) = \exp\left[-j2k\sqrt{X_c^2 + (Y_c - u)^2} + j2kR_c\right] \quad (3.111)$$

olup, fazladan eklenen $j2kR_c$ değeri, referans hızlı – zaman noktasının T_c , olduğunu ve değişmeyeceğini garantilemektedir.

Adım – 3. Sayısal noktasal – ışıklandırma süzmesi maksadıyla, (w,u) alanındaki sıkıştırılmaya tabi tutulmuş SAR verisi $s_c(w,u)$ için, frekans alanından zaman alanına ters Fourier dönüşümü ve yavaş – zaman alanı u 'dan, yavaş – zaman Doppler alanına Fourier dönüşümü gerçekleştirilir.

Adım – 4. Süzme işleminin gerçekleştirildiği yerdir. Bu süzme işlemi ile kutupsal biçim işleme ile yeniden oluşturma gerçekleştirilmiş olur.

Adım – 5. Kutupsal biçim işleme'ye tabi tutulmuş SAR verisinin hızlı – zamanda Fourier dönüşümü alınarak, yavaş – zamanda sıkıştırılmış ve sayısal noktasal ışıklandırılmış SAR verisi $S_{cd}(w,k_u)$, elde edilmiş olur.

Adım – 6. Bu bölümde istenirse sıfır ekleme ile SAR verisi yukarı örneklenebilmektedir. Çünkü sıfır ekleme, bazı durumlarda yavaş – zaman Doppler katlanma hatalarının giderilmesinde sayısal noktasal – ışıklandırmaya nazaran daha etkili olmaktadır [Soumekh,1999].

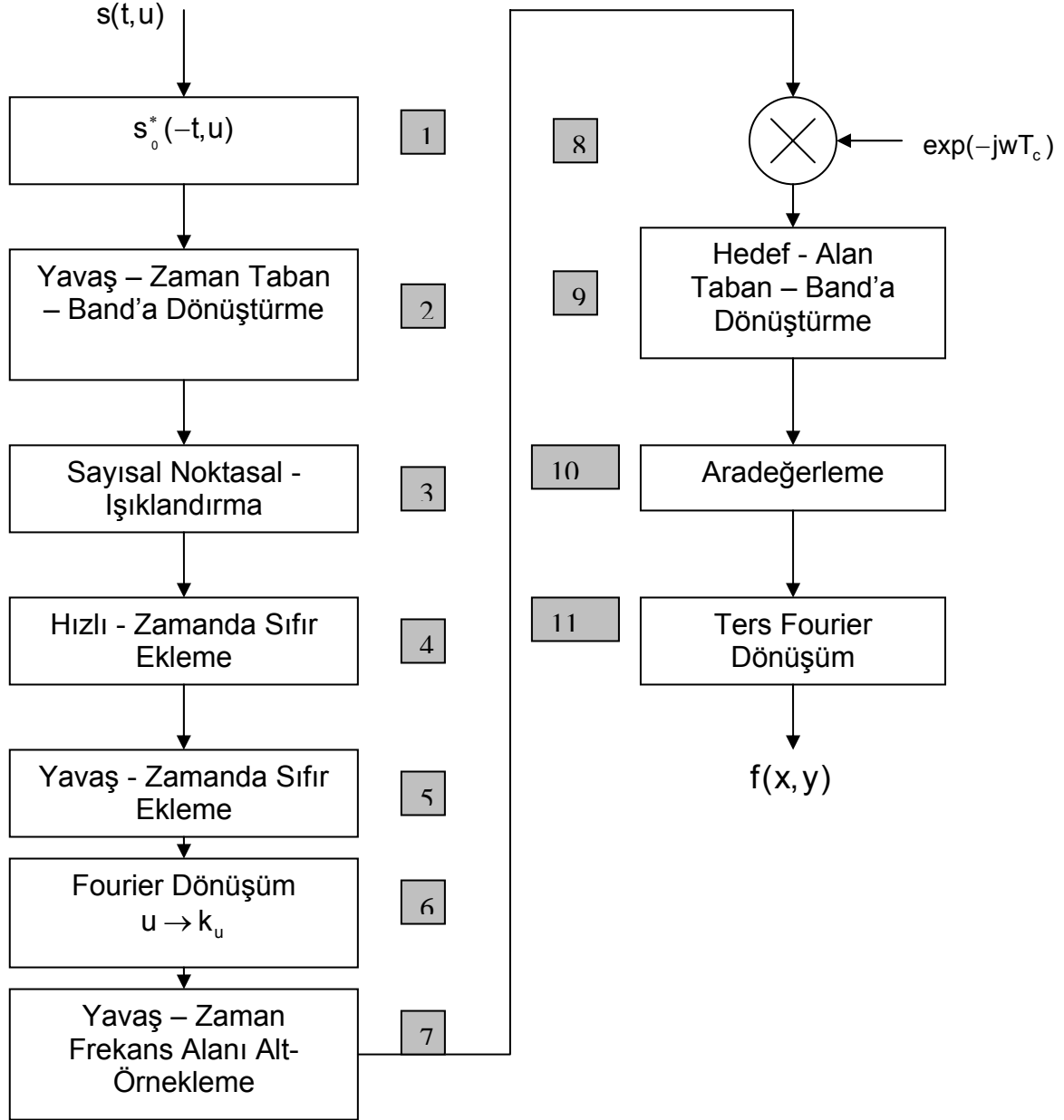
Adım – 7. Sıfır ekleme işleminden sonra SAR verisine ters Fourier dönüşümü uygulanmakta ve böylece sıkıştırılmış yavaş – zaman işareti $s_{cd}(w,u)$, elde edilmektedir.

Adım – 8. Son olarak, referans işareti ile geri sıkıştırma yapılarak asıl sayısal noktasal – ışıklandırılmış SAR verisi $s_d(w,u)$, elde edilir.

Daha önce söylenildiği gibi sayısal noktasal – ışıklandırma sayısal manada veri üzerinde var olan ve yan – loblardan kaynaklanan bazı katlanma hatalarını gidermede kullanılmaktadır. Noktasal – ışıklandırma işlemine tabi tutulmuş veri yinede süzgeç dışında kalan hedeflerden kaynaklanan bazı kaçıntılar (leakage) içerebilmektedir. Veri içinde yer alan bu örnekler de katlanma hatasına maruz kalmaktadırlar. Katlanma hatasına maruz kalmayan kaçıntılar için daha geniş bir çapraz – menzil (Y_0) seçilmelidir. Bunun için Adım – 6.'da da belirtildiği gibi SAR verisine sıfır eklenmelidir.

3.4.1.7. Uzamsal frekans aradeğerlemesiyle SAR yeniden oluşturma algoritması

Şekil 3.18.'te Uzamsal frekans aradeğerlemesiyle SAR yeniden oluşturma algoritması görünmektedir.



Şekil 3.18. Uzamsal frekans aradeğerlemesiyle SAR yeniden oluşturma algoritması blok şeması.

Adım – 1. İşaret alış – verişi ile hedef alandan elde edilen SAR verisi, dürtü fonksiyonu, hedef alan merkezinde bulunan birim yansıtıcıdan yansıyan yankı işareti olan uyumlu süzgeçten geçirilir.

Adım – 2. Hızlı – zaman uyumlu süzme sonunda elde edilen SAR verisi, yan – dik bakış dışındaki durumlar için, DFT algoritmalarının daha sağlıklı çalıştırılabilmesi amacıyla yavaş – zaman alanında taban – banda dönüştürülür.

Adım – 3. Sayısal noktasal – ışıklandırma işlemi yapılmaktadır.

Adım – 4. Uzamsal frekans alanında $w \rightarrow k_x$ aradeğerlemesi için bir Jacobian fonksiyonundan bahsedilmiştir. Noktasal – ışık SAR işaretinin iki boyutlu bant genişliği içerisinde yer alan tüm veri için genel Nyquist sınırlaması,

$$\Delta k_{J_{\max}} \leq \Delta k_x \quad (3.111)$$

halini almaktadır. Burada J_{\max} maksimum Jacobian değerini göstermektedir. k_x için Nyquist sınırlaması ise,

$$\Delta k_x \leq \frac{\pi}{X_0} \quad (3.112)$$

şeklindedir. Bu iki eşitlikten hareketle,

$$\Delta k_x \leq \frac{\pi}{J_{\max} X_0}$$

şeklinde olup, frekans alanı örnek aralığı $\Delta w = \Delta k.c$ ve işlem zamanı $T = \frac{2\pi}{\Delta w}$ olduğundan , Δk üzerindeki bu Nyquist sınırlaması, Eş 3.113.'teki hızlı – zaman işlem zamanı koşulunu gerektirmektedir.

$$T \geq \frac{2X_0}{cJ_{\max}} \quad (3.113)$$

Bu durumda SAR verisini işlemek için gerekli olan zaman,

$$T_{\min} = \max \left[T_f - T_s, \frac{2X_0}{cJ_{\max}} \right] \quad (3.114)$$

şeklindedir. k_x alanında, $t = T_f - T_s$, bahse konu SAR verisinin işlenmesi için yeterli örnekleme yoğunluğunu sağlamadığı durumda, SAR datasına hızlı – zamanda sıfır ekleme işlemi yapılmaktadır.

Adım – 5. Bilindiği gibi yavaş – zaman Doppler alanı örnekleme aralığı ve aynı zamanda hedef fonksiyonu için SAR sisteminde,

$$\Delta k_y = \Delta k_u = \frac{\pi}{L} \quad (3.115)$$

şeklindedir. $Y_0 > L$ ise Nyquist kriteri olan, $\Delta k_y = \frac{\pi}{Y_0}$, sağlanmamaktadır. SAR verisinin katlanma hatalarına maruz kalmaması için minimum yapay açıklık uzunluğunun sağlanması maksadıyla ($L_{\min} = \max[L, Y_0]$), hızlı – zamanda sıfır eklenmiş SAR verisine yavaş – zamanda da sıfır eklenir.

Adım – 6. Hızlı ve yavaş – zaman alanlarında sıfır eklenmiş SAR verisi u alanında Fourier Dönüşümüne tabi tutularak $S_d(w_n, k_{um})$ elde edilir.

Adım – 7. SAR sisteminde $Y_0 < L$ ise işlem yükünün azaltılması için, SAR verisi yavaş – zaman frekans (Doppler) alanında alt – örnekleme yapılmaktadır.

Adım – 8. DFT algoritması, hızlı – zaman dizisinde, orta örneği $t = 0$ 'da olacak şekilde algılamaktadır. Ancak bu örnek $t - T_c$ zamanına aittir. DFT işlemi için, SAR işareti $\exp(-jwT_c)$ doğrusal faz fonksiyonu ile çarpılmaktadır. Bu şekilde hızlı – zaman orijinin gerçek sıfıra çekilmesi sağlanır.

Adım – 9. Doğrusal faz fonksiyonu ile çarpılmış SAR hedef alanı Eş 3.116.'daki şekilde taban - banda dönüştürülür .

$$F[k_x, k_y] = S_d(w, k_u) \exp(-jwT_c) \exp(jk_x X_c + jk_u Y_c) \quad (3.116)$$

Adım – 10. Eşit olmayan aralıklarla dizilmiş $F[k_{xmn}, k_{ymn}]$ işareti örneklerinden düzgün ızgara üzerine eşit aralıklı sıralanmış $F[k_x, k_y]$ işareti örneklerinin aradeğerlemesi işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu alan için ızgara aralıkları,

$$\Delta k_x = \frac{\pi}{X_0} \quad (3.117)$$

$$\Delta k_y = \frac{\pi}{Y_0} \quad (3.118)$$

şeklinde olup, ızgara üzerindeki örnek sayıları sırasıyla,

$$k_x \text{ alanı için } N_x = 2 \left\lceil \frac{k_{x\max} - k_{x\min}}{2\Delta k_x} \right\rceil$$

$$k_y \text{ alanı için } N_y = 2 \left\lceil \frac{k_{y\max} - k_{y\min}}{2\Delta k_y} \right\rceil$$

olarak yazılır.

Adım – 11. Düzgün ızgara üzerinde eşit aralıklı sıralanmış $F(k_x, k_y)$ işaretinin ters Fourier dönüşümünün alınması işlemi yapılmaktadır. Böylece elde edilen SAR görüntüsü için eşit örnek aralıkları,

$$\Delta_x = \frac{2\pi}{N_x \Delta k_x} = \frac{2X_0}{N_x} \quad (3.110)$$

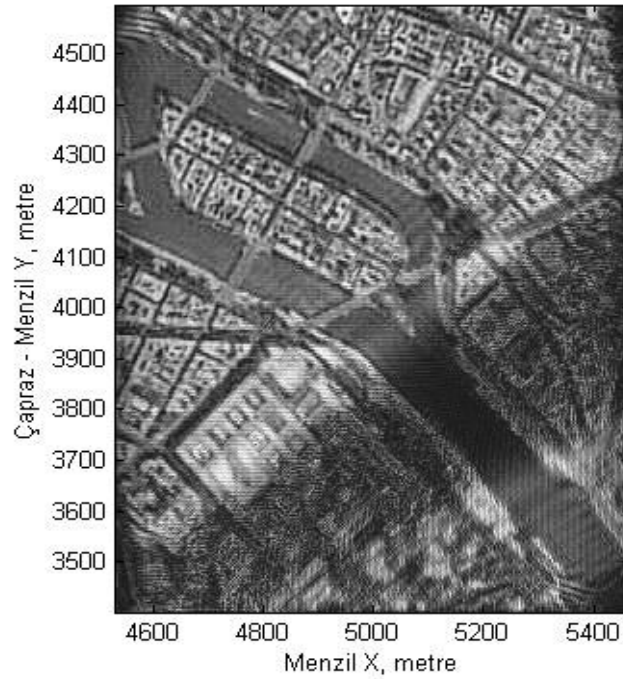
$$\Delta_y = \frac{2\pi}{N_y \Delta k_y} = \frac{2Y_0}{N_y} \quad (3.111)$$

şeklinde bulunmaktadır.

Aşağıda Şekil 3.19.'te uydu ile fotoğrafı çekilmiş bir bölgenin görüntüsü, Şekil 3.20.'de ise bu bölgenin noktasal – ışık SAR görüntüleme algoritması ile elde edilmiş bir simülasyon görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3.19. Uydu ile fotoğrafı çekilmiş bir bölge görüntüsü.



Şekil 3.20. SAR görüntüsü

3.4.2. Şerit – haritalama yapay açıklıklı radar

Noktasal – ışık SAR'a nazaran hedef bölge radar anteni mekanik ya da elektronik yöntemler ile çevrilerek değil, veri alma süresi boyunca uçuş yoluna göre sabit bir pozisyonunda tutularak aydınlatılmaktadır. Bu radar tipinde görüntüleme menzil

alanında sabit şeritler halinde yapılmaktadır. Bu sebepten bu tip yapay açıklıklı radarlar şerit – haritalama ya da yan – bakış (side - looking) SAR olarak adlandırılmaktadırlar. Veri toplama işlemi esnasında, çapraz – menzil alanı bir darbeden diğerine geçerken değişiklik arz etmektedir. Başka bir deyişle, radar yapay açıklık hattı üzerindeki bir noktada işareti hedef alan üzerine göndermekte huzmenin baktığı menzil hattından gelen yankıları toplamakta ve sonrasında bir sonraki çapraz – menzil noktasına ilerlemektedir.

Noktasal – ışık ve şerit – haritalama iki farklı radar görüntüleme biçimidir. İkisi arasındaki seçim, uygulama tipine göre yapılmaktadır. Genel olarak şerit - haritalama ile görüntülemeye çok büyük alanlar hedeflenirken, noktasal – ışık görüntülemeye daha küçük alanlar ve yüksek – çözünürlük bilgisi hedeflenmiştir.

Bu tez çalışmasında noktasal – ışık SAR temel alındığından, şerit – haritalama algoritmaları işlenmemiştir.

4. SAR SİSTEMLERİNİN KARIŞTIRILMASI

4.1. Elektronik Harp

Elektromanyetik enerji askeri amaçlar açısından, hedef tespiti, hedef takibi, hedefi bertaraf etmek, elektronik cihazlarının kullanımını negatif yönde etkilemek ve bu enerjinin karşı kullanıcı tarafından kullanımını engellemek amacıyla kullanılmaktadır.

Elektromanyetik dalgaların kullanımını elektronik harp açısından 3 ana maddede sınıflandırabiliriz. Bunlar:

- Elektronik Destek Tedbirleri (ESM - Electronic Support Measures)
- Elektronik Karşı Tedbirleri (ECM - Electronic Countermeasures)
- Elektronik Karşı Karşı Tedbirleri (ECCM - Electronic Counter Countermeasures)

olarak sıralanabilir.

4.1.1. Elektronik destek tedbirleri (ESM)

ESM yayımlanmış elektromanyetik enerjiyi belirlemek, lokalize etmek, algılamak, ve araştırmak için anlık tehdit tanıma amacıyla alınmış faaliyetleri içermektedir [Walter, 1993].

Bu faaliyetler açık olarak tehditler hakkında bilgi sahibi olma, tehditlere ait elektromanyetik yayım yapan cihazın kimliğini belirleme ve ESM sistemi kütüphanesinde varsa cihazın bulunduğu platform ve diğer sahip olunan savaş sistemleri hakkında elde edilen bilgileri kapsar. Böylece yapılanması bilinen ya da tahmin edilen tehditlere karşı nasıl bir elektronik harp taktiği uygulanacağına karar verilmektedir.

4.1.2. Elektronik karşı tedbirler (ECM)

Karşı tarafın elinde bulunan elektromanyetik cihazların kullanımını önleyen ya da etkinliğini azaltan tedbirlerdir. Bu tedbirlerin başlıcaları aşağıda olduğu gibi özetlenebilir.

4.1.2.1. Aktif karşı tedbirler

Gürültü karıştırma (Noise jamming)

Gürültü karıştırma işareti genellikle bant – sınırlı Gaussian gürültünün bir yüksek güç yükselteci ile yükseltilmesi yoluyla elde edilir. Bu yöntem Doğru Gürültü Yükseltmesi (Direct Noise Amplification (DINA)) olarak anılmaktadır. Pratikte DINA karıştırma iki türlü üretim alternatifine sahiptir. Bunlarda birincisinde yüksek güç yükselteci yarı doğrusal modda çalıştırılmaktadır. Bu şekilde en etkin karıştırma Gaussian gürültü dalga formu karakteristiğininde korumaktadır. Bu karıştırmada yükseltecin sıkıştırma noktası (compression point) gürültü voltajı RMS değerinin 7 -10 dB üzerinde bir değer bölgesine ayarlanmak suretiyle karıştırıcı işareti elde edilmektedir. İkinci olarak da yüksek güç yükselteci doyum noktasında çalıştırılarak gürültü elde edilmektedir. Böylece çıkış gücü maksimize edilir. Ancak, bunun yanında çıkış gürültü işaretinin genlik olasılık dağılımı da gürültü tepelerinin kırılmasından dolayı Gaussian yapısından ayrılmaktadır.

Bir başka gürültü üretim yöntemi olarak gürültü işareti rastgele dalga formu kullanılarak frekans modülasyonu ya da faz modülasyonuna tabi tutulur. Bu işlem DINA tekniğinde kullanılan güç yükseltecine benzer bir güç yükselteci ile ya da Geriye Dalga Osilatörü (Backward Wave Oscillator (BWO)) gibi hızla ayarlanabilen bir güç osilatör kullanılarak gerçekleştirilmektedir [Schleher,1999].

Gürültü karıştırma, radar skopunda bir sektörde tüm menzil boyunca video saturasyonu olarak tanımlanmaktadır. Burada saturasyona uğrayan sektörün genişliği karıştırıcı işaretinin güç ve menziline bağlıdır [Walter,1993].

Aldatma karıştırması (Deception jamming)

Karşı platform alıcı cihazının yanlış bilgi almasına ve alıcı cihazında karışıklığa neden olmayı amaçlayan karıştırma tekniğidir. Bu tip karıştırma, karşı platform verici cihazından alınan işaretin kaydedilmesi ve radar işaretine benzer bir işaretin yanlış bilgiler içerecek şekilde tekrar yayımlanması şeklinde yapılmaktadır.

4.1.2.2. Pasif karşı tedbirler

Radar huzmesi önüne radarın kafasını karıştırmak amacıyla atılan aldatıcı yansıtıcılar ile yapılan karıştırma tekniğidir.

4.1.3. Elektronik karşı karşı tedbirleri (ECCM)

ECM tedbirlerine karşı kullanılan tedbirlerdir. Elektronik kovma olarak ta anılmaktadır.

4.2. Görüntüleme Radarlarına Karşı Elektronik Karıştırma Tedbirleri

ECM teknikleri bölümünde de görüldüğü gibi, bir radar alıcısına karıştırma işaretinin sokulması için iki temel yol bulunmaktadır. Birinci olarak ortam koşullarından kaynaklanan gürültüye ek olarak üretilen gürültü işaretlerinin radar anteni içerisine ana – lob ya da yan – loblar kullanılarak sokulması ile olmaktadır. İkinci olarak da sahte işaretler, radar alıcısını aldatmak, karışıklığa yol açmak amacıyla yine radar ana – lobu ya da yan – lobu aracılığıyla alıcıya verilmektedir. Bu sahte işaretlere karşın radarın tepkisi, karıştırıcı, gerçek radar vericisi dalga formunun yakın bir şekilde taklidini yapabilirse maksimum seviyede olmaktadır. Gerçek gönderilmiş dalga formu bakımından, karıştırıcı işareti dalga formu zarfında ya da faz yapısında bir sapma veya uyumsuzluk kaybına neden olabilir. Bu uyumsuzluk ilave karıştırıcı gücüyle dengelenmelidir. Bu yüzden aldatıcı karıştırıcılar genellikle, radar işaretini bir eş evreli zaman gecikmesiyle ve frekans çevirisiyle birlikte tekrarlamaktadır [Schleher,1999].

Gürültü karıştırması için hedef radarın parametrelerine (çalışma frekansı dışında) ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu amaçla karıştırıcı sistemi Sayısal Anlık Frekans Ölçüm (Digitally Instantaneous Frequency Measurement (DIFM)) alıcısına sahiptir. Bu alıcılardan elde edilen veri voltaj kontrollü bir osilatöre beslenerek karıştırma gerçekleştirilir. Karıştırıcı sistemi bu sistem kombinasyonu ile SAR sistemi ana – lob karıştırımı için yeterli zamana sahiptir. Ancak, görüntülenmeye çalışılan hedef aynı zamanda arkada yol izlerine sahip olabilir (Örn. gemi ve su üzerindeki izleri). Her ne kadar hedef SAR ana – lobundan yapılan etkin gürültü karıştırmasıyla saklanılabilsede, SAR sistemi bu söz konusu izler sayesinde hedefi bulabilmektedir. Bu yüzden karıştırıcı sistemi hedef izlerini de örtebilecek kadar

hızlı olması gerekmektedir [Condley,1990]. Aldatıcı karıştırmada radar işaretinin algılanmasının yanında, işaretin izge ve zamansal karakteristikleri de kaydedilmektedir. Günümüzde bu tarz kaydetme işlemi TWT (Traveling Wave Tube) hafıza döngüsü ya da DRFM (Digital Radio Frequency Memory) gibi sayısal bir cihaz kullanılarak yapılmaktadır. Aldatıcı karıştırmaya nazaran, gürültü karıştırmaya karşın radarlar daha etkin çözümlere sahip olduklarından, aldatıcı karıştırma teknikleri ile radarlar üzerinde daha etkin karıştırma yapılabilir.

Aldatıcı karıştırmanın bir diğer özelliği ise modern radarlara karşı etkinliği gürültü karıştırmaya nazaran daha fazla olmasıdır. Aldatıcı karıştırıcı (gürültü karıştırıcı ile karşılaştırıldığında), darbe - Doppler ve darbe – sıkıştırma gibi tip eş evreli teknikler kullanan modern radarlara karşı daha etkindir. Eş evreli teknikler kullanan radarlar gürültüye karşı büyük işleme kazançlarına (Örn. 20 dB'ye 60 dB oranında) sahip olabilirler. Böylece bu radarlar ister istemez hedef – benzeri işaret dönüşlerini (Örn. aldatıcı karıştırıcı işareti) büyük oranda kabul ederken diğer tarafta gürültü işaretlerini bir o kadar reddetmektedir [Schleher,1999].

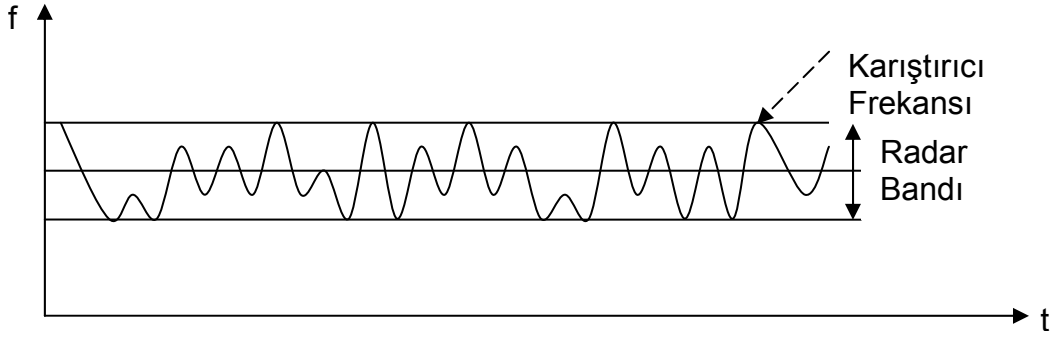
Bu modern radarlar gibi darbe – sıkıştırma gibi teknikleri kullanan görüntüleme radarları da aynı şekilde gürültü karıştırmanın yanında aldatıcı karıştırmadan daha fazla etkilenmektedir. Sonuç olarak, etkin bir karıştırma, karşı platform verici işaretlerinin ne kadar iyi derecede tespit edilebildiği ve ne kadar original olarak kopyalanabildiği ile doğru orantılı olmaktadır.

4.2.1. Gürültü Karıştırma Tipleri

Noktasal gürültü karıştırması (Spot noise jamming)

Radar işaretlerinin sabit bir frekans aralığını kullandığı biliniyorsa bu durumda en etkin gürültü karıştırma yöntemi olarak noktasal karıştırma kullanılmaktadır. Uygulanan karıştırma işaretinin bandı tümüyle alıcı frekans bandına denk geleceğinden radar bandında mevcut gürültü seviyesi, karıştırıcı işaretinin gücü ile kontrol edilebilir halde olacaktır.

Şekil 4.1.'te görüldüğü gibi noktasal karıştırmada gürültü bandı tam olarak radar alıcı bandı içerisine düşmektedir.



Şekil 4.1. Noktasal karıştırma işareti ve radar bandı frekans – zaman alanı gösterimi

Noktasal karıştırmada kullanılan gürültü işareti de baraj gürültü işaretinde olduğu gibi tüm görüntülenen alan boyunca etkin olup tekdüze yoğunluktadır. Yalnız etki olarak baraj karıştırmadan biraz farklılık içermektedir. Radar alıcısına gelen noktasal gürültü işareti dar bant işaret olduğundan, bu işaretin Fourier dönüşümü alındığında oluşan benekler genişlemektedir. Genişleyen benek boyutu menzil alanında ısıl ve parazit yankılar sebebiyle oluşan beneklerden büyük olmasına rağmen çapraz alanda bu gürültülerin oluşturduğu benek boyutuna eşit benek boyutuna sahiptir [Shenghua,2004]

Noktasal gürültü karıştırma sadece sabit frekans kullanan radarlarda etkin şekilde kullanılmaktadır. Aşağıda sıralanan karşı – karşı tedbirler ile bu tip karışırmaların etkileri zayıflatılmaktadır [Neri,2001].

- Frekans Atlaması (Frequency Hopping)
- Frekans Çeşitlemesi (Frequency Diversity)
- Yan – lob Bastırılması (Side – lobe Blanking)
- Yan – lob elemesi (Side – Lobe Cancellation)

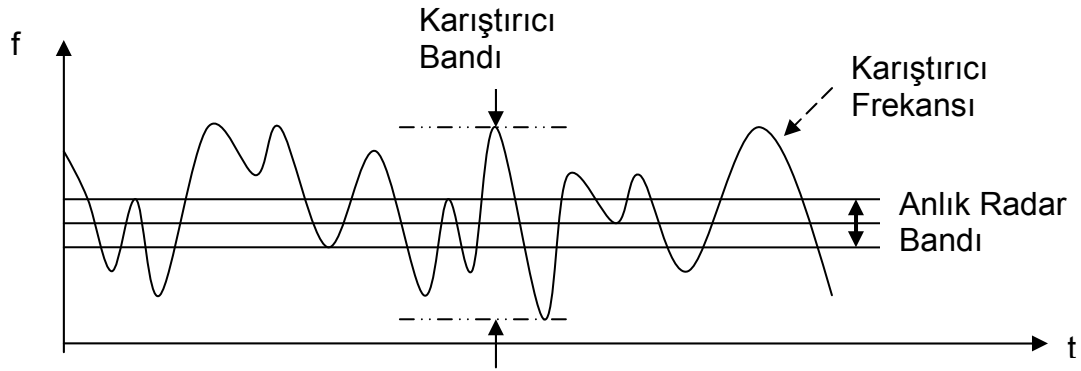
Şekil 4.3.'de gösterilen yapı aynı şekilde noktasal karıştırma için de geçerlidir. Yalnız amaçlanan bant bilinen sabit bir değerde olduğundan yapı içerisinde yer alan süzgeç frekans aralığı değeri bu banda ayarlanmaktadır.

Baraj gürültü karıştırması (Barage noise jamming)

Karıştırılmak istenen radar sistemi frekans atlama ya da frekans gezme özelliklerine sahipse burada kullanılacak en iyi gürültü karıştırma yöntemi baraj

karıştırma olarak tanımlanmaktadır. Karıştırma işaretlerinin elektromanyetik spektrumun geniş bir bölümünü işgal ettiği düşünüldüğünde birkaç karıştırıcı işaret frekansının radarın kullandığı banda denk geleceği ve hedef bilgilerini kolayca silebileceği düşünülebilir. Ancak, şu unutulmamalıdır ki karıştırıcı geniş bir spektrumu hedef alındığından radar alıcı bandına düşen güç miktarı az olacaktır.

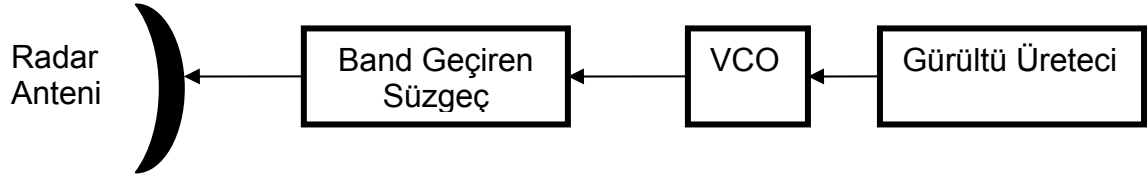
Baraj karıştırma sürekli modda yapılmaktadır. Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi B_j (etkin gürültü bandı), tüm spektral banda yayık durumda olup radar gürültü tabanına katkıda bulunan sadece radar alıcı bandıyla sınırlı olan kısımdır. Karıştırma işareti görüntülenen tüm alan boyutunca yayılmış olup tekdüze yoğunluktadır. Baraj karıştırma, tüm menzil bandını ve mümkün olan tüm Doppler frekansları menzillerini kaplamaktadır [Walter 1993].



Şekil 4.2. Baraj karıştırma işareti ve radar bandı frekans – zaman alanı gösterimi

Normal olarak, gürültü girişimine maruz bir SAR, görüntüsünde benek arz etmektedir. Baraj karıştırma ile tüm bant yukarıda da bahsedildiği gibi gürültü bileşenleri ile kaplanmış durumdadır. Bu karıştırma ile radar görüntüsü üzerinde elde edilen benek boyutu menzil ve çapraz – menzil çözünürlük hücresi seviyesindedir. Evre uyumsuz eklenen birçok gürültü bileşenleri radar işlemcisinde çoklu bakış işlemeye tabi olmakta ve sonuç olarak pikseller arasındaki parlaklık farklılıklarını düzlemektedir. Görülen etki, ısı gürültünün oluşturduğu etkiye benzemektedir [Shenghua,2004].

Şekil 4.3'de Baraj karıştırma verici yapısı görülmektedir.



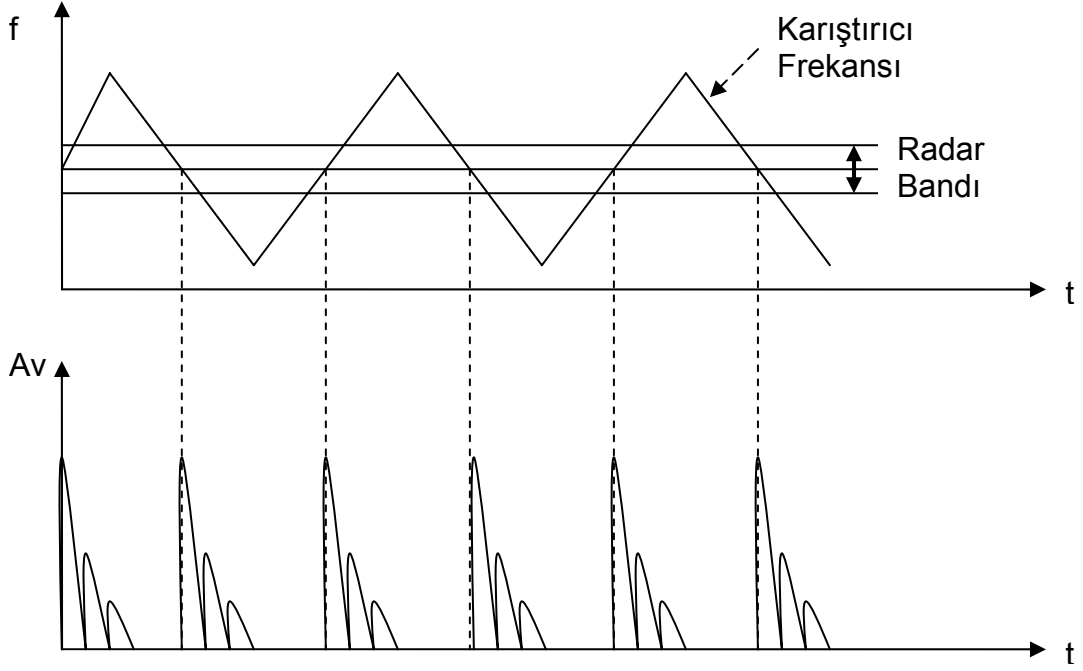
Şekil 4.3. Baraj karıştırma verici yapısı

Baraj karıştırma, noktasal gürültü karıştırmaya nazaran daha geniş bir bandı işgal etmesine ve değişik frekanslarda çalışan bir radar sistemine karşın daha etkin bir karıştırma yapmasına rağmen, karıştırıcı tüm enerjisini bant boyunca yaymak durumunda kalacağından radar alıcısı üzerindeki etkisi düşük seviyede kalacaktır. Noktasal gürültü karıştırmada bahsedilen karşı tedbirler aynı şekilde baraj karıştırma içinde geçerli durumdadır.

Taramalı gürültü/sürekli dalga karıştırması (Swept noise/CW jamming)

Taramalı gürültü Radar skopunda yanlış hedefler oluşturarak radar alıcısında karışıklığa yol açmak için yapılmaktadır. Baraj karıştırma ile benzer özellikler göstermektedir ancak, baraj karıştırmadan farklı olarak yanlış hedefler oluşturma özelliğine sahiptir. Çoklu frekans ile çalışan bir ve ya birden çok radar sistemi için karıştırıcı bu radarlara ait işaretleri tespit etmekte zorlanmaktadır. Karıştırma için bu radar sistemlerin frekans bandı diğer gürültü karıştırma teknikleri ile sürekli olarak kaplanamamaktadır. Bu gibi bir durumda karıştırıcı işareti tüm frekans bandını zamanla doğrusal olarak taramaktadır. Böylece radar bandı üzerinde karıştırma sürekliliği sağlanmış olmaktadır [Barton,1998].

Bu karıştırma için dalga formu olarak Şekil 4.4.'de görüldüğü gibi linear FM modülasyonlu karıştırıcı işareti kullanılmaktadır. Bu dalga formu ile geniş – bant taraması yapılmakta ve bu karıştırıcı frekansı radar alıcısı kullanıcı bandına denk gelen frekans bandından geçerken zaman bölgesine yansıyan yüksek genlikli ani darbeler sebep olmaktadır [Neri,2001]. Şekil 4.4.'de bu ani darbeler açıkça görülmektedir.

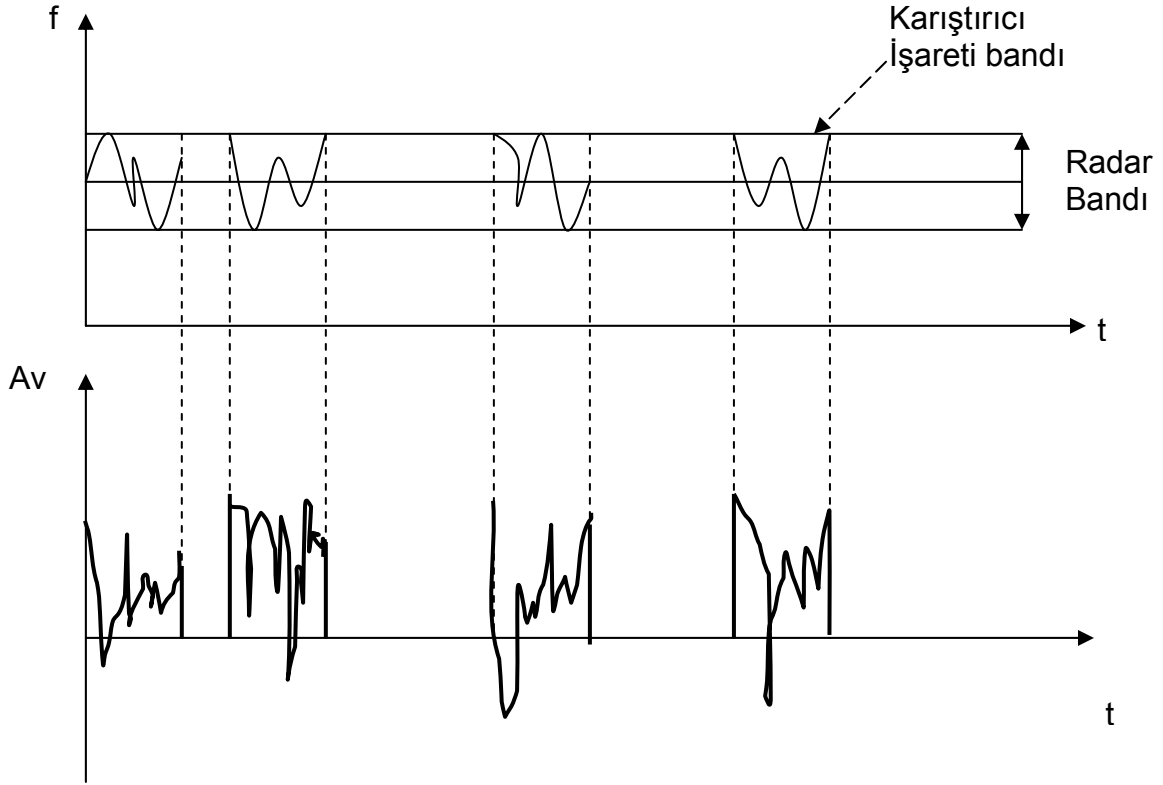


Şekil 4.4. Taranmış gürültü/sürekli dalga karıştırması frekans – zaman ve genlik – zaman diyagramı gösterimi [Neri,2001]

Yukarıda bahsedilen karıştırmaya karşı alınabilecek tedbirler bu karıştırma tipinde de kullanılmaktadır. Ancak, en etkin ECCM tekniği 'Dicke-fix' alıcısı kullanmaktır [Neri,2001].

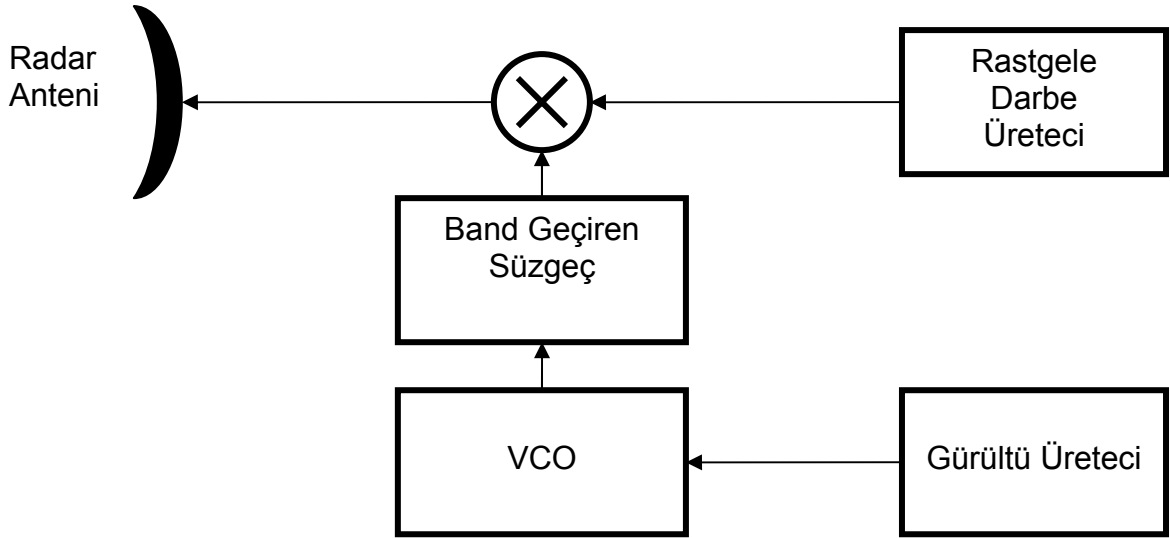
Rastgele darbe karıştırması (Random pulse jamming)

Bu karıştırma yönteminde gürültü darbeleri rastgele zaman farklılıklarıyla yollanmaktadır.(Bkz. Şekil 4.5.) Bu durumda gürültü darbeleri aydınlatılan alanın herhangi bir bölümünden geliyor olarak algılanmaktadır.



şekil 4.5. Rasgele darbe karıştırmasının frekans – zaman ve genlik – zaman alanlarında gösterimi.

Bu karıştırma yöntemi fasılalar ile yapıldığından etkin gürültü gücü ortalama karıştırıcı gücüne eşittir. Frekans bandı açısından karıştırma menzil bandı radar alıcı bandı içerisinde yer almaktadır. Karıştırıcı gürültüsü tüm görüntüleme alanında var olup tekdüze yoğunluğa sahiptir. şekil 4.6.'da rastgele darbe karıştırıcı yapısı görülmektedir.



Şekil 4.6. Rastgele darbe karıştırıcı yapısı

4.2.2. Aldatıcı karıştırma

Bu teknik, niyetli ve kasıtlı olarak genlik, frekans, faz ve ya daha başka modüle edilmiş kesikli ve sürekli işaretler gönderimi ya da tekrar gönderimi ile hedef radarı yanıltmayı amaçlamaktadır.

Tekrarlayıcı karıştırma (Repeater jamming)

Bir karıştırıcı, radarın görmeyi amaçladığı gerçek hedefleri yanında yalancı hedefler de sunabilmektedir. Fakat bunun etkin olabilmesi için radardan alıp kaydettiği işaretin yansımasını en azından bir yapay açıklık zamanında değişiklik olmaksızın uygulaması gerekmektedir [Walter,1993].

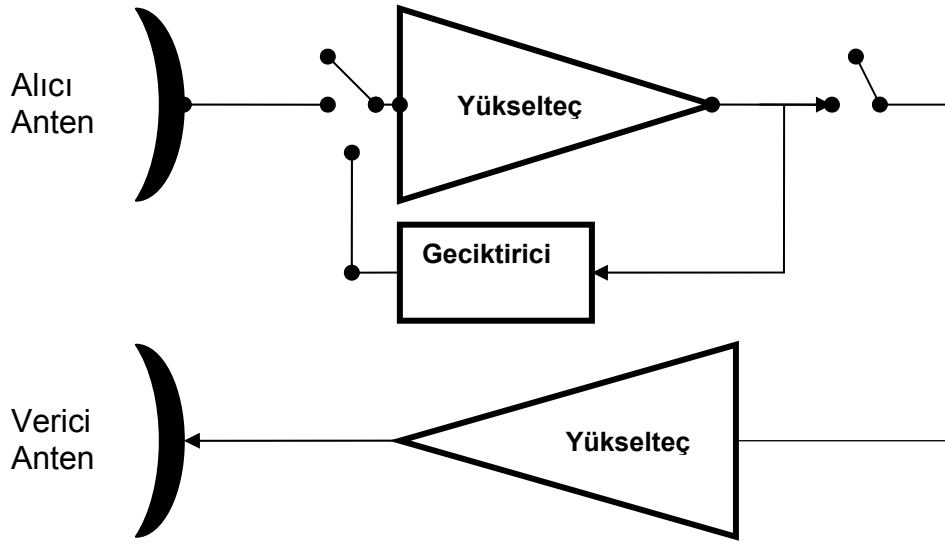
Tekrarlayıcı karıştırmanın etkinliği, alıcı bölümünde yapılan radar işaretini kaydetme işleminin kalitesi ile doğru orantılıdır. Yeniden yayımlanan sahte işarete karıştırıcı tarafından radar darbe kodlaması ve Doppler karakteristikleri devam ettirilirse, bu şekilde SAR tarafından algılanan işaretler, menzil ve çapraz – menzil alanlarında sıkışmakta ve yanlış hedeflerin yoğunluğu, sabit nokta hedeflerden radar işaret dönüşlerinde olduğu gibi, işaret işleme kazançlarıyla artırılmaktadır [Walter,1993].

Bu durumda işaretin karakteristik özellikleri iyi şekilde belirlenemezse, tekrar yayımlanan işaret karşı radar sistemi tarafından gürültü şeklinde yorumlanmaktadır. Çünkü kendi verici işaretine duyarlı radar işlemcisi, verici

işaretini göremediğinden alınan diğer tüm işaretlere gürültü muamelesi yapmaktadır.

İşaret karakteristikleri iki şekilde değerlendirilmektedir. Bunlardan biri darbe içi karakteristikleridir. Bunlara darbe genişliği, işaret frekansı, frekans kayma oranı gibi özellikler örnek verilmektedir. Diğer ise Doppler karakteristikleridir. Tekrarlayıcı karıştırmada yukarıda da bahsedildiği gibi eğer Doppler karakteristikleri geri gönderilen işarete eklenmez ise menzil alanında sıkıştırılmış çözünürlük hücresi genişliğinde parlak bir çizgi oluşturmaktadır. Doppler bilgisi de eklendiğinde bu parlak çizgi çapraz – menzil alanında da sıkıştırılmakta ve sonuç olarak bir sahte hedef şeklinde kullanıcıya görünmektedir [Walter, 1993].

Tekrarlayıcı karıştırmayı gerçekleştiren sistem yapısı Şekil 4.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Tekrarlayıcı darbe karışırma verici yapısı

SAR sistemleri sadece durağan hedefleri gözlemlemek için kullanılmamakta, aynı zamanda hareketli hedefleri de gözlemleyebilmektedir. Hareketli hedefleri gözlemlemek için kullanılan sistemler 'Parasitic' SAR sistemleri olarak tanımlanmaktadır. Bu tip radarlarda alıcı sistemi birkaç bileşenden oluşmaktadır. Alıcı sistemi verici sistemi ile aynı yol üzerinde fakat aralarında büyükçe bir mesafe olacak şekilde işlevini gerçekleştirmektedir. Bu sistem üzerinde yapılan gürültü karışırması ve tekrarlayıcı karışırma teknikleri, ilgili SAR sisteminin

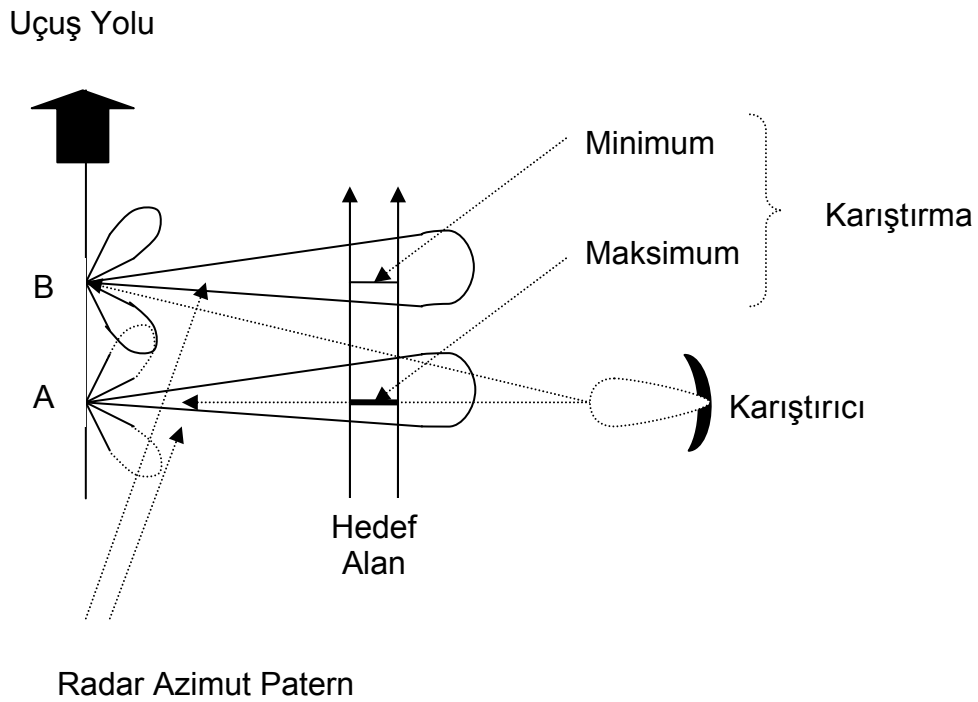
Hareketli Hedef Göstericisi (Moving Target Indicator, MTI) karakteristiğinden dolayı parazit muamelesine tabi tutulup kolayca elenmektedir. Bu gibi sistemlerin karıştırılması için hareketli aldatıcı karıştırma uygulanmaktadır. Çok sayıda üretilen hareketli sahte hedefler ile bu sistemlerin karıştırılması gerçekleştirilmiştir [Wei,2005]

Bu karıştırma tipi, radarlar üzerindeki etkisi gürültü karıştırmaya nazaran çok fazladır. Karıştırıcı sistemi radar işaretlerinin aynısını ürettiğinden radar alıcısına bu sahte işaretlerinin girmesi çok kolaydır. Bu radarlara karşı yapılan aldatma karışımlarına karşı tedbir olarak Darbe Çeşitleme (Pulse Diversity), Ultra Geniş Bant Gürültü Radar ve Değişikliğe Uğratılmış Doğrusal FM işaretlerini kullanma olarak sıralanabilir.

4.2.3. Karıştırıcı etkinliği

4.2.3.1. Algılanan karıştırıcı gücü

Şekil 4.8.'da [Walter,1993]'in örneğinde yan – bakış modundaki radar bir hedef hücreyi görüntülemektedir.



Şekil 4.8. Karıştırma sistem geometrisi ([Walter,1993]'dan değiştirilerek)

Azimut paterninde radar anteni ana lobu olduğu kadar yan loblarda içermektedir. Radar platformu 'A' noktasındayken, karıştırıcı ana lob üzerinden doğru olarak karıştırma uygularken, platform 'B' noktasına hareket ettiğinde karıştırıcı, araç sensörü azimut paterninde 1. yan lob boşluğuna karıştırma uygulamaktadır. Bu durumda alınan işaret gücü minimum değerdedir. Ana ve yan loblardan da görüleceği gibi maksimum karıştırma geometri olarak ana lobu hedef alabilen karıştırıcı işaretiyle yapılabilmektedir. Alınmış karıştırma gürültüsünün izgesel karakteristikleri göze alınmaksızın, radar ana lobundan alınan güç yoğunluğu,

$$p_{ji} = \frac{p_j G_j}{4\pi R_j^2 L_j} A_r = p_j G_j G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi R_j}\right)^2 \quad (4.1)$$

şeklinde olup, burada:

p_{ji} : radar ana lobundan alınan karıştırıcı güç yoğunluğunu,

p_j : karıştırıcı gönderme işareti güç yoğunluğunu,

G_j : karıştırıcı antenin radar yönündeki kazancını,

G_t : karıştırıcı yönündeki radar anten kazancını,

λ : kullanılan radar işareti dalga boyunu,

R_j : karıştırıcı ve radar arasındaki mesafeyi,

A_r : karıştırıcı yönüne bakan radar anten alanını ifade etmektedir.

Görüntüleme işlemi boyunca karıştırıcı antenin kazancı sabit, radar anten bakış açısı ise hareket yoluna dik alınmaktadır. Hareket yolu boyunca karıştırma işareti için anten kazancı yan - loblardan dolayı değişiklik göstermektedir.

4.2.3.2. SAR için işaret gürültü oranı

Karıştırıcı İşaretinin beklenildiği olabilmesi için karıştırıcı vericisinin, radar alıcısına gelen ve radarın istediği işaret gücünü aşabilecek derecede yeterli Etkin Işıma Gücünü (E.R.P.) üretebilir olması gereklidir. Radar denklemi,

$$\frac{S}{N} = \frac{P_t G_t \sigma A_r}{(4\pi)^2 R^4 k T_0 B F_n} \quad (4.2)$$

şeklinde olup, burada:

S: radar hedef sinyali gücünü,

N: radar sistemi iç gürültü gücünü,

P_t : radar verici işareti gücünü,

G_t : radar verici anten kazancını,

σ : hedefin radara göre kesit alanını,

R: radarın hedefe olan uzaklığını,

k: Boltzman sabitini,

T_0 : gürültü sıcaklığı (290°K)'ni

B: gürültü bandını ve

F_n : gürültü faktörünü ifade etmektedir.

Yapay anten oluşturma yolu ile azimut yönde çözünürlük sağlayan bir radarda, dahil edilen darbe sayısı sebebiyle ek bir işaret gürültü oranı artırıcı faktör vardır. Dahil edilen darbe sayısı, PRF ile radar platform uçuş süresinin çarpımına eşittir [Skolnik,1996].

Bahsedilen bu faktör,

$$F = \frac{\tau_u}{\tau_c} \frac{PRF.L}{V} \quad (4.3)$$

şeklinde olup, burada:

τ_u : sıkıştırılmamış darbe süresini,

τ_c : sıkıştırılmış darbe süresini,

L : radar platform uçuş mesafesini ve

v : radar platform hızını ifade etmektedir.

Görüldüğü gibi sıkıştırılmış radar yankısının sıkıştırılmamış olan yankıya nazaran işaret gürültü oranına yaptığı kazanım da bu faktörle ifade edilmiştir.

$$L = \frac{R\lambda}{2\delta_{az}} \quad (4.4)$$

olarak ifade edilir. Burada δ_{az} radar azimut çözünürlük hüccresinin uzunluğunu göstermektedir. Anten kazancı,

$$G_t = \frac{4\pi A_r}{\lambda^2} \quad (4.5)$$

ortalama güç,

$$P_{av} = P_t \tau_u PRF \quad (4.6)$$

radar kesit alanı,

$$\sigma = \rho \delta_{az} \delta_r \sin \psi \quad (4.7)$$

şeklinde olup, burada da, δ_r , menzil çözünürlük hüccresi genişliğini, ρ hedef yansıtıcılığını, ψ ise huzmenin hedefle yataya göre yaptığı açığı ifade etmektedir.

Bu bulunan değerler, Eş. 4.2.'de yerlerine yerleştirilip, eşitlik tekrar düzenlenecek olursa, SAR sisteminde işaret gürültü oranı,

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{av}}{(8\pi) k T_0 F_n R^3 \lambda B \tau_c} \frac{A_r^2 \rho \delta_r \sin \psi}{v} \quad (4.8)$$

olarak yazılmaktadır. Tüm kaynaklardan gelen gürültüler, bunlar ısı nitelikte olabilir, radar görüntüsü üzerinde yarışmaktadırlar. Aynı zamanda nicemleme ve doyunluk gürültüsünde olduğu kadar belirsizliklerin oluşturduğu bir gürültü de olabilir. Bunların hepsi radar görüntüsünün gürültü tabanına katkıda bulunmaktadır [Walter,1993].

Karıştırmanın efektifliğini ölçmek için gürültü tabanını oluşturan gürültüler ayrı ayrı değerlendirilmesi gereklidir. Ancak radar görüntüsünde silmede etkin olabilmek için karıştırıcı gürültü, gürültü taban seviyesini belirgin ölçüde aşmalıdır. Böylece diğer gürültü oluşturan faktörler göz ardı edilebilir.

4.2.3.3. Gürültü karıştırma için işaret karıştırıcı oranı

Eş. 4.8'de bulunan işaret gürültü oranı maksimum radar menzili için aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$R_{\max} = \left[\frac{P_{\text{av}} A_r^2 \rho \delta_r \sin \psi}{(8\pi) (S/N)_{\min} kT_0 F_n B \tau_0 \lambda v} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.9)$$

Karıştırıcı yoğunluğunun gürültü güç yoğunluğundan çok yüksek olduğunu düşünelim ($p_{ji} \gg kT_0 F_n$). Buradan hareketle,

$$R_{\max} = \left[\frac{P_{\text{av}} A_r^2 \rho \delta_r \sin \psi}{(8\pi) (S/J)_{\min} p_{ji} B \tau_0 \lambda v} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.10)$$

şeklinde yazılıp, burada:

$(S/J)_{\min}$: uygun hedef ve algılama istatistiği için işaret gürültü oranını,

R_{\max} : radarın karıştırıcı etkisini aşabildiği menzil değerini ifade etmektedir [Schleher,1999].

Eş. 4.10.'da p_{ji} , radar alıcısındaki karıştırıcı güç yoğunluğu, ve anten kazancı yerlerine yerleştirilecek olursa,

$$R_{\max} = \left[\frac{P_{\text{av}} \lambda G_t \rho \delta_r \sin \psi R_j^2}{8\pi (S/J)_{\min} B \tau_0 p_{ji} G_j v} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.11)$$

şeklinde yazılmaktadır. Burada karıştırıcı güç yoğunluğu,

$$P_{ji} = \frac{P_j}{B_j} \quad (4.12)$$

olmak üzere, P_j karıştırıcı etkin gücü ve B_j karıştırıcı bant genişliği olarak ifade edilmektedir. Eş. 4.12., Eş. 4.11.'de yerine yerleştirilirse R_{max} değeri,

$$R_{max} = \left[\frac{P_{av} \lambda \rho \delta_r \sin \psi R_j^2 G_t B_j}{8\pi (S/J)_{min} \tau_0 P_j v G_j B} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.13)$$

şeklinde bulunur. Bu eşitlikte $\frac{B_j}{B}$ oranı karıştırıcı işaret oranını göstermektedir. Bu

oran $\frac{B_j}{B} \leq 1$ ise yapılan karıştırma noktasal karıştırma, $B_j \gg B$ ise yapılan karıştırma baraj karıştırmadır.

4.2.3.4. Tekrarlayıcı karıştırma için karıştırıcı işaret oranı

Bir tekrarlayıcı karıştırıcı etkinliği radar alıcısında hedeften gelen yankı gücünün karıştırıcı tarafından taklit edilen ve radar alıcısına erişilen işaret tarafından bastırılabilmesi ile ilgilidir. Karıştırıcıya işaret (J/S) oranı radar devrelerinde yeterince etkili olabilmek için en az 7 dB – 10 dB seviyesinde olmalıdır [Schleher,1999]. Karıştırıcı alıcı tarafından alınan işaretin gücü,

$$P_{JR} = \frac{P_t G_t \lambda^2 G_{JR}}{(4\pi R)^2 L_p} \quad (4.14)$$

şeklinde yazılıp, burada:

G_{JR} : karıştırıcı alıcı anten kazancını,

L_p : ortam kayıplarını ifade etmektedir.

Tekrarlanmış işaretin radar alıcısında oluşturduğu güç,

$$P_{RJ} = \frac{P_t G_t \lambda^4 G_{JR} G_{JT} G_e}{(4\pi R)^4 L_p^2} \quad (4.15)$$

şeklinde olup, burada:

G_{JT} : karıştırıcı verici anten kazancını

G_e : polarizasyon dışındaki kayıplar çıkıldığında tekrarlayıcının tüm kazancını ifade etmektedir.

Radar alıcısında hedeften yansıyan yankı işareti gücü ise,

$$P_R = \frac{P_t G_t^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (4.16)$$

şeklinde olup, buradan karıştırıcı işaret gücü oranı,

$$\frac{J}{S} = \frac{G_e G_{JR} G_{JT} \lambda^2}{4\pi \sigma L_p^2} \quad (4.17)$$

şeklinde yazılmaktadır. Beklendiği gibi bu oranın radar menziline bağımsız olduğu görülmektedir. Karıştırıcının genel kazancı

$$G_{REP} = G_e G_{JR} G_{JT} = \frac{4\pi J \sigma L_p^2}{\lambda^2 S} \quad (4.18)$$

şeklinde olup. Bazen tekrarlayıcı işareti, oluşan salınımların giderilmesi amacıyla yüksek hızda kapılanabilir. Bu kapılma etkin karıştırıcı işaretinin ortalama gücünü düşürür [Schleher,1999]. Kapılanmış bir radar işareti için karıştırıcı genel kazancı,

$$G_{REP} = \frac{4\pi J \sigma L_p^2}{\lambda^2 \beta S} \quad (4.19)$$

şeklinde olup, radarın periyodundaki görev zamanı oranı $\beta \leq 1$ 'de olarak ifade edilmektedir.

4.2.4. Karıştırma tedbirleri ile ilgili literatür araştırması

SAR sistemlerine karşı karıştırma tedbirleri ile ilgili olarak özellikle [Shenghua,2004] ve [Condley,1990] olmak üzere iki çalışmaya rastlanmıştır. Bu

kaynaklarda gürültü karıştırmaları ve aldatma karıştırmaları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu tez çalışmasında temel olarak bu iki kaynak incelenmiştir.

Görüldüğü üzere karıştırma tedbirleri (ECM) olsun, karıştırma tedbirlerine karşı tedbirler (ECCM) olsun literatür taraması yapıldığında fazla kaynağa ulaşılamamaktadır. Bunun nedenleri, bu radar tiplerinin temellerinin 50'li yıllara dayanmasına rağmen tam anlamıyla kullanımının 90'lı yıllar itibariyle yaygınlaşması, bu radarlar için karşı tedbirlerinse bu yıllardan sonra geliştirilmeye başlanması, yeni bir teknoloji olup askeri açıdan bu tarz sistemler için geliştirilmiş ve bilinen tedbirler dışında olan tedbirlerin güvenlik açısından yayımlanmak istenmemesi olarak sayılabilir.

5. YAPAY AÇIKLIKLI RADAR KARIŞTIRMA SİMULASYONLARI

Simülasyonlar MATLAB programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, noktasal – ışık SAR modu alınmış ve görüntüleme, MATLAB dilinde yazılan bir program ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan bu MATLAB programı kaynak kodları EK’de sunulmuştur. Görüntüleme amacıyla programda, hedef alan bölgesi olarak ‘Google Earth’ programında yer alan, uydu ile çekilmiş yer fotoğrafları kullanılmıştır. Bu fotoğraflardaki piksel yoğunluk değerlerinin, ilgili alanın radar yansıtıcılığı ile orantılı olduğu varsayılarak sanal bir alan simüle edilmiştir. Karıştırma işaretleri ise yine MATLAB dili ile üretilerek Şekil 3.13.’de blok şeması gösterilen SAR yeniden oluşturma algoritması girişinde yer alan, hedef alandan yansıyan yankı işaretleri toplamı olan $s(t,u)$ işaretine eklenmiştir. Şekil 5.1.’de karıştırıcı işaretinin SAR görüntü oluşturma algoritmasına eklenişi gösterilmektedir. Burada $f_j(x,y)$ karıştırma altında oluşan SAR görüntüsüdür.



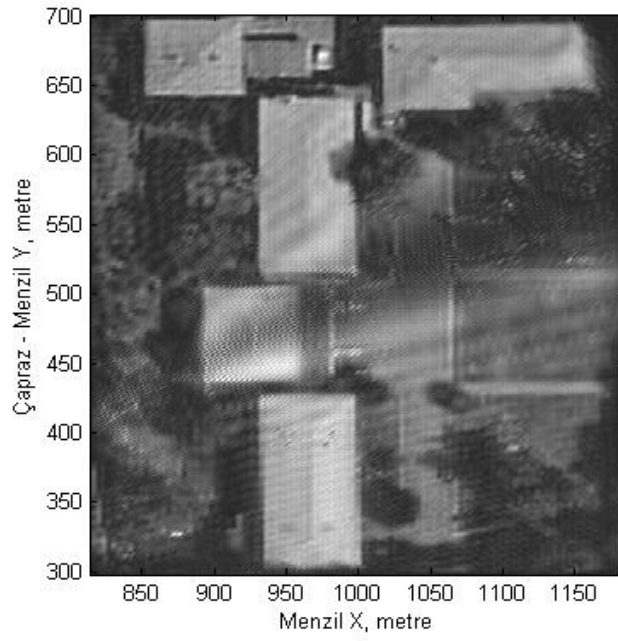
Şekil 5.1. Karıştırıcı işaretinin SAR görüntü oluşturma algoritmasında eklenişinin gösterimi.

5.1. Gürültü Karıştırma ile Görüntüleme

Bu kısımda görüntüleme ile ilgili simülasyonlar, üç tür gürültü karıştırma yöntemi olan noktasal, baraj ve rastgele darbe karıştırma altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.2.’de hedef alana ait gerçek görüntü ve Şekil 5.3.’te de bu hedef alana ait SAR simülasyon görüntüsü görünmektedir.



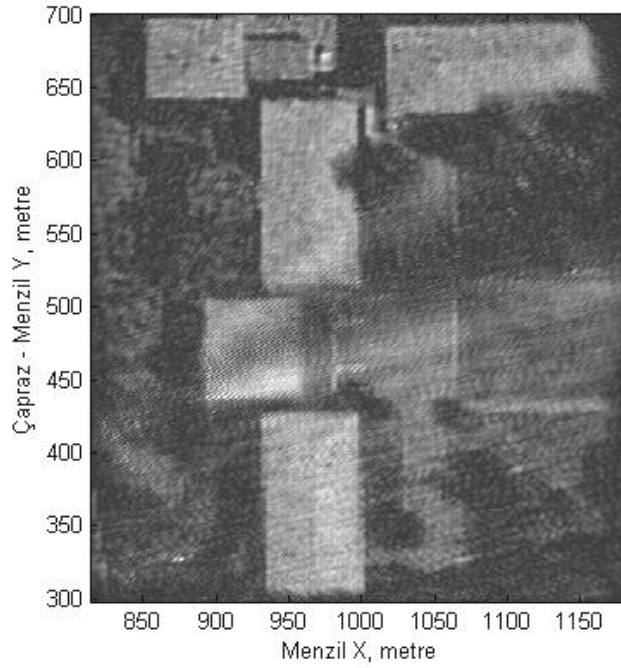
Şekil 5.2. SAR hedef alan gerçek görüntüsü.



Şekil 5.3. Karıştırmasız SAR simülasyon görüntüsü.

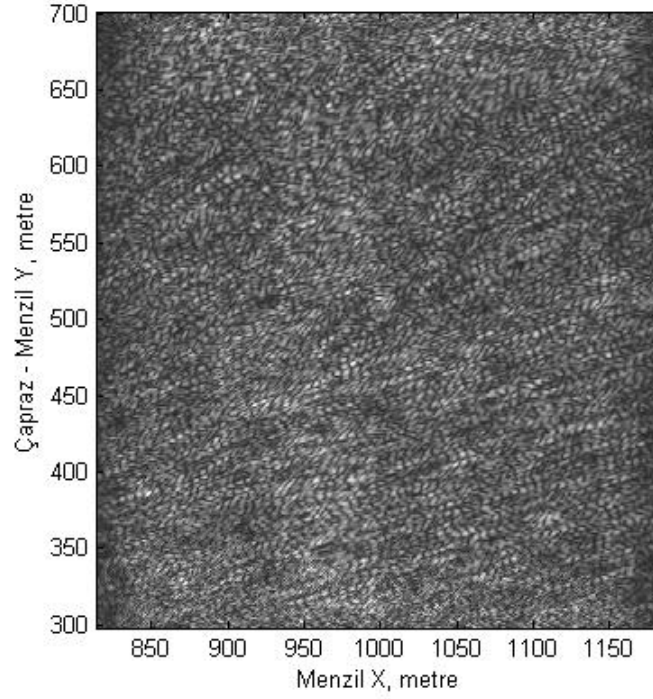
5.1.1. Noktasal gürültü karıştırması simülasyonları

Şekil 5.4. ve Şekil 5.5.'te sırasıyla düşük ve yüksek güçte noktasal gürültü karıştırması ortamında gerçekleştirilmiş iki adet SAR simülasyon sonuçları görünmektedir.



Şekil 5.4. Düşük güçte noktasal gürültü karıştırmasına maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.

Düşük güçte karıştırıcı işareti varlığında yapılan SAR görüntüleme, karıştırıcı etkin gücü, işlenmiş işaret gücünü geçemediğinden gerçek görüntüye nazaran yoğunlukların bir miktar bozulması dışında pek değişiklik olmamıştır. Burada yapılan simülasyonda karıştırıcı gücü, işaret gücünün yaklaşık olarak 20 dB yukarısında seçilmiştir.

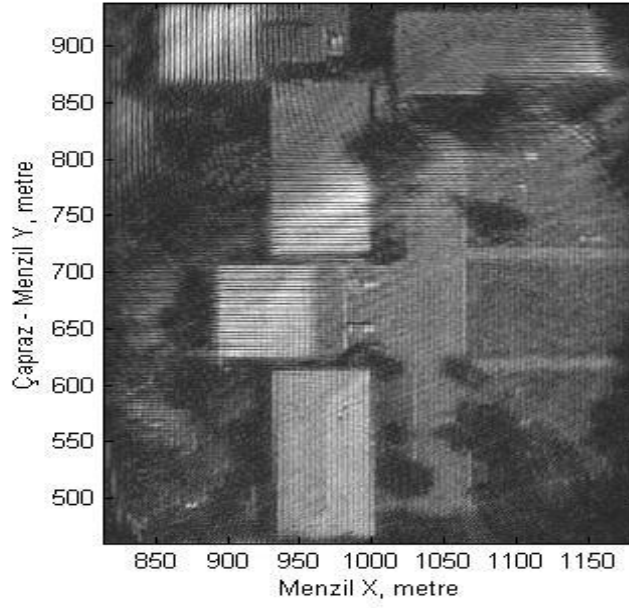


Şekil 5.5. Yüksek güçte noktasal gürültü karıştırmasına maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.

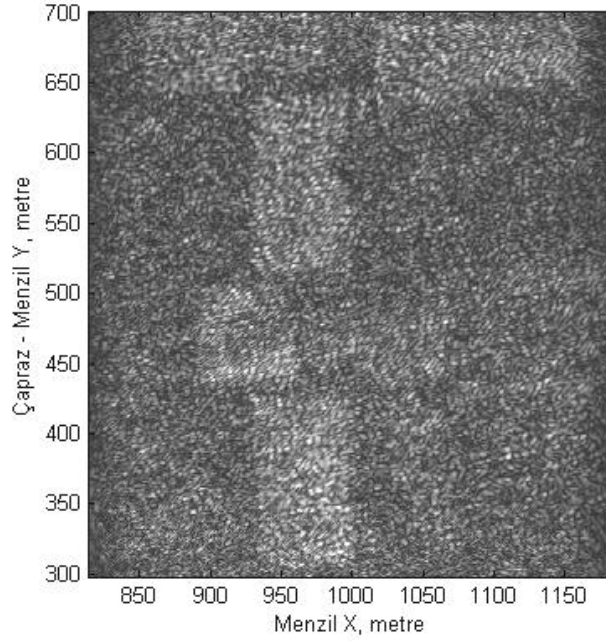
Yüksek enerjili karıştırıcı ile yapılan simülasyonda ise karıştırıcının etkinliği açıkça görünmektedir. Hedef alan tamamıyla karartılabiliştir. Burada karıştırıcı gücü, işaret gücünün yaklaşık olarak 34 dB yukarısında bir güç ile sisteme entegre edilmiştir.

5.1.2. Baraj gürültü karıştırması simülasyonları

Şekil 5.6. ve Şekil 5.7.da sırasıyla düşük güçteki ve yüksek güçteki baraj gürültü karıştırma ortamında gerçekleştirilmiş iki adet SAR simülasyon sonuçları görünmektedir. Birinci simülasyon için işaret gürültü oranına göz atıldığında yaklaşık olarak 13 dB'lik bir fark olduğu görülmektedir. Gerçek görüntüye nazaran ilk görüntüde yoğunluklardaki şiddetin hafifçe de olsa azaldığı gözükmemektedir.



Şekil 5.6. Düşük güçte baraj karıştırmaya maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.

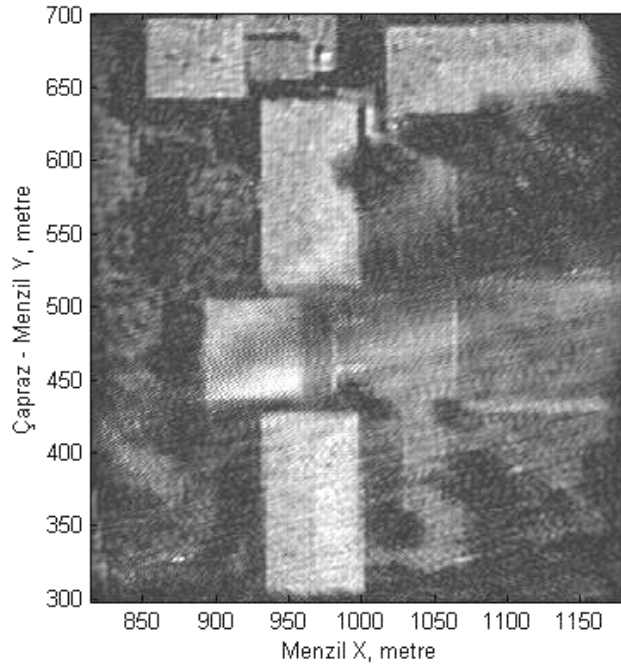


Şekil 5.7. Yüksek güçte baraj karıştırmaya maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.

Karıştırıcı gücünün artırılmasıyla yapılan ikinci simülasyon görüntüsünde radar alıcısında gürültü örneklerinin gücü gerçek işaretlerin gücünü aştığından gerçek bir karıştırma gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonda karıştırıcı gücü ise işaret gücünün yaklaşık olarak 33 dB üzerinde bir değerde seçilmiştir.

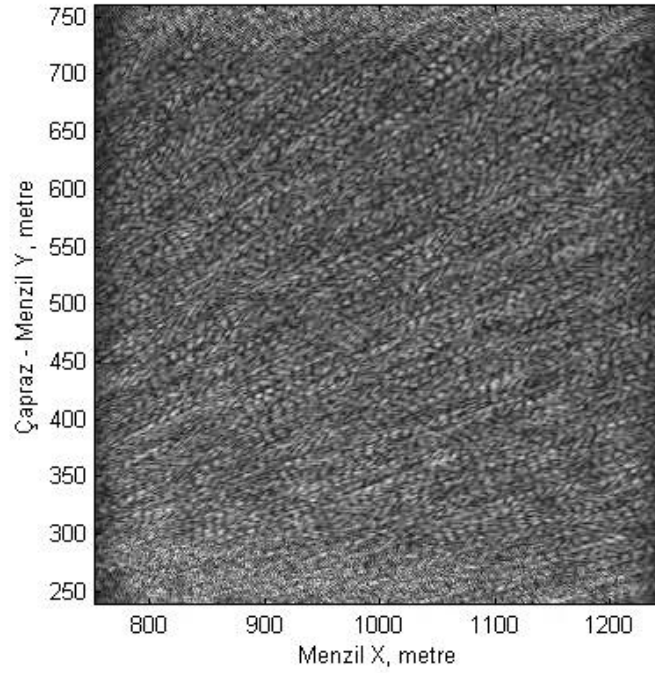
5.1.3. Rastgele darbe karıştırması simülasyonları

Şekil 5.8. ve Şekil 5.9.'da sırasıyla düşük güçteki ve yüksek güçteki rastgele gürültü karıştırması ortamında gerçekleştirilmiş iki adet SAR simülasyon sonuçları görünmektedir.



Şekil 5.8. Düşük güçte rastgele darbe karıştırmasına maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.

Şekil 5.8.'te gösterilen düşük güçte rastgele darbe karıştırması simülasyon sonucunda görüldüğü üzere diğer gürültü karıştırması simülasyon örneklerinde olduğu gibi karıştırma ile görüntüde gözle görülebilir farklılıklar meydana gelmiştir. Birinci simülasyonda karıştırıcı gücü işaret gücüne oranla yaklaşık 19 dB fazla seçilmiş olup, ikincisinde ise bu değer yaklaşık 33 dB'ye yükseltilerek Şekil 5.9.'da görüldüğü gibi tam anlamıyla bir karıştırma elde edilmiş ve hedef alan tamamıyla karartılmıştır.



Şekil 5.9. Yüksek güçte rastgele darbe karıştırmasına maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.

Gürültü karıştırma tekniklerinin SAR sistemi üzerinde etkileri simülasyonlar ile Şekil 5.4. – 5.9.'de yer alan örneklerde görülmektedir. Bilindiği üzere bu işlenen tekniklerden baraj gürültü karıştırması dışında kalan karışırtılarda radar çalışma bandı karıştırıcı cihaz tarafından bilinmektedir. Bant genişliği açısından düşünüldüğünde, baraj gürültü karıştırma, noktasal gürültü ve rastgele darbe karışırtılarında kullanılan aynı güç ile daha geniş bandı işgal etmeyi hedeflediğinden gücünü tüm banda yaymakta, dolayısıyla radar alıcı bandına düşen düşük bir güçle ile karıştırma yapmaya çalışmaktadır. Yüksek güçte gerçekleştirilen üç simülasyona bakıldığında baraj karıştırma noktasal gürültü ve rastgele darbe karışırtılarında kullanılan işaret genliklerinin iki katı genlikte çalışmasına rağmen diğer karıştırma etkinliklerini tam yakalayamamıştır. Hedef alandaki bazı görüntüler hala seçilebilmektedir. Noktasal gürültü ve rastgele darbe karıştırması karıştırıcı sisteminin ürettiği gürültü işaretleri bandı tamamıyla radar alıcı bandında yer aldığından bu karışırtıcılar güçlerini etkin biçimde kullanmışlardır. Etkin karıştırıcı gücü açısından konuya bakıldığında baraj ve noktasal gürültü karıştırıcı işaretleri sürekli işaret olduklarından etkin güçleri gönderilmiş işaret tepe gücü ile ölçülürken, rastgele darbe karıştırıcı işaretin ortalama gücü ile ölçülmektedir. Bu açıdan noktasal gürültü karıştırma en etkin

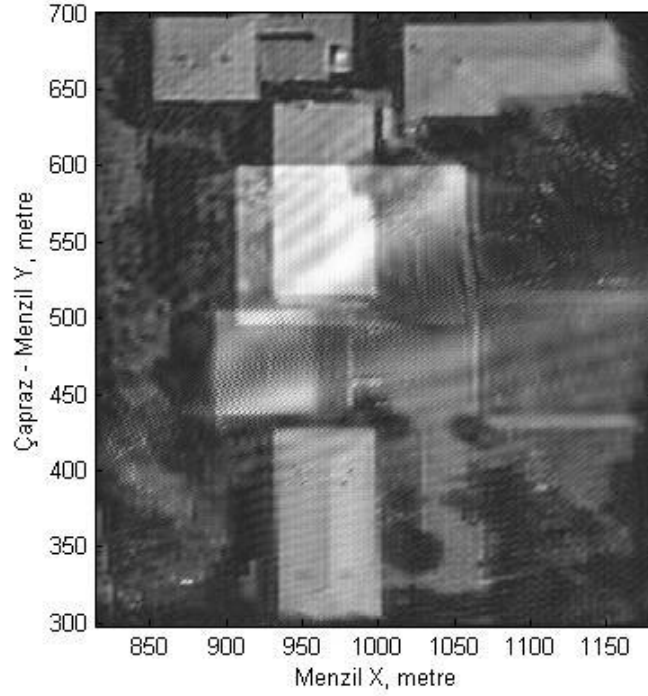
karıştırılmayı gerçekleştirmektedir. Baraj gürültü tepe gücünü kullanmasından dolayı rastgele darbe karıştırmasına göre daha güçlü karıştırma yapabilir gözükmesine rağmen, amaçladığı bant geniş olduğundan karıştırma etkinliğinde rastgele darbe karıştırmasından geride kalmıştır.

5.2. Aldatma Karıştırması (Tekrarlayıcı Karıştırma)

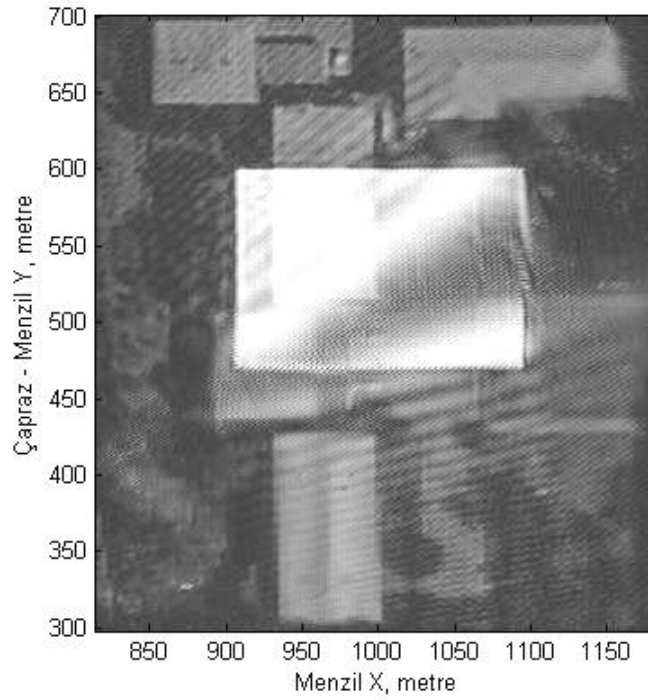
Bir tekrarlayıcı karıştırıcının en önemli karakteristiği karıştırılmak istenen radara ait işaretin eş evreli olarak kayıt etmesi ve yeniden üretebilmesidir. Bu işlem bir hafıza cihazı sayesinde gerçekleştirilmektedir. Pratikte, TWT (Traveling Wave Tube) hafıza döngüsü ve SAW (Surface Acoustic Wave) erteleme hattı gibi erteleyici bir cihaz ya da Sayısal Radyo Frekans Belleği (Digital Radio Frequency Memory, DRFM) gibi sayısal bir cihaz kullanılarak yapılmaktadır. Bu cihazlardan DRFM, kaydetme zamanından bağımsız olarak çalışmakta ve bu yüzden de ertelemeyen kaynaklanan işaret bozulmalarını önleyebilmektedir. DRFM görevi kapsamında radar tarafından gönderilen işareti hafızasına doğru bir şekilde kaydetmektedir. Sonrasında darbe tekrar frekansını (PRF) kestirmekte ve bu işareti, PRF'ten elde ettiği bilgiye dayanarak, radar tarafından beklenen diğer darbe işareti gelmeden veya geldikten sonra yayımlamaktadır [Soumekh,2006]. DRFM, radar işaretinde mevcut olan Doppler kaymalarını ise kopya ettiği işaretlere, işareti RF enerjiye çeviren çıkış referans osilatörü ve işareti temel – banda çeken giriş referans osilatörü frekanslarını basitçe dengeleyerek ekleyebilmektedir. Doppler kaymaları bir sayısal faz kaydırıcı olan 'Digital Serrodyning' ile de yapılabilir [Schleher,1999].

Şekil 5.10. ve Şekil 5.11.'de sırasıyla düşük güçteki ve yüksek güçteki tekrarlayıcı karıştırma ortamında gerçekleştirilmiş iki adet SAR simülasyon sonuçları görünmektedir. Bilindiği gibi tekrarlayıcı karıştırmada kaydedilen radar işareti kopyalanıp istenilen gecikmelerle tekrar geri yollanmakta dolayısıyla radar bu karıştırıcı işareti kendi işaretlerine ait yankıların gibi muamele yapmaktadır. Böylece bu karıştırıcı işaretleri ile radar görüntüsü üzerinde istenilen alt mevki kolayca maskelenebilmektedir. Simülasyonlara bakılacak olursa, düşük güç karıştırıcı ile yapılan birinci simülasyonda karıştırıcı gücü işaret gücüne oranla yaklaşık -2 dB aşağıda bir değerde seçilmiş olmasına rağmen Şekil 5.10.'da

görülebileceği gibi karıştırma, radar görüntüsü üzerindeki etkisini açıkça gösterebilmiştir.

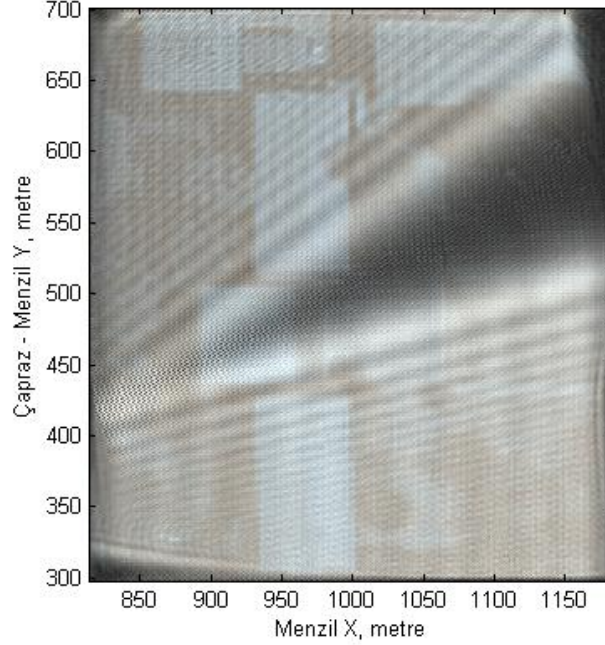


Şekil 5.10. Düşük güç tekrarlayıcı darbe karıştırmasına maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.



Şekil 5.11. Yüksek güç tekrarlayıcı darbe karıştırmasına maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.

Karıştırıcı gücü yaklaşık 9 dB değerine çıkarıldığında hedef alan üzerindeki hedeflenen bölge Şekil 5.11.'de görüldüğü gibi kolayca maskelenmiştir. Şekil 5.12.'de tümüyle tekrarlayıcı darbe karıştırmasına maruz kalmış SAR görüntüsü görülmektedir.



Şekil 5.12. Tümüyle tekrarlayıcı darbe karıştırmasına maruz kalmış SAR sisteminden elde edilen simülasyon görüntüsü.

Genel olarak gürültü ve aldatıcı karıştırma simülasyonlarına bakıldığında, gürültü karıştırma örneklerine nazaran düşük güçlerde gerçekleştirilen aldatıcı karıştırmanın hedef radar üzerinde daha fazla bir karıştırma etkisine sahip olduğu görülmektedir. Düşük karıştırıcı gücü altında yapılan örneklere bakıldığında, karıştırıcı gücünün işaret gücüne oranla minimum 13 dB üstünde olduğu gürültü karıştırma simülasyonlarında görüntü üzerinde pek fazla bir şey değişmezken, karıştırıcı gücü işaret gücünün yaklaşık -2 dB altında seçildiği tekrarlayıcı karıştırma simülasyonunda ise karıştırıcının etkisi açık bir şekilde görülmüştür. Bu durum yüksek karıştırıcı gücü kullanılarak yapılan örneklerde de aynı şekilde gözlemlenmiş, karıştırıcı gücü işaret gücünün yaklaşık olarak 9 dB üstünde olduğu simülasyonda hedef tamamıyla silinirken, bu durum gürültü karıştırma da yaklaşık olarak minimum 33 dB değerinde sağlanmıştır.

Gürültü karıştırmaya nazaran tekrarlayıcı karıştırmanın daha az güç harcanarak yapılabilmesi yanında bu karıştırma yöntemi ile hedef alan içerisinde radar tarafından gözlemlenmek istenen herhangi bir bölüm kolayca silinebilmekte ve SAR'ın keşif çalışması engellenebilmektedir. Ayrıca, günümüz radarları gürültü karıştırma, yan – loblardan da yapılsa karıştırıcının yerini kolayca tespit edip gerekli tedbirleri alabilecek gelişmiş teknolojilere sahiptirler. Ancak aldatıcı karıştırmada kullanılan işaret, radarın kendi gönderdiği işaretlerin kopyası olduğundan ve radar alıcısına gelen karıştırıcı işaretler ve gerçek yankılar benzer olduklarından yapılan karıştırma radar tarafından kolayca anlaşılammakta ve böylece karıştırma rahatça icra edilmektedir.

6. SONUÇLAR

Çalıştığımız örnekler göstermektedir ki aldatıcı karıştırma gürültü karıştırmaya nazaran daha etkin bir karıştırma tekniğidir. Gürültü karıştırmada yüksek güçler kullanıldığında iyi sonuçlar elde edilirken, aldatıcı karıştırmada çok daha az bir güçle bu durum sağlanmaktadır. Ayrıca hedef alan içerisinde, radar tarafından bilgi edinilmesi istenmeyen spesifik bölgeler kolayca karartılarak radarın bu bölgede keşif çalışması yapması engellenebilmektedir.

Günümüz görüntüleme radarları sahip oldukları yeni teknolojilerle gürültü karışırmalarına karşın büyük işlem kazançlarına sahiptirler. Aldatıcı karıştırmada kullanılan işaretler ise radar işaretlerinin birer kopyası olması nedeniyle, bu karıştırma işaretleri radar tarafından kolay bir şekilde fark edilememektedir. Dolayısıyla bu işaretler sistem tarafından normal bir hedeften geliyormuş gibi yorumlanmakta ve böylece karıştırma kolay bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada noktasal – ışık SAR modu temel alınsa da, şerit – haritalama modu içinde karıştırma etkinliğinin benzer sonuçlar vereceği beklenmelidir.

Çalışmamızda noktasal – ışık SAR modu için uzamsal frekans aradeğerlemesi tabanlı bir SAR görüntü oluşturma algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma diğer sayısal görüntü oluşturma algoritmalarına nazaran daha hızlı çalışan ve daha yaygın kullanılan bir algoritmadır. Bu sayısal görüntü oluşturma yöntemleri, alternatif görüntüleme yöntemleri olan Kutupsal – Biçim İşleme ve Menzil – Doppler Görüntüleme'ye nazaran yaygın olarak kullanılan ve yaklaşım içermeyen yöntemler olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Bu nedenle bazı yaklaşımlar içeren görüntü oluşturma yöntemlerine karşı, karıştırma etkinliğinin daha fazla olması beklenmelidir.

Gelecek çalışma olarak, bu tez çalışmasında gerçekleştirilen karıştırma tedbirlerinin, aynı şekilde, şerit – haritalama SAR modu üzerindeki etkilerinin simülasyonlar ile incelenmesi amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [Ausherman,1984], Ausherman, A. Kozma, J. Walker, H. Jones and E. Poggio, "Development in Radar Imaging", IEEE Transactions Aerospace Electronic Systems, 20; 363,1984.
- [Barton,1998], David C. Barton, Sergey A. Leonov, "Radar Technology Encyclopedia (Electronic Edition)", Artech House Inc., 1998
- [Brown,1969], W. Brown and R. Fredricks, "Range – Doppler Imaging with Motion Through Resolution Cells" IEEE Transactions Aerospace Electronic Systems, 5; 98,1969.
- [Condley,1990], Christopher J. Condley, "Some System Considerations for Electronic Countermeasures to Synthetic Aperture Radar", Electronic Warfare Systems, IEEE Colloquium on Volume, Issue, 1990, Pages 8/1-8/7.
- [Cutrona,1966], L. Cutrona, E. Leith, L. Porcello and W. Vivian,"On the Application of Coherent Optical Processing Techniques to Synthetic Aperture Radar" Proc IEEE, 54 (8);1026 – 1032, 1966
- [Ender,2002], Joachim H.G. Ender, Patrick Berens, Andreas R. Brenner, Ludwig Röbling, Ursula Scupin "Multi Channel SAR/MTI System Development at FGAN:From AER to PAMIR", 0-7808-7536-X/ © 2002 IEEE.
- [Klemm,1997], Richard Klemm, "Conference Report EUSAR'96 Current Trends in SAR Technology", 0885-8995/97© 1997 IEEE.
- [Mahafza,2000], Bassem R. Mahafza, "Radar System Analysis and Design Using Matlab" Chapman and Hall/CRC, 2000.
- [Neri,2001], Flippo Neri, "Introduction to Electronic Defence Systems", Artech House Inc., 2001.
- [Orhan,2001], Orhan Orhan, "Yapay Açıklıklı Radarda Farklı Aralıklı Hızlı Fourier Dönüşümü Yöntemi", İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2001.
- [Ölçer,1995], İbrahim Ölçer, "Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging", İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Eylül 1995.
- [Shenghua,2004], Zheng Shenghua, Xu Dazhuan, Jin Xueming, Han Hua, "A Study of Active Jamming on Synthetic Aperture Radar", 0 – 7803 – 8562 – 4/04/ 2004 IEEE.
- [Skolnik,1990], Merrill I. Skolnik, "Radar Handbook", McGraw Hill, 1990.

- [Soumekh,1999], Mehrard Soumekh, "Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithms", John Wiley & Sons, 1999.
- [Soumekh,2006], Mehrard Soumekh, "SAR – ECCM Using Phase – Perturbed LFM Chirp Signals and DRFM Repeat Jammer Penalization", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol.42, No.1, January 2006.
- [Walter,1993], W. Goj. Walter, "Synthetic Aperture Radar and Electronic Warfare", Artech House, Inc., 1993.
- [Webb,1998], Jennifer L.H.Webb, David J.Munson, Nick J.S.Stacy, "High Resolution Planetary Imaging via Spotlight – Mode SAR", IEEE Transactions on Image Processing, Vol.7, No.11, November 1998
- [Wei,2005], Lie Wei, Liang Diannong, Dong Zhen, "A New Jamming Method on Parasitic Spaceborne SAR System", 0-7803-9050-4/05 ©2005 IEEE.

EK

SAR Uzamsal Frekans Aradeğerlemesi İle Sayısal Yeniden Oluşturma MATLAB Kaynak Kodu

```
%% SAR Uzamsal Frekans Aradeğerlemesi İle Sayısal Yeniden Oluşturma
readim=double(imread('deneme.jpg'))/255;
ntarget=size(readim);
% xn: menzil;      yn= çapraz - menzil;   fn: yansıtıcılık
a=zeros(1,ntarget(1)*ntarget(2)); b=a;      r=a;
index=1;
Xc=1000; % alan merkezi
Yc=500; % alan merkez
%
colormap(gray(256));
L=200;
c=3e8;
f0=20e6;% taban bandı
w0=2*pi*f0;
fc=200e6;% taşıyıcı frekansı
wc=2*pi*fc;
kc=2*pi*fc/c;% taşıyıcı frekanstaki dalga numarası.
kmin=2*pi*(fc-f0)/c;% maksimum frekanstaki dalga num.
kmax=2*pi*(fc+f0)/c;% minimum frekanstaki dalga num.
teta_c=atan(Yc/Xc);% yan - dik dışı bakış açısı
lambda_min=c/(fc+f0);% yüksek frekansta dalga boyu
lambda_max=c/(fc-f0);% düşük frekansta dalga boyu
Xcc=Xc/(cos(teta_c))^2;
DX=c/(4*f0);% menzil çözünürlüğü
DY=(Xcc*lambda_max)/(4*L);% çapraz menzil çözünürlüğü
X0=ntarget(2)/2*DX;% hedef alan menzil genişliği [Xc-X0,Xc+X0]
Y0=ntarget(1)/2*DY;% hedef alan çapraz menzil genişliği
Rc=sqrt(Xc^2+Yc^2);% yan dik dışı bakış, hedef alan merkez menzili
L_min=max(Y0,L);
%% HIZLI ZAMAN ÖRNEKLEME VE İŞLEME
if Yc-Y0-L < 0,
    Rmin=Xc-X0;
    teta_min=atan((Yc-Y0-L)/(Xc-X0));
else
    Rmin=sqrt((Xc-X0)^2+(Yc-Y0-L)^2);
    teta_min=atan((Yc-Y0-L)/(Xc+X0));
end
Rmax=sqrt((Xc+X0)^2+(Yc+Y0+L)^2);% maksimum menzil
teta_max=atan((Yc+Y0+L)/(Xc-X0));
Tp=3e-7;% chirp darbe süresi
Ts=2*Rmin/c;
Tf=2*Rmax/c+Tp;% bir hedef alan çözünürlük hücresi için
% maksimum veri toplama süresi.
T=Tf-Ts;
Ts=Ts-.1*T;
Tf=Tf+.1*T;
T=Tf-Ts;
Tc=T/2;% hızlı zaman referans noktası
```

```

delta_t=1/(4*f0);% hızlı zamanda örnek aralığı
Tmin=max(T,(4*X0)/(c*cos(teta_max)));
N=2*ceil(Tmin/(2*delta_t));% hızlı zaman örnek sayısı
t=Ts+(0:N-1)*delta_t;% hızlı zaman dizisi
w=wc+(2*pi/(N*delta_t))*(-N/2:N/2-1);
k=w/c;
%% YAVAŞ ZAMAN ÖRNEKLEME VE İŞLEME
delta_uc=(Xcc*lamba_min)/(4*Y0)/1.2;% örnekleme aralığı (sıkıştırılmış)
mc=2*ceil(L_min/delta_uc);% gönderilen darbe sayısı
uc=delta_uc*(-mc/2:mc/2-1);
delta_kuc=2*pi/(mc*delta_uc);% ku alanında örnek aralığı
kuc=delta_kuc*(-mc/2:mc/2-1);
delta_u=pi/(kmax*(sin(teta_max)-sin(teta_min)))/1.4;
delta_ku=delta_kuc;
m=2*ceil(pi/(delta_u*delta_ku));
du=2*pi/(m*delta_ku);
u=delta_u*(-m/2:m/2-1);
ku=delta_ku*(-m/2:m/2-1);
%% KARIŞTIRICI ÜRETİMİ
%baraj=vco(rectpuls(t(:)*ones(1,mc)).*rand(N,mc),[-100e6,100e6],200e6);
%spot=vco(rectpuls(t(:)*ones(1,mc)).*rand(N,mc),[-20e6,20e6],60e6);
% ranpls=zeros(N,mc);
% for i=1:length(uc),
%   ran=round((ntarget(1)*ntarget(2)-10)*rand(size(ones(1,100))))+1;
%   for ix=1:100,
%     delay=2*sqrt((Xc+a(ran(ix))).^2+(Yc+b(ran(ix))-uc).^2)/c;
%     tim_fn=t(:)*ones(1,mc)-ones(N,1)*delay;
%     ranpls=ranpls+vco(rectpuls(tim_fn).*rand(N,mc),[-15e6,15e6],60e6);
%   end
% end

%% Tekrarlayıcı darbe üretimi
% jindex=1;
% for jiy=1:50
%   for jix=1:50,
%     ja(yindex)=-X0/2+DX/2+DX*(jix-1);
%     jb(yindex)=Y0/2-DY/2-DY*(jiy-1);
%     jindex=jindex+1;
%   end
% end
% alpha=w0/Tp; % Chirp rate
% beta=wc-alpha*Tp;
% rep=zeros(N,mc);
% for i=1:(jindex-1),
%   delay=2*sqrt((Xc+ja(i)).^2+(Yc+jb(i)-uc).^2)/c;
%   time_fn=t(:)*ones(1,mc)-ones(N,1)*delay;
%   rep=rep+exp(j*beta*time_fn+j*alpha*(time_fn.^2)).*(time_fn >= 0 & time_fn <= Tp
%   & ...ones(N,1)*abs(uc) <= L & t(:)*ones(1,mc) < Tf);
% end
%% RESİM OKUMA
for z=1:3,
  for iy=1:ntarget(1)
    for ix=1:ntarget(2),
      a(index)=(-X0+DX/2)+DX*(ix-1);
      b(index)=(Y0-DY/2)-DY*(iy-1);
    end
  end
end

```

```

        r(index)=readim(iy,ix,z);
        index=index+1;
    end
end
%% İŞARET İŞLEME
alpha=w0/Tp;% Chirp karakteristik bilgileri
beta=wc-alpha*Tp;%
s=zeros(N,mc);%
for i=1:(index-1),
    delay=2*sqrt((Xc+a(i)).^2+(Yc+b(i)-uc).^2)/c;
    time_fn=t(:)*ones(1,mc)-ones(N,1)*delay;
    s=s+r(i)*exp(j*beta*time_fn+j*alpha*(time_fn.^2)).*(time_fn >= 0 & time_fn <= Tp & ...
    ones(N,1)*abs(uc) <= L & t(:)*ones(1,mc) < Tf);
end
sb=s.*exp(-j*wc*t(:)*ones(1,mc));
% sb=sb+baraj;% karıştırıcı işareti ekleme
% sb=sb+spot;
% sb=sb+ranpls;
% sb=sb+rep;

% hızlı zaman taban banda dönüştürme
t_fn_ref=t(:)-2*sqrt(Xc^2+Yc^2)/c;
s0=exp(j*beta*t_fn_ref+j*alpha*(t_fn_ref.^2)).*(t_fn_ref >= 0 & t_fn_ref <= Tp); %
referans işaret
s0b=s0.*exp(-j*wc*t(:));% referans işaretin taban banda dönüştürülümü
sb=ftx(sb).*(conj(ftx(s0b))*ones(1,mc));% s(w,u)
%% NOKTASAL IŞIKLANDIRMA
sc=sb.*exp(j*2*(k(:)*ones(1,mc)).* ...
(ones(N,1)*sqrt(Xc^2+(Yc-uc).^2))-j*2*k(:)*Rc*ones(1,mc));% sıkıştırma
fp=ifftx(fty(sc));% dar bant kutupsal biçim işleme
fi=asin(kuc/(2*k));% açılal doppler alanı
tm=(2*Rc/c+delta_t*(-N/2:N/2-1));
R=(c*tm)/2;
Wd=((abs(R(:)*cos(fi+teta_c)-Xc) < X0).* ...
(abs(R(:)*sin(fi+teta_c)-Yc) < Y0));
fd=fp.*Wd;
fsc=ftx(fd);% (omega,ku) alanına çevirim
% sıfır ekleme
mz=m-mc;
fsc=(m/mc)*[zeros(N,mz/2),fsc,zeros(N,mz/2)];
sc=ifftx(fsc);% (omega,u) alanına çevirim
s=sc.*exp(-j*2*(k(:)*ones(1,m)).* % geri sıkıştırma
(ones(N,1)*sqrt(Xc^2+(Yc-u).^2))+j*2*k(:)*Rc*ones(1,m));
kus=2*k*c*sin(teta_c)*ones(1,N);
s=s.*exp(-j*kus(:)*u);% yan dik dışı bakış için yavaş zaman taban banda dönüştürme
fs=fty(s);
%% YAVAŞ ZAMAN ALT ÖRNEKLEME
if Y0 < L,
    ny=2*ceil(1.2*Y0/delta_u); % y alanında örnek sayısı
    ms=floor(m/ny);% alt örnekleme oranı
    tt=floor(m/(2*ms));
    l=m/2+1-tt*ms:ms:m/2+1+(tt-1)*ms; % alt örneklenmiş index
    [tt,ny]=size(l);
    fs=fs(:,l);
    ky=ku(l);

```

```

    delta_ky=delta_ku*ms;
else
    delta_ky=delta_ku;
    ny=m;
    ky=ku;
end;
dy=2*pi/(ny*delta_ky);% y alanı örnek aralığı
y=dy*(-ny/2:ny/2-1);% çapraz menzil dizisi
%% YENİDEN OLUŞTURMA
ky=ones(N,1)*ky+kus(:)*ones(1,ny);
kx=(4*k(:).^2)*ones(1,ny)-ky.^2;
kx=sqrt(kx.*(kx > 0));
kxmin=min(min(kx));
kxmax=max(max(kx));
dkx=pi/X0;
nx=2*ceil(((kxmax-kxmin))/(2*dkx));
%% UYUMLU SÜZME VE ARADEĞERLEME
f=fs.*((kx>0).*exp(j*kx*Xc+j*ky*Yc-j^2*k(:)*ones(1,ny)*Rc)); % hedef alanın taban banda
    %dönüşümü
is=8;
l=2*is+1;% sinc lob sayısı
kxs=is*dkx;
nx=nx+2*is+4;
KX=kxmin+(-is-2:nx-is-3)*dkx;
kxc=KX(nx/2+1);
KX=KX(:)*ones(1,ny);
F=zeros(nx,ny);
for i=1:N;
    ickX=round((kx(i,:)-KX(1,1))/dkx)+1; % KX alanında en yakın ızgara noktası
    ikx=ones(l,1)*ickX+[-is:is]*ones(1,ny);
    ikx=ikx+nx*ones(l,1)*[0:ny-1];
    nKX=KX(ikx);
    SINC=sinc((nKX-ones(l,1)*kx(i,:))/dkx);% sinc fonksiyonu
    HAM=.54+.46*cos((pi/kxs)*(nKX-ones(l,1)*kx(i,:)));% Hamming pencereleme
    F(ikx)=F(ikx)+(ones(l,1)*f(i,:)).*(SINC.*HAM);
end
f=ifftx(iftx(F));
dx=2*pi/(nx*dkx);
x=dx*(-nx/2:nx/2-1);
G=abs(f);
xg=max(max(G)); ng=min(min(G)); cg=255/(xg-ng);
q=(256-cg*(G-ng));
q=q.*(q>=0);
g(:,z)=q;
end
q=1-g/256+0.15;          % renk ayarlama
for z=1:3,
    for i=1:ny,
        for p=1:nx,
            if q(i,p,z)>1
                q(i,p,z)=1;
            elseif q(i,p,z)<0
                q(i,p,z)=0;
            end
        end
    end
end
end

```

```
end
end
image(Xc+x,Yc+y,q);axis([Xc-X0 Xc+X0 Yc-Y0 Yc+Y0]);
axis image; axis xy;
xlabel('Menzil X, metre')
ylabel('Çapraz - Menzil Y, metre')
```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Serdar ÇAKAL

Doğum Yeri : Düzce

Doğum Yılı : 1980

Medeni Hali : Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise 1994-1998,Düzce Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı Lise)

Lisans 1998-2003,Hacettepe Üniversitesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil : İngilizce

İş Tecrübesi :

2004 Nisan – 2004 Ağustos : Yarı Zamanlı Araştırma Görevlisi, Başkent Üniversitesi

2005 - ? : Mühendis Teğmen, Deniz Kuvvetleri K.İğİ (Gölcük Tersanesi Komutanlığı)