İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPAY AÇIKLIK RADARI İŞARET İŞLEME ve DOPPLER MERKEZ FREKANSININ KESTİRİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Osman KARABAYIR

Anabilim Dalı: Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Programı: Telekomünikasyon Mühendisliği

MAYIS 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPAY AÇIKLIK RADARI İŞARET İŞLEME ve DOPPLER MERKEZ FREKANSININ KESTİRİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Osman KARABAYIR

(504071331)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :

Tezin Savunulduğu Tarih :

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sedef KENT(İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri :

MAYIS 2010

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda değerli zamanını esirgemeyen, bilgi ve önerilerini benimle her zaman paylaşan değerli hocalarım Prof. Dr. Sedef KENT'e ve Yrd. Doç. Dr. Mesut KARTAL'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca yüksek lisans eğitimim süresince manevi destekleri ve sevgileri ile yanımda olan başta annem Ayşe KARABAYIR ve babam Ali KARABAYIR olmak üzere bütün aileme ve bütün arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2010

Osman KARABAYIR
Elektronik ve Haberleşme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
KISALTMALAR ..... **vii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xiii**
SUMMARY ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Yapay Açıklık Kavramı 3
1.2 SAR Radarlarının Tarihsel Gelişimi 5
1.3 Genel SAR Sistem Yapısı 6
1.4 SAR Geometrisi 7
1.5 SAR Çalışma Modları 8
1.5.1 Şerit tarama modu 8
1.5.2 Tarama modu 8
1.5.3 SPOTIŞIĞI modu 8
1.6 SAR Sisteminde Uzaysal Çözünürlük 9
1.6.1 Menzil çözünürlüğü 9
1.6.2 Çapraz menzil çözünürlüğü 10
1.7 SAR Sistemine Etkiyen Geometrik Faktörler 11
1.7.1 Boy kısalması (Foreshortening) 12
1.7.2 Kaplama (Layover) 12
1.7.3 Gölge (Shadow) 13
2. SAR VERİ İŞLEME **15**
2.1 SAR İşaret İşleme Aşamaları 16
2.1.1 Demodülasyon 16
2.1.2 SAR görüntü oluşturma 17
2.1.2.1 Menzil sıkıştırması 17
2.1.2.2 Menzil hücre göçü düzeltme (RCMC) 21
2.1.2.3 Çapraz menzil sıkıştırması 22
3. DOPPLER MERKEZİ KESTİRİMİ **29**
3.1 ΔE Algoritması (Energy Balancing) 29
3.2 Doppler Kestirim (Doppler Estimation (CDE)) Yöntemi 32
3.3 İşaret Doppler Kestirimi (Sign Doppler Estimation (SDE)) Yöntemi 34
3.4 Radon Dönüşümü Yöntemi 35
3.4.1 GDE algoritma tanımı 37
4. ΔE YÖNTEMİNİN KALMAN PARAMETRE KESTİRİCİSİ İLE DESTEKLENMESİ **45**
4.1 Kalman Filtresi 46
4.2 Kalman Parametre Kestirici 47

4.3 Kalman Parametre Kestirici ve ΔE Algoritması ile Doppler Merkez Frekans Kestirimi 49
5. SAR İŞARET İŞLEME YAZILIMI 51
5.1 RADARSAT-1 Uydusu ve Özellikleri 51
5.2 CEOS Veri Formatı 53
5.3 SAR İşaret İşleme MATLAB Yazılımı 54
5.3.1 Parametre belirleme alt yazılım bloğu 54
5.3.2 SAR verisinin kaydedildiği ortamdan çıkarılması yazılım bloğu 55
5.3.3 Saf SAR verisinin yüklenmesi yazılım bloğu 55
5.3.4 Doppler merkez frekansının hesaplanması yazılım bloğu 55
5.3.5 RDA algoritması ile SAR görüntüsünün oluşturulması yazılım bloğu 55
5.4 SAR İşaret İşleme MATLAB Benzetim Sonuçları 55
5.4.1 SAR görüntüsü oluşturma benzetim sonuçları 55
5.4.2 Hatalı Doppler frekans sesabının SAR görüntüsüne etkisi 56
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 61
KAYNAKLAR 63
EKLER 65

KISALTMALAR

A/D : Analog-Sayısal Dönüşümü (Analog to Digital Conversion)
AGF **:** Alçak Geçiren Filtre
BW **:** Band Genişliği (Band Width)
CDE **:** Doppler Merkezi Kestirimi (Centroid of Doppler Estimation)
CEOS **:** Dünya Gözlem Uydu Komitesi (Committee on Earth Observation Satellites)
FFT **:** Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
FM **:** Frekans Modülasyonu (Frequency Modulation)
GDE **:** Geometrik Doppler Kestirici (Geometry Based Doppler Estimator)
GSAR **:** Genelleştirilmiş Yapay Açıklık Radarı (Generalized Synthetic Aperture Radar)
Hz **:** Frekans Birimi (Hertz)
IFFT **:** Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform)
PRF **:** Darbe Tekrarlama Frekansı (Pulse Repetition Frequency)
RBFN **:** Radyal Bazlı Fonksiyon Ağı (Radial Basis Function Network)
RDA **:** Menzil Doppler Algoritması (Range Doppler Algorithm)
RCMC **:** Menzil Hücre Göçü Düzeltme (Range Cell Migration Correction)
SAR **:** Yapay Açıklık Radarı (Synthetic Aperture Radar)
SNR **:** İşaret Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : RADARSAT-1 PARAMETRELERİ. 52

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Algılayıcı sistem tipleri 1
Şekil 1.2 : Sentetik açıklığın sentezlenmesi. 3
Şekil 1.3 : Genel SAR sistem yapısı. 6
Şekil 1.4 : Temel SAR geometrisi. 7
Şekil 1.5 : SAR çalışma modları. 9
Şekil 1.6 : Menzil çözünürlüğü örneği. 10
Şekil 1.7 : Çapraz menzil çözünürlüğü örneği 11
Şekil 1.8 : SAR – Boy kısalması etkisi örneği. 12
Şekil 1.9 : SAR – Kaplama etkisi örneği. 13
Şekil 1.10 : SAR – Gölge etkisi örneği. 13
Şekil 2.1 : SAR işaretinin demodülasyon işlemi. 17
Şekil 2.2 : Cıvıltı işaretinin zaman domeni gösterimi. 19
Şekil 2.3 : Cıvıltı işaretinin frekans domeni gösterimi 19
Şekil 2.4 : Dört yansıtıcıya ait ham SAR görüntüsü 20
Şekil 2.5 : Menzil sıkıştırması sonrası SAR görüntüsü 21
Şekil 2.6 : RCMC işlemi sonrası SAR görüntüsü 22
Şekil 2.7 : SAR geometrisi 23
Şekil 2.8 : Çapraz menzil cıvıltı işareti zaman domeni gösterimi 25
Şekil 2.9 : Çapraz menzil cıvıltı işareti frekans domeni gösterimi 26
Şekil 2.10 : Çapraz menzil sıkıştırması sonrası SAR görüntüsü 27
Şekil 3.1 : Çapraz menzil yönündeki işaretin periodogramı 30
Şekil 3.2 : Toplam periodogramların frekans domeni cevabı 31
Şekil 3.3 : Toplam periodogramın AGF'den geçirilmiş formu 32
Şekil 3.4 : Otokorelasyon fonksiyonunun spektrumu 34
Şekil 3.5 : ΔE, CDE ve SDE yöntemlerinin karşılaştırılması 35
Şekil 3.6 : Şerit tarama modu geometrisi 36
Şekil 3.7 : Şerit tarama modu geometrisi hedef yanıt işareti 36
Şekil 3.8 : GDE algoritmasında kullanılan geometrik ifadeler 38
Şekil 3.9 : GDE algoritması akış diyagramı 40
Şekil 3.10 : Radon dönüşümü benzetim sonuçları 44
Şekil 4.1 : Çapraz menzil işareti güç spektrumu 45
Şekil 4.2 : Kalman filtre yapısı 46
Şekil 4.3 : Doppler merkez frekansı kestirim metodu akış diyagramı 50
Şekil 5.1 : Vancouver SAR görüntüsü -1 56
Şekil 5.2 : Vancouver SAR görüntüsü -2 56
Şekil 5.3 : Doppler merkezi =50Hz durumu 57
Şekil 5.4 : Doppler merkezi = 100Hz durumu 58
Şekil 5.5 : Doppler merkezi = 350Hz durumu 58
Şekil 5.6 : Doppler merkezi = 600Hz durumu 59
Şekil 5.7 : Doppler merkezi = 850Hz durumu 59

Şekil 5.8 : Doppler merkezi = 1050Hz durumu..... 60
Şekil 5.9 : Doppler merkezi = 1250Hz durumu..... 60

YAPAY AÇIKLIK RADARI İŞARET İŞLEME ve DOPPLER MERKEZ FREKANSININ KESTİRİMİ

ÖZET

Yapay açıklık radarları (SAR, Sentetik Açıklık Radarı), yüksek çözünürlükte görüntüleme olanağı sağlayan radar sistemleridir. Fiziksel olarak çok sayıda antenden oluşan dizi antenlerle gerçeklenebilecek büyük anten açıklığı ve yüksek çözünürlük, SAR sistemlerinde tek bir anten ve işaret işleme teknikleri ile gerçeklenmektedir.

Bu çalışmada, SAR işaret işleme aşamaları detaylı olarak açıklanmakta ve ayrıca SAR işaret işlemede karşılaşılan en önemli problemlerden biri olan "Doppler merkez frekansının kestirimi" problemine yönelik olarak geliştirilen yeni bir metod anlatılmaktadır.

Çalışmanın ilk bölümünde, SAR kavramı ve SAR sistemlerinin tarihsel gelişimi hakkında detaylı bilgi verilmektedir. Bu bilgiler, ilerleyen bölümlere önbilgi niteliği taşımaktadır.

Bölüm 2' de, SAR işaret işlemeye giriş yapılmaktadır. SAR sisteminde, gönderilen ve alınan elektriksel işaret özelliklerine değinilmekte, ardından baştan sona kadar SAR işaret işleme adımları tanıtılmaktadır. Bu bölüm, verilen bir SAR işaret işleme örneği ile pekiştirilmektedir.

Bölüm 3' de, SAR işaret işlemede karşılaşılan en önemli problemlerden birisi olan Doppler merkez frekansının hesabına yönelik arşivlerde var olan yöntemlere yer verilmektedir.

Bölüm 4' de, Doppler merkez frekansının kestirimine yönelik olarak geliştirilen yeni kestirim yöntemi açıklanmaktadır.

Son olarak bölüm 5' de de, yeni Doppler kestirim yöntemi ve gerçek SAR verisi kullanılarak SAR işaret işleme uygulaması gerçeklenmektedir.

SYNTHETIC APERTURE RADAR SIGNAL PROCESSING and DOPPLER CENTROID ESTIMATION

SUMMARY

Synthetic aperture radar is a radar system which enables high resolutional imaging. A huge antenna aperture and high resolution is produced by a single antenna and signal processing techniques which can also be done with antenna arrays that consists of many antennas physically.

In this work, SAR signal processing steps are explained in detail, and also a new method for solving one of the most important problems of SAR signal processing, Doppler centroid estimation, is introduced.

Detailed information about the SAR concept and the historical development of the SAR systems are given in the first section. These information is foreknowledge for the next sections.

In section 2, introduction of SAR signal processing is done. Electrical characteristics of SAR transmit and receive signals are expressed and then all SAR signal processing steps are introduced. In this section, a SAR signal precessing example is given to harden the processing knowledge.

In section 3, methods in literature for Doppler centroid frequency estimation which is one of the most important problems in SAR processing are introduced.

In section 4, new method which is designed for Doppler centroid estimation is explained.

Finally, in section 5, a SAR signal processing application with new Doppler estimation method and real SAR data is applied.

1. GİRİŞ

Görüntüleme sensör sistemleri aktif ve pasif olarak ikiye ayrılır. Pasif görüntüleme sistemlerinde, doğada var olan ve cisimlere çarpıp yansıyan işaretler değerlendirilir. Diğer yandan aktif görüntüleme sistemlerinde ise, hedefe yönelik işaret gönderilir, hedeflerden yansıyan işaretler toplanarak hedef hakkında yorum yapılır [1]. Pasif görüntüleme sistemleri frekans bandı olarak görünür ışık ve kızılötesi frekans bantlarını kullanır. Bu tip yöntemle, toprak sınıflandırma, hareket tespiti, dünyanın termal davranışı ve su kaynakları analizi gibi işlemler uygulanabilir. Pasif görüntüleme yöntemlerinin avantajı güç tasarrufu iken, dezavantajı ise, bulutlu ve sisli havalarda bu yöntemin uygulanamamasıdır. Böyle ortamlarda, çalışılan frekans bandı nedeniyle alıcıya, cisimlerden yansıyan işaretler ulaşamayacaktır.



Şekil 1.1 : Algılayıcı sistem tipleri

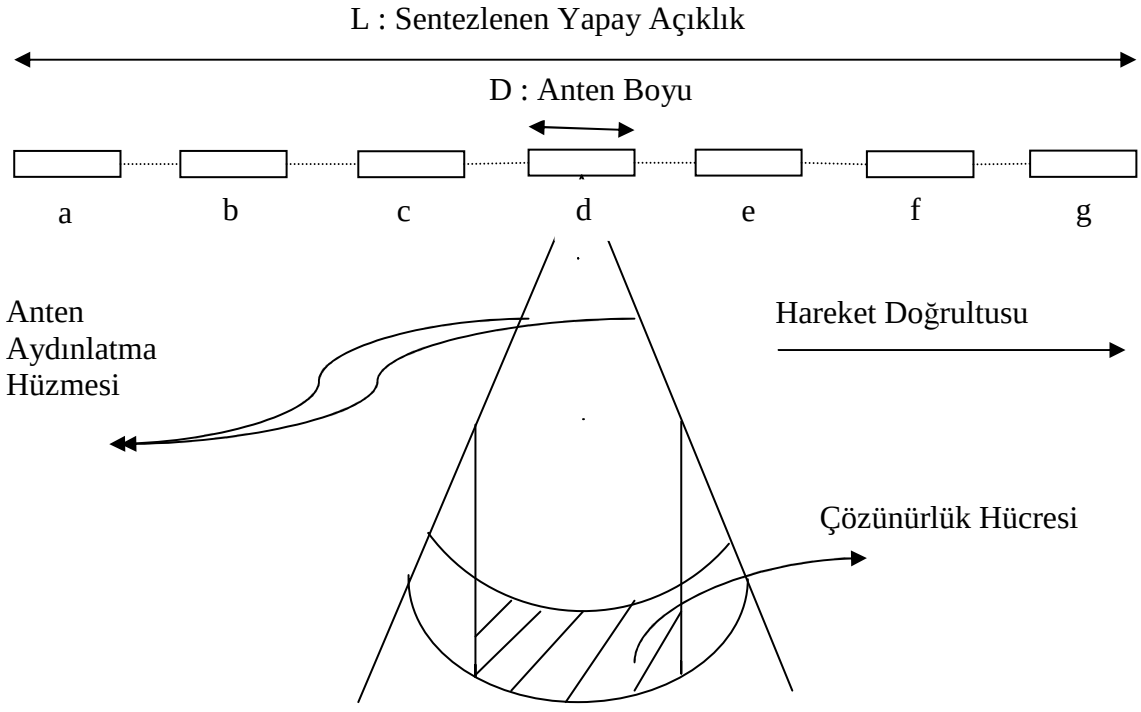
Aktif görüntüleme sistemleri, pasif sistemlerin olumsuz hava koşullarda çalışamaması yetersizliğini ortadan kaldırır. Bu sistemler, radar sistemleri ile gerçeklenir. Çalışma frekansları mikrodalga frekans aralığındadır. Aktif sistemlerin dezavantajı çözünürlükteki düşüklüktür. Bu ifade gerçek açıklık radarları baz alınarak yapılmaktadır. Öte yandan çözünürlük kavramı, çalışılan dalgaboyu ve anten boyuna da bağlıdır. Mikrodalga sensörleri, metreler boyutunda çözünürlük için birkaç yüz metreden kilometrelere uzanan uzunlukta anten boyutu gerektirmektedir.

Yukarıda, pasif görüntüleme sistemleri, ardından aktif görüntüleme yani radar sistemleri açıklanmıştır. Pasif sistemlerdeki olumsuzlukları gerçek açıklıklı radar sistemleri ile giderebilmekteyiz. Gerçek açıklıklı radar sistemlerindeki olumsuzlukları gidermek için uygun bir yöntem “sentetik açıklıklı radar” sistemlerini kullanmaktır. Sentetik açıklıklı radar sistemlerinde, çok büyük bir anten, küçük bir antenin belli bir konumda hareket ettirilip, belli konumlarda alınan işaretlerin depolanıp, daha sonra depolanan verilerin değerlendirilmesi ile sentezlenir. Alınan işaretin hem genliği hem de fazı kaydedilerek alıcı anten gerçeklenir. İşaret işleme sayısal olarak gerçeklenir. SAR (sentetik açıklık radarı) işte bu tip bir görüntüleme sensörüdür.

SAR sistemleri her türlü hava koşulunda, gece-gündüz çalışabilir. Bu sistemler, yüksek çözünürlük için geniş veri hacmi kullanır. Ayrıca, yüklü miktarda veriyi işleyebilmek için güçlü bilgisayarlar gerektirir. Bu güçlü bilgisayarların olduğu sistemler genellikle SAR sisteminin bulunduğu hava araçlarında değil, yeryüzündeki istasyonlarda bulunur. SAR sistemlerinde iki antenin kullanılması ile 3 boyutlu görüntüler elde edilir [2].

1.1 Yapay Açıklık Kavramı

Geniş bir yatay açısal çözünürlük için, birçok dizi anten, aynı anda aydınlatma yaparak ortak bir ışınlandırma demeti olusturur [3]. Birçok antenin kullanılması, performans açısından iyi değildir. Aynı çalışma performansına, küçük bir anten ve işaret işleme teknikleri yoluyla erişilebilir. Anten, belli bir uçuş yolu boyunca belli noktalarda aydınlatma yapıp, gelen veriyi depolar. Sonuçta bütün saklanan veriler, hem fazlı (coherent) olarak işlenerek büyük bir antenin sağlayacağı performans elde edilir. Bu açıklanan kavram yapay açıklık mantığını aydınlatır. Depolama işleminde, işaretlerin genlik ve fazları cok iyi korunmalıdır. SAR radarı, bir uzun fiziksel antenin kullanılmasi yerine, işaret işlemi yoluyla bir etkin uzun antenin üretilmesine dayanır. Şekil 1.2' de şematik olarak gösterildiği gibi, antenin birçok noktadan yaptığı aydınlatma sonuçları depolanarak istenilen genişlikteki açıklığa sahip anten sentezlenebilir.



Şekil 1.2 : Sentetik açıklığın sentezlenmesi

Şekil 1.2’ de sentetik açıklığın sentezlenmesi gösterilmektedir. Hareket eden platforma yerleştirilen anten, hareket doğrultusu boyunca a konumundan başlayarak hedef yüzeye frekans modülasyonlu darbe işaretleri göndererek aydınlatma işlemine başlar. Anten, aydınlatma işlemine g konumuna gelene kadar devam eder ve her bir konumda yapmış olduğu aydınlatma işlemi sonrası platforma dönen yankı işaretlerini kaydeder. Şekilde, tek bir konumdaki anten aydınlatma hüzmesi ve çözünürlük hücresi gösterilmiştir. Hareket doğrultusu boyunca a konumundan g konumuna kadarki bütün konumlardaki açıklıkların toplamı yapay açıklığı oluşturur. Böylece, yapay açıklık sentezlenmiş olur.

SAR işaretleri, işlenmeden önce, fazları ayarlanırken belli uzaklıklara odaklanma yapılabilir. Ayrıca her uzaklığa ayrı ağırlıklandırma da yapılabilir.

SAR sistemi, dizi antenlerle benzerlik göstermektedir. Dizi antenlerle yapılan çalışmada, SAR’ daki hareketli tek bir anten yerine hareketsiz birçok anten kullanılır. Diğer yandan iki sistem arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. SAR sistemiyle dizi antenlerinin arasındaki önemli bir fark, SAR sistemindeki çözünürlüğün iki kat fazla olmasıdır. Dizi antenlerde, antenin her elemanıyla alınan işaretlerin fazlarındaki farklılıklar, antenin yönlendirmesini yapar. Dizi antenlerde her eleman hem aydınlatma, hem de işaret alma yönünde rol oynar. SAR sisteminde, işaretler depolandığı için farklı uzaklıklar icin ağırlıklandırma yapılabilir ve belli uzaklıklara odaklanma yapılabilir, ancak dizi anten sisteminde farklı uzaklıklar için ağırlıklandırma işlemi gerçek zamada kolayca sağlanamaz.

SAR sisteminde, aydınlatma yapılırken ve yankı alınırken, sistem hareket halinde olduğundan, yankı işaretlerinin frekansında belli bir kayma meydana gelmektedir, frekanstaki bu kaymaya “Doppler frekans kayması” adı verilir [4]. Bununla beraber, genelde işaretler için darbe süreleri Doppler kaymasına duyarlı olacak kadar uzun olmadığından radarın ışınlandırma ve alma sürecinde hareketsiz olduğu düşünülebilir. Bu durumun etkisi şöyledir; işaret verme ve alma durumları aynı biçimli ancak uçuş yolları farklı iki ayrı anten kullanılmış gibidir. Radarı taşıyan aracın hızının ve hedef uzaklığının çok büyük olması durumunda, radarın yerdeğiştirmesi küçük kalacağından veya uçak hızı bilindiğinden bu durumlar gözardı edilebilir.

İlke olarak radar, bir işaret (sürekli dalga) gönderir, gelen yankının genlik ve fazına göre uzaklık ve yatay çözümünü elde eder. Sürekli dalgayla calışmak zor olduğundan, darbeli calışma tercih edilir. Darbe tekrarlama frekansı çözünürlüğü etkilemektedir.

1.2 SAR Radarlarının Tarihsel Gelişimi

İlk SAR denemeleri 1953 yılında Ilinosis Üniversitesindeki bilimadamları tarafından yapılmıştır.

Amerikan ordusu Michigan Üniversitesinden bu konu üzerine (Volvorine Project) araştırma istemiş. Ilinosis Üniversitesi, General Electric, Philco, Varian ve Goodyear Aircraft Corporation şirketleri bu araştırmaya katılmıştır. Bu proje, SAR sistemleri için yapılan çalışmaların ciddi manada başlangıcı olşmuştur.

İlk SAR sisteminin, Michigan Üniversitesi tarafından 1957’ de X bandında (3 cm) çalıştırıldığına inanılır. Bu sistem Amerikan savunma sistemleri için yapılmıştır.

1960’ ların sonundan itibaren, NASA, SAR sistemleri için destekleyici olmaya başlamıştır. İlk X band sistemi ERIM tarafından yapılmıştır ve bu sistem 1973 yılında L bandında bir kanalın eklenmesiyle (NASA tarafından) güncellenmiştir.

JPL (Jet Propulsion Labratuary), NASA için L bandlı SAR yapmış ve 1962’ de bir roket üzerinde testlere başlamıştır. Bu radar, 1966 yılında NASA CV-990 uçağına yerleştirilmiştir.

ERIM ve JPL şirketleri, Apollo Lunar Sounder çalışması yapmışlar ve bu çalışma 1972’ de Apollo 17 Lunar sisteminde kullanılmıştır. Bu çalışmadaki başarılı sonuçlar, NASA’yı SEASAT-A çalışmasında L band SAR kullanmaya yöneltmiştir. Daha çok okyanus araştırmalarına odaklanmış olsa da, SEASAT-A, buzul ve jeoloji araştırmalarında da iyi sonuçlar vermiştir. SEASAT-A sistemi, arıza nedeniyle 100 gün çalışabilmiştir. Bu sistem SAR sistemlerinin önem kazanmasını sağlamıştır.

SEASAT-A sisteminden sonra NASA, Shuttle Imaging Radar uçuş serisini başlatmıştır. İlk uygulama SIR-A’ dır. Bu sistem, L bandında çalışmıştır. Bakış açısı 47 derecedir. Optik kayıt yöntemini kullanmaktadır. İşaret işleme yapısı da tamamen optiktir ve kara ve jeoloji araştırmaları için kullanılmıştır.

SIR-B uygulaması 1984’ te uygulanmıştır. L band kanalda çalışılmış, 15-60 dereceli bakış açısına sahip tamamen sayısal bir sistemdir.

SIR-C sistemi 1994’ te uygulanmıştır. Bu sistemde C ve L band kanallar kullanılmış, daha sonra bu sisteme X bandı da bütünleşmiş edilmiştir.

Europian Space Agency (ESA), C bandlı ERS-1 ve ERS-2 sensör sistemleri ile SAR teknolojisine katılmıştır. İlk sistem 1991, diğeri 1995’ te uygulanmıştır.

SAR teknolojisine katılan diğer ülkeler ve sistemleri ise şöyledir:

Rusya: ALMAZ-1, S band çalışma, 1991

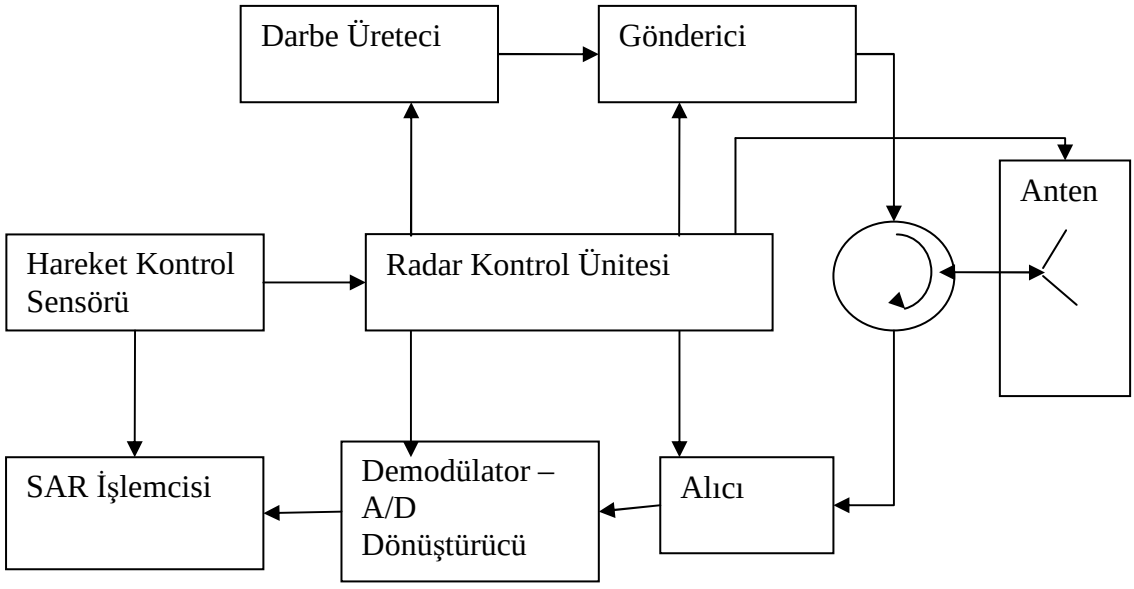
Japonya: JERS-1, L band çalışma, 1992

Kanada: RADARSAT, C band çalışma, 1995

Zamanımızda uygulanan ve gelecekte uyulanacak SAR uygulamalarını ise; ENVISAT, LIGHTSTAR, ECHO, COSMO-SKYMED ve SMART SAR şeklinde verebiliriz [2].

1.3 Genel SAR Sistem Yapısı

SAR sisteminin ana birimleri Şekil 1.3’ de gösterilmiştir [5]. İstenilen hedef çözünürlüğüne erişebilmek için darbe üreteci birimi istenilen bandgenişliğinde darbe üretir.

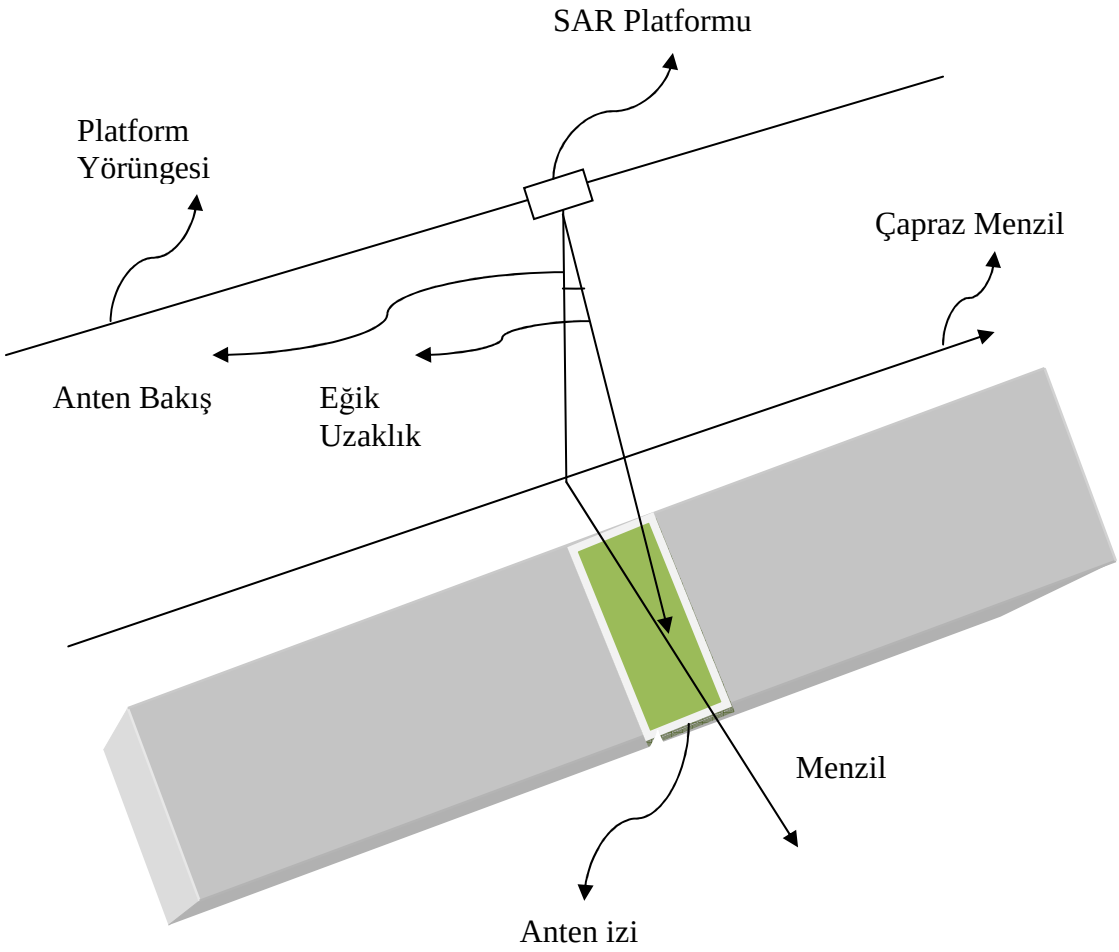


Şekil 1.3 : Genel SAR sistem yapısı

Üretilen darbeler kuvvetlendirildikten sonra gönderici katıyla antene gönderilir ve anten bu işaretleri yayınlar. Alma tarafında, yankı işaretleri anten tarafından alınır, uygun bir seviyeye kuvvetlendirilir ve bandgeçiren filtreden (BGF) geçirilir. Ardından, demodülasyon ve A/D (analog-sayısal dönüştürme) işlemlerinden geçirilen işaretler işlenmek üzere SAR işlemcisine gönderilir. Sistemde ayrıca hareket kontrol sensörleri de bulunabilir. SAR sisteminde bulunan radar kontrol birimi, işaret gönderme ve alma sıralamalarının zamana göre ölçeklenmesini sağlar.

1.4 SAR Geometrisi

SAR sisteminde, belli bir yörüngede hareket eden uçuş platformuna bütünleşmiş edilen anten ve bu antenin SAR yöntemiyle görüntüleme yapacağı sistemin geometrisi Şekil 1.4' de gösterilmiştir.



Şekil 1.4 : Temel SAR geometrisi

SAR sisteminde anten, yatay uçuş yönünde hareket ederek menzil (range) ve çapraz menzil (azimuth) yönlerinde görüntüleme yapar. Anten ile hedef arasındaki doğrusal uzaklığa eğik menzil (slant range) denir [2 - 4].

1.5 SAR Çalışma Modları

Temel olarak üç tip SAR çalışma modu vardır. Bu modlar; şerit tarama (STRIPMAP), tarama (SCAN) ve spotışığı (SPOTLIGHT) (nokta ışınlandırma) çalışma modlarıdır. En yaygın olarak kullanılan çalışma modu, şerit tarama modudur [2, 3, 6].

1.5.1 Şerit tarama modu

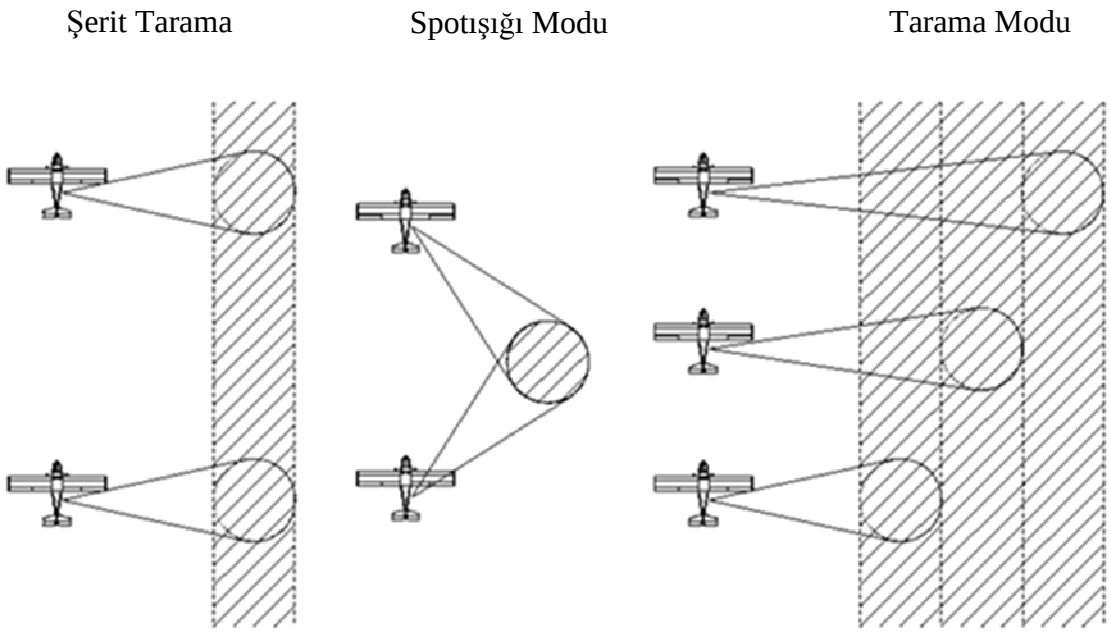
Bu çalışma modunda, radar anteni uçuş platformunun yolu boyunca sabit bir yönde görüntüleme yapar ve yeryüzündeki anten izi (antenna footprint) platform hareket ettikçe ve sistem çalıştıkça belli bir bandı kapsar. Şerit tarama çalışma modu, iki görüntüleme geometrisi içerir. En geleneksel olarak kullanılanı dik-bakış (boresight) geometrisidir. Bu geometride, anten hüzmesi uçuş yönüne diktir. İkinci görüntüleme geometrisi de açılı-bakış (squinted) görüntüleme geometrisidir. Bu geometride, dik bakış açısına göre ileri veya geri yönde belli bir açıda ışıma yapılır. Bu açıya yan bakış açısı denir. Düz arazilerde dik bakış geometrisi kullanılırken, engebeli arazilerde açılı bakış geometrisinin kullanılması daha iyi sonuç verecektir.

1.5.2 Tarama modu

Bu mod, yer parçasının menzil boyutundaki görüntülemenin iyileştirilmesini sağlamaktadır. Bu yetenek, anten hüzmesinin komşu yer parçalarına (subswath) periyodik olarak atlamasıyla gerçekleşir. Bu modda, radar sürekli olarak çalışır, fakat, komşu yer parçalarındaki her hedef için tüm sentetik anten uzunluğunun sadece belli parçası kullanılır. Bu da, çapraz menzil çözünürlüğünde şerit tarama moduna göre azalmaya neden olmaktadır.

1.5.3 SPOTIŞIĞI modu

Önceki modlara göre daha farklı bir yöntem kullanılmıştır. Bu modda, radar anteni, işlem boyunca aynı bölgeyi ışınlandırır. Tarama moduna göre çapraz menzil çözünürlüğünü artırmak için, bu modda anten boyutu büyütülmelidir.



Şekil 1.5 : SAR çalışma modları

1.6 SAR Sisteminde Uzaysal Çözünürlük

SAR sistemiyle daha önce de bahsedildiği gibi yüksek oranda menzil ve çapraz menzil çözünürlüğü elde edilebilir. Çözünürlüğün elde edilmesinde anten boyutu, antenin bakış açısı, hedefe olan uzaklık gibi parametrelerin oynadıkları önemli rol gözardı edilemez.

1.6.1 Menzil çözünürlüğü

Menzil çözünürlüğünün matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

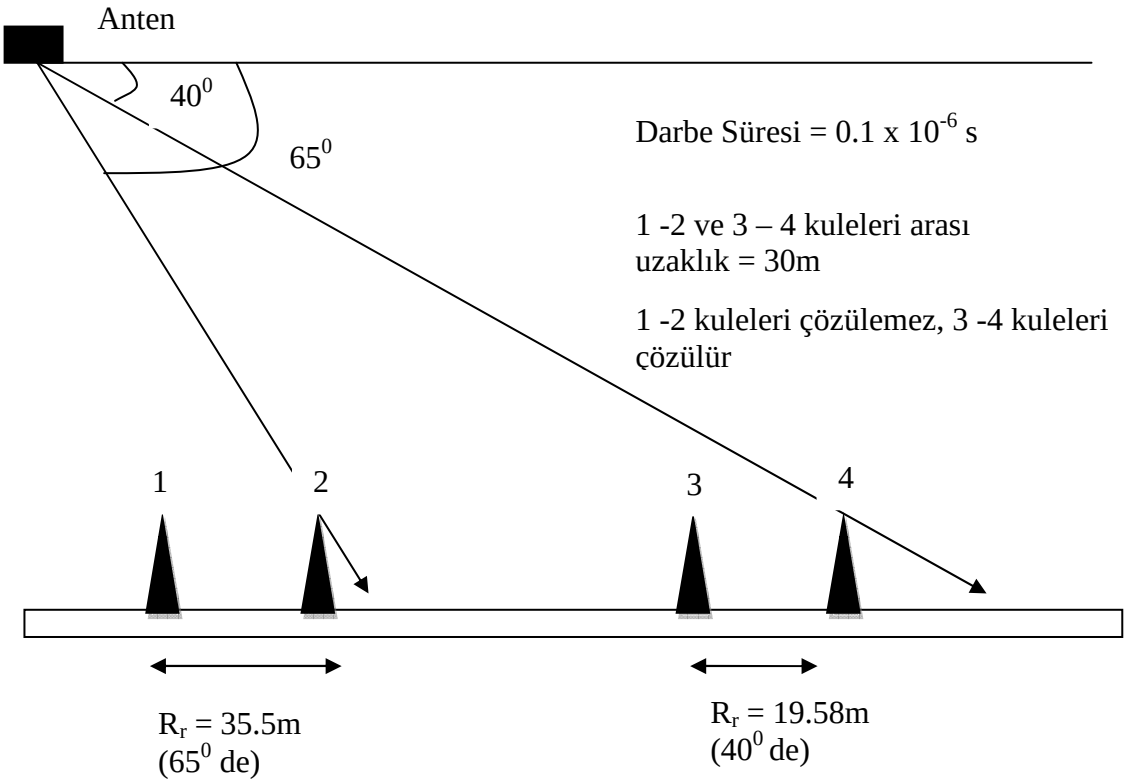
$$R_r = \frac{t.c}{2\cos\gamma} \qquad (1.1)$$

t: Darbe süresi

c: Işık Hızı

γ: Yere bakış açısı

Kısa darbe uzunluğu, daha iyi bir menzil çözünürlüğünün elde edilmesini sağlar [2]. Öte yandan, darbe uzunluğunun kısaltılması hedefi daha düşük bir enerji ile aydınlatmaya yol açar. Şekil 1.6' da menzil çözünürlüğü örneklenmektedir.



Şekil 1.6 : Menzil çözünürlüğü örneği

Örnekte; aralarında 30m bulunan 1 ve 2 kulelerinin bulundukları noktadaki çözünürlük 35.5m olduğu için iki kulenin birbirlerinden ayırt edilemedikleri görülür. Ayrıca, 3 ve 4 numaralı kulelerin bulundukları noktada çözünürlük 19.58m olduğu için aralarında 30m uzaklık bulunan bu kuleler birbirlerinden ayırt edilebilirler.

1.6.2 Çapraz menzil çözünürlüğü

Çapraz menzil çözünürlüğünün matematiksel ifadesini aşağıdaki gibi verebiliriz.

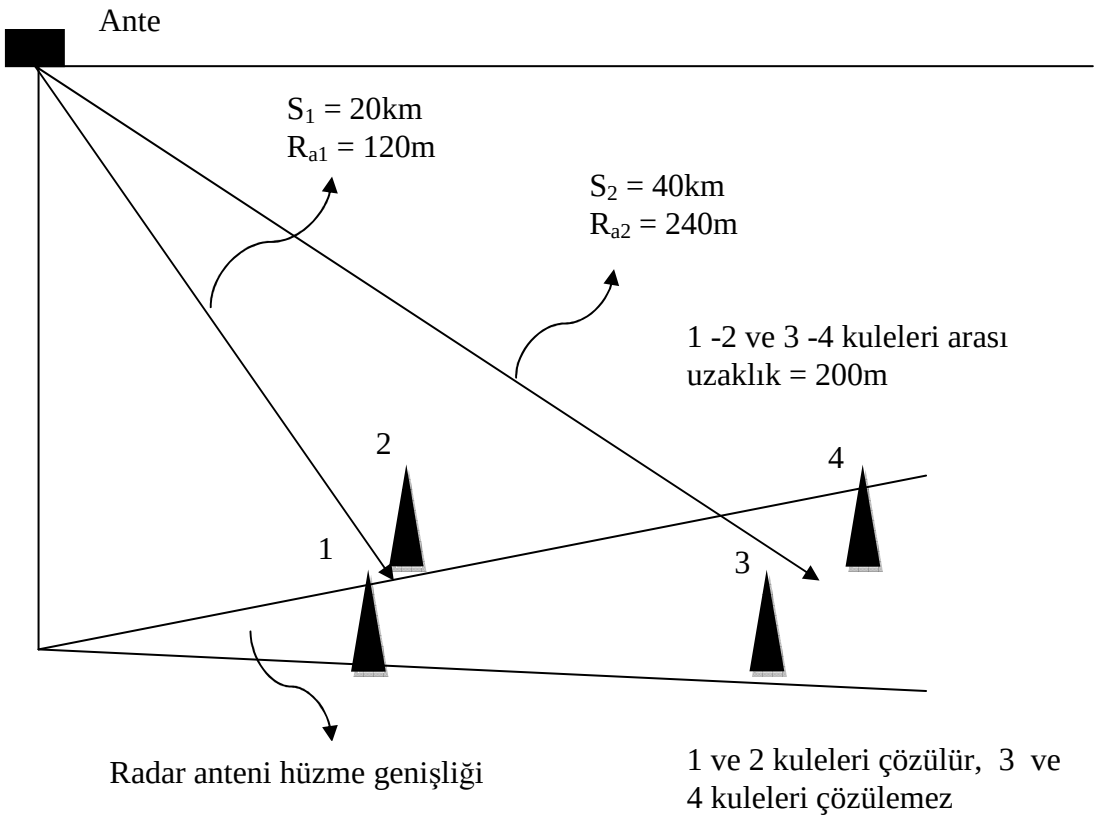
$$R_a = \frac{S.\lambda}{D} \qquad (1.2)$$

S: SAR platform-hedef arası eğik menzil (slant range)

λ: Dalga boyu

D: Sentetik anten açıklığı

Dalgaboyunun (λ) azaltılması ve anten boyunun artırılması çapraz menzil çözünürlüğünü artırır [2]. Dalgaboyunun azaltılması, atmosferdeki ve bitkilerdeki saçılmayı azaltacaktır. Şekil 1.7' de çapraz menzil çözünürlüğünü örneklendirmektedir.



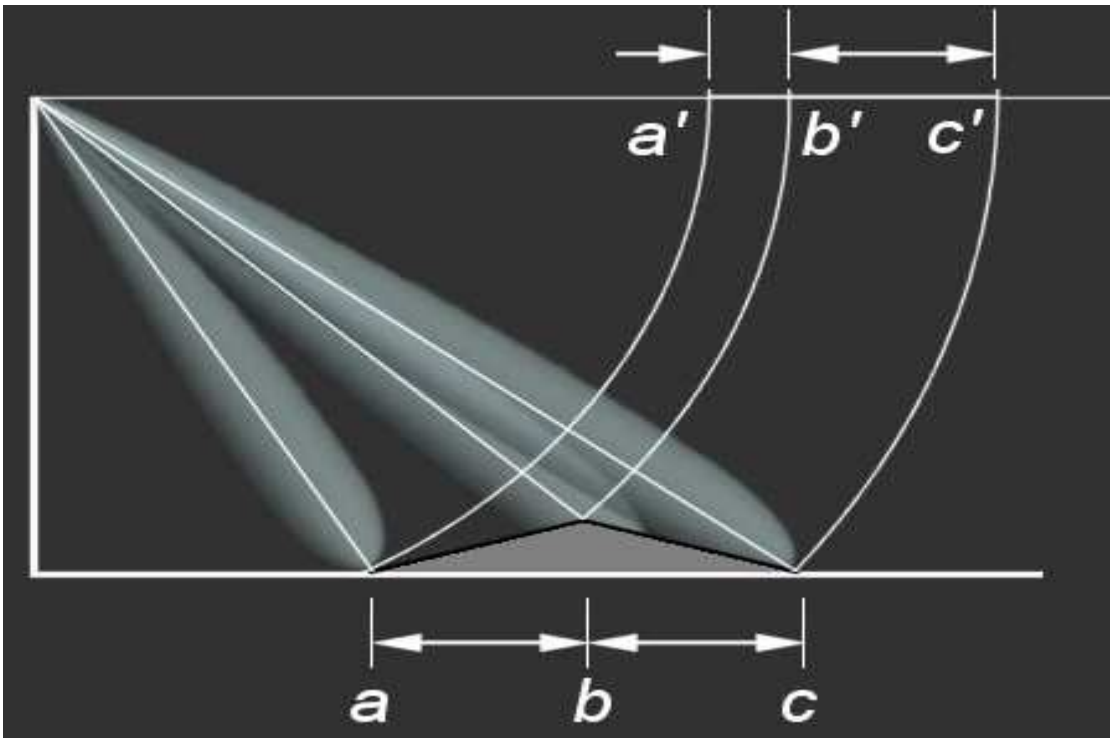
Şekil 1.7 : Çapraz menzil çözünürlüğü örneği

1.7 SAR Sistemine Etkiyen Geometrik Faktörler

Diğer görüntüleme sistemlerinde olabileceği gibi SAR sistemiyle yapılan çalışmalarda, yeryüzü şekillerinin, sistemin çalışmasına büyük etkisi olmaktadır. Yeryüzü şekillerinin SAR görüntülemesine etkisini boy kısalması (foreshortening), kaplama (layover) ve gölge (shadow) şeklinde sıralayabiliriz [7].

1.7.1 Boy kısalması (Foreshortening)

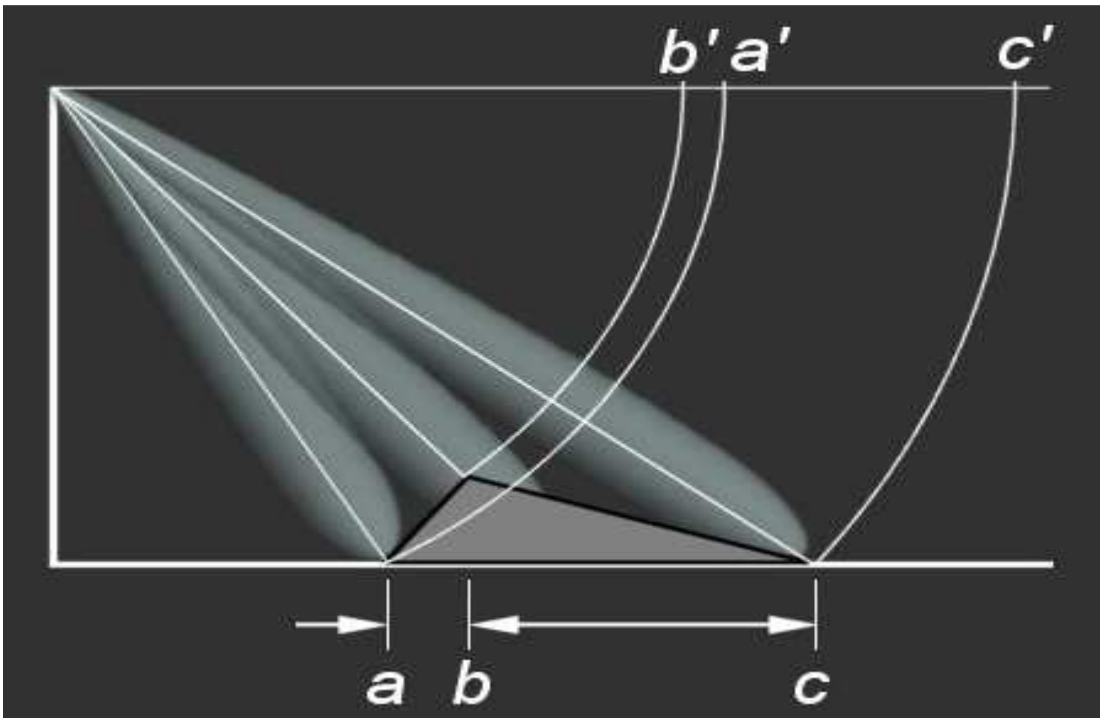
Bu durum, eğimli arazilerin görüntülenmesinde karşımıza çıkmaktadır. Eğimli arazilerde iki nokta arasındaki eğik menzil (slant range) düz araziye göre daha kısa olmaktadır. Bu durum Şekil 1.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 1.8 : SAR – Boy kısalması etkisi örneği

1.7.2 Kaplama (Layover)

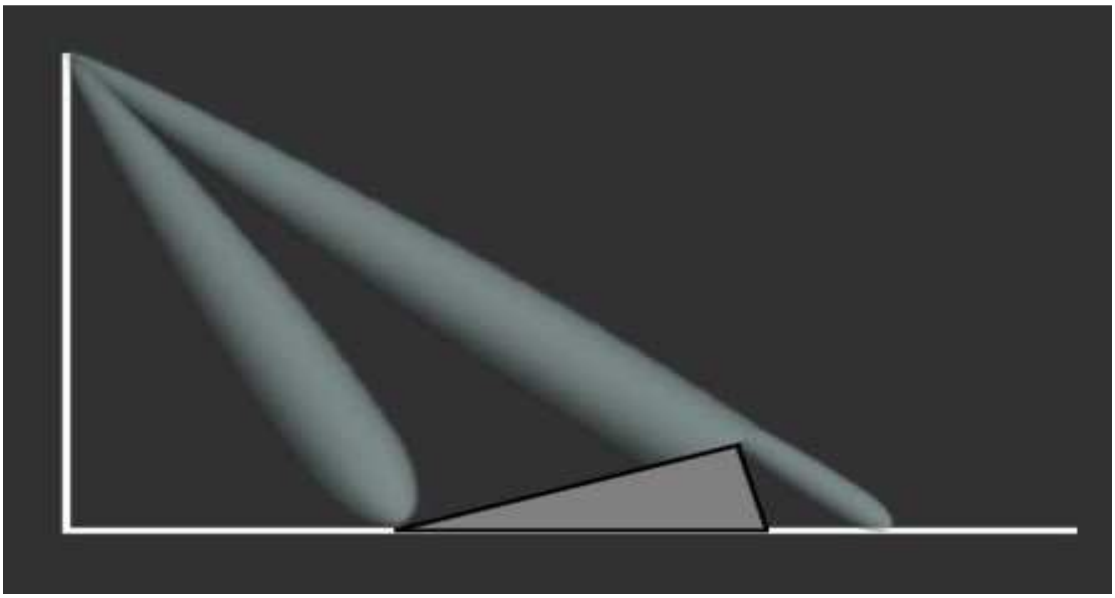
Dik yokuşlu arazilerde bu durum oluşmaktadır. Eğik uzaklığı daha fazla olan vadiler ile dağ tepeleri arasındaki açı görüntüde ters olmaktadır. Bu durum Şekil 1.9’ da gösterilmiştir.



Şekil 1.9 : SAR – Kaplama etkisi örneği

1.7.3 Gölge (Shadow)

Yine dik yokuşlu arazilerde karşımıza çıkar. Dik yamaçların arkalarında kalan yamaçlar, gölgeye maruz kalır. Bu durum Şekil 1.10’ da gösterilmiştir.



Şekil 1.10 : SAR – Gölge etkisi örneği

2. SAR VERİ İŞLEME

SAR sistemlerinde, yıllar boyunca birçok işaret işleme algoritması geliştirilmiştir. İlk başlarda, ayrı ayrı menzil ve çapraz menzil çözünürlüğünü iyileştirmek üzere algoritmalar türetilmiştir. Bu metodlar arşivlerde "Range Doppler Algorithm (RDA)" adıyla dökümante edilmiştir. SAR verisini işleyebilecek yetenekte güçlü sistemler geliştikçe, iki boyutta da çözünürlüğü iyileştirecek yöntemler geliştirilmiştir. Teknolojideki son gelişmeler, istenilen her çözünürlükte işaret işlemeye olanak sağlayacak yöntemlerin geliştirilmesini sağlarken, yüksek donanımsal maliyetleri de beraberinde getirmiştir.

SAR verisi işlemek üzere geliştirilen algoritmaları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz. Bütün algoritmalar birbirlerine göre birtakım avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu algoritmalar içerisinde en yaygın olarak kullanılanı RDA' dır.

•Range Doppler Algoritması

•Chirp Scaling Algoritması

•Omega-K Algoritması

•SPECAN Algoritması

RDA algoritması 1976-1978 yılları arasında SEASAT SAR verisini işlemek üzere geliştirilmiştir [6]. Daha sonra, 1978' de uzaysal SAR görüntülerini sayısal olarak işlemek üzere kullanılmıştır ve günümüzde de yaygın olarak kullanılmaktadır. RDA, menzil-Doppler frekansı domeninde çalışır, tek boyutlu işlemlerde kolaylık sağlar. Bu algoritma ile ilgili detaylı bilgi ve örnek SAR işleme çalışması ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

2.1 SAR İşaret İşleme Aşamaları

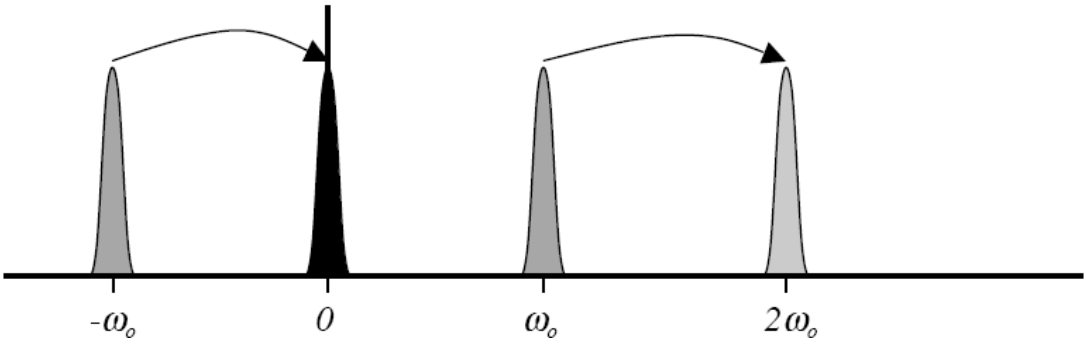
SAR işaret işleme ve SAR görüntü oluşturma adımları bu bölümde detaylı olarak açıklanacaktır. İşaret işleme adımları basit örneklerle örneklendirilerek daha iyi şekilde anlatılmaya çalışılacaktır. Ayrıca gönderilen ve alınan SAR işaretinin özellikleri açıklanarak Doppler frekans kayması konusuna değinilecektir.

Alınan SAR işareti öncelikle demodüle edilir ve sayısal forma dönüştürülür. Ardından da seçilen bir SAR işaret işleme algoritması ile işlenir ve görüntü haline getirilir.

2.1.1 Demodülasyon

Alınan SAR elektromanyetik dalgası belli bir taşıyıcı frekans civarında (yaklaşık olarak ω~5GHz) belli bir band genişliğine sahip (B~15MHz) cıvıltı (chirp) işaretidir. Nyquist örnekleme kuralına göre alınan bu SAR işareti 10GHz örnekleme frekansı ile örneklenebilir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken nokta şudur; tek bir örnek 1 bayt hafızada saklanacak olursa 10GHz frekansında örnekleme yapıldığı taktirde elimizde her saniye 10GB veri olacaktır. Bu kadar büyük verinin hem işlenmesi çok uzun zaman alacaktır hem de bu kadar verinin saklanması çok büyük bellek elemanları gerektirecektir, sonuç olarak 10GHz' de örnekleme yapmak efektif olmamaktadır [8].

Taşıyıcı frekans civarında yapılan örneklemenin efektif olmaması nedeniyle SAR işareti, sanal bileşen taban frekans bandına gelecek şekilde kaydırılır [9]. SAR işareti gerçek değerli bir fonksiyon olması ve işareti Fourier transformu Hermityen simetri özelliği taşıdığı için kaydırma işlemini SAR işaretine uygulamamızda sakınca bulunmamaktadır. Ayrıca kaydırılmış işaretin 2ω frekansında meydana gelen bileşenini yok etmek üzere son durumda elde edilen işaret alçak geçiren filtreden (AGF) geçirilir. Sonuçta, taşıyıcı frekans ile bilgi işareti birbirlerinden ayırt edilmiş oldu ve taban bantta bilgi işareti oluşturuldu. Bu durumda taşıyıcı frekansa göre çok daha düşük frekanslarda örnekleme yapılarak daha düşük bellek gerekecektir.



Şekil 2.1 : SAR işaretinin demodülasyon işlemi

Taban bantta elde edilen karmaşık işaret sayısal forma dönüştürülerek belli bir formatta depolanır. SAR işaretini saklamak üzere CEOS gibi formatlar geliştirilmiştir. Bu aşamanın sonucunda SAR işareti demodüle edilip sayısallaştırılmış hale getirilmiş olur, bundan sonraki adımlarda SAR işaretinin bu hali alınarak SAR işaret işleme yapılır. Bu formdaki veriye ham (RAW) SAR verisi adı verilir.

2.1.2 SAR görüntü oluşturma

Bu adımda ham SAR verisinin işlenerek SAR görüntüsünün oluşturulması adımları anlatılacaktır.

Ham SAR verisinden görüntü oluşturmaya yönelik bir çok algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmalardan en yaygın olarak kullanılanı Range-Doppler Algoritması (RDA)' dır. Bu çalışmada da görüntü oluşturma algoritması olarak RDA kullanılmıştır.

RDA algoritması üç temel aşamadan oluşmaktadır; menzil yönünde sıkıştırma (range compression), menzil hücre göçü düzeltme (range cell migration correction, RCMC) ve çapraz menzil yönünde sıkıştırma (azimuth compression). Her temel aşama birkaç alt aşamadan oluşabilir.

2.1.2.1 Menzil sıkıştırması

SAR radarlarında gönderilen işaret dikdörtgen dalga olabilirdi. Dikdörtgen dalga kullanılması durumunda işaretin süresi çok önem kazanmaktadır. Kısa darbe süresi olması durumunda elektromanyetik dalganın menzili de kısa olmaktadır, ayrıca menzil çözünürlüğü de düşmektedir. Bu olumsuzlukları gidermek için uzun süreli darbe kullanımı durumunda menzil çözünürlüğü ve menzil artmaktadır ancak bu durumda da çok fazla güç harcanmaktadır. Fazla güç sarfiyatını önlemek için işaret süresi uzun olan frekans modülasyonlu cıvıltı (chirp) işareti kullanılır [8]. Bu şekilde, hem uzun işaret süresi ile çözünürlük artırılmış olur hem de, güç kaybı azaltılmış olur.

SAR' da kullanılan cıvıltı işareti aşağıdaki gibidir:

$$s(t) = e^{i\pi kt^2} \qquad |t| < \tau_p/2 \qquad (2.1)$$

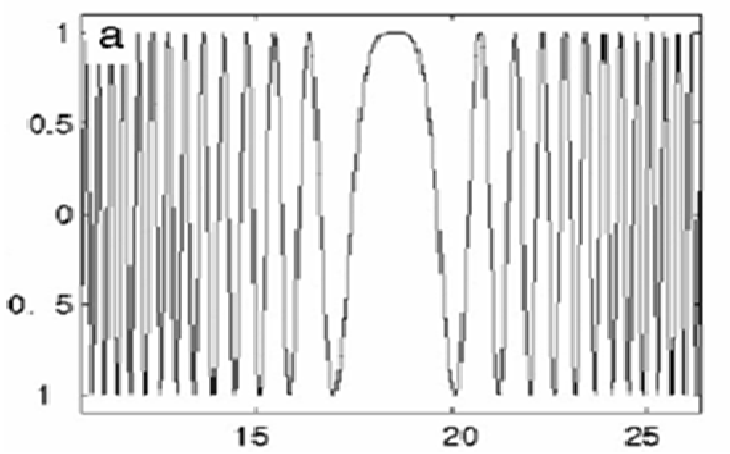
k: Cıvıltı işareti eğimi

τ_p : Darbe süresi

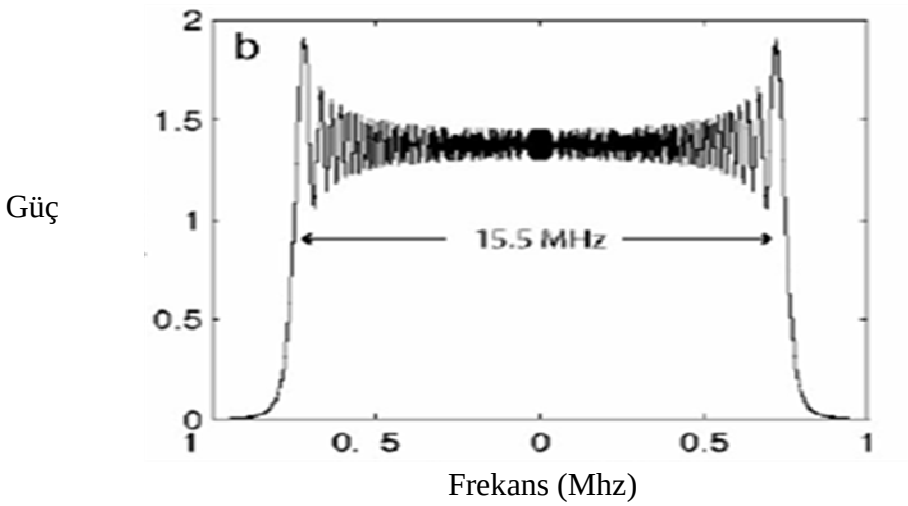
f_s : Menzil örnekleme oranı

SAR platformundan yeryüzüne gönderilen frekans modülasyonlu işarete ait elektromanyetik dalga, yeryüzünde kilometrelerce genişlikteki menzile çarpar ve geri döner. Platforma geri dönen işaret, gönderilen işaret ile yeryüzündeki nesnelerin yansıtıcılığı ile konvolve olmuş halidir. Amacımız sadece yeryüzü yansıtıcılığı bilgisini elde etmek olduğundan yeryüzüne gönderilen işaret bileşke işaretten dekonvolüsyon yoluyla ayırılmalıdır. Bu işleme menzil sıkıştırması adı verilir.

Menzil sıkıştırması aşamasında, bilgi işaretinin dekonvolüsyon yoluyla toplam işaretten çıkarılması işlemi uyumlu filtreler aracılığı ile yapılır. Uyumlu filtre ile SAR platformuna dönen bileşke işaret işleme sokulduğunda sonuçta bilgi işareti elde edilmiş olur. Uyumlu filtre, yeryüzüne gönderilen SAR işaretinin karmaşık eşleniğine eşittir [8].



Şekil 2.2 : Cıvıltı işaretinin zaman domeni gösterimi

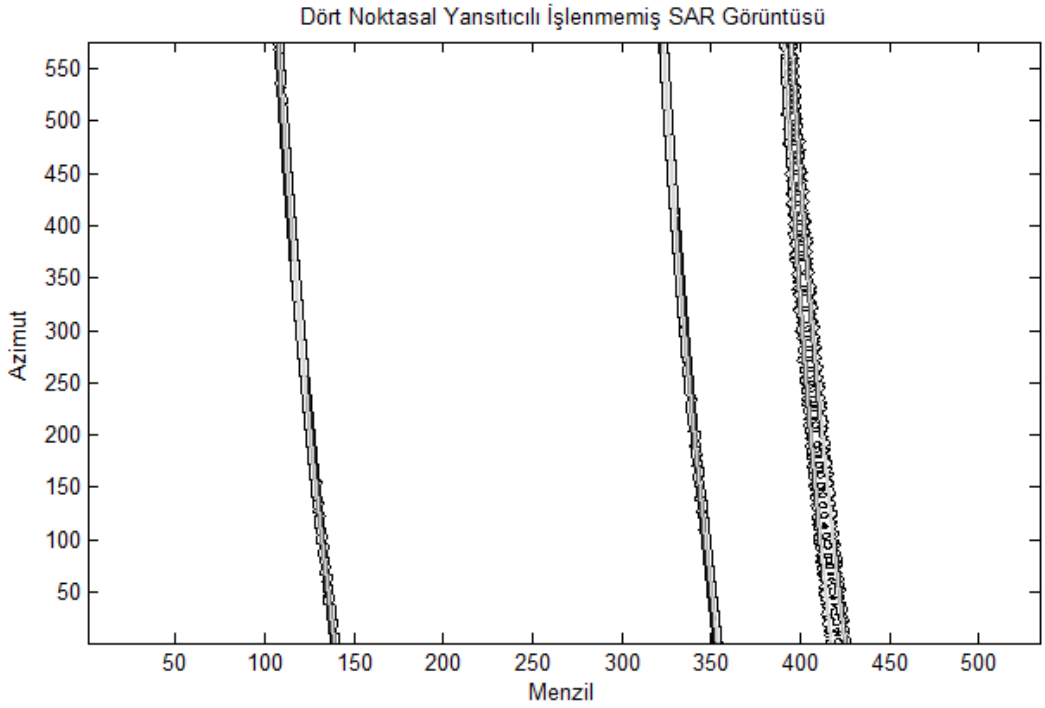


Şekil 2.3 : Cıvıltı işaretinin frekans domeni gösterimi

Şekil 2.2 ve 2.3’ de, sırasıyla SAR platformundan yeryüzüne gönderilen cıvıltı işaretinin zaman ve frekans domenlerindeki karşılıkları gösterilmektedir.

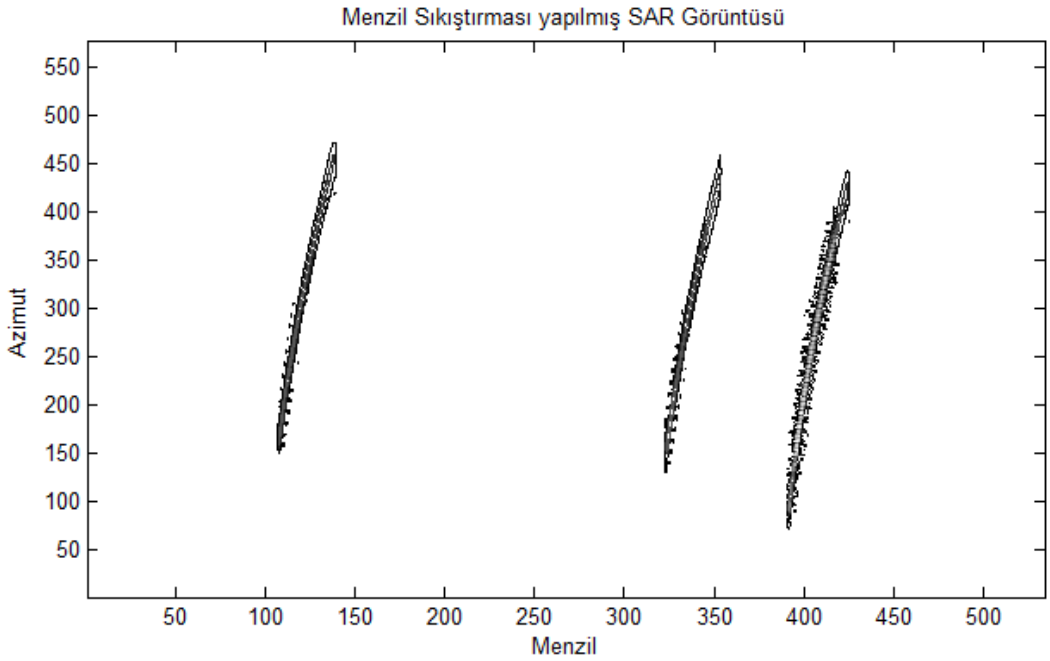
SAR işaret işleme adımlarını kafada daha iyi canlandırabilmek için burada bir örneğe yer verilmektedir. Örnekte gerçek veri kullanılmamıştır. Dört yansıtıcının bulunduğu bir ortamın benzetimi yapılmıştır. Bir noktasal yansıtıcı ham SAR verisinin zaman domenindeki formunda hiperbolik bir şekilde görülür. Bu, SAR platformunun hareketinden kaynaklanır. Platform, noktasal yansıtıcının tam hizasına gelmeden önce SAR anteninin gönderdiği darbelerin oluşturduğu elektromanyetik dalganın çok az bir kısmı noktasal yansıtıcıya çarpar. Bu durumda, noktasal yansıtıcı SAR sistemine göre daha uzak bir menzilde ve gerçek boyutuna göre çok daha küçük bir nesneymiş gibi algılanır. Platform, noktasal yansıtıcı hizasına geldiğinde ise, yansıtıcıdan daha fazla enerji geri yansıyacaktır ve bu enerji daha kısa sürede platform geri dönecektir. Bu durumda da noktasal yansıtıcı daha yakın bir menzilde ve daha büyük bir cisim olarak gözlenecektir. SAR platformu hareketine devam edip noktasal yansıtıcıdan tekrar uzaklaşmaya başladığında da durum yine ilk haldeki gibi olur, yani platformun noktasal yansıtıcı hizasına gelmeden önceki durumdaki gibi olur.

Aşağıda verilen örnekte dört noktasal yansıtıcının SAR sistemine dönen cevabı gerçeğe uygun olması açısından hiperbolik şekilde simüle edilmiştir.



Şekil 2.4 : Dört yansıtıcıya ait ham SAR görüntüsü

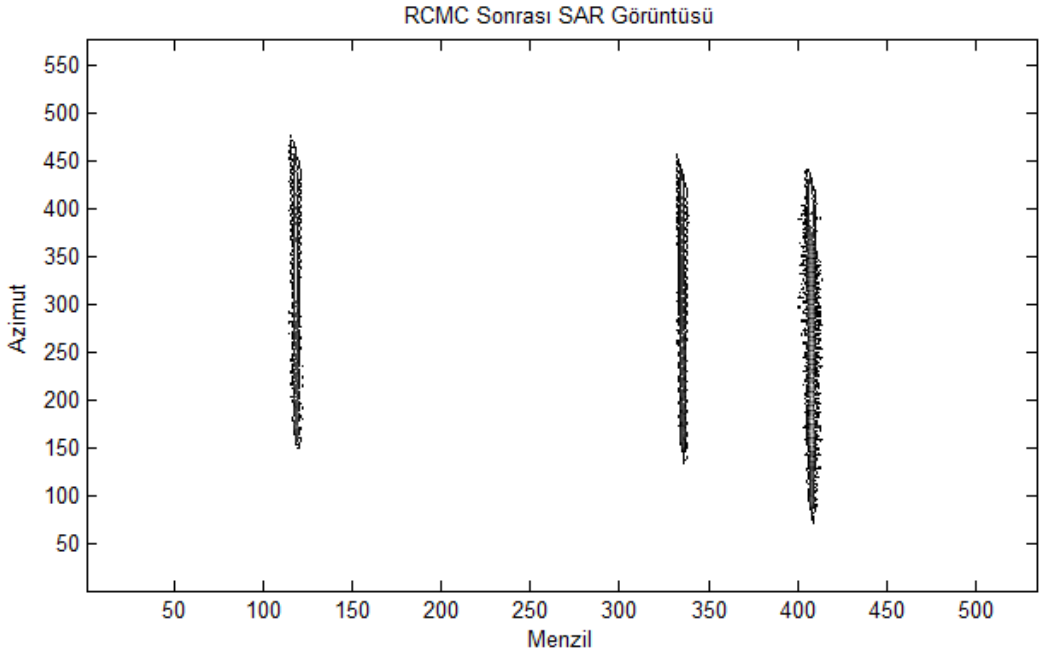
Şekil 2.4’ teki işlenmemiş SAR görüntüsüne menzil sıkıştırma işlemi uygulandıktan sonra SAR görüntüsü aşağıdaki şekle dönüşür.



Şekil 2.5 : Menzil sıkıştırması sonrası SAR görüntüsü

2.1.2.2 Menzil hücre göçü düzeltme (RCMC)

Ham SAR ve menzil sıkıştırması yapılan SAR görüntülerinde de görüldüğü gibi noktasal yansıtıcılara ait SAR görüntüleri hiperbolik şekle sahip olduklarından dolayı, bir menzile ait noktasal yansıtıcıya ait veri komşu menzil hücrelerine de taşmaktadır. Doğru bir SAR işaret işleme yapabilmek için bu problemin giderilmesi gerekmektedir. SAR işaret işleme uygulamalarında Doppler merkez frekansının kestirimi ile birlikte RCMC işlemi en önemli adımlardandır. RCMC işlemi ardından SAR görüntüsü Şekil 2.6’ da görüldüğü gibi hiperbolik formattan çizgisel formata dönüşmektedir.



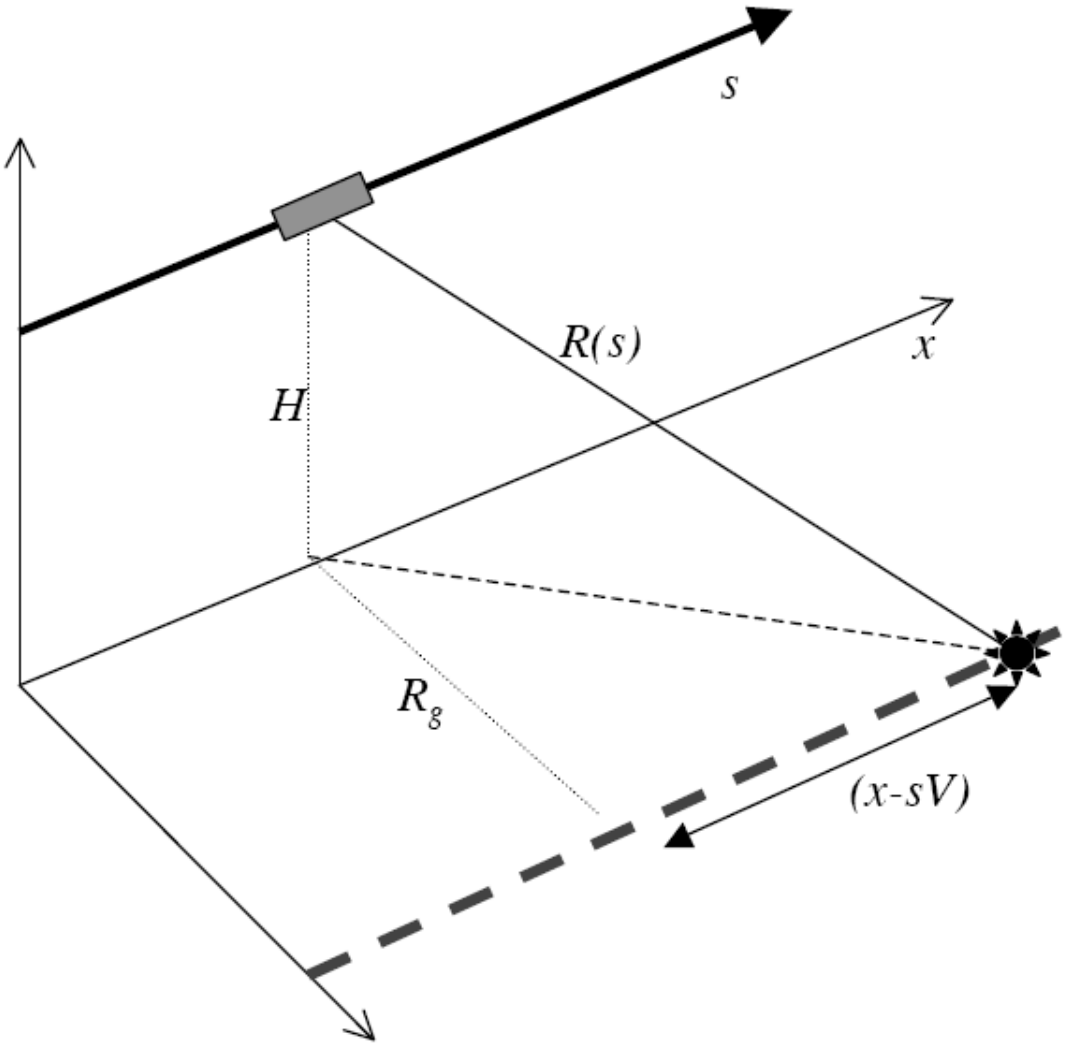
Şekil 2.6 : RCMC işlemi sonrası SAR görüntüsü

2.1.2.3 Çapraz menzil sıkıştırması

Menzil sıkıştırması ve RCMC işlemleri ardından SAR işaretine çapraz menzil sıkıştırması işlemi uygulanır. Bu bölümde Doppler frekans kayması kavramına da değinilecektir.

Çapraz menzil sıkıştırması, SAR platformunun özelliği nedeniyle SAR işaretinde çapraz menzil yönünde oluşan cıvıltı işaretini bilgi işaretinden ayırt etmektir. Detaylı bilgi aşağıdadır.

SAR geometrisini yeniden irdeleyelim.



Şekil 2.7 : SAR geometrisi

s: Azimut boyutunda zaman

x: Uçuş yönünde pozisyon

V: Uçuş yönünde hız

s_0: Noktasal yansıtıcı ile SAR platformunun aynı hizada olduğu zaman

H: Platform yüksekliği

R_g: Yeryüzü menzili

R(s): SAR platform ile hedef yansıtıcı arası menzil

$R_0 = R_{near} + n*(C/f_s)$: Platform ile hedef arası en kısa mesafe

SAR sistemine dönen herbir radar yansıtıcı ekosunun karmaşık fazı şöyledir.

$$C_s = \exp\left[i \frac{4\pi}{\lambda} R(s) \right] \tag{2.2}$$

Formüldeki R(s) ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$R^2(s) = H^2 + R_g^2 + (x - sV)^2 \tag{2.3}$$

Bu ifade hiperbolü ifade eder ve parabolden yararlanarak bu ifadeyi aşağıdaki gibi yaklaşık olarak yazabiliriz.

$$R(s) = R_0 + \dot{R}_0 (s - s_0) + \frac{\ddot{R}_0}{2} (s - s_0)^2 + \ldots \tag{2.4}$$

Nokta işareti menzile göre türevi göstermektedir. Curlander ve McDonough (1991) bu polinomal yaklaşıklığın doğruluğunu tartışmışlardır [8]. Yukarıdaki eşitliklerden yola çıkılarak türev ifadeleri aşağıdaki gibi çıkarılabilir.

$$\dot{R}_0 = -V \frac{(x - s_0 V)}{R_0} \tag{2.5}$$

İkinci dereceden türev ifadesi de şöyle olur:

$$\ddot{R}_0 = \frac{V^2}{R} + \frac{-V^2 (x - sV)^2}{R^3} = \frac{V^2}{R} \left[1 - \frac{(x - sV)^2}{R^2} \right] \tag{2.6}$$

Genellikle ikinci terim çok küçük olabilmektedir ve bu terim dikkate alınmayabilir. Hesaplanan eşitliklerden yararlanarak karmaşık faz ifadesini tekrar yazacak olursak;

$$C(s) = \exp\left\{ i \frac{4\pi}{\lambda} \left[R_0 + \dot{R}_0 (s - s_0) + \ddot{R}_0 (s - s_0)^2 / 2 \right] \right\} \tag{2.7}$$

veya daha açık bir ifade ile,

$$C(s) = \exp\left\{ i \frac{4\pi R_0}{\lambda} \right\} \exp\left\{ i 2\pi \left[\frac{-2V}{\lambda} \frac{(x - s_0 V)}{R_0} (s - s_0) + \frac{2V^2}{\lambda R_0} (s - s_0)^2 / 2 \right] \right\} \tag{2.8}$$

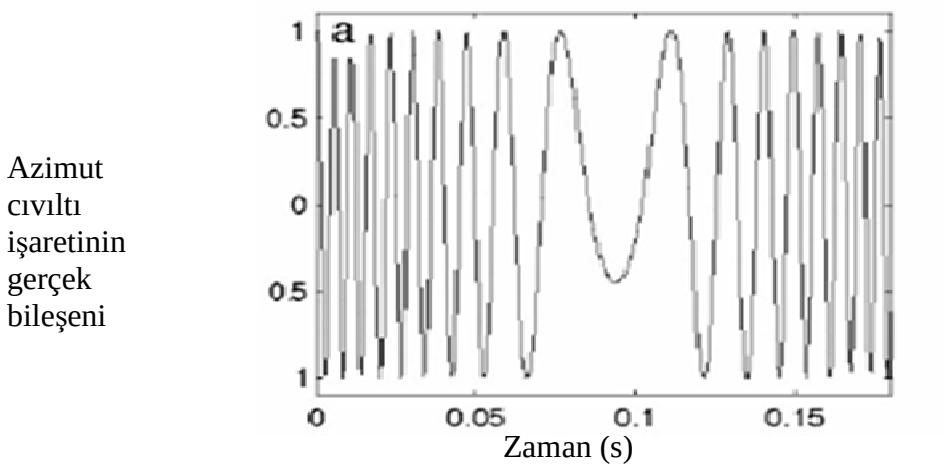
Son olarak elde edilen karmaşık faz ifadesinde Doppler merkez frekansı ve Doppler frekans hızı da bulunmaktadır.

$$f_{DC} = \frac{-2V}{\lambda}\frac{(x - s_0 V)}{R_0} \quad \text{: Doppler merkez frekansı} \qquad (2.9)$$

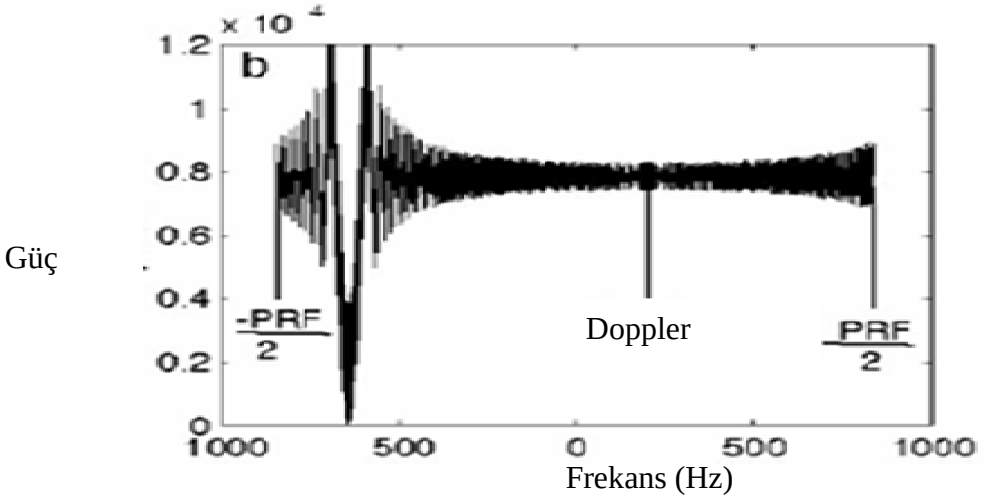
$$f_R = \frac{2V^2}{\lambda R_0} \quad \text{: Doppler frekans hızı} \qquad (2.10)$$

Doppler merkez frekansı, platform ile hedef yansıtıcının aynı hizada olduğu zamandaki ($s = s_0$) frekanstır. Bu frekans genellikle [-PRF/2 - +PRF/2] aralığında yer almaktadır.

Kompleks faz işaretine tekrar bakacak olursak, bu işaretin de bir cıvıltı işareti olduğu görülmektedir. İşaretin zaman ve frekans domeni karşılıkları Şekil 2.8 ve 2.9'da gösterilmektedir.



Şekil 2.8 : Çapraz menzil cıvıltı işareti zaman domeni gösterimi

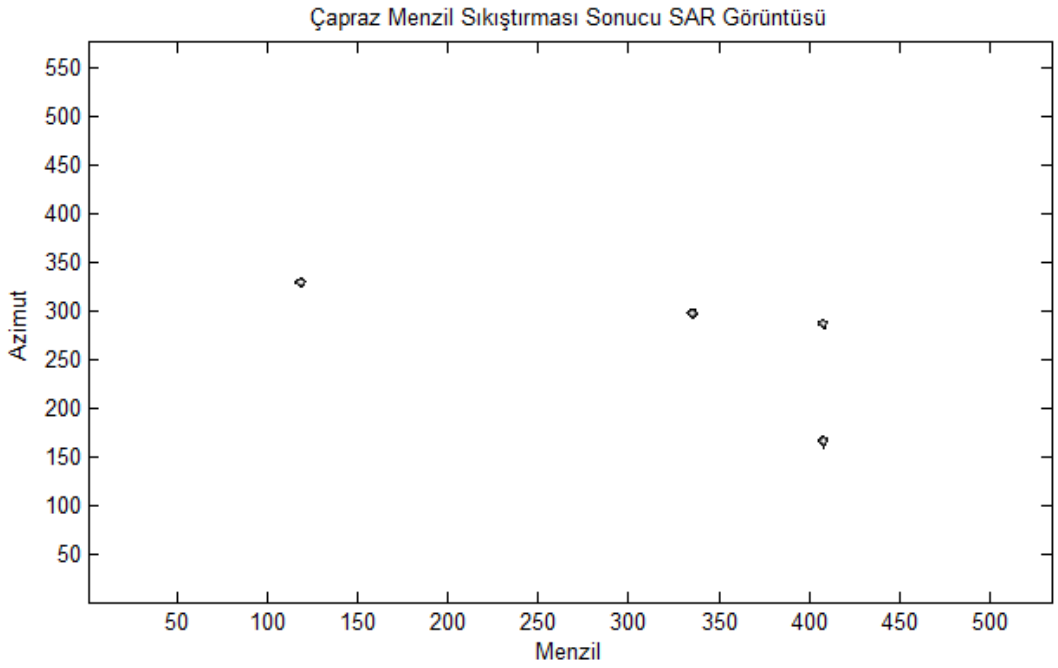


Şekil 2.9 : Çapraz menzil cıvıltı işareti frekans domeni gösterimi

Çapraz menzil cıvıltı işaretinin bilgi işaretinden çıkarılması işlemi çapraz menzil sıkıştırması adını alır. Çapraz menzil sıkıştırması işlemi de yine menzil sıkıştırması aşamasında yapıldığı gibi uyumlu filtreler ile gerçekleştirilir. Uyumlu filtrenin frekans cevabı Doppler merkez frekansına göre hesap edildiği için bu aşamadan once mutlaka Doppler merkez frekansı hesap edilmelidir. Yukarıda değinilen Doppler merkez frekansı ileriki bölümlerde anlatılan Doppler merkez frekans kestirim yöntemlerinden birisi kullanılarak hesap edilir, ardından çapraz menzil uyumlu filtresi tasarlanır ve bu filtre yardımıyla da çapraz menzil sıkıştırma adımı tamamlanmış olur.

Doppler merkez frekansının yanlış hesap edilmesi durumunda gerçek yansıtıcı bilgileri kaybedilebilir ve işaret gürültü oranı düşürülebilir, sonuçta da beklenen SAR görüntüsü elde edilemez.

Çapraz menzil sıkıştırma işlemi ardından nokta yansıtıcılar SAR görüntüsünde belirir. Bu aşamadan sonra görüntü işleme teknikleri yardımıyla SAR görüntüsünün iyileştirilmesi işlemleri uygulanabilir.



Şekil 2.10 : Çapraz menzil sıkıştırması sonrası SAR görüntüsü

Böylece SAR işaret işleme adımlarının sonuna gelinmiş, yansıtıcıların belirginleştiği SAR görüntüsü elde edilmiştir. Bu çalışmanın son bölümünde gerçek ham SAR verisi ile yapılmış bir SAR işaret işleme uygulaması verilmiş, bu uygulama üzerinde yanlış Doppler merkez frekans kestiriminin etkileri gösterilmiştir.

3. DOPPLER MERKEZİ KESTİRİMİ

İşlenmiş bir SAR görüntüsünün kalitesi, ışınlandırılan hedeflerden yansıyan işaretlerin beklenen faz geçmişlerinin doğru bir şekilde kestirilmesine çok bağlıdır. Kestirimde yapılacak hatalar, çapraz menzil işlemesinde kullanılacak uyumlu filtrenin hatalı bir şekilde tasarlanmasına, filtrenin yanlış tasarımı ise görüntü kalitesinin düşmesine sebep olacaktır. Daha açık bir ifade ile, yanlış filtre tasarımı, SNR oranının düşmesine, çapraz menzil belirsizlik oranının artmasına ve piksel konumunun değişmesine sebep olcaktır. Genel olarak, spesifik SAR görüntü kalite gereksinimleri için, Doppler merkez frekansının yeterli derecede doğru bir şekilde kestirilmesi gerekmektedir. Doppler merkez kestiriminin doğru bir şekilde yapılması, SAR görüntüsünün hızlı bir şekilde elde edilmesini de sağlamaktadır.

Doppler merkez frekansının kestirimine yönelik bir çok yöntem ve algoritma geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin birbirlerine göre maliyet, uygulanabilirlik ve karmaşıklık gibi durumlar yönünden bir takım avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. İlerleyen bölümlerde bu yöntemler detaylı olarak açıklanmaktadır.

3.1 ΔE Algoritması (Energy Balancing)

ΔE Algoritması, Curlander (1982), Li (1985) ve Madsen (1986) tarafından tanımlanan, yaygın olarak bilinen bir frekans domeni yaklaşımıdır [10]. Bu algoritma, çapraz menzil yönünde en temel SAR özelliğini kullanır. Algoritmaya göre, anten hüzmesinin merkezindeki frekans Doppler frekansıdır ve bu frekans, frekans domeninde anten çapraz menzil (azimut) paterninin maksimum gücüyle orantılıdır. Frekans domeninde, gücün maksimum olduğu noktadaki frekans Doppler frekansıdır [11].

Maksimum güce bağımlı olan frekansı belirleyebilmek için, belli r uzaklığındaki (slant range) ayrık çapraz-menzil işareti olan A_r, Ayrik Fourier Transformu ile frekans domenine dönüştürülür ve spektrumun periodogramı hesap edilir.

$$A_r\left(\frac{n}{N_aT}\right)=\sum_{k=0}^{N_a-1}a_r(kT)\exp\left[-j\frac{2\pi}{N_a}nk\right] \qquad \text{n = 0, 1, . . . Na - 1} \qquad (3.1)$$

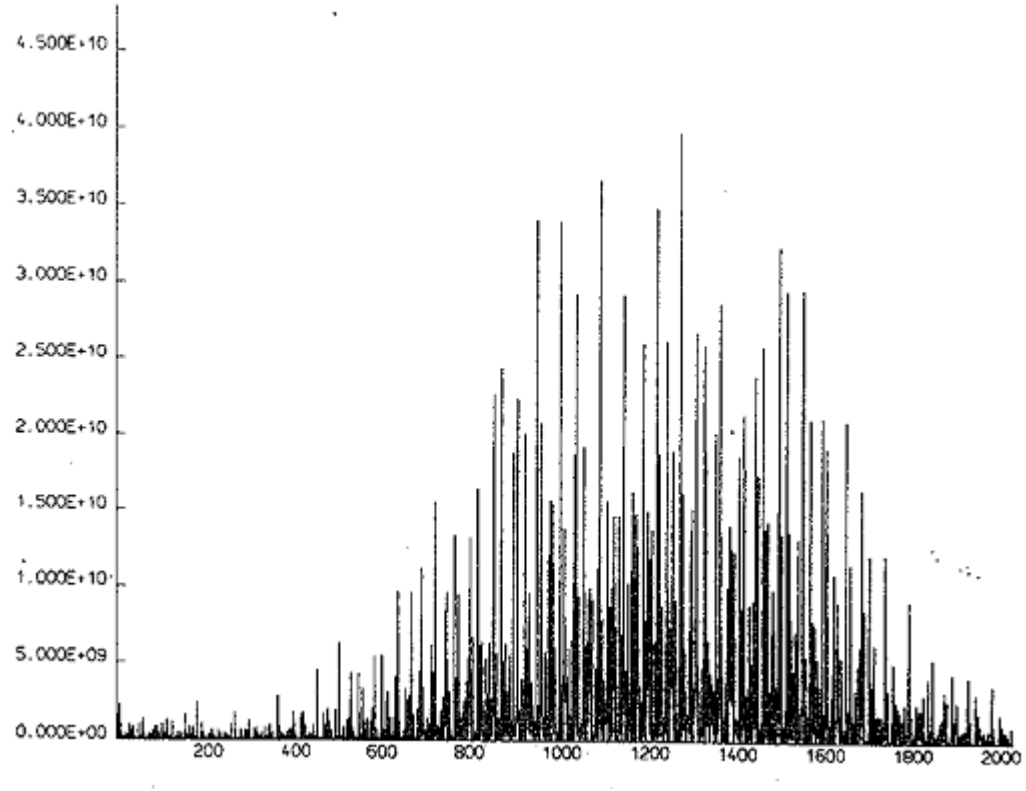
Na : Çapraz menzil örnek sayısı

T : Darbe tekrarlama süresi

A_r işaretinin Ayrık Fourier Transformu' nun hesabı **(3.1)**' de verilmiştir.

$$P_r\left(\frac{n}{N_aT}\right)=\left|A_r\left(\frac{n}{N_aT}\right)\right|^2 \qquad (3.2)$$

Ayrık Fourier Transform' u alınmış işaretin periodogramı da **(3.2)**' de verilmiştir. Periodogramın spektrumu Şekil 3.1' de verilmştir.



Şekil 3.1 : Çapraz menzil yönündeki işaretin periodogramı

Periodogramın varyansını azaltmak icin rl' den ru' ya kadar uzaklıklardaki (slant range) azimut periodogramları toplanır. Bu hesabın ifadesi;

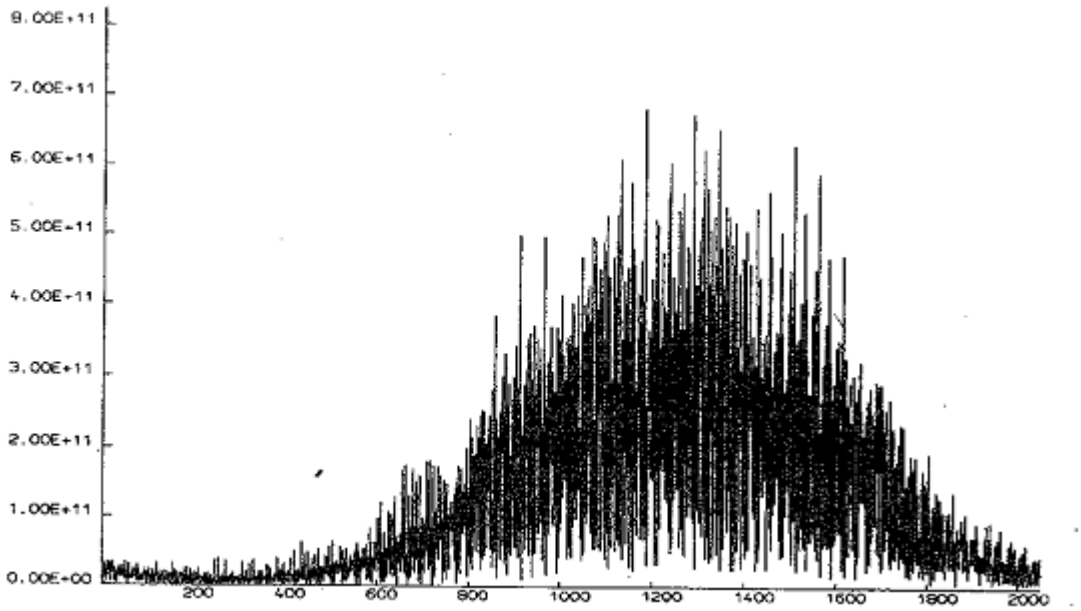
$$P_{ac}\left(\frac{n}{N_aT}\right)=\frac{1}{N_r}\sum_{r=r_l}^{r_u}P_r\left(\frac{n}{N_aT}\right) \qquad \text{rl} \le \text{r} \le \text{ru} \qquad (3.3)$$

Nr : Toplanan çapraz menzil periodogram sayısı

rl : Alt menzil sınırı

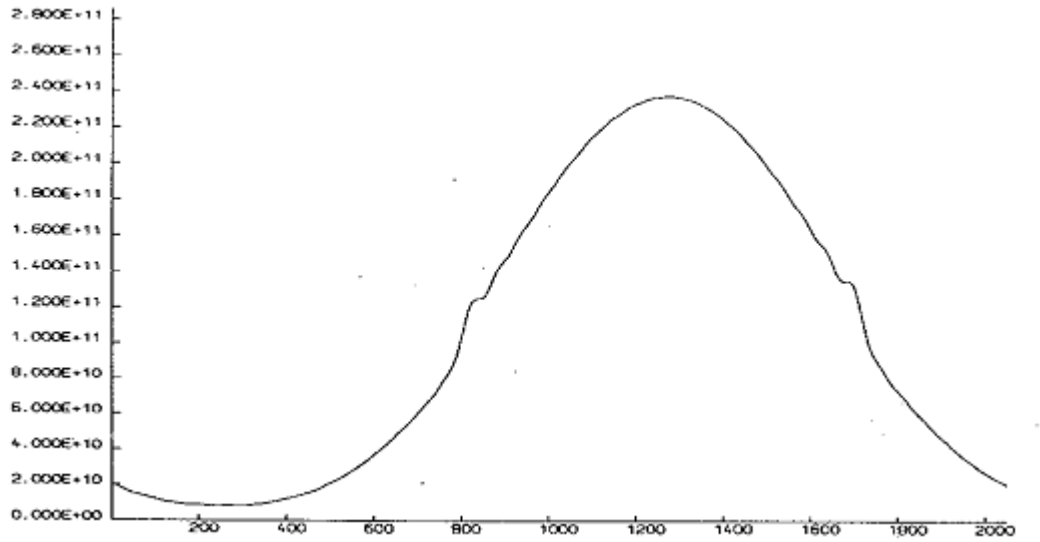
ru : Üst menzil sınırı

Periodogramların toplanması işleminden sonra ortaya çıkan spektrum Şekil 3.2’ de yer almaktadır.



Şekil 3.2 : Toplanan periodogramların frekans domeni cevabı

Bu noktada, toplamsal periodogramın, yavaş bir şekilde değişen anten patern fonksiyonunun hedeften yansıyan yüksek frekanstaki bilgi işaretiyle çarpımsal bir şekilde üst üste geldiğini düşünebiliriz. Bu sebepten dolayı, Madsen’ in yaklaşımına göre, elde edilen son işaret alçak geçiren filtreden geçirilerek yüksek frekanslı bilgi bileşenleri işaretten ayırılır. Böylece, geriye sadece yavaş değişen anten patern fonksiyonu kalır. Filtrelenmiş işaretin spektrumu Şekil 3.3’ tedir.



Şekil 3.3 : Toplam periodogramın AGF'den geçirilmiş formu

Yukarıdaki şekilde de görülen, modifiye edilmiş çapraz menzil periodogramının maksimum gücüne bağlı olan frekans, Doppler merkez frekansı, Şekil 3.3' ün maksimumuyla ilişkilidir.

3.2 Doppler Kestirim (Doppler Estimation (CDE)) Yöntemi

CDE algoritması, çapraz menzil işaretini zaman domeninde kullanmasına rağmen yöntem olarak ΔE algoritmasına oldukça benzemektedir. Frekans domeninde kullanılan algoritmaya zıt olarak, frekans domeninde uygulanan adımlar bu yöntemde ilgili zaman domeni eşitlikleri ile sağlanmaktadır.

Doppler merkezine göre çapraz menzil işaretinin periodogramındaki kayma, ilgili zaman domenindeki fonksiyondaki faz kaymasının hesabı ile belirlenir.

Öncelikle, belli bir r uzaklığındaki (slant range) ayrık çapraz menzil işaretinin (ar) otokorelasyon fonksiyonu olan R_r hesap edilir.

$$R_r(kT) = \sum_{i=0}^{N_a-1} \left(a_r((k+i)T)a_r(iT)\right) \qquad (3.4)$$

R_r, ayrık fourier transformu yoluyla çapraz menzil periodogramı P_r' ye bağlıdır.

$$R_r(kT) \xrightarrow{F} \left|A_r\left(\frac{n}{N_a T}\right)\right|^2 = P_r\left(\frac{n}{N_a T}\right) \qquad (3.5)$$

ΔE algoritmasındaki gibi, belli r uzaklığındaki otokorelasyon fonksiyonları toplanır.

$$R_{ac}(kT) = \frac{1}{N_r}\sum_{r=r_l}^{r_u} R_r(kT) \qquad \text{rl} \le \text{r} \le \text{ru} \tag{3.6}$$

Nr : Menzil değerleri sayısı

rl : Alt menzil sınır değeri

ru: Üst menzil sınır değeri

Fourier dönüşümünün kayma (shifting) özelliğinden dolayı, kaydırılmış periodogramın ters fourier transformu, kaydırılmamış fonksiyonun otokorelasyon fonksiyonunun exponansiyel bir bileşenle çarpılmış haline eşittir (lineer fazlı fonksiyon) [12].

$$P_r\left(\frac{n-i}{N_a T}\right) \xleftarrow{F} R_r(kT).\exp\left[j\frac{2\pi}{N_a} ik \right] \tag{3.7}$$

Bu nedenle, R_{ac} otokorelasyon fonksiyonu ile nominal (sıfır Doppler kaymalı) otokorelasyon fonksiyonu arasındaki faz farkı, Doppler kayması ile doğru orantılıdır.

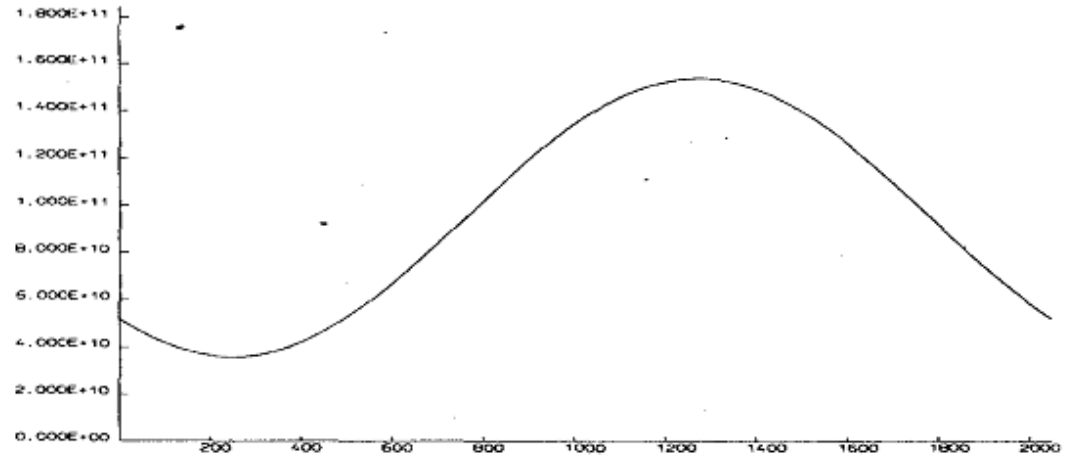
SAR çapraz menzil işareti, Nyquist frekansından çok büyük olmayacak bir hızda örneklendiğinde, yuksek belirlilikte Doppler aralığının (range) belirlenebilmesi icin j=1 seçilerek otokorelasyon fonksiyonlarının fazları hesap edilir. Faz farklarının hesabından sonra Doppler merkez frekansı elde edilir.

$$\Delta\arg = \arg\{R_{ac}(T)\} - \arg\{R_0(T)\} \tag{3.8}$$

Faz farkının hesabı **(3.8)**' de verilmiştir. Bu hesaptan yararlanarak Doppler merkez frekansının hesabına da aşağıdaki ifadeden ulaşılacaktır.

$$f_D = \left[\frac{1}{2\pi T}.\Delta\arg\right] \pm f_{PRF} \qquad \text{n = 0, +/-1, +/-2, …} \tag{3.9}$$

Burada dikkat edilmesi gereken nokta sudur. J=1 seçilmesi, çapraz menzil periodogramının ilk harmoniğine karşılık düşer. Şekil 3.4, j=1 için Rac' yi şematize etmektedir. Ayrıca bu şekil, ΔE yöntemiyle elde edilen son şeklin zaman domeni ifadesiyle ilişkilidir.



Şekil 3.4 : Otokorelasyon fonksiyonunun spektrumu

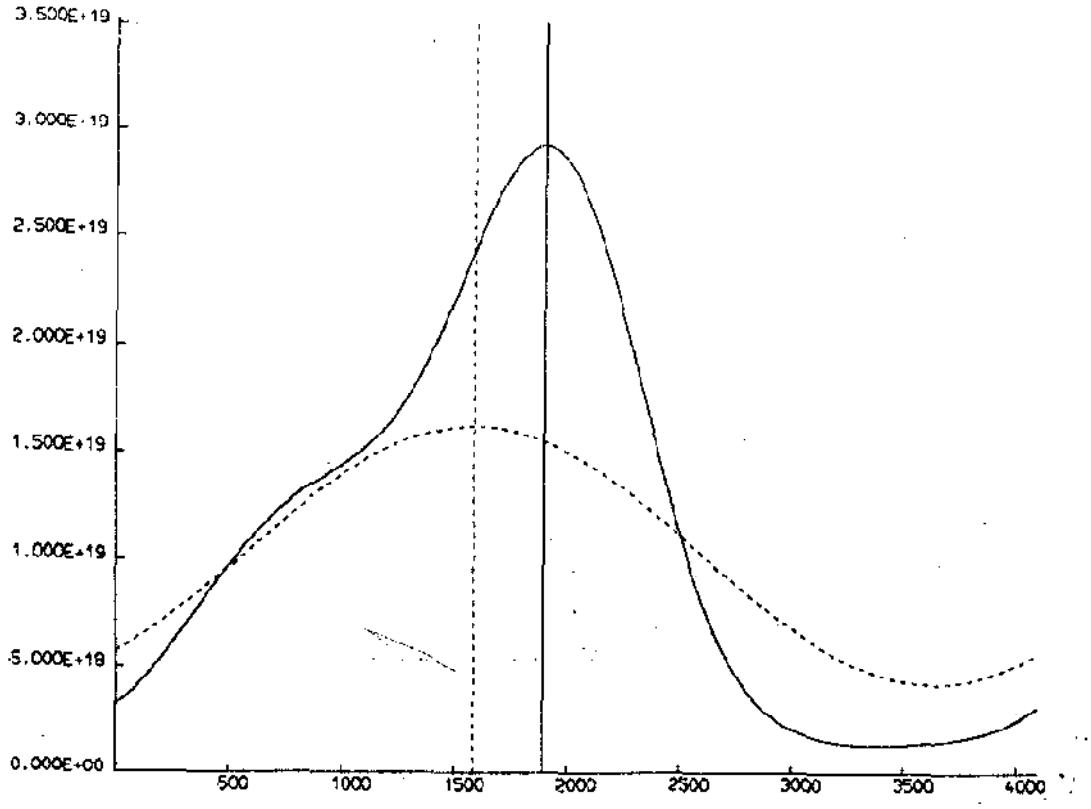
3.3 İşaret Doppler Kestirimi (Sign Doppler Estimation (SDE)) Yöntemi

CDE algoritmasında olduğu gibi, SDE yöntemi de Doppler merkez frekansının kestirimi için korelasyon katsayılarını kullanmaktadır.

SDE ile CDE yöntemleri arasındaki tek fark, R_{ac}' nin hesap edilme yöntemidir. CDE algoritması, çapraz menzil işaretinin otokorelasyon fonksiyonunu hesaplamak için çok iyi bilinen standart eşitlikleri kullanırken, SDE algoritması, Gaussian proseslerdeki arksinüs kanununu (Arcsine Law) kullanmaktadir [13]. Arksinüs kanununun temel kuralı şudur; kompleks sayısal bir işaretin reel ve sanal birimleri Gaussian ise, otokorelasyon fonksiyonu bu birimlerin sadece işaretlerinin kullanılması ile elde edilebilir.

Bilinen SAR verisi (SEASAT, Goldstone scene) yukarıda açıklanan, ΔE ve SDE/CDE yöntemlere uygulanmıştır.

Sürekli çizgi ile gösterilen eğri ΔE yönteminin sonuçlarını, kesikli çizgi ise, CDE/SDE yöntem sonuçlarını göstermektedir. Aradaki fark 25 Hz' dir. Yöntemlerin sonuçlarına bakıldığında ΔE yönteminin gerçek sonuca daha yakın olduğu görülmüştür. Karşılastırma, MacDonald Dettwiler and Asssociates Ltd. Tarafından geliştirilen "Generalized Snthetic Aperture Radar Processor (GSAR)" ile yapılan gerçek ve doğru ölçümlere göre yapılmıştır [11].

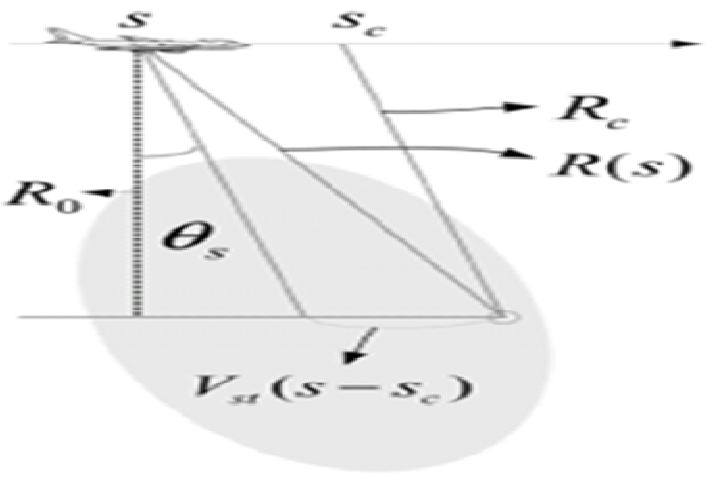


Şekil 3.5 : ΔE, CDE ve SDE yöntemlerinin karşılaştırılması

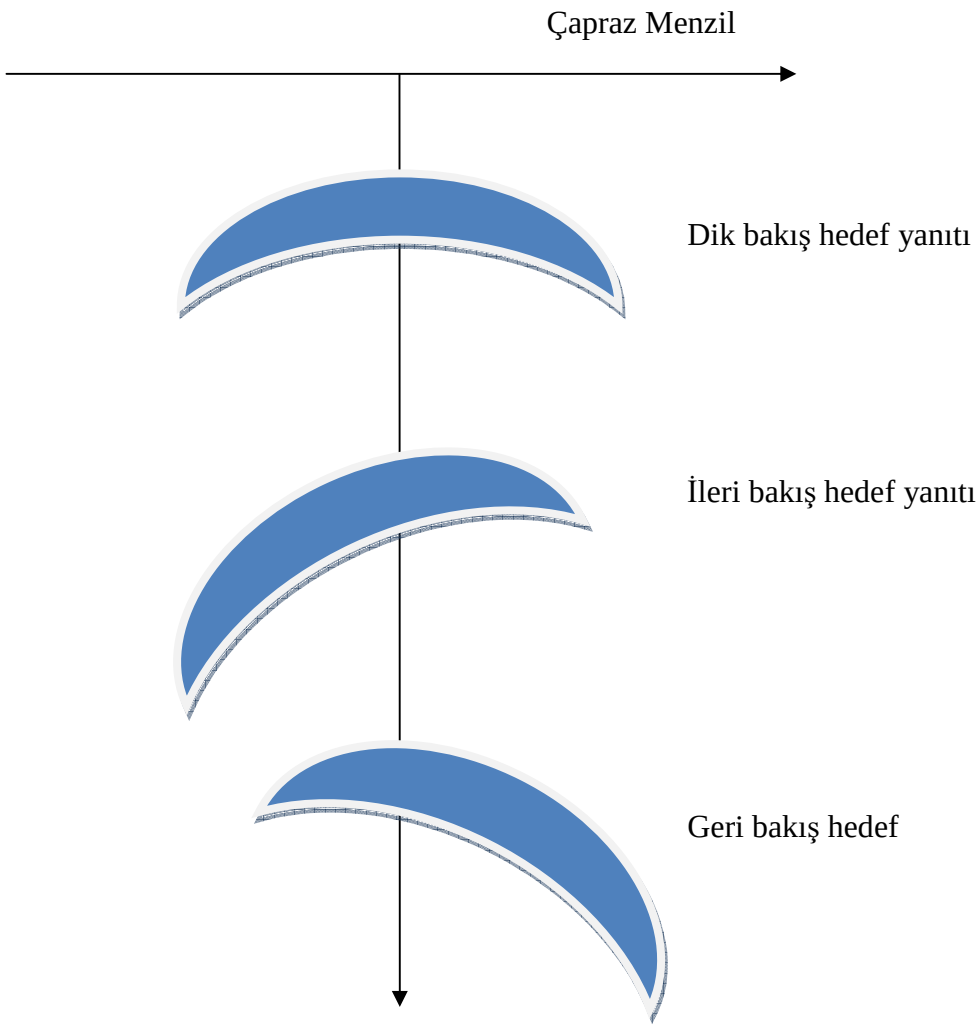
3.4 Radon Dönüşümü Yöntemi

SAR işaret işlemede “clutter lock” olarak adlandırılan Doppler merkez kestirim tekniği çok önemlidir, çünkü, Doppler merkez frekansı SNR oranı, geometrik distorsiyonlar ve radyometrik hatalar ile ilişkilidir. Geleneksel algoritmalar beraberlerinde belirsizlik problemleri ve yüksek işlem yükü getirirler. Bakış açısı(squint angle) ile Doppler merkezi arasındaki ilişkiden yararlanılarak, belirsizliğin olmadığı, geometri tabanlı, radon dönüşümünün kullanıldığı bir teknik geliştirilmiştir [14]. Geliştirilen algoritma hesaplama açısından oldukça verimlidir ve Doppler merkezinin doğru bir şekilde kestirilmesine olanak sağlamaktadır. Diğer algoritmalarda olduğu gibi burada belirsizlik problemi yoktur. Belirsizlik problemlerinin çözümünde kullanılan FFT ve ters FFT işlemleri bu yöntemde kullanılmadığı için çok sayıda işlem yükü de ortadan kalkmaktadır.

Şekil 3.6’ da şerit tarama modu SAR geometrisi ve Şekil 3.7’ de hedef yanıtı gösterilmektedir.



Şekil 3.6 : Şerit tarama modu geometrisi



Şekil 3.7 : Şerit tarama modu geometrisi hedef yanıt işareti

Şekil 3.6’ da, s çapraz menzil yönündeki zamanı (slow time), Vst platform hızı, θ_s bakış açısı, λ_c taşıyıcı frekanstaki dalga boyu ve f_{DC} Doppler merkezi olarak gösterilirse, Doppler merkez frekansının hesabı;

$$f_{DC} = \frac{2V_{st}}{\lambda_c} \sin \vartheta_s \tag{3.10}$$

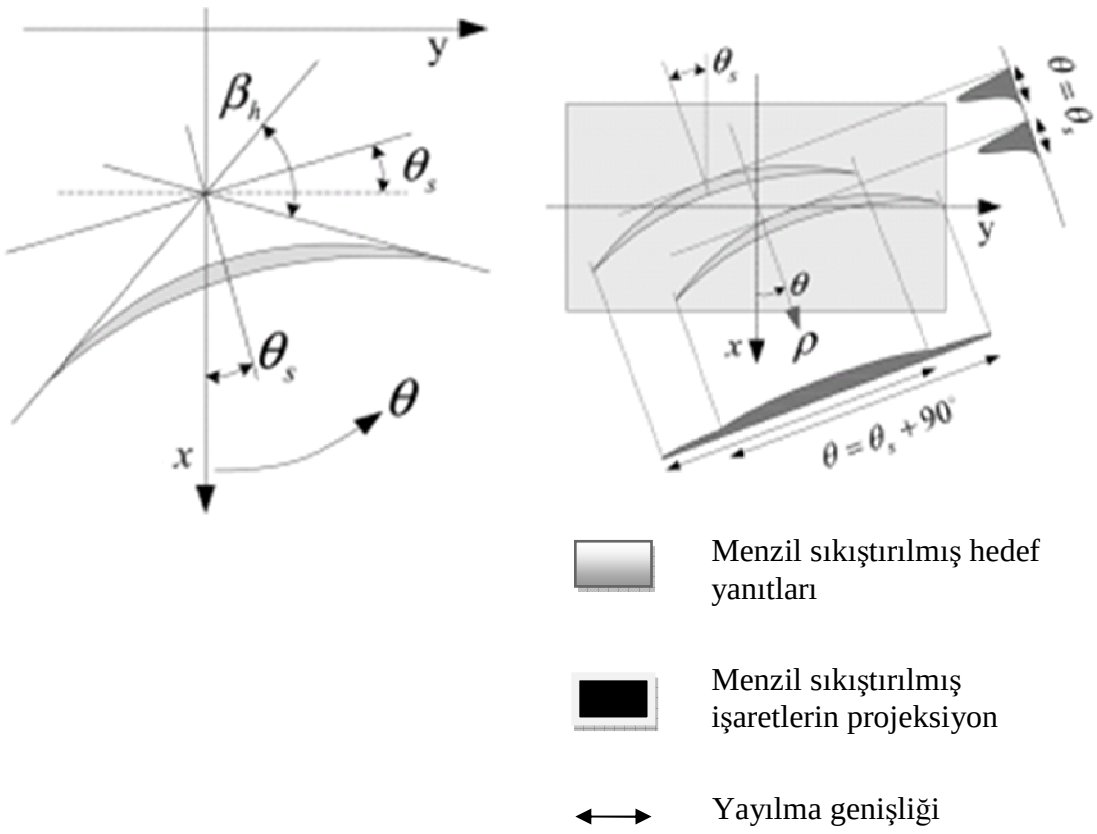
Eşitlikteki açı ifadesi:

$$\sin \vartheta_s = \frac{\sqrt{R_0^2(r) - h^2}}{R_0(r)} \sin \vartheta_d \tag{3.11}$$

Doppler merkezinin kestirimi için kullanılan ΔE, CDE ve SDE gibi algoritmalar aynı bakış açısını kullanmaktadır, gelen işaretin güç spektrumunu kullanırlar. Bu algoritmalar, belirsizlikleri ortadan kaldırabilmek için ek tekniklere ihtiyaç duyarlar. Şimdi, hedef yanıtını menzil sıkıştırılmış domende araştıralım. Menzil sıkıştırılmış domende hedef yanıtı kuadratiktir. Şekil 3.7’ de, Şekil 3.6 ’ daki SAR geometrisinde farklı bakış açıları sonucunda elde edilen hedef yanıtları gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, hedef yanıtının şekli bakış açısı ile ilişkilidir. Fakat, hedeften dönen bütün yanıtlar aynı açı bilgisine sahipse, bilgiyi menzil sıkıştırılmış veriden çıkarmak zor olacaktır. Radon dönüşümüne dayalı bu algoritmaya Geometry Based Doppler Estimator (GDE) denilmektedir.

3.4.1 GDE algoritma tanımı

Daha önce de belirtildiği gibi hedef yanıtının şekli bakış açısı ve hüzme genişliği ile ilgili bilgi barındırmaktadır. Eğer bu bilgi başarılı bir şekilde çıkarılırsa, **(3.10)’** da belirtilen eşitlik kullanılarak Doppler merkezi hesap edilebilir. Şekil 3.8 a’ da menzil sıkıştırılmış hedef yanıtında taşınan açı bilgisini göstermektedir.



Şekil 3.8 : GDE algoritmasında kullanılan geometrik ifadeler

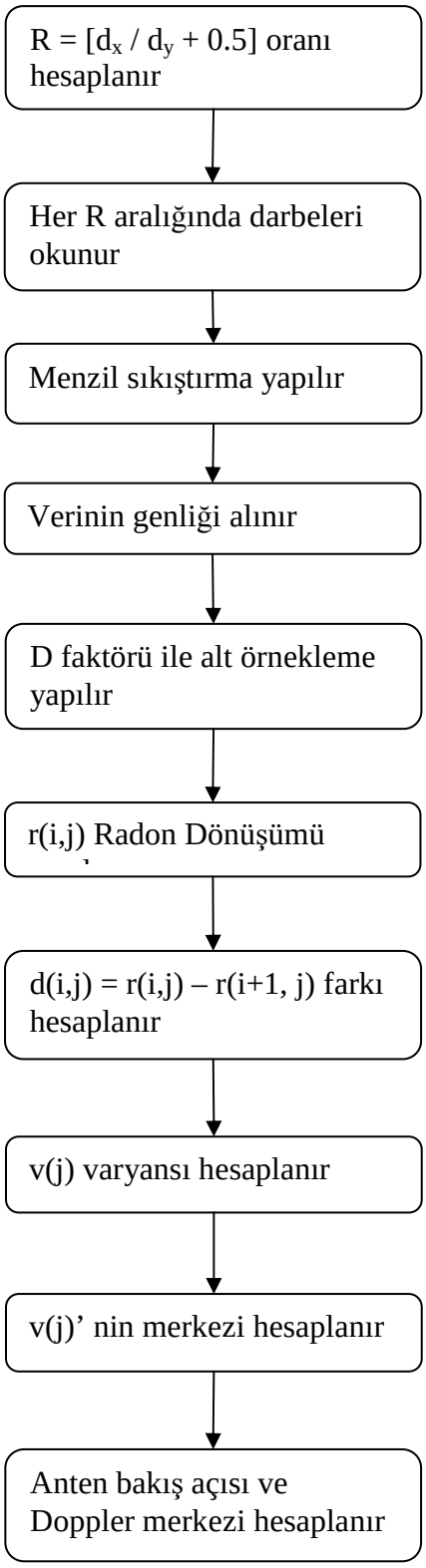
β_h anten hüzme genişliğidir ve bilinen bir değerdir, θ_s hedef yanıtın ortalama eğimini gösteren bakış açısıdır (squint angle). Burada, hedef yanıtın meydana geldiği yerde açıların uzaklığını (range of angles) belirlemek için Radon dönüşümü kullanılacaktır. Radon dönüşümü, bir görüntü üzerindeki düz çizgileri dedekte etmek için kullanılır ve orijinden uzaklık ve pozitif x eksenine göre olan açı ile tanımlanan düz çizgi üzerinde alınan integral olarak tanımlanır. g(x,y) domeninde tanımalanan bir çizgi aşağıdaki dönüşüm ifadesi ile bir noktaya dönüştürülür [15].

$$\hat{g}(\rho,\vartheta) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} g(x,y)\delta(\rho - x\cos\vartheta - y\sin\vartheta)dxdy \qquad (3.12)$$

GDE algoritmasının akış şeması şekil 3.9' de verilmiştir. Doppler merkezi, fdc, menzile bağlı olarak değiştiğinden, GDE' den önce menzil yönünde menzil sıkıştırılmış veriye segmentasyon işlemi uygulanır, çünkü, GDE, bakış açısının

menzile göre değişmediğini varsayar. δ(x) ‘ i menzil örnekleme aralığı, δ(y)’ yi de çapraz menzil örnekleme aralığı olarak alalım. Genellike δ(x) δ(y) den büyük seçilir, böylece, $R = \lfloor \delta x / \delta y + 0.5 \rfloor 10$ yapılır.

Hesaplama verimliliğini artırmak için, ham veriye çapraz menzil yönünde R faktöründe alt örnekleme (down-sampling) işlemi uygulanır. Daha sonra yukarıda da belirtildiği gibi ham veriye menzil sıkıştırma işlemi uygulanır. Alt örnekleme işleminden sonra örneklerin genlikleri alınır ve ilgilenilen açılarda Radon transformu uygulanır. Radon transformu uygulanırken, maksimum açısal adım boyutu $\Delta(\theta)$ $\beta_h/3$’ ten küçük olmalıdır. Eğer bakış açısı ile ilgili herhangi bir ön bilgi mevcut değilse adım açısı daha büyük seçilir (örneğin 30 derece).



Şekil 3.9 : GDE algoritması akış diyagramı

Transforme edilmiş görüntünün ifadesi:

$$r(i,j) = \hat{g}(\rho_0 + i\Delta\rho, \vartheta_0 + j\Delta\vartheta) \quad 0 < i < N\text{-}1,\ 0 < j < M\text{-}1 \tag{3.13}$$

i ve j uzaklık ve açının indeksleridir. Δ(ρ) ve Δ(θ) uzaklık ve açı için adım boyutlarıdır. θ(0) ve ρ(0) ifadeleri Radon transformu için başlangıç açısı ve başlangıç uzaklıklarıdır. Radon transformasyonunun sonucu, anten hüzmesi yönüne ilişkin açılarda yoğunlaşmış eğrilerin bir koleksiyonudur. Bu nedenle, transforme edilmiş doğruların yoğunlaştığı açıların menzilini belirlemek zorunludur. Burada önemli nokta şudur, bu bölgede transforme edilmiş görüntüler uzaklık (distance) yönünde dalgalıdır. Bu durum Şekil 3.8 b' den kolayca görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, eğer projeksiyon açısı θ, θ(s)' e yakın olursa nokta hedef yanıtının projeksiyon görüntüsü küçük bir alana yoğunlaşacaktır. Diğer yandan, eğer θ, θ(s)' den uzaklaşırsa hedef yanıtın projeksiyon görüntüsü daha geniş bir alana dağılacaktır. Açı doğru bakış açısına eşit olduğu durumda transforme edilmiş görüntü uzaklık yönünde daha az dağılır (saçılır), ve bu açıda fark işaretleri daha yüksek varyansa sahip olur. Bu nedenle, fark işaretinin varyansı dalgalanmanın ölçümü için kullanılır, bu ifade aşağıda verilmiştir.

$$v(j) = \frac{1}{N-1}\sum_{i=0}^{N-2} d^2(i,j) - \left\{\frac{1}{N-1}\sum_{i=0}^{N-2} d(i,j)\right\}^2 \tag{3.14}$$

v(j)' nin tepe değerinin dedekte edilmesi bakış açısının bulunması için iyi bir yol değildir, cünkü, v(j)' nin tepe değeri her zaman hüzme merkezinde olmayabilir. Bu problemin çözümü için RBFN algoritması ve buna bağlı olarak aşağıdaki normalize işaret kullanılmıştır [16].

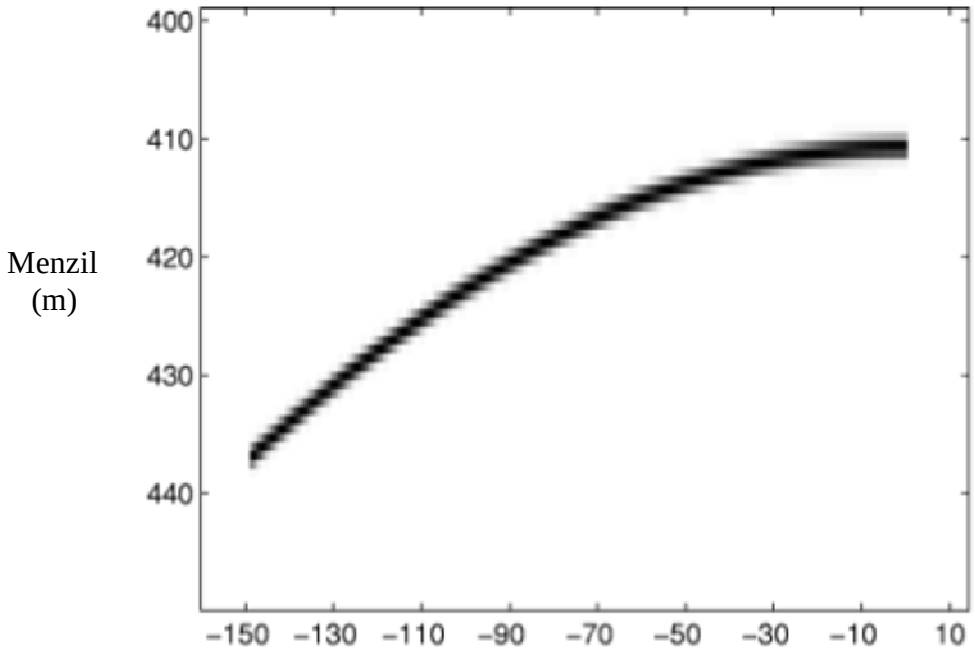
$$\hat{v}(j) = \{v(j) - v_{\min}\}/\{v_{\max} - v_{\min}\} \tag{3.15}$$

v(max) ve v(min) değerleri v(j)' nin maksimum ve minimum değerleridir. Tepe pozisyonu icin Gaussian temel fonksiyonun başlangıç merkezi seçilir ve temel fonksiyonun başlangıç genişliği anten hüzme genişliğinden hesap edilir. Fonksiyon yaklaşıklıklığı tespit edildiğinde temel fonksiyonun merkezi bakış açısının kestirimini verir. Bakış açısı kullanılarak ta Doppler merkez frekansı hesaplanır.

Şekil 3.10' da Radon dönüşümünün kullanıldığı bir örneğin benzetim sonuçları verilmştir [14]. Bu örnekteki parametreler:

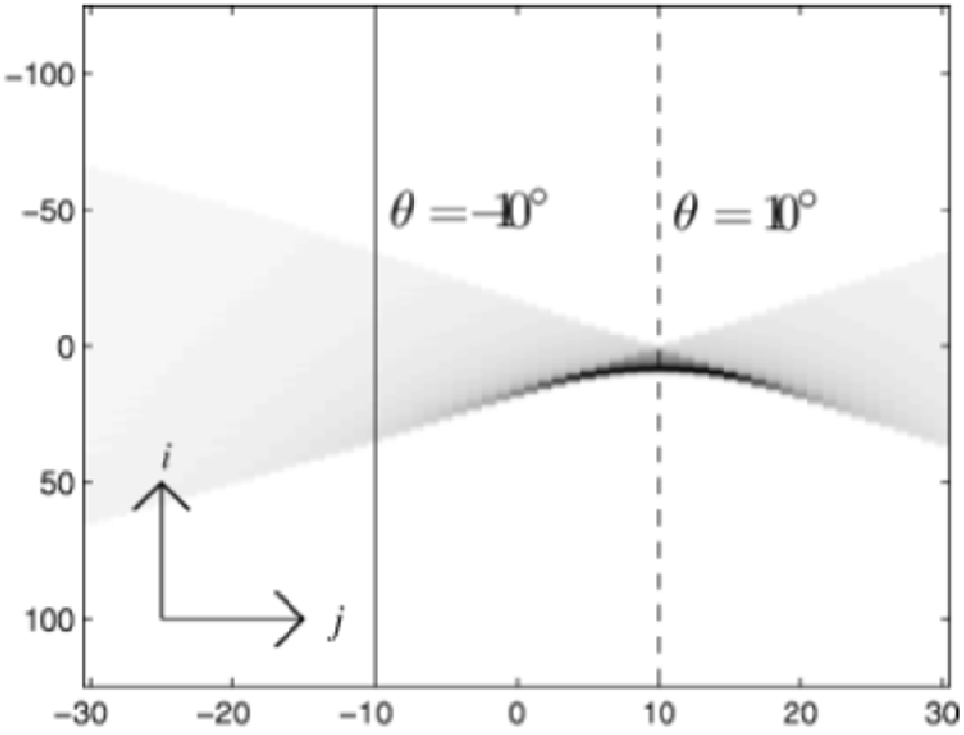
β(h) = 10 derece, θ(s) = 10 derece, PRF = 4 KHz, f(s) = 150MHz, V(st) = 100m/s

Sıfır olmayan bakış açısı (squint angle) nedeniyle şekilden de görüldüğü gibi hedef yanıtın Radon dönüşüm cevabı asimetrik bir görüntü vermektedir. Menzil sıkıştırılmış hedef yanıtı ve işaretin Radon dönüşümü Şekil 3.10 a ve 3.10 b' de gösterilmiştir. Şekil 3.10 c, eksi ve artı 10 derecelerdeki fark işaretlerini göstermektedir. Beklendiği gibi, bakış açısı olan +10 derecedeki fark işareti -10 derecedeki işarete göre daha dalgalıdır. Son olarak, RBFN fonksiyon yaklaşıklık yöntemi kullanılarak fark işaretlerinin varyansları hesaplanarak Doppler merkezi bulunur, bu işlemin sonucu da 3.10 d' de gösterilmiştir.



(a)

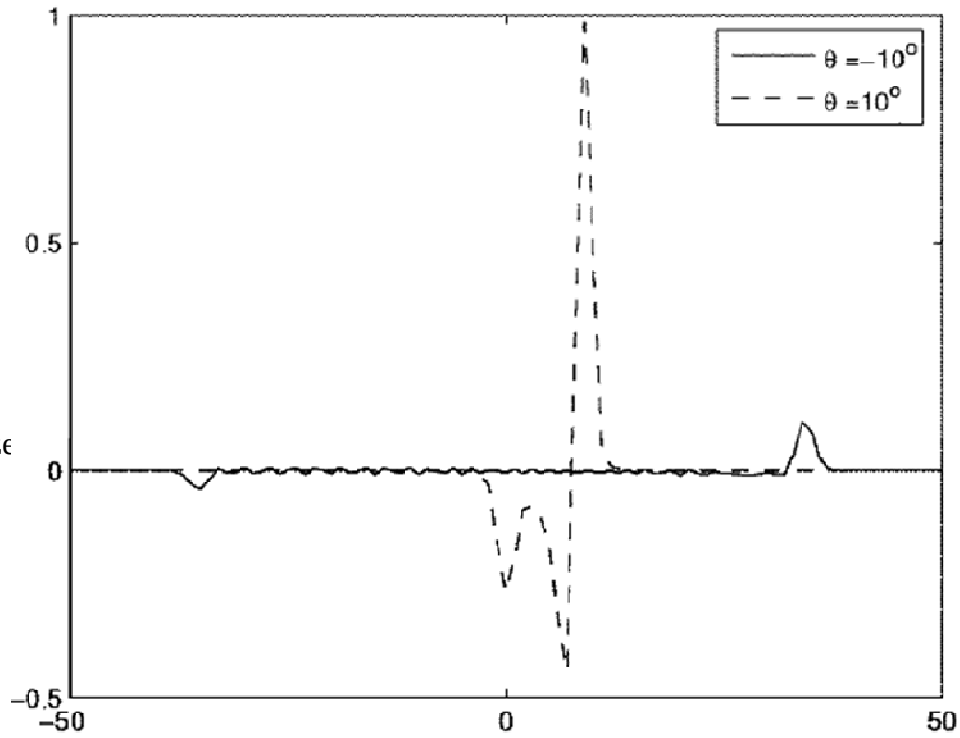
ρ (m)



θ (deg)

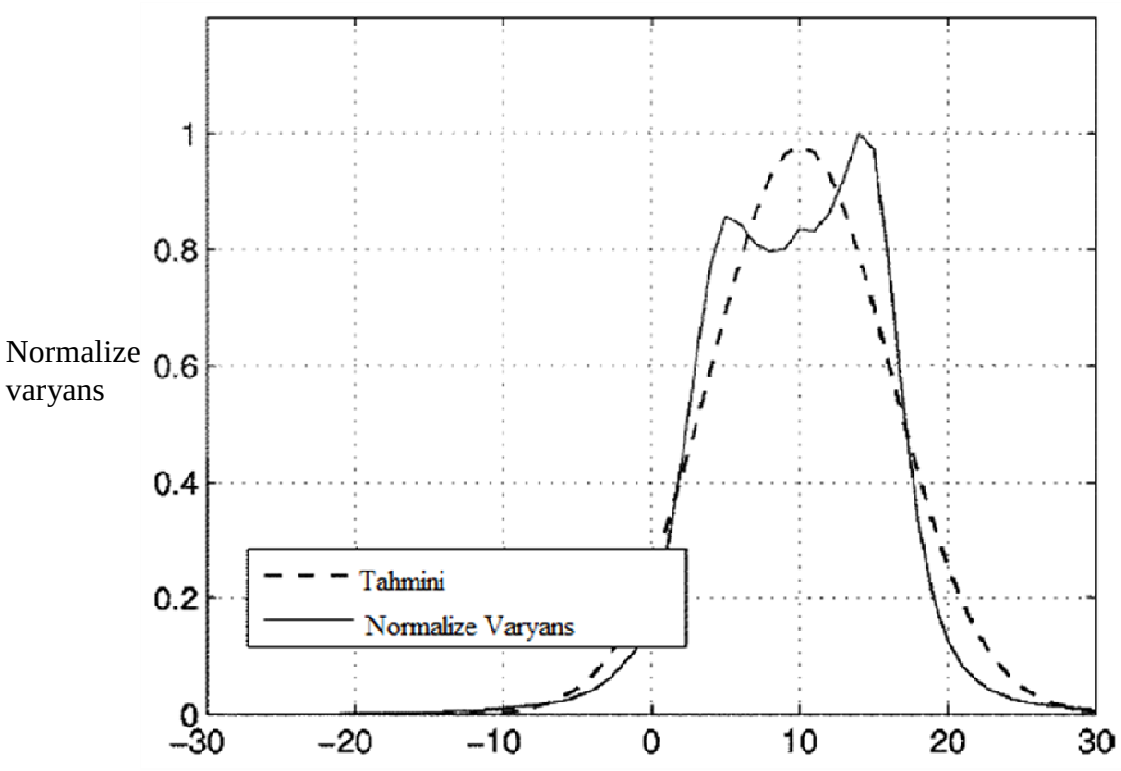
(b)

Normalize
fark



ro (ρ)

(c)



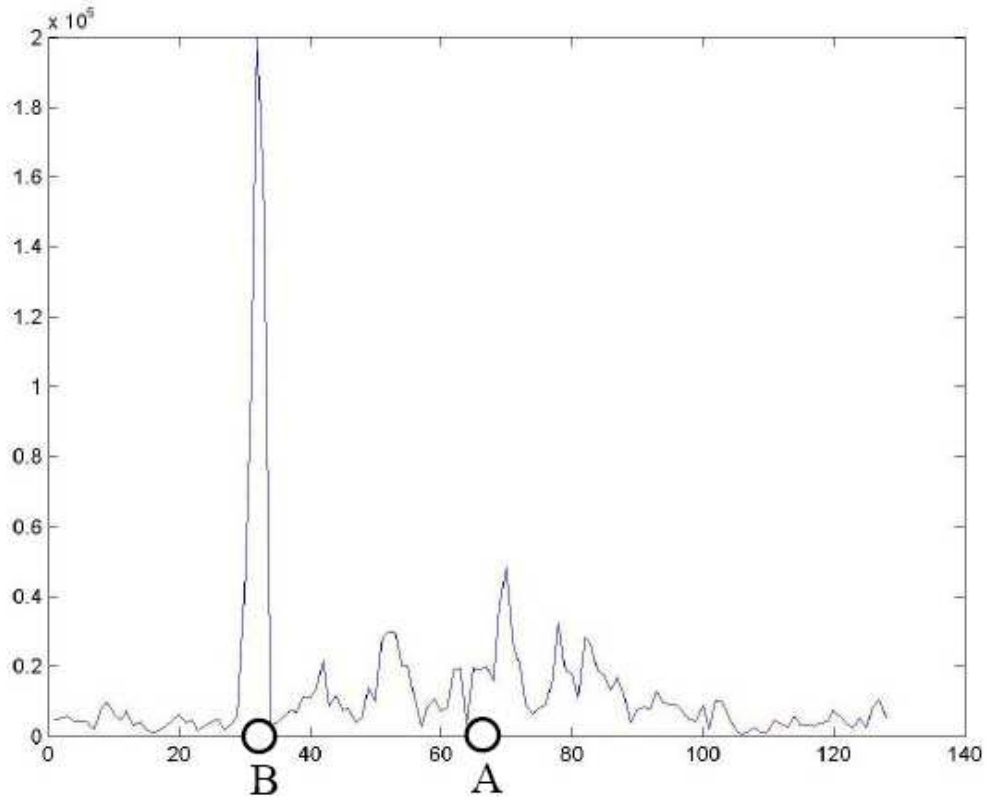
(d)

Şekil 3.10 : Radon dönüşümü benzetim sonuçları [14]

4. ΔE YÖNTEMİNİN KALMAN PARAMETRE KESTİRİCİSİ İLE DESTEKLENMESİ

ΔE yöntemi Doppler merkez frekans kestirim yöntemleri arasında en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Bu yöntemle ilgili detaylı bilgi önceki bölümlerde verilmiştir. Yönteme yeniden kısaca değinmek gerekirse, ΔE yönteminde, çapraz menzil çizgisi boyunca alınan işaretlerin güç spektrumları hesaplanır, maksimum gücün bulunduğu frekans, Doppler merkez frekansı olarak kabul edilir.

ΔE algoritması teorik ve uygulama açısından basittir ve geniş bir uygulama alanı bulur. Yöntem, genel olarak işe yarar ancak yöntemle ilgili dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta bulunmaktadır. Gürültü veya başka bir sebeple çapraz menzil işaretinin güç spektrumunda Doppler merkez frekansının bulunduğu noktalar dışında yüksek genlikli tepeler bulunması durumunda en yüksek tepenin bulunduğu frekans Doppler merkez frekansı olarak değerlendirilebilir.



Şekil 4.1 : Çapraz menzil işareti güç spektrumu

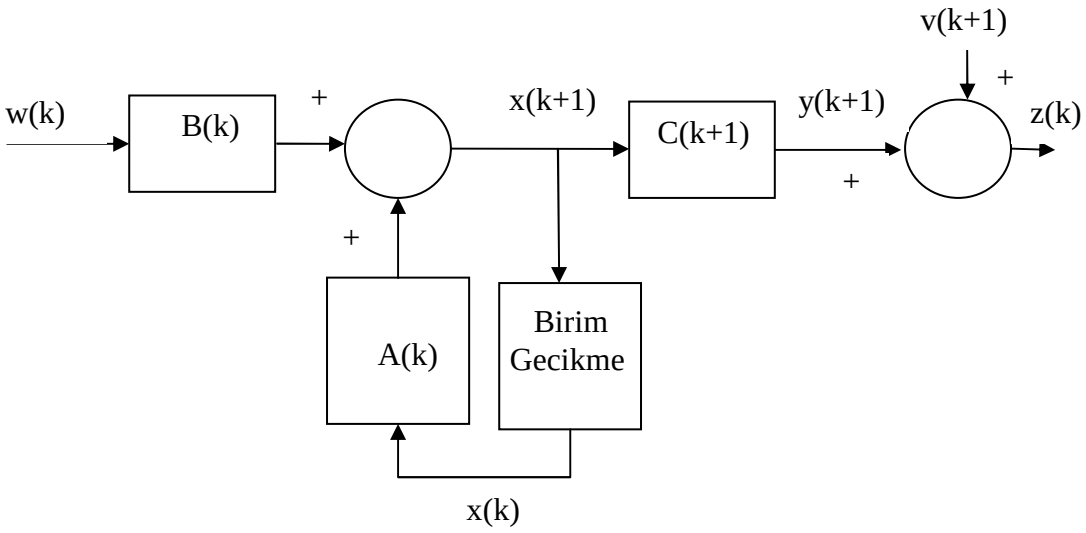
Bu durum Şekil 4.1' de örneklendirilmiştir. Şekle göre, gerçek Doppler merkez frekansı A noktasındaki frekans iken, B noktasında görülen yüksek genlikli tepe nedeniyle ΔE yöntemine gore Doppler merkez frekansı B noktası olarak algılanacaktır.

Literatürde, yukarıda açıklanan duruma yönelik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bir çalışmada, ΔE yöntemi uygulaması öncesinde belli bir eşik değerinin üzerindeki tepe genlikleri öncelikle yok edilmekte, ardından da yöntem uygulanmaktadır [17]. Yapılan bu işlem bahsedilen problemi giderebilmektedir ancak kullanılacak eşik değerinin seçimi çok kolay değildir ve yanlış eşik değeri seçimi Doppler merkez frekansının yanlış hesabına, dolayısıyla SAR verisinin yanlış işlenmesine sebep olacaktır.

Burada, ΔE yönteminde bulunan probleme farklı bir açıdan yaklaşılmaktadır. Doppler frekansı dışındaki frekanslardaki tepelerin etkisini azaltmak üzere Kalman filtresinin özel bir kullanımı yani "Kalman Parametre Kestiricisi" kullanılmıştır.

4.1 Kalman Filtresi

Hedef izleme filtresi olarak son zamanlarda Kalman filtresi ve onun türevleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Filtre, adını bu filtreyi bulan Rudolf E. Kalman' dan almıştır. Kalman filtresinin türevlerini; Standart Kalman filtresi, Genişletilmiş Kalman filtresi ve Uyarlanmış Kalman filtresi olarak sıralayabiliriz [18].



Şekil 4.2 : Kalman filtre yapısı

Şekil 4.2’ de Kalman filtresinin temel hali şematize edilmektedir. Şekilde, A(k), B(k) ve C(k) değerleri Kalman filtresini oluşturan ara blokların impuls cevapları, z(k) gözlem uzayı, x(k) kestirilen parametre uzayı, w(k) ölçüm gürültü uzayı ve v(k) süreç gürültü uzayını temsil etmektedir.

Şekle göre temel Kalman eşitliklerini aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$\left\{\begin{aligned} x(k+1) &= A(k)x(k) + B(k)w(k) \\ y(k) &= C(k)x(k) \\ z(k) &= y(k) + v(k) \end{aligned}\right\} \qquad (4.1)$$

Kalman filtresinin detaylı filtreleme ve kestirim eşitlikleri ekler bölümünde verilmiştir. Burada, Kalman filtresinin ortalama kestirim hatasını minimize eden parametre kestirme özelliğini inceleyeceğiz.

4.2 Kalman Parametre Kestirici

(4.2)’ deki gözlem eşitliğine sahip rasgele θ parametresi olsun.

$$z(k) = C(k)\theta + v(k) \qquad \text{k = 1, 2, …} \qquad (4.2)$$

θ parametresinin lineer ortalama karesel kestirimini hesaplamanın iki yolu vardır. Bunlardan birisi, parametrenin bütün gözlem uzayının elimizde olmasını gerektirir, bütün gözlem uzayını kullanarak θ’ nın gerçek değerini hesap eder. Bu yönteme “Batch Processing” denir [19]. Rasgele parametreyi kestirmenin bir diğer yolu da Kalman modelini kullanmaktır. Bu yöntemde, bütün gözlem uzayının elimizde olması gerekmemektedir. Gözlem yapıldıkça sonuçlar rekürsif olarak hesap edilmektedir.

Kalman filtresinin parametre kestirim özelliği kullanılırken A(k) = I ve B(k) = 0 kabul edilebilir. Bu durumda Kalman parametre kestirici modeli için eşitlikler aşağıdaki hali alır:

$$\left\{\begin{aligned} x(k+1) &= x(k) \\ y(k) &= C(k)x(k) \\ z(k) &= y(k) + v(k) \end{aligned}\right\} \qquad (4.3)$$

Ayrıca, yukarıdaki kabuller doğrultusunda Kalman modelinin kestirim eşitlikleri de basitleşmektedir. Sonuç olarak, parametre kestirici modelin Kalman kazanç, parametre kovaryans ve parametre kestirim eşitlikleri aşağıdaki gibi olur:

$$\left\{\begin{array}{l}\hat{\theta}_0 = \mu_\theta = 0 \\ V_{\hat{\theta}}(1/0) = V_\theta = 1 \\ K(k) = \dfrac{V(k/k-1)}{V(k/k-1)+1} \\ V(k+1/k) = (1-K(k))V(k/k-1) \\ \hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} + K(k)\left[z(k) - \hat{\theta}_{k-1}\right] \end{array}\right\} \qquad (4.4)$$

Yukarıdaki eşitlikler yardımıyla rasgele bir parametrenin gözlem uzayı kullanılarak parametrenin gerçek değeri kestirilebilmektedir. Eşitliklerde K değeri Kalman kazanç katsayısını, V ise parametrenin kovaryans vektörünü temsil etmektedir. Kalman kazanç katsayısı, K, kestirim değerini kontrol etmektedir, bu sayede, parametrenin bir sonraki adımdaki kestirim değeri bir önceki kestirim değerine yakın olmaktadır. Böylece, Kalman modelinin uygulandığı sistemde, kestirilen parametrenin gözlem uzayında beklenen değere çok uzak değerler olduğu durumda, Kalman kazanç değeri devreye girer ve kestirim sonucunu yine beklenen değerler sınırına çeker. Bu durumu bir örnekle açıklayalım. Parametremizin gerçek değerinin 140 olduğunu varsayalım. Gözlem uzayımız da Z(k) = [140, 130, 160] olsun. Bu gözlem uzayının ilk iki elemanını Kalman parametre kestiriciye girdi olarak verirsek sonuçta parametremizin kestirilmiş değerini 135 buluruz. Görüldüğü gibi sonucu gerçek değere yakın olarak hesapladı. Bir sonraki adım olarak üçüncü girdiyi de kestiriciye uygularsak üçüncü adım sonunda parametrenin kestirim sonucu 143 olur, yine gerçek değere yakın sonuç elde ettik. Burada gözlem uzayında bulunan 160 değeri gürültü sebebiyle gözlenen anlık tepe genlik değerleridir. Kestirim filtresi uygulanmadan gözlem uzayından örnekleme yapılsaydı 160 değeri sebebiyle yanlış hesaplamalar yapılacaktı. Bir sonraki bölümde, burada anlatılan Kalman parametre kestirici modelin Doppler merkez frekansının kestiriminde kullanılışı anlatılacaktır.

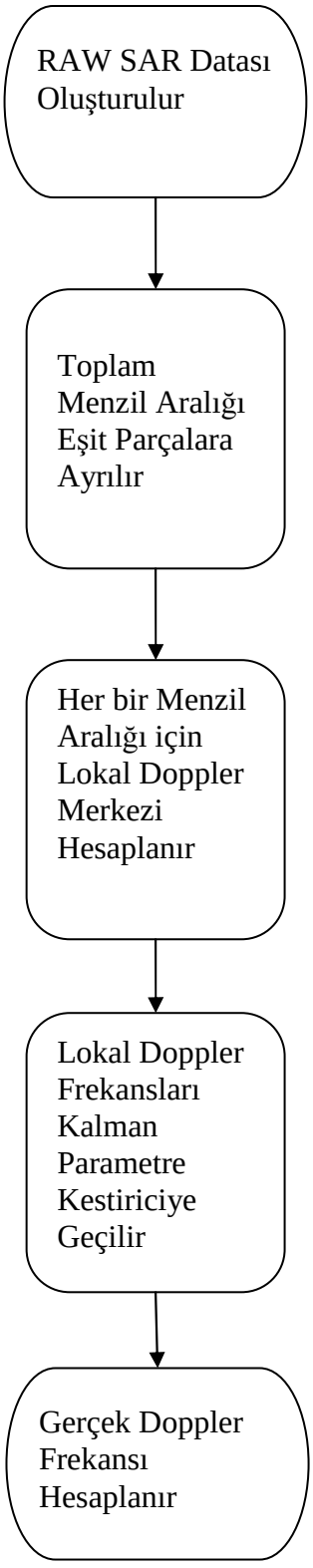
4.3 Kalman Parametre Kestirici ve ΔE Algoritması ile Doppler Merkez Frekans Kestirimi

ΔE algoritması ve Kalman parametre kestirici hakkında detaylı bilgi önceki bölümlerde yer almaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi çok yaygın olarak kullanılan ΔE Doppler merkez frekans kestirim algoritması, güürültü nedeniyle beklendik frekans dışındaki frekanslarda tepe genlik değerleri oluşması halinde yanlış sonuç verebilmektedir. Bu bölümde, Kalman parametre kestirici yapısının ΔE algoritmasına entegre edilmesi anlatılacaktır. Bu sayede yeni ΔE yöntemi daha doğru sonuçlar verecektir.

ΔE algoritmasında, belli bir menzil aralığında çapraz menzil çizgisi boyunca güç spektrumu hesaplanıp bu spektrumlar toplanmaktaydı. Sonuçta elde edilen spektrumda maksimum genliğin olduğu frekans Doppler merkez frekansı olarak tayin edilmekteydi. Yeni yöntemde ise toplam menzil aralığı belli sayıda eşit aralığa bölünmektedir. Herbir menzil aralığı için çapraz menzil çizgisi boyunca güç spektrumu hesaplanır. Herbir menzil aralığı için elde edilen güç spektrumlarının maksimum noktaları ile menzil aralıklarının lokal Doppler merkez frekansları hesap edilir. Son adımda ise, elde edilen lokal Doppler frekanslarını Kalman parametre kestiriciye gözlem uzayı olarak vererek gerçek Doppler merkez frekansı hesap edilmiş olur.

Menzil aralıklarında elde edilen lokal Doppler merkez frekansları birbirlerine yakın değerlerdedir veya yakın değerlerde olmaları beklenir. Kalman parametre kestiricinin hesapladığı gerçek Doppler frekansı lokal Doppler frekanslarının maksimumu ile minimumu arasında bir değer alır.

Yeni yöntemin akış diyagramı Şekil 4.3’ te verilmiştir.



Şekil 4.3 : Doppler merkez frekansı kestirim metodu akış diyagramı

Yeni Doppler merkez frekans kestirim yönteminin kullanıldığı SAR işaret işleme benzetimleri son bölümlerde yer almaktadır.

5. SAR İŞARET İŞLEME YAZILIMI

Bu bölümde, MATLAB programı kullanılarak geliştirilen SAR işaret işleme yazılım uygulamasına yer verilmiştir. Uygulamada, RADARSAT-1 uydusuna ait SAR ham verisi kullanılmıştır. SAR işaret işleme adımlarından biri olan Doppler merkez frekansının hesaplanması aşamasında yeni Doppler merkez frekansı kestirim yöntemi kullanılmıştır.

Yazılım, RADARSAT-1 uydusunun verisini işlemeye yönelik olduğu için öncelikle RADARSAT-1 hakkında birtakım temel bilgilere yer verilecektir. Ardından, bir ham RADARSAT-1 SAR verisini işleme aşamaları anlatılacaktır. Son olarak ta benzetim sonuçları verilecektir. Benzetim sonuçları içerisinde yanlış Doppler merkez frekansı kullanımı sonucunda SAR görüntüsünde oluşan bozulmaya da değinilmektedir.

5.1 RADARSAT-1 Uydusu ve Özellikleri

RADARSAT-1 uydusu 1995 yılının Kasım ayında uzaya fırlatılmıştır.Uydu, aktif olarak çalışmaya Haziran, 1996 tarihinde başlamıştır. Uydunun başlıca fırlatılış amaçları arasında, Antartika buz tabakasının takibi, navigasyon çalışmaları ve iklim araştırmalarında kullanılmak üzere deniz-buz alanlarının monitör edilmesi ve dünyadaki kara yüzeyinin yıllara göre değişimini izlemeyi gösterebiliriz.

Uydu 15m x 1.5m boyutlarında antene sahiptir. Uydu kuzey yarım kürede sağ bakışlı, güney yarım kürede (Antartika modunda) sol bakışlı olarak çalışır. İstenilen çözünürlükleri sağlayabilmek için bir çok hüzme (beam) çalışma moduna sahiptir. 7.1m x 8.4m boyutuna kadar çözünürlük sağlanabilmektedir.

RADARSAT-1’ e ait teknik parametreler aşağıdaki Çizelge 5.1’ de verilmiştir [20].

Çizelge 5.1 : RADARSAT-1 parametreleri

Frekans	5.3GHz (C Bandı)
Dalgaboyu	5.66cm
Polarizasyon	HH
RF Bandgenişliği	11.6, 17.3, 30.0MHz
Darbe Tekrarlama Frekansı (PRF)	1200-1400Hz
Gönderici Tepe Gücü	5KW
Gönderici Ortalama Gücü	300W
Radar Veri Hızı	77-105Mbps
Teyp Geri-okuma Hızı	85Mbps
Örnek Kelime Boyutu	Her I ve Q için 4 bit
Cıvıltı İşaret Tipi	Lineer FM
İşaret Hızı/Gönderme BW/Örnekleme Hızı	-279.300KHz/u-sec/ 11.731MHz/ 12.927 MHz -416.200KHz/u-sec/ 17.480MHz/ 18.467 MHz -721.400KHz/u-sec/ 30.299MHz/ 32.317 MHz
Çözünürlük BW	11.583MHz/ 17.282 MHz / 30.002
Darbe Genişliği	42.0 u-sec

Bütün RADARSAT-1 verileri CEOS (Committee on Earth Observation Satellites) formatında kaydedilir. SAR işareti işlenmeden önce uydu verisinin medyaya kaydolma formatı bilinmeli ve işaret o formata göre okunup işlenmelidir. Uygulamada kullanılan CEOS formatı ile ilgili bazı bilgiler bir sonraki bölümdedir.

5.2 CEOS Veri Formatı

SAR ham verisi CEOS gibi belli formatlarda belli ortamlara kaydedilir. Kayıt ortamları genellikle teyp veya CD-ROM' dur.

Bir CEOS ürünü içerisinde sadece ham SAR görüntü verisi bulunmaz, görüntü verisi yanında ham SAR verisini işlemede kullanılacak olan SAR platformunun uzayda bulunduğu konum, hız veya görüntüleme yapılan yeryüzü parçasının koordinatları gibi birçok parametre de yer almaktadır. Ham SAR verisi ve parametrelerin bulunduğu veriler CEOS ürünü içerisindeki belli dosyalarda bulunur. CEOS ürünü içerisinde her zaman ham SAR verisi olmayabilir, işlenmiş SAR verisi de bulunabilir.

CEOS ürünü içerisinde, ham verinin ve parametre verilerinin bulunduğu dosyalar şöyledir [21]:

- Volume Directory dosyası;
- SAR Leader dosyası;
- SAR Data dosyası;
- SAR Trailer dosyası;
- Null Volume Directory dosyası.

CEOS ürünü içerisinde ham SAR verisi "SAR Data dosyası" içerisinde yer almaktadır. Bu dosya içerinde ham veri yine belli bir formatta kaydedilmiştir. SAR platformunun uçuşu süresince, yeryüzüne gönderilen her bir darbeye karşılık ham SAR verisinde bir yanıtlık (eko) bilgi kaydedilmektedir. Bu şekilde, gönderilen her bir darbe için alınan yanıtlar ham SAR verisinde arka arkaya kaydedilir. Her bir kayıt bilgi uzunluğu örnekleme hızına göre değişiklik gösterebilir. Kayıt yapılan her sekiz

darbe yanıtı ile beraber gönderilen darbenin bilgisi de sekiz yanıttan biri ile beraber kaydedilir.

Ham SAR verisinin başlangıcında, darbe yanıtları ve darbe bilgisi kayıtlarından önce 16252 baytlık bir "Görüntü Seçenekleri Veri Dosyası Başlığı (Image Options Data File Header)" bulunur. Her bir yanıt kaydının başında da 192 baytlık kayıt başlığı ve 50 baytlık yardımcı bilgi başlığı bulunmaktadır. Saf SAR verisine ulaşıp bu veriyi işleyebilmek için, kayıt başlangıcındaki 16252 baytlık görüntü seçenek başlığı ve her kayıtta yer alan 192 + 50 = 242 baytlık başlık bilgileri gerçek veriden çıkarılmalıdır.

5.3 SAR İşaret İşleme MATLAB Yazılımı

Daha önceki ünitelerde detaylı olarak açıklanan SAR işaret işleme aşamaları MATLAB programı kullanılarak yazılımsal olarak gerçeklenmiştir. Geliştirilen SAR işaret işleme yazılımı CEOS formatı temel alınarak tasarlanmıştır. Ham veriden başlık bilgilerinin çıkarılması ardından uygulanan RDA algoritması ise herhangi bir formattaki veri için kullanılabilir. Bu noktada yapılması gereken, SAR veri formatının öğrenilmesi ve bu formata göre ham SAR verisini kaydedildiği ortamdan okuyacak yazılımın tasarlanmasıdır.

Tasarlanan MATLAB SAR işaret işleme yazılımı beş temel dosyadan oluşmaktadır, bu dosyalar specify_parameters.m, extract_data.m, load_extracted_data.m, estimate_doppler_centroid.m ve process_sar_data.m dosyalarıdır. Bu dosyalar, bütün yazılımı oluşturan alt yazılım bloklarını oluşturmaktadır. Bu yazılım blokları ile ilgili açıklamalar alt başlıklarda irdelenecektir.

5.3.1 Parametre belirleme alt yazılım bloğu

Bu yazılım bloğu specify_parameters.m dosyasını içermektedir. Bu dosyada, kullanılan SAR veri ürünü ve bu ürünün içerdiği SAR verisi ile ilgili bütün parametreler yazılıma tanıtılmaktadır. Parametrelere örnek olarak, ham SAR verisi kayıt sayısı ve boyu, menzil hücre sayısı, çapraz menzil hücre sayısı, gönderilen darbe bilgisinin sekiz yanıt kaydından hangisi ile birlikte saklandığı gibi parametreleri gösterebiliriz.

5.3.2 SAR verisinin kaydedildiği ortamdan çıkarılması yazılım bloğu

Bu yazılım bloğunda extract_data.m dosyası bulunmaktadır. Bu yazılım bloğunda yapılan işlem, parametre belirleme alt bloğunda yapılan işlemden sonra tanıtılan parametrelere göre ham SAR verisinin kaydedildiği ortamdan çıkarılarak, sadece veri kısmının başka bir ortama kaydedilmesidir.

5.3.3 Saf SAR verisinin yüklenmesi yazılım bloğu

Bu yazılım bloğunda load_extracted_data.m dosyası bulunmaktadır. Yapılan işlem, kaydedildiği ortamdan başlık bilgilerinden arındırılarak çıkarılan saf SAR verisinin işlemede kullanılmak üzere kaydedildiği ortamdan alınıp programa dahil edilmesidir.

5.3.4 Doppler merkez frekansının hesaplanması yazılım bloğu

Bu yazılım bloğunda estimate_doppler_centroid.m dosyası bulunmaktadır. Bu blokta yapılan işlem, daha önceki ünitelerde anlatılan yeni Doppler merkez frekans kestirimi yöntemini kullanarak Doppler merkez frekansının hesap edilmesidir. Burada hesap edilen Doppler frekansı bir sonraki yazılım bloğunda çapraz menzil uyumlu filtresinin tasarımında kullanılmaktadır.

5.3.5 RDA algoritması ile SAR görüntüsünün oluşturulması yazılım bloğu

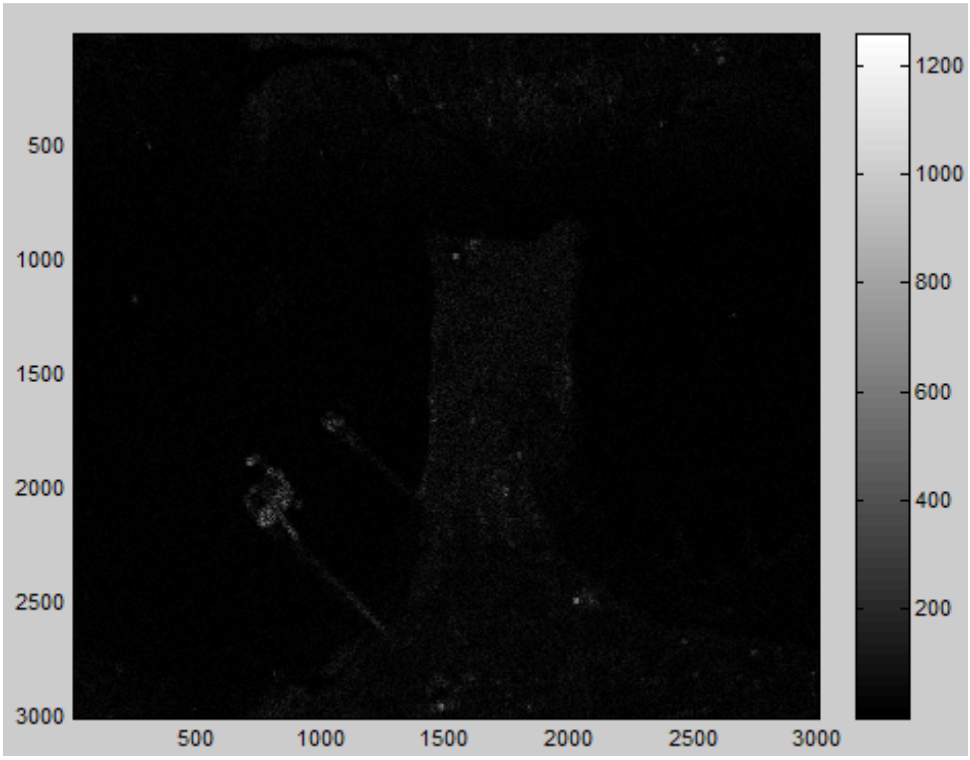
Bu son yazılım bloğunda process_sar_data.m dosyası bulunmaktadır. Yapılan işlem, RDA algoritmasına göre saf SAR verisini işleyerek SAR görüntüsünü oluşturmaktır.

5.4 SAR İşaret İşleme MATLAB Benzetim Sonuçları

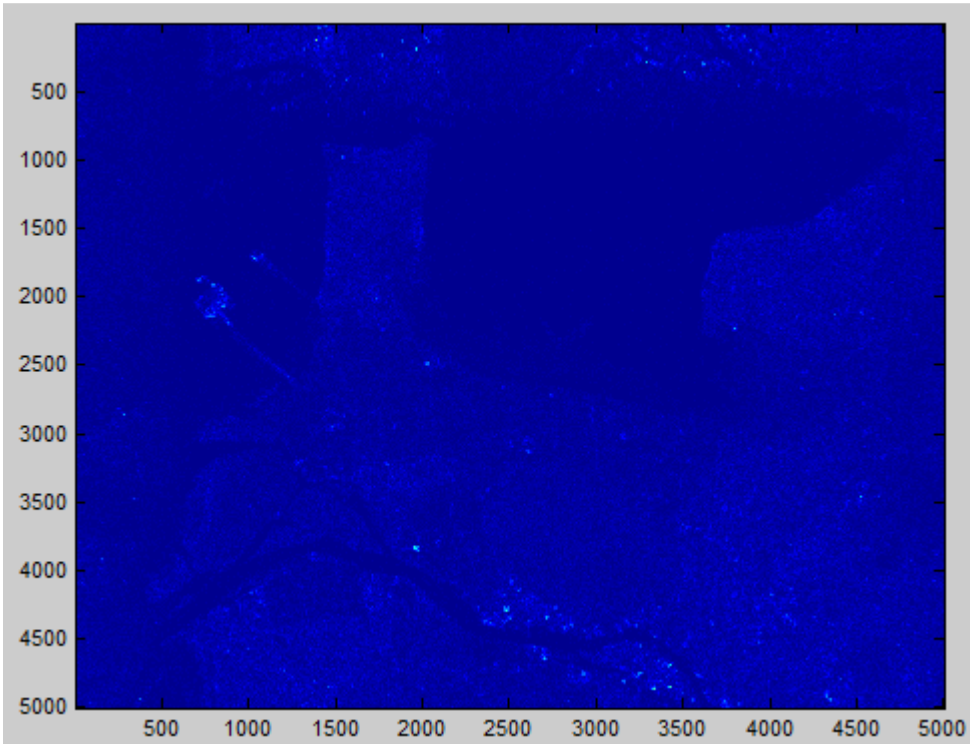
Geliştirilen SAR işaret işleme yazılımı kullanılarak gerçek ham SAR verisi ile benzetimler yapılmıştır. Benzetimlerde kullanılan veri Kanada' nın Vancouver şehrine ait RADARSAT-1 SAR verisidir. Bu gerçek SAR verisi ile Vancouver şehrine ait SAR görüsü oluşturulmuştur. Ayrıca, Doppler merkez frekansının yanlış hesap edilmesi durumunda SAR görüntüsündeki bozulma gösterilmiştir.

5.4.1 SAR görüntüsü oluşturma benzetim sonuçları

Bu bölümde geliştirilen SAR işaret işleme yazılımı ile Vancouver şehrine ait RADARSAT-1 SAR verisinden görüntü oluşturma benzetim sonuçları verilmektedir.



Şekil 5.1 : Vancouver SAR görüntüsü -1

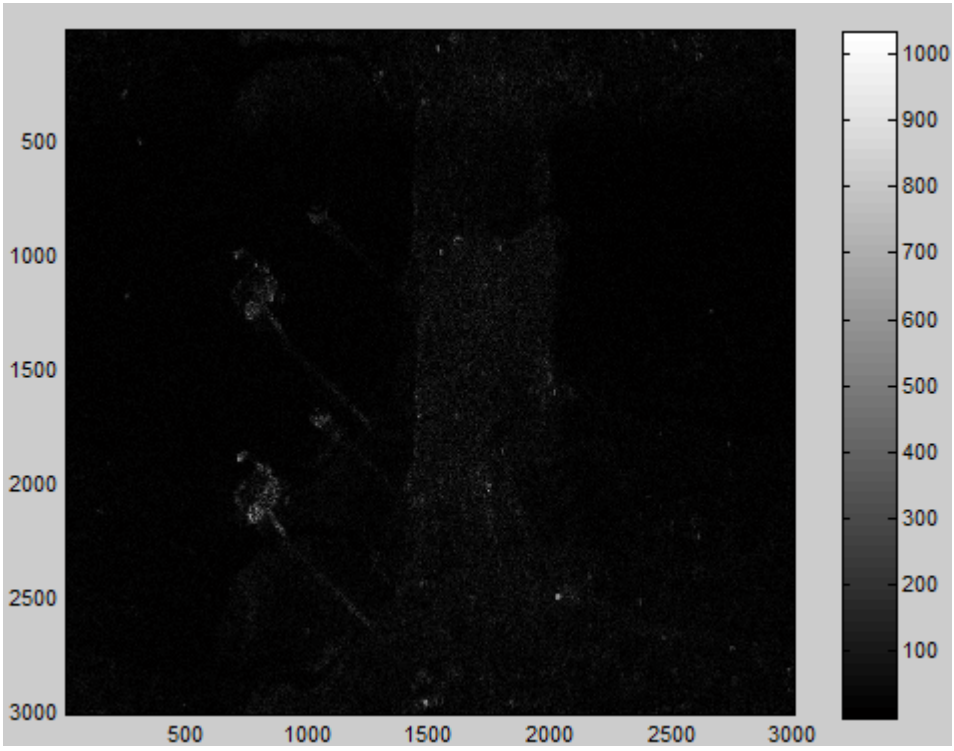


Şekil 5.2 : Vancouver SAR görüntüsü -2

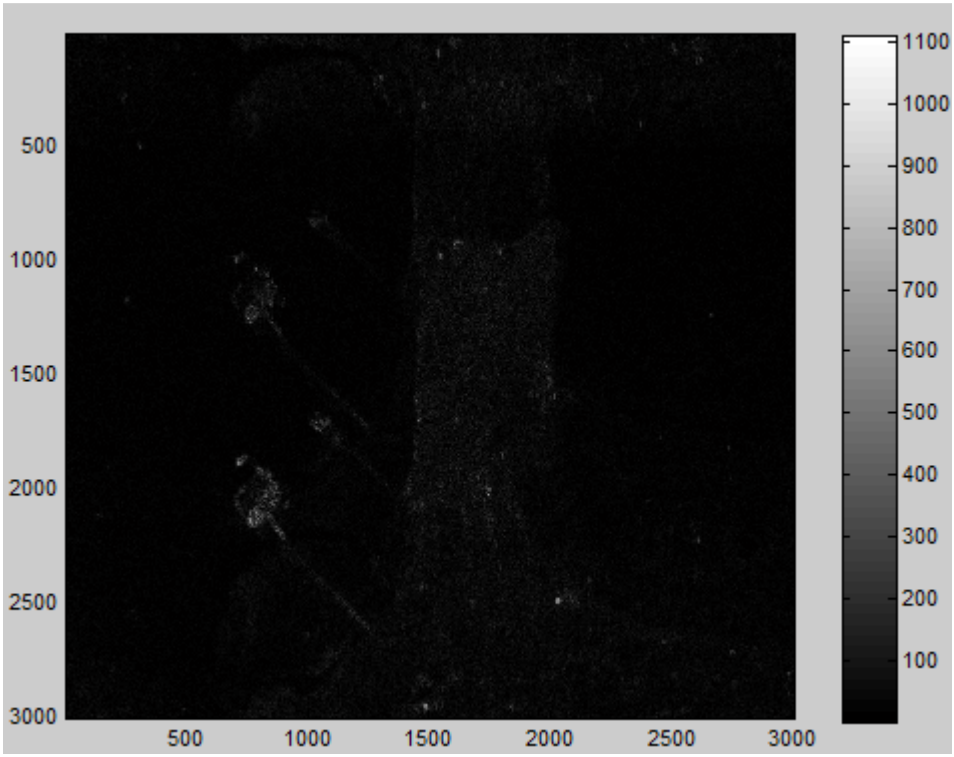
5.4.2 Hatalı Doppler frekans hesabının SAR görüntüsüne etkisi

Bu bölümde, hatalı Doppler merkez frekansı hesap edilme durumunda SAR görüntüsünün bozulmasını benzetim sonuçlarından görebilmektedir.

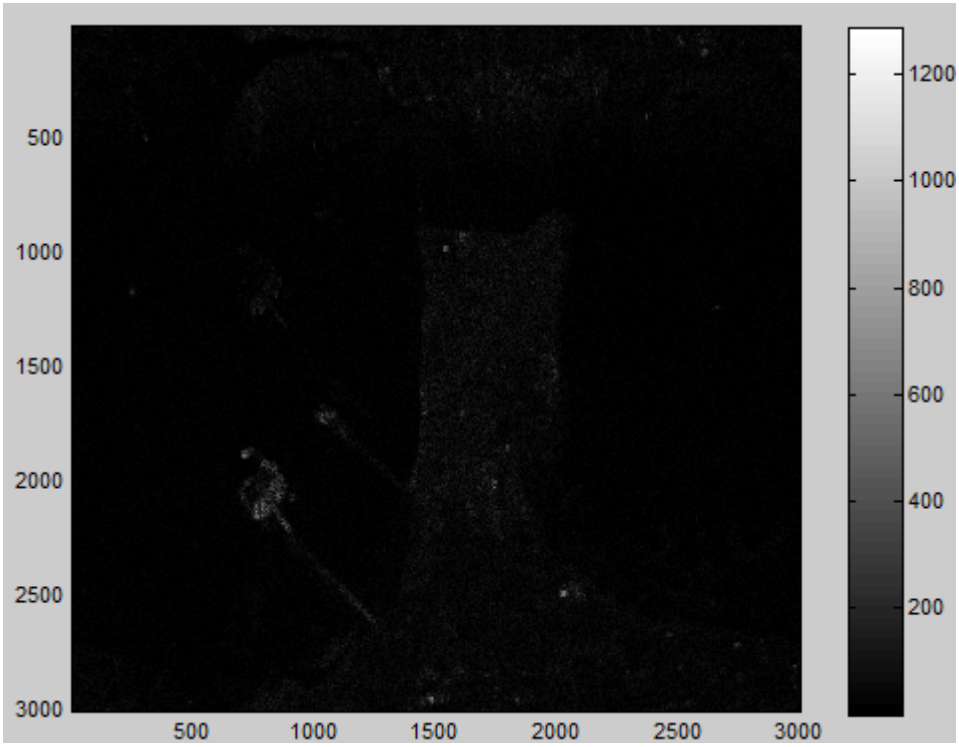
Benzetimde yine Vancouver şehrine ait SAR verisi kullanılmıştır. Veriye ait Doppler merkez frekansı yeni yönteme göre hesaplanmış ve değerinin 600Hz olduğu belirlenmiştir. Doppler merkez frekansının 50Hz, 100Hz, 350Hz, 600Hz, 850Hz, 1050Hz ve 1250Hz olduğu durumlara ait SAR görüntüleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



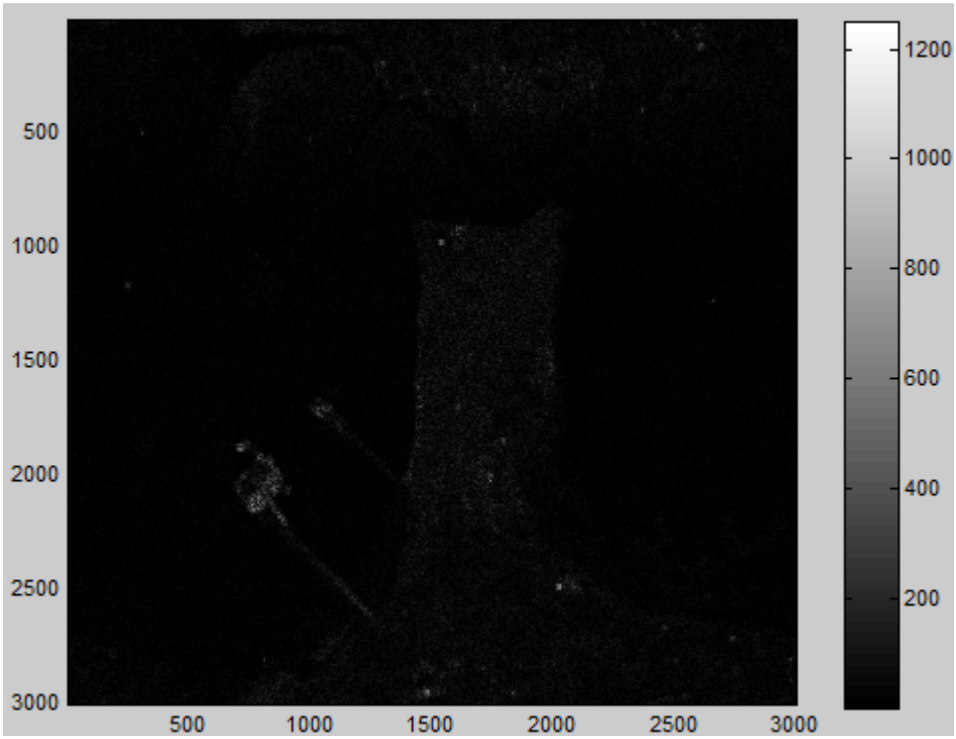
Şekil 5.3 : Doppler merkezi =50Hz durumu



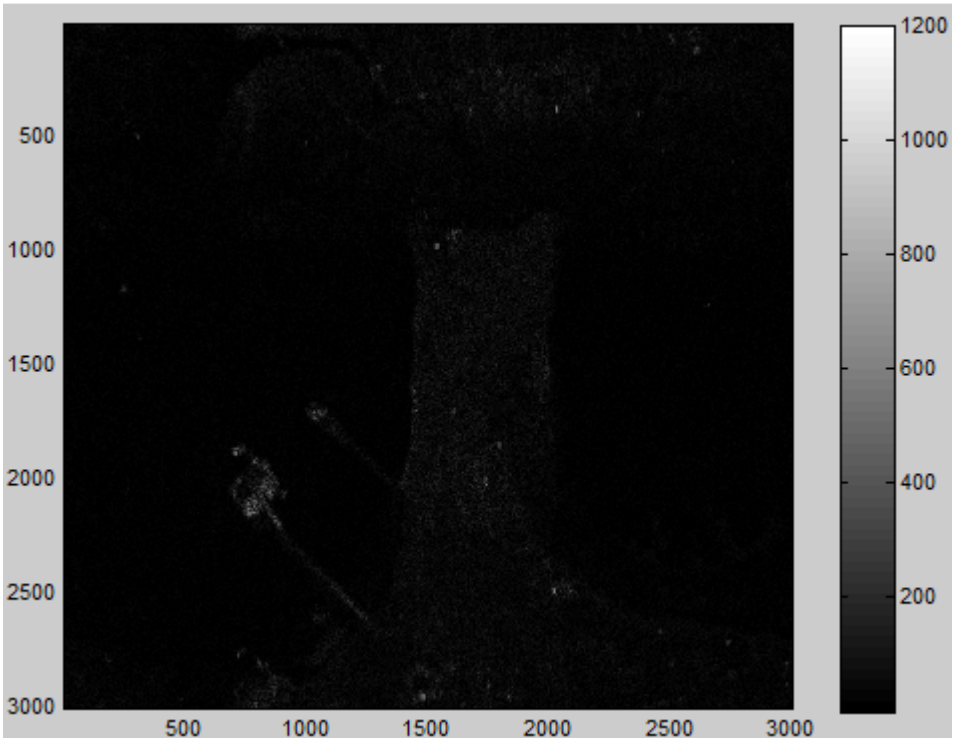
Şekil 5.4 : Doppler merkezi = 100Hz durumu



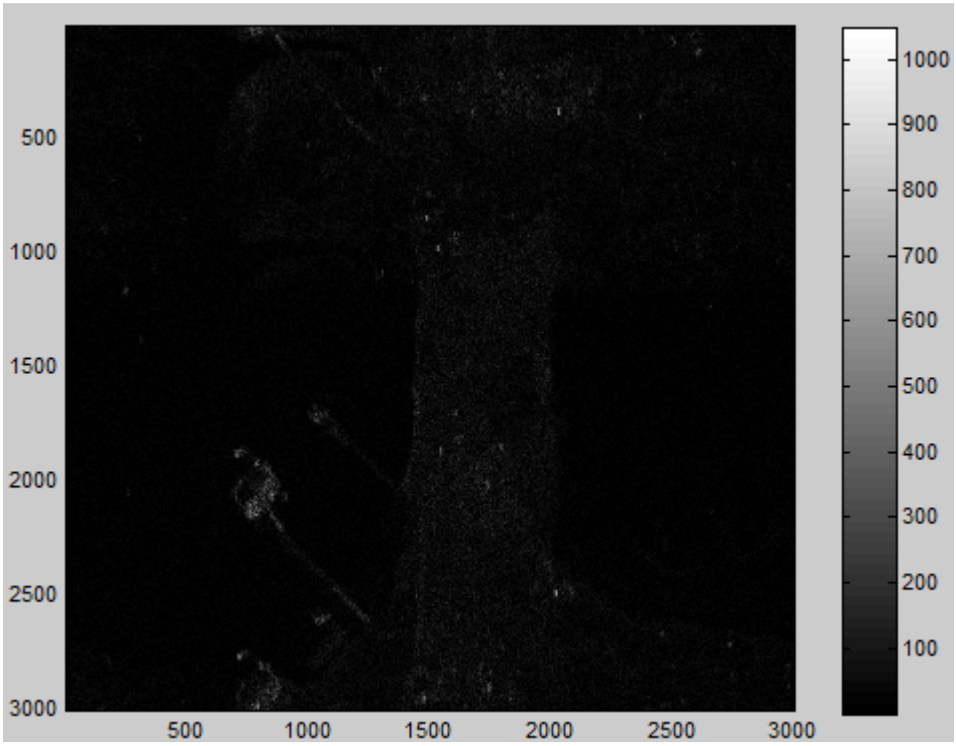
Şekil 5.5 : Doppler merkezi = 350Hz durumu



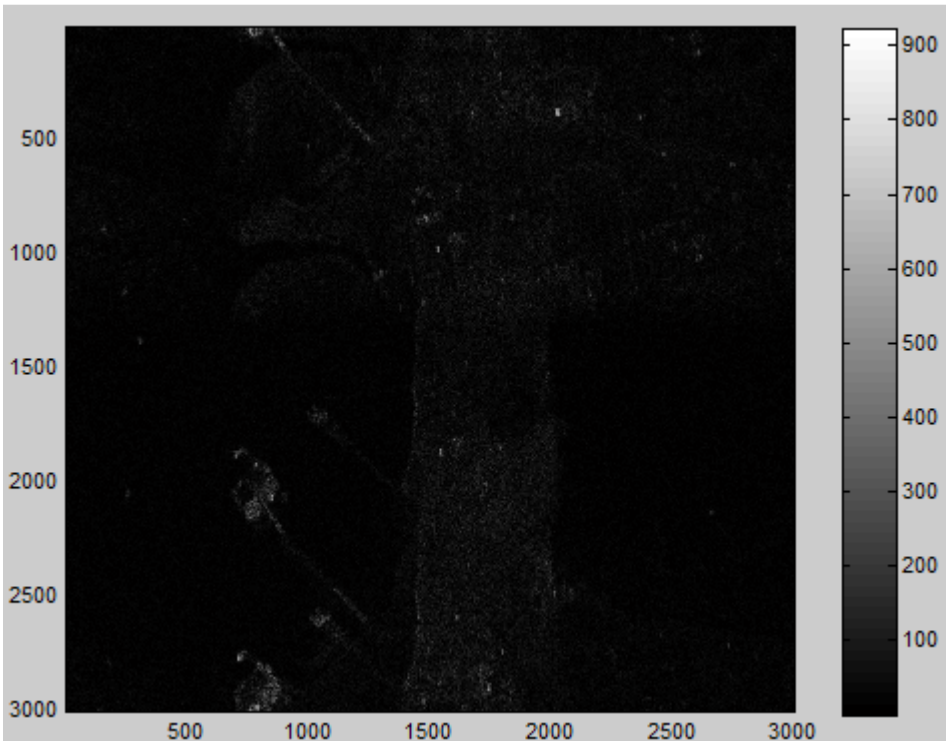
Şekil 5.6 : merkezi = 600Hz durumu



Şekil 5.7 : Doppler merkezi = 850Hz durumu



Şekil 5.8 : Doppler merkezi = 1050Hz durumu



Şekil 5.9 : Doppler merkezi =1250Hz durumu

Benzetim sonuçlarından da görüleceği gibi, Doppler merkez frekansının yanlış hesaplanması durumunda SAR görüntüsünün bozulduğu gözlenmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Görüntüleme sistemleri içerisinde, pasif sistemlerin çalışma koşullarındaki kısıtlamalar bilimadamlarını aktif sistemlerde çalışmaya itmiştir. Aktif görüntüleme sistemleri çoğu ihtiyaca cevap verebilirken, yüksek çözünürlüklü uygulamalarda yetersiz kalmıştır. Yüksek çözünürlüklü sistemler öncelikle dizi anten sistemleri ile gerçeklenmiştir. Dizi antenlerin gerek ekonomi gerekse performans açısından pek iyi olmaması yeni ve yazılıma dayalı yöntemleri gerekli kılmıştır, buradan hareketle SAR sistemleri geliştirilmiştir. SAR sistemleri sayesinde, işaret işleme teknikleri ile dizi antenlerden daha ekonomik ve daha yüksek performanslı görüntüleme işlemleri olanaklı hale gelmiştir.

SAR işaret işlemeye yönelik birçok algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmalar arasında RDA algoritması yaygın bir kullanıma sahip olmuştur.

RDA gibi algoritmalar ile SAR işaret işleme Doppler merkez frekans hesabı ve RCMC problemleri çok büyük öneme sahiptir. Bu adımlarda yapılacak hatalar, SAR görüntüsünü bozucu etkiye sahip olacaktır.

SAR işaret işlemenin iki kritik probleminden biri olan Doppler merkez frekans kestirimi probleminin çözümüne yönelik bir çok yöntem geliştirilmiştir. Her bir algoritma farklı uydular ve farklı SAR çalışma modları için belli avantajlara sahiptir. Bu yöntemler içerisinde ΔE algoritması geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu algoritma genel olarak başarılı bir performansa sahip iken SNR oranının yüksek olması gibi durumlarda hatalı sonuçlara sebep olabilmektedir. Bu çalışmada ΔE algoritmasındaki problemin çözümüne yönelik Kalman parameter kestiricisi kullanılarak yeni bir yöntem geliştirilmiştir.

Sonuç olarak, yeni Doppler kestirim metodunu da içeren SAR işaret işleme yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılım, RADARSAT-1 uydu ham verisinin kaydedildiği ortamdan çıkarılarak görüntü oluşturulma aşamasına kadarki bütün adımları içermektedir. Geliştirilen yeni yazılım gerçek RADARSAT-1 SAR verisi kullanılarak test edilmiştir. Benzetim sonuçları, yeni metodun başarılı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, geliştirilen yeni yazılım ile, hatalı Doppler merkezi kestiriminin doğuracağı sonuçlar da simüle edilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] **UZAKTAN ALGILAMA,** http://www.cscrs.itu.edu.tr/page.tr.php?id=11, 20 Mart 2010.

[2] **Giorgio F., Riccardo L.**, 1999. *Synthetic Aperture Radar Processing*, pp. 30-70.

[3] **Kayserilioğlu C.**, 1996-1997. *Modern Radar Sistemleri*, pp. 37-65.

[4] **Soumekh, M**., 1999. *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms*. New York, NY: Wiley & Sons, Inc.

[5] **Patrick B.,** 2008. *Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR)*, Research Institute for High-Frequency Physics and Radar Techniques (FHR) Research Establishment for Applied Science (FGAN), Germany.

[6] **Naeim D.,** 2007. *Processing SAR data using Range Doppler and Chirp Scaling Algorithms*, Master's of Science Thesis in Geodesy Report No. 3096 TRITA-GIT EX 07-005 School of Architecture and Built Environment Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.

[7] **Radar Courses**, http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/Radar_Course_III/, 25 Mart 2010.

[8] **David S.**, 2008. *SAR IMAGE FORMATION: ERS SAR PROCESSOR CODED IN MATLAB*, SIO 239.

[9] **Bracewell, R.**, 1978. *The Fourier transformation and its applications*. McGraw-Hill, New York, 2nd edn..

[10] **Madsen, S.N.**, 1986. *Speckle Theory Modelling, analysis, and applications related to Synthetic Aperture Radar data*, Ph.D. thesis.

[11] **Siewerth, J.,** 1989. *Theory and Quantitative Comparison of Doppler Centroid Estimation Methods*, German Aerospace Research Establishment, volume: 4, pp: 2576 – 2578, West Germany.

[12] **Gaskill, J.D.**, 1978. *Linear Syatems, Fourier Transforms, and Optics*, John Wiley & Sons, Inc.

[13] **Papoulis, A.**, 1965. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, McGraw-Hill Book Company.

[14] **Young Kyun Kong, Byung-Lae Cho, Young-Soo Kim.**, 2005. *Ambiguity-Free Doppler Centroid Estimation Technique for Airborne SAR Using the Radon Transform.*

[15] **Peter W. Cary**, 1998. *The simplest discrete Radon transform*, Sensor Geophysical Ltd.

[16] **Zhi-Yuan Li, Feng-Qi Zhang, Shu-Ting Wan.**, 2009. *RBFN based on two levels iteration cluster algorithm and its application in generator fault diagnosis*, volume: 2, pp. 1183 - 1187.

[17] **Wei Song, Fang Zhihong, Wang Hongyuan**, 2004. *An Improved Method of Doppler Centroid Estimation in SAR*.

[18] **Greg Welch, Gary Bishop**, 2006. *An Introduction to the Kalman Filter*, Department of Computer Science University of North Carolina at Chapel Hill.

[19] **Chun-Zhi JIN, Li-Juan JIA, Zi-Jiang YANG and Kiyoshi WADA.**, 2002. *Parameter estimation of autoregressive processes by solving eigenvalue problem*, volume: 3, pp: 1265 - 1268.

[20] **RADARSAT-1 Satellite**, *RADARSAT*-1, Project Office, Canadian Space Agency, ASF User Services Alaska SAR Facility Geophysical Institute.

[21] **RADARSAT Data Products Specifications**, 1997. RSI-GS-026 2/0

EKLER

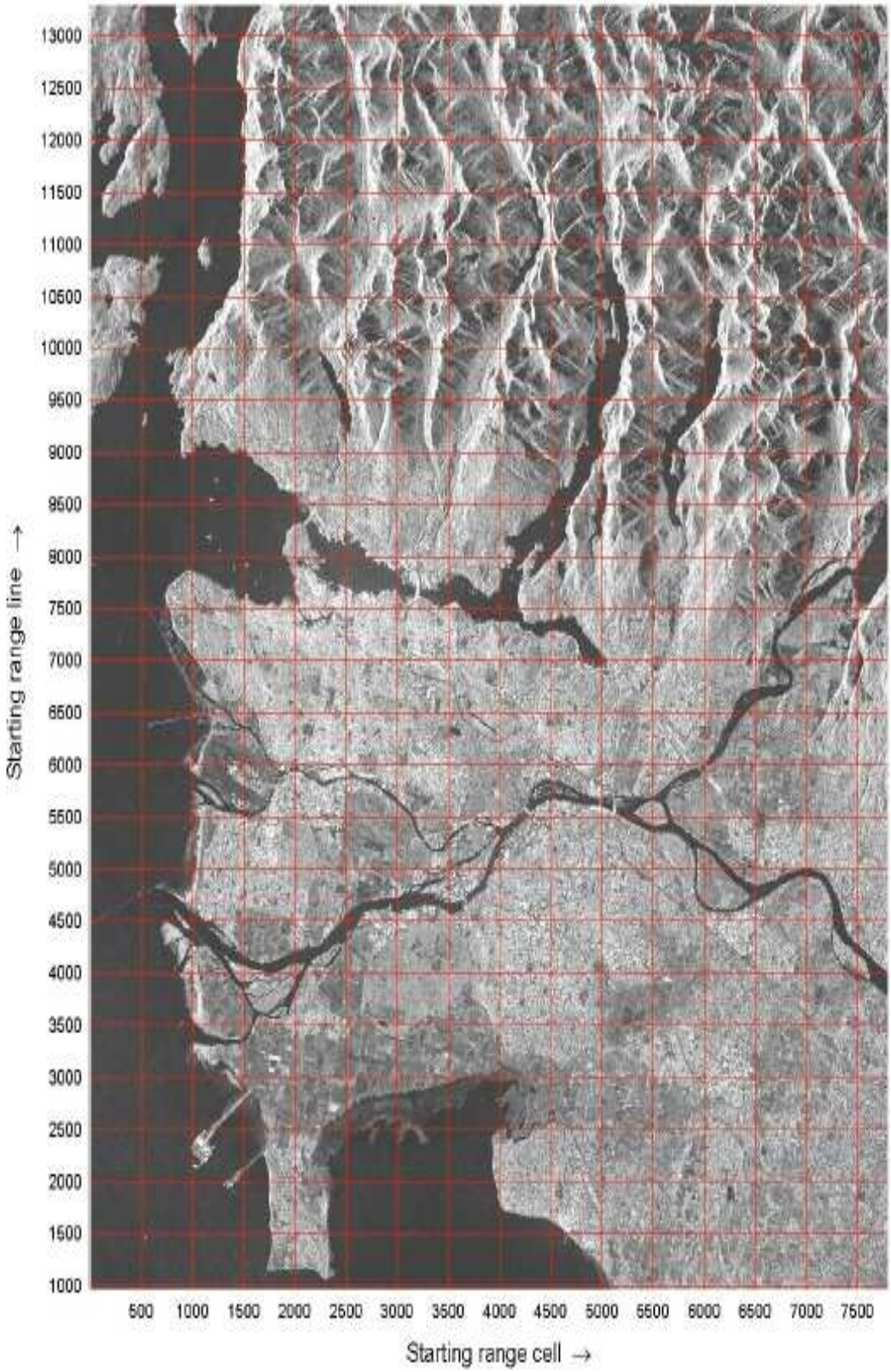
EK A.1 : Kalman filtre eşitlikleri
EK A.2 : Vancouver şehri RADARSAT uydu görüntüsü

EK A.1

Sistem Modeli	$\underline{x}_k = \Phi_{k-1}\underline{x}_{k-1} + \underline{w}_{k-1}; \quad \underline{w}_k \sim N(\underline{0}, Q_k)$
Ölçüm Modeli	$\underline{z}_k = H_k\underline{x}(t_k) + \underline{v}_k; \quad k = 1,2,\cdots; \quad \underline{v}_k \sim N(\underline{0}, R_k)$
Başlangıç Koşulu	$E[\underline{x}(0)] = \hat{\underline{x}}_o, \quad E[(\underline{x}(0) - \hat{\underline{x}}_o)(\underline{x}(0) - \hat{\underline{x}}_o)^T] = P_o$
Diğer Varsayımlar	$E[\underline{w}_k \underline{v}_j^T] = \underline{0}$ *for all j, k*
Durum Kestirimi	$\hat{\underline{x}}_k(-) = \Phi_{k-1}\hat{\underline{x}}_{k-1}(+)$
Hata Kovaryansı	$P_k(-) = \Phi_{k-1}P_{k-1}\Phi_{k-1}^T + Q_{k-1}$
Durum Kestirim Kovaryansı	$\hat{\underline{x}}_k(+) = \hat{\underline{x}}_k(-) + K_k[\underline{z}_k - H_k\hat{\underline{x}}_k(-)]$
Hata Kovaryans Güncellemesi	$P_k(+) = [I - K_kH_k\hat{\underline{x}}_k(-)]P_k(-)$
Kazanç Matrisi	$K_k = P_k(-)H_k^T(\hat{\underline{x}}_k(-)[H_k(\hat{\underline{x}}_k(-)P_k(-)H_k^T\hat{\underline{x}}_k(-) + R_k]^{-1}$

Şekil A.1 : Kalman filtre eşitlikleri

EK A.2



Şekil A.2 : Vancouver şehri RADARSAT uydu görüntüsü

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad:	Osman KARABAYIR
Doğum Yeri ve Tarihi:	Vakfıkebir, 1984
Adres:	Fatih Mah. Mızrak Sok. No: 39, Sancaktepe/İSTANBUL
Lisans Üniversite:	Yıldız Teknik Üniversitesi