

**MUHARİP UÇAKLARDA KULLANILAN RADAR  
GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

**AN INVESTIGATION OF RADAR IMAGING METHODS  
USED IN FIGHTER AIRCRAFT**

**EMRAH ONAT**

**YRD. DOÇ. DR. YAKUP ÖZKAZANÇ**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2014

**EMRAH ONAT**'ın hazırladığı “**Muharip Uçaklarda Kullanılan Radar Görüntüleme Yöntemlerinin İncelenmesi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MUHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. A. Salim KAYHAN

Başkan

Yrd. Doç. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ

Danışman

Doç. Dr. Murat EFE

Üye

Yrd. Doç. Dr. Mücahit K. ÜNER

Üye

Yrd. Doç. Dr. S. Esen YÜKSEL

Üye

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

16 / 09 / 2014

EMRAH ONAT

## ÖZET

# MUHARİP UÇAKLARDA KULANILAN RADAR GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ

**EMRAH ONAT**

**Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ**

**Eylül 2014, 82 Sayfa**

Savaş uçaklarında platformun seyir, tespit, takip, hedefleme, işaretleme ve silah angajmanı gibi görevleri büyük ölçüde uçakta bulunan ateş kontrol radarları tarafından sağlanan veriler ile mümkün olabilmektedir. Savaş uçaklarında bulunan çok fonksiyonlu bu radarlar, diğer pek çok radardan farklı olarak; savaş uçağının üzerinde uçtuğu araziye görüntüleyebilmesine de olanak tanımaktadır. Böylece pilot elektro-optik sensörlerden bağımsız olarak, radar dalgaları ile gece-gündüz araziye görebilmekte ve bu görüntüyü gerek seyir için gerekse silah fonksiyonlarını desteklemek için kullanabilmektedir.

Radar anteninden gelen verilerin belirli algoritmalar kullanılarak işlenmesiyle taranan bölgelerin görüntüleri oluşturulmaktadır. Görüntülerin oluşturulmasında farklı modlar kullanılmaktadır. Bazı görüntüleme modlarını kullanarak görüntü üretebilmek için radar anteni belirli açılar arasında mekanik hareket yaparken; bazı modlar için ise radar anteni sabit bir açıya bakmaktadır. Birbirinden farklı algoritmaları ve farklı özellikleri bulunan bu modları kronolojik olarak sıralamak gerekirse; Gerçek Hüzmeyle

Yer Haritalama (RBGM), Doppler Hüzme Keskinleştirme (DBS) ve Sentetik Açıklık Radarı (SAR) olmak üzere üçe ayırabiliriz. Bu modlardan ilk ikisinde mekanik olarak belirli açılar arasında hareket eden radar anteni gerekli iken; SAR ile şerit şeklinde yer haritası çıkarılan modda ise anten, uçağın hareket eksenine göre hep aynı açıda sabit durmaktadır.

Modlar içerisinde Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama (RBGM) modu görüntü kalitesi ve çözünürlük bakımından en kaba görüntünün elde edildiği moddur. Doppler Hüzme Keskinleştirme (DBS) modu ise içerisinde bazı sinyal işleme işlemleri olması sebebiyle daha yüksek çözünürlüğün elde edildiği bir mod olarak sınıflandırılabilir. Halihazırda bazı savaş uçaklarındaki tek görüntü modu olarak DBS kullanılmaktadır. Sentetik Açıklık Radarı (SAR) ise, uçak veya uydu üzerinden uzaktan görüntüleme amacıyla kullanılan ve hem gece hem de gündüz her türlü hava koşulunda yüksek çözünürlükte görüntü sağlayabilen bir radar sistemidir.

Tez kapsamında görüntüleme yöntemleri MATLAB ortamında modellenerek bazı benzetimler yapılmıştır ve benzetime girdi olarak aynı harita verildiğinde yöntemlerin çıkardıkları sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler** : Radar Görüntüleme Yöntemleri, Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama (RBGM), Doppler Hüzme Keskinleştirme (DBS), Sentetik Açıklıklı Radar (SAR)

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

# **ABSTRACT**

## **AN INVESTIGATION OF RADAR IMAGING METHODS USED IN FIGHTER AIRCRAFTS**

**EMRAH ONAT**

**Master of Science, Electrical and Electronics Engineering**

**Department**

**Supervisor: Assist. Prof. Yakup ÖZKAZANÇ**

**September 2014, 82 Pages**

In fighter aircrafts; duties such as platform's navigation, detection, tracking, targeting, marking and weapon engagement are succeeded with the help of data that comes from fire control radars located at plane. Unlike the most of the radars, these fire control radars give a chance for ground imaging. So, aircraft-pilot can generate an image of the ground irrespective of electro-optic sensors at not only during daylight but also in night with the help of electromagnetic radar waves. Besides this generated map can be used for supporting the weapon functions of aircraft.

Ground images of scanned areas are generated by some algorithm processes of data that come from radar antennas. Different modes are used to generate images. In one hand, radar antenna has to change its aspect angle in a definite interval mechanically to compose ground images by using some modes, on the other hand, for some modes radar antenna has to be stable, thus its aspect does not alter. These modes those

have different algorithms and different properties are chronologically three parts. They are Real Beam Ground Mapping (RBGM), Doppler Beam Sharpening and Synthetic Aperture Radar. Mechanically moveable radar antenna property is necessary for first two modes, for Synthetic Aperture Radar mode, radar antenna has to be fixed angle according to flight direction to generate a strip map.

Real Beam Ground Mapping mode generates the worst images according to image quality and resolution in all modes. Doppler Beam Sharpening mode has some signal processing blocks. So, it composes better quality images and higher resolution in comparison with RBGM. In addition, DBS mode is the just one imaging mode at some aircrafts in present time. However Synthetic Aperture Radar (SAR) is an airborne or spaceborne radar system which is used in remote sensing to provide high resolution images for not only daylight but also night and all weather conditions.

Imaging methods are modelled in the MATLAB and simulations are produced. Then, same map is given the all simulations as an input and the outputs of the methods are compared in detail.

**Keywords:** Radar Imaging, Real Beam Ground Mapping (RBGM), Doppler Beam Sharpening (DBS), Synthetic Aperture Radar (SAR)

**Advisor:** Dr. Yakup Özkazanç, Assistant Professor, Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering

## TEŞEKKÜR

Bu tezin oluŐması s¼recinde askerlik, evlilik ve iŐ deęiŐiklięi gibi sebeplerle ara verilmiş olmasına rağmen benden g¼venini esirgemeyen, bilgi ve tecr¼belerinden faydalandığım tez danıŐmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Yakup Őzkazanę'a sabırlı yol g¼stericilięi, titiz değerlendirmeleri için teŐekk¼r ederim.

İlk nefesimi aldığım andan beri yanımda olduklarını hep hissettiğim, t¼m yaŐamım boyunca Örnek aldığım, maddi ve manevi desteklerini benden hiç esirgemeyen sevgili annem Dilek ONAT ve sevgili babam Zeki ONAT'a çok teŐekk¼r ederim.

Sevgili eŐim Pınar ŐİMŐEK ONAT'a her zaman olduğu gibi tez çalıŐmam boyunca da yanımda yer alarak anlayıŐını ve desteğini eksik etmediği için çok teŐekk¼r ederim.

Tez çalıŐmalarımı destekleyen T¼BİTAK-BİLGEM/İLTAREN ve SDT A.Ő.'ye (Space&Defence Technologies) teŐekk¼r ederim.



# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER.....	vii
ÇİZELGELER.....	ix
SÖZLÜK DİZİNİ.....	x
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. GÖRÜNTÜLEME MODLARI.....	7
2.1 Tüm Modlar için Menzil Çözünürlüğü.....	9
2.1.1. Uyumlu Filtre.....	11
2.1.2. Darbe Sıkıştırma.....	14
2.1.3. Darbe Çözme ve Menzilde Yansıtırlık Fonksiyonu Elde Etme.....	15
2.2. Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama (RBGM).....	16
2.3. Doppler Hüzme Keskinleştirme (DBS).....	20
2.4. Sentetik Açıklıklı Radar (SAR).....	32
2.4.1. Odaksız Sentetik Açıklıklı Radar (unfocused SAR).....	34
2.4.2. Odaklı Sentetik Açıklıklı Radar (focused SAR).....	38
3. GÖRÜNTÜLEME MODLARININ MODELLENMESİ.....	47
3.1. Tüm Modlar için Senaryo Oluşturma.....	47
3.2. Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama (RBGM).....	51
3.3. Doppler Hüzme Keskinleştirme (DBS).....	56
3.4. Odaksız Sentetik Açıklıklı Radar (unfocused SAR).....	65
4.GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	70
5.SONUÇLAR.....	78
KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	81

# ŞEKİLLER

## Sayfa

Şekil 1.1: Yer Taraması.....	1
Şekil 1.2: Yer Taraması ([2]'den uyarlanmıştır).....	2
Şekil 1.3: RBGM (sol) ve DBS (sağ) Görüntülerinin Karşılaştırılması [7].....	3
Şekil 1.4: SAR Modunda Yer Taraması.....	4
Şekil 1.5: Şerit Haritalama (üst) ve Noktasal Işık (alt) için Uçuş Geometrileri.....	5
Şekil 2.1: Menzil ve Çapraz Menzil Çözünürlüğü.....	7
Şekil 2.2: Menzil Çözünürlüğü.....	9
Şekil 2.3: Menzil Yansıtıcılık Fonksiyonu Elde Etme.....	15
Şekil 2.4: Gerçek Hüzme Haritalama.....	16
Şekil 2.5: RBGM Menzil - Çapraz Menzil Çözünürlükleri.....	17
Şekil 2.6: RBGM Blok Diyagramı.....	18
Şekil 2.7: RBGM Her Hüzmeden Alınan Darbeler.....	18
Şekil 2.8: RBGM (üst) ve DBS (alt) Yer Taraması.....	20
Şekil 2.9: RBGM - DBS Karşılaştırması.....	22
Şekil 2.10: Arkkosinus Fonksiyonu Değişim Grafiği.....	24
Şekil 2.11: DBS Modu Çapraz Menzil Hesaplanması ([17]'den uyarlanmıştır).....	25
Şekil 2.12: DBS Blok Diyagramı ([8]'den uyarlanmıştır).....	30
Şekil 2.13: DBS Data Matrisi.....	30
Şekil 2.14: Sentetik Açıklıklı Radar [7].....	32
Şekil 2.15: Odaksız SAR (üst) ve odaklı SAR (alt) [2].....	33
Şekil 2.16: Olabilecek En Yüksek Sentetik Açıklık.....	35
Şekil 2.17: Odaksız Sentetik Açıklıklı Radar Algoritması ([2]'den uyarlanmıştır).....	37
Şekil 2.18: En yüksek Açıklık için Anten Hüzme Genişliği Limiti.....	39
Şekil 2.19: SAR Geometrisinde Hedef Menzilin Değişmesi.....	44
Şekil 2.20: Odaklı Sentetik Açıklıklı Radar Algoritması ([2]'den uyarlanmıştır).....	46
Şekil 3.1: Taranacak Harita.....	48
Şekil 3.2: Benzetim Senaryosu.....	50
Şekil 3.3: RBGM Modu Kullanılarak Oluşturulan Harita.....	54
Şekil 3.4: RBGM Modu Kullanılarak Oluşturulan Harita-2.....	55
Şekil 3.5: Doppler Frekansının Çıkartılması Blok Diyagramı.....	58

Şekil 3.6: DBS Modu Kullanılarak Oluşturulan Harita.....	60
Şekil 3.7: Sentetik Hüzme Aralıkları.....	61
Şekil 3.8: DBS Modu Kullanılarak Oluşturulan Harita – 2.....	62
Şekil 3.9: DBS İyileştirme Katsayısı.....	63
Şekil 3.10: $\pm 90^\circ$ DBS Verimli Hüzme Genişliği.....	63
Şekil 3.11: Çapraz Menzil Çözünürlüğü.....	64
Şekil 3.12: Odaksız SAR Benzetimi.....	66
Şekil 3.13: Odaksız SAR Veri Matrisi.....	67
Şekil 3.14: Odaksız SAR Modu Kullanılarak Oluşturulan Harita.....	68
Şekil 4.1: RBGM-DBS-SAR Performans Karşılaştırması.....	71
Şekil 4.2: Benzetimlere Girdi Yapılan Sentetik Harita – 1.....	72
Şekil 4.3: RBGM Modu Çıktısı – 1.....	72
Şekil 4.4: DBS Modu Çıktısı – 1.....	73
Şekil 4.5: Odaksız SAR Modu Çıktısı – 1.....	74
Şekil 4.6: Benzetimlere Girdi Yapılan Sentetik Harita – 2.....	75
Şekil 4.7: RBGM Modu Çıktısı – 2.....	75
Şekil 4.8: DBS Modu Çıktısı – 2.....	76
Şekil 4.9: Odaksız SAR Modu Çıktısı – 2.....	77

## ÇİZELGELER

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Doppler Çizgileri.....	23
Çizelge 3.1: Ortak Parametreler.....	47
Çizelge 3.2: RBGM işlemleri öncesi Çıkartılan Hedef Bilgileri.....	51
Çizelge 3.3: RBGM Model Parametreleri.....	52
Çizelge 3.4: Yansıyan Darbelerden Elde Edilen Bilgiler.....	53
Çizelge 3.5: DBS İşlemleri Öncesi Çıkartılan Hedef Bilgileri.....	57
Çizelge 3.6: Yansıyan Darbelerden Elde Edilen Bilgiler.....	59
Çizelge 3.7: Odaksız SAR işlemleri öncesi Çıkartılan Hedef Bilgileri.....	67
Çizelge 3.8: Yansıyan Darbelerden Elde Edilen Bilgiler.....	68

## SÖZLÜK DİZİNİ

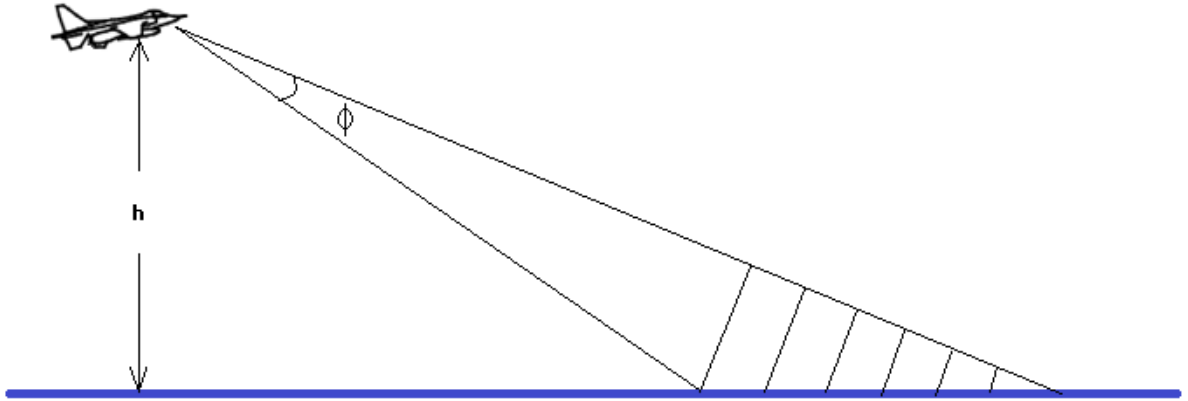
Çözünürlük	:	Resolution
Çapraz Menzil / Kerteriz	:	Cross Range
Darbe	:	Pulse
Dar Bant	:	Narrow Band
Darbe	:	Pulse
Darbe Çözme	:	Pulse Decompression
Darbe Sıkıştırma	:	Pulse Compression
Görüntü İşleme	:	Image Processing
Hüzme Genişliği	:	Beamwidth
Hüzme Keskinleştirme	:	Beam Sharpening
Kutupsal	:	Polar
Menzil	:	Range
Noktasal Işık	:	Spotlight
Odaklı	:	Focused
Odaksız	:	Unfocused
Ortalama Kareysel Hata	:	Mean Square Error
Ötüş Sinyali	:	Chirp Signal
Ötüş Hızı	:	Chirp Rate
şerit Haritalama	:	Stripmap
Taban Bant	:	Baseband
Uyumlu Filtre	:	Matched Filter
Yan Kulak Seviyesi	:	Sidelobe Level
Yansıtırlık Fonksiyonu	:	Reflectivity Function
Yüzey Yansıtırlık Katsayısı	:	Surface Reflection Coefficient

## KISALTMALAR DİZİNİ

DBS	:	Doppler Beam Sharpening
RBGM	:	Real Beam Ground Mapping
SAR	:	Synthetic Aperture Radar

## 1. GİRİŞ

Bu bölümde, muharip uçaklarda kullanılan görüntüleme yöntemleri ve yöntemlerin özellikleri hakkında genel bilgiler verilerek literatürdeki mevcut çalışmalara yer verilmiştir. Muharip uçaklarda bulunan ateş kontrol radarları tarafından sağlanan verilerin yardımıyla görüntüleme modları çalıştırılarak savaş uçağının üzerinde uçtuğu araziye Şekil 1.1'deki gibi görüntüleyebilmesine imkan sağlanmaktadır. Böylece, pilot elektro-optik sensörleri kullanmaksızın, elektro-manyetik radar dalgaları yardımıyla gece-gündüz araziye görebilmekte ve bu görüntüyü gerek anlık olarak seyir için gerekse silah fonksiyonlarını desteklemek için kullanabilmektedir. Tüm bunlara ek olarak istenirse görüntüler kaydedilerek uçuş sonrası yer platformalarında da kullanabilmektedir.



**Şekil 1.1: Yer Taraması**

İlerleyen bölümlerde görüntüleme yöntemlerinin çalışma prensipleri, algoritmaları, teknik özellikleri, birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Aynı zamanda MATLAB simülasyonları oluşturularak teorik çalışmalar simülasyon ortamında gerçekleşmiş ve ulaşılan sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Radar teknolojisinin her geçen gün ilerleyen bir teknoloji olduğu ve test uçuşlarının yüksek maliyetleri düşünüldüğünde; radar simülasyonlarının, pilot ve operator performanslarını artıracak etkin bir yaklaşım olduğunu söyleyebiliriz [1].

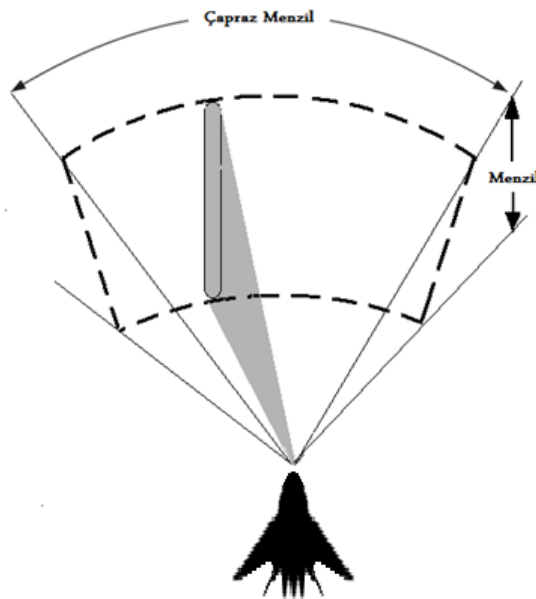
Bahsi geçen radar görüntüleme yöntemleri, teknolojik gelişme ve karmaşıklık sırasına göre şöyle sıralanır:

1. Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama  
(RBGM - Real Beam Ground Mapping)
2. Doppler Hüzme Keskinleştirme  
(DBS - Doppler Beam Sharpening)
3. Sentetik Açıklıklı Radar  
(SAR - Synthetic Aperture Radar)

En sade tanımlarıyla görüntüleme modları anlatılacak olursa;

Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama (RBGM), isminden de rahatça anlaşılacağı üzere taranan bölgenin haritasını sadece anten hüzmesinin aydınlattığı bölgeden gelen sinyallerin herhangi bir algoritmik işleminden geçirmeksizin harita oluşturmada kullanıldığı en basit moddur. Bu sebeple görüntü çözünürlüğü düşüktür ve kaliteli değildir. Görüntü içindeki renk, ton ve parlaklık değişimi sadece gelen sinyalin genlik bilgisinden yararlanılarak oluşturulur.

Uçan platformlar üzerinden yer taraması yapılırken, anten hüzmesi Şekil 1.2'deki gibi tarama yaparak kesik çizgili alanı aydınlatır. Bu tarama işleminde dar bir hüzme kullanır. Bu hüzmenin kerteriz açısı daha dar iken ( $2^{\circ}$ - $3^{\circ}$ ), yükseliş açısı kerterize kıyasla geniştir ( $10^{\circ}$ - $15^{\circ}$ ) [2].

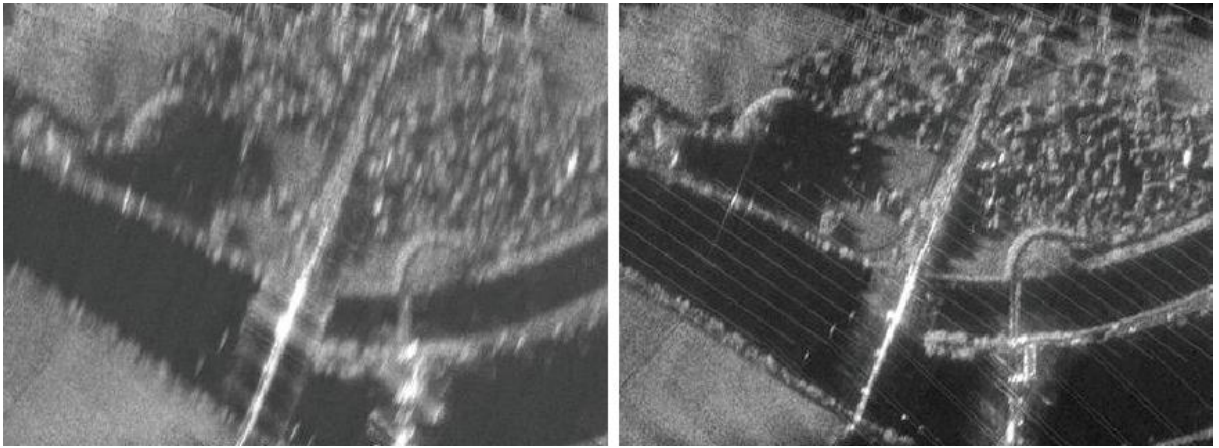


**Şekil 1.2:** Yer Taraması ([2]'den uyarlanmıştır)



Doppler Hüzme Keskinleştirme (DBS) modu da tıpkı RBGM modunda olduğu ve Şekil 1.2'de görüldüğü gibi anten hüzmesinin aydınlattığı alandan gelen elektromanyetik sinyalleri kullanır. Ancak bu modda RBGM'den farklı olarak; uçağın hızından dolayı oluşan ve taranılan bölgedeki her açıya göre değişen Doppler kayması değeri, hüzme genişliğini sentetik Doppler aralıklarına bölerek daha yüksek çözünürlükte bir harita oluşturur [3], [4]. Kısacası iki mod arasındaki en temel fark çapraz menzil çözünürlüğündeki değişimdir.

RBGM modunda çapraz menzil çözünürlüğünün kötü olması sebebiyle daha yüksek çözünürlük elde edebilmek için Doppler Beam Sharpening modunun kullanıldığı 100MHz altındaki frekanslarda çalışan radarlar 1950'lerin başlarında geliştirilmiştir [5], [6].



**Şekil 1.3:** RBGM (sol) ve DBS (sağ) Görüntülerinin Karşılaştırılması [7]

Şekil 1.3'de RBGM modu ve DBS modu kullanılarak aynı bölgenin görüntüleri elde edilmiştir. Görüntülerin çözünürlük kalitesi açısından büyük farklılıkları olduğu görülmektedir. Bunun sebebi modların ulaşabilecekleri en yüksek çapraz menzil çözünürlüklerinin farklı olmasıdır. Bu farklılık; DBS modunu, RBGM moduna göre daha avantajlı duruma getirmiştir.

Üzerinde durulan görüntüleme yöntemlerinden sonuncusu olan ve diğer modlara göre birçok üstün özelliği bünyesinde barındıran Sentetik Açıklık Radarı (SAR) ile ilgili ilk tanımlamalar ve gösterimler 1951 yılında Goodyear Aircraft şirketinde Carl

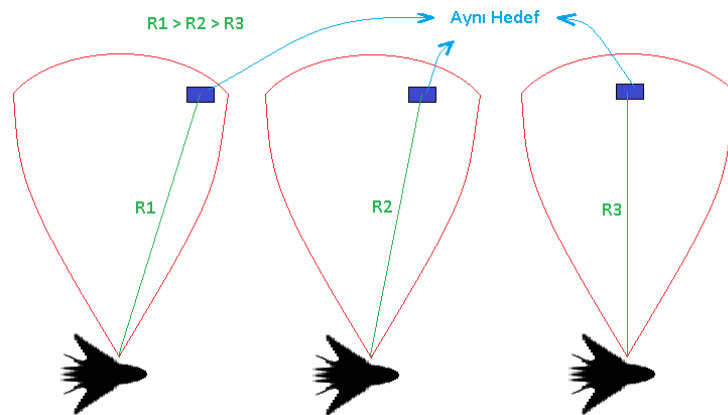
Wiley tarafından yapılmış ve bu çalışmalar 1965 yılında “Doppler Beam Sharpening” (DBS) ismiyle kategorize edilip patent olarak alınmıştır [8].

Sentetik Açıklık Radarı (SAR), tıpkı Doppler Hüzme Keskinleştirme modunda olduğu gibi yanıp gelen sinyaldeki değişimin analiz edilmesine dayalı bir görüntüleme tekniğidir [9], [10], [11]. SAR bir bölgenin yüksek çözünürlüklü görüntü ve haritasını elde etmekte kullanılan, işlemcisinde büyük boyutlu bir antene eşdeğer sentezleme gerçekleştirerek çapraz menzilde yüksek çözünürlük sağlayan bir radar sistemidir [12]. Sentetik Açıklıklı Radar ile de tıpkı diğer modlarda olduğu gibi menzilde ve ona dik olan çapraz menzilde iki boyutlu görüntü elde edilir.

SAR sistemi kendi içerisinde iki farklı alt moda ayrılmaktadır. Bu alt modlar;

- A. Odaksız Sentetik Açıklıklı Radar  
(unfocused Synthetic Aperture Radar)
- B. Odaklı Sentetik Açıklıklı Radar  
(focused Synthetic Aperture Radar)

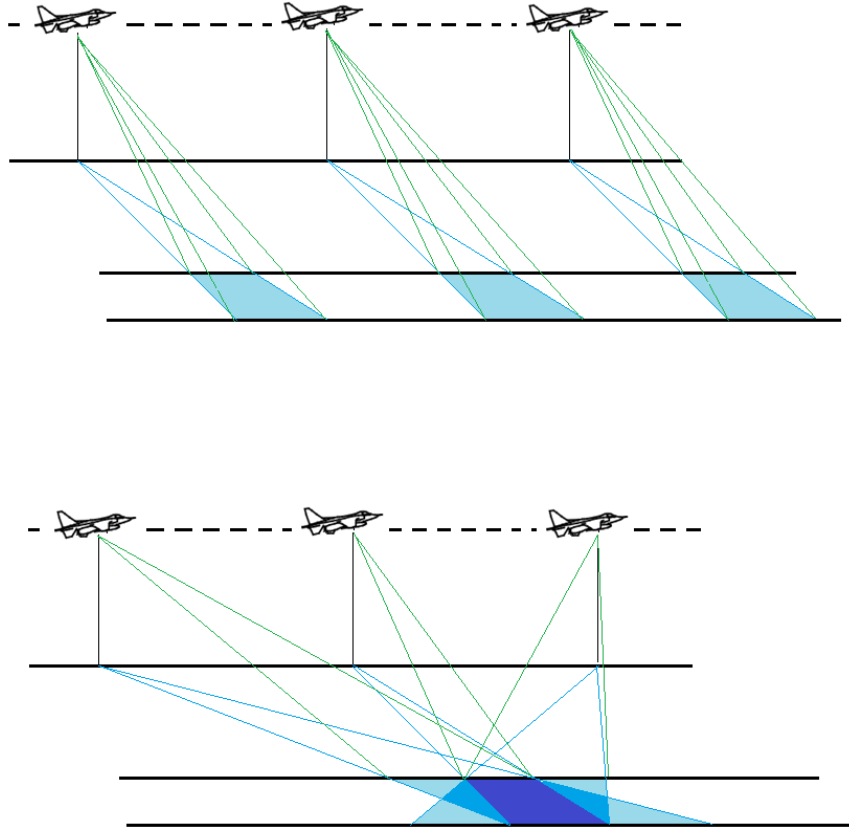
Radarın üzerinde bulunduğu platform hareket halinde olduğu için anten hüzmesi yön değiştirmese bile sürekli bir yer taraması yapmaktadır. Bu sebeple tıpkı Şekil 1.4’de de olduğu gibi yerde sabit duran bir hedefin radar hüzmesine ilk girdiği andan hüzmeden çıktığı son ana kadar radara göre uzaklığı sürekli olarak değişmektedir. Bu değişim hedeften yansarak gelen sinyallerin fazını da doğal olarak değiştirmektedir. Radar tarafından alınan bu sinyallerdeki faz farklılığının göz ardı edilip edilmemesi ise SAR alt modlarını oluşturmaktadır.



Şekil 1.4: SAR Modunda Yer Taraması

SAR alt modlarından odaksız Sentetik Açıklıklı Radar alt modu neredeyse tüm SAR sistemlerinde olmasına rağmen daha düşük çözünürlükte görüntü üretmesi sebebiyle etkin bir şekilde kullanılmamaktadır. Bu sebeple SAR denildiğinde herkesin aklına ilk ve tek gelen odaklı Sentetik Açıklıklı Radar modu olmaktadır.

Odaklı SAR alt modunda yer taraması yaparak harita çıkarırken de iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden ilki tezin en başından beri bahsedilen antenin uçakta sabit bir açıyla (uçanın hareket eksenine dik) hareketsiz durduğu ve uçağın hareketi sayesinde yeryüzünün taranarak görüntü elde edildiği Şerit Haritalama (Stripmap) modudur. Diğer bir yöntem olan Noktasal Işık (Spotlight) modunda ise SAR anteni yan alanda belli bir bölgeye odaklanacak şekilde bakış açısını değiştirmekte ve açıklık boyunca hareketinde bu sınırlı bölgeden gelen yansımaları toplamaya devam etmektedir [13].



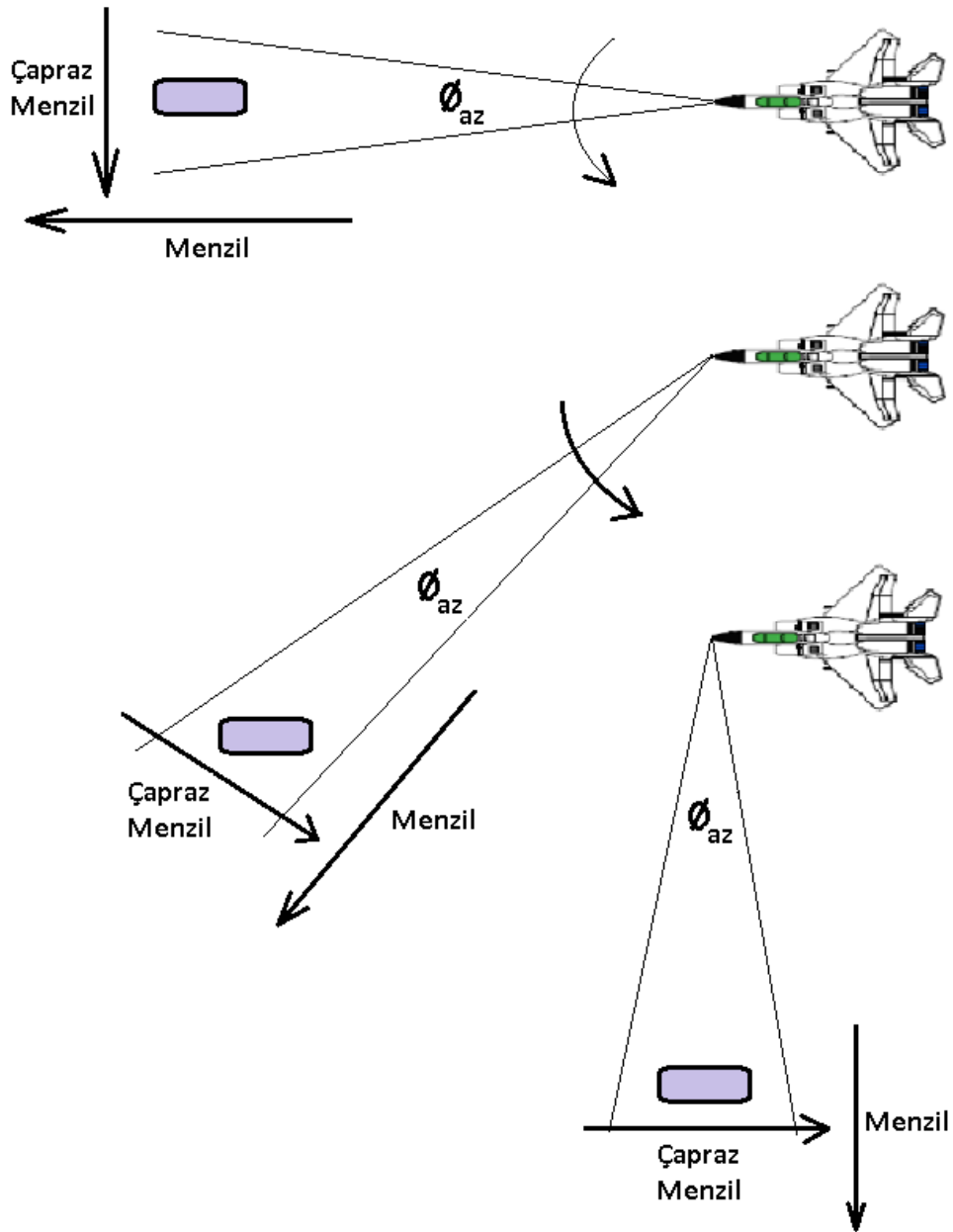
**Şekil 1.5:** Şerit Haritalama (üst) ve Noktasal Işık (alt) için Uçuş Geometripleri

Bu iki yöntemden Noktasal Işık modunda belirli bir bölge Şekil 1.5'deki gibibir çok farklı açıdan gözlemlendiğinden, başka bir deyişle Şerit Haritalama moduna göre daha büyük bir sentetik anten tarafından aydınlatıldığından Şerit Haritalama modundan daha yüksek çözünürlük değerleri elde edilebilmektedir.

Bu tez kapsamında öncelikli olarak muharip uçaklarda kullanılan görüntüleme yöntemleri hakkında genel bilgiler ve sade tanımlamalar verildikten sonra bu görüntüleme yöntemlerinin hepsi için ortak olan menzil çözünürlüğü, darbe sıkıştırma ve darbe çözme başlıkları ile ikinci bölümde detaylı olarak anlatılmıştır. İkinci bölümün devamında Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama'dan (RBGM) başlayarak, Doppler Hüzme Keskinleştirme (DBS) ve son olarak da odaksız ve odaklı sentetik Açıklıklı Radar modları teorik yönleriyle incelenmiş, literatürden yararlanılarak modların algoritmaları ve birbirlerinden ayıran en temel fark olan çapraz menzil çözünürlüklerine ilişkin formüller tüm detaylarıyla paylaşılmıştır. Üçüncü bölümde görüntüleme yöntemleri için senaryo oluşturulmuş ve görüntülenecek harita oluşturulduktan sonra RBGM, DBS ve odaksız SAR modları kendi algoritmaları kullanılarak MATLAB ortamında benzetimleri ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Bu modlar kullanılarak taranan haritaların sistem çıktısı görüntüleri paylaşılmış ve dördüncü bölümde hem görüntüler üzerinden hem de algoritmik olarak bilinen çözünürlük değerleri üzerinden görüntüleme modları karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise tez ile ilgili genel değerlendirmeler yapılmış ve sonuçlara yer verilmiştir.

## 2. GÖRÜNTÜLEME MODLARI

Görüntüleme yöntemlerinin teorik yönleri ve algoritmik açıklamaları bu bölümde detaylandırılmaktadır. En temel tanımıyla; görüntüleme yöntemlerinde görüntüleme eksenlerinden biri olan menzil eksenini taşıyan hareketli platformun tarama yaptığı anten hüzmesine paralel iken, diğer eksen olan çapraz menzil eksenine ise hüzme yönüne diktir. Tarama açısı değiştikçe menzil ve çapraz menzil yönleri Şekil 2.1'de olduğu gibi değişmektedir.

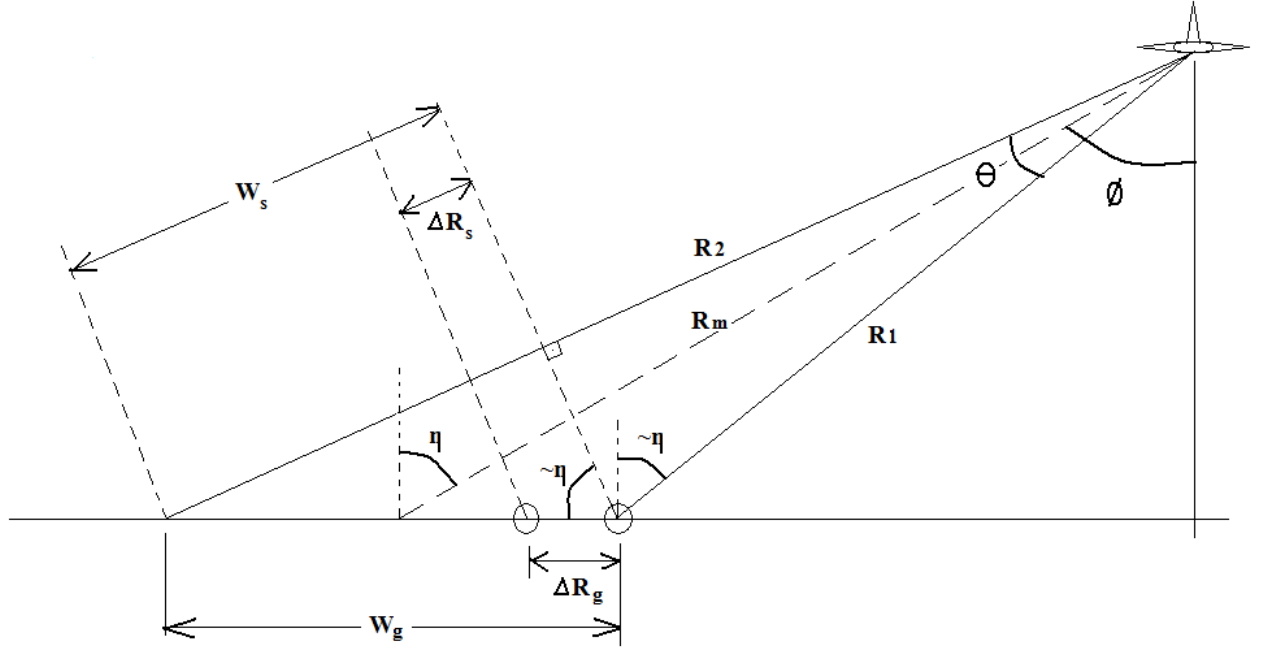


Şekil 2.1: Menzil ve Çapraz Menzil Çözünürlüğü

Görüntüleme sitemlerinin performanslarını belirleyen en önemli parametre çözünürlüktür. Ancak modlar için çözünürlük tanımlanırken menzil ve çapraz menzil için ayrı ayrı tanımlanır. Çözünürlük performansları değerlendirilmesi yapılırken ise menzil ve çapraz menzil çözünürlüğünün her ikisi de dikkate alınır. Giriş bölümünde de bahsedildiği üzere modları birbirinden ayıran en belirgin fark çapraz menzil çözünürlüklerinin değişiklik arz etmesidir. Bu sebeple modun performansını belirleyecek olan asıl parametre çapraz menzil çözünürlüğüdür. Tüm modlar için ortak olması sebebiyle tez içerisinde tekrara yol açmaması açısından menzil çözünürlüğü ilk olarak anlatılmıştır.

## 2.1. Tüm Modlar İçin Menzil Çözünürlüğü

Menzil çözünürlüğü, sistem tarafından iki noktanın birbirinden ayırılması için gerekli olan minimum mesafe olarak tanımlanır [14]. Şekil 2.2'deki  $\Delta R_g$  menzil çözünürlüğünü göstermektedir.



**Şekil 2.2:** Menzil Çözünürlüğü

Platforma daha yakın olan noktadan yansıyan darbenin geri ucu ile platforma daha uzak olan noktadan yansıyan darbenin ön ucunun kesişmediği durumda bu iki nokta birbirinden ayrılabilir. Bu şartın sağlanabilmesi için iki nokta arasındaki en düşük mesafe yani menzil çözünürlüğü  $\Delta R_g$ ;

$$\Delta R_g = \frac{\Delta R_s}{\sin \eta} = \frac{c \cdot \tau_p}{2 \cdot \sin \eta} \quad (2.1)$$

olacaktır. Burada  $c$  ışık hızını,  $\eta$  ise hüzmeyi yaklaşık orta noktasının düşey eksenle yaptığı açığı göstermektedir.

Formülden de anlaşılacağı üzere menzil çözünürlüğünü iyileştirebilmek için darbe genişliğini  $\tau_p$  azaltmak gerekmektedir ki bu da gerekli bant genişliğini artırmaktadır ve darbe tekrarlama aralığı sabit tutulduğu için gönderici güçte ciddi bir azalmaya sebep olmaktadır. Ayrıca bu durumda kısa darbe süresinde yeterli güçte sinyal basılamayacağından sinyal gürültü oranı düşecek ve güvenilir bir şekilde hedef tespiti yapılamayacaktır. Bu problemin üstesinden gelmek için kullanılan yöntemlerden biri gönderilen sinyalin ötüş (chirp) sinyaliyle kodlanmasıyla gerçekleştirilen darbe sıkıştırma yöntemidir. Bu yöntemde gönderilen darbenin frekansının zamanla doğrusal bir şekilde değişmesi ve böylece darbenin frekans düzlemindeki karşılığının ötüş sinyaliyle kodlanmamış aynı uzunlukta bir darbeninkine göre daha geniş bir bant genişliğine yayılması sağlanır. Yöntemin zaman düzleminde darbe sıkıştırma olarak adlandırılması, kodlamayla bant genişliği artırılan darbenin zamanda sıkıştırılmışçasına daha kısa bir darbeden elde edilebilecek faydaları sağlayacak hale getirilmesindedir. Sonuçta, radar tarafından gönderilen ötüş sinyaliyle kodlanmış darbe hedeften yansıyıp geri döner ve alıcıda uyumlu filtreden geçirildikten sonra elde edilen menzil çözünürlüğü aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\delta R_s = \frac{c \cdot \tau_p}{2 \cdot B_R \cdot \sin \eta} \quad (2.2)$$

Bu ifadedeki  $B_R$  gönderilen sinyalin bant genişliğini göstermektedir. Bu değer in pratik sınırlar içerisinde artırılmasıyla menzil çözünürlüğü iyileştirilir [15].



### 2.1.1. Uyumlu Filtre

Uyumlu filtre radarların almaç kısmında kullanılan ve alınan sinyalin sinyal-gürültü oranını yükselterek daha iyi algılama sağlayan bir filtredir. Bu filtrenin transfer fonksiyonu gönderilen sinyalin eşleniğine eşit olacak şekilde seçilirse, filtre çıkışında sinyal-gürültü oranı en büyük değerine ulaşmaktadır. Bu sonuca nasıl ulaşıldığı aşağıda ifade edilmiştir.

Almaç girişindeki sinyal  $r(t)$ ;

$$r(t) = a \cdot s(t - \tau) + n(t) \quad |t - \tau| < \frac{\tau_p}{2} \quad (2.3)$$

$a$  : Sinyal genliğindeki sönümlenmeyi gösteren katsayı

$\tau$  : Sinyali gönderip alma arasında geçen süre (R uzaklıktaki bir hedef için  $\tau = \frac{2 \cdot R}{c}$ )

$\tau_p$  : Gönderilen darbenin süresi

$n(t)$ : Sinyali gönderip alma sırasında ve alıcıda sinyal üzerine eklenen gürültü

Transfer fonksiyonu  $H(j\omega)$  olan doğrusal bir sistemin  $f(t)$  girdisine verdiği yanıt  $g(t)$ ;

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - t') f(t') dt' \quad (2.4)$$

$h(t)$ : sistem dürtü yanıtı

Eşitlik 2.4'de girdi olarak  $\alpha \cdot s(t - \tau)$  verilirse, çıkıştaki sinyal  $g(\tau)$ ;

$$g(\tau) = \alpha \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau - t') s(t' - \tau) dt' \quad (2.5)$$

olacaktır. Girişte iki yanlı  $N/2$  yoğunluğa sahip beyaz gürültü için çıkıştaki güç ise;

$$E|g_n(\tau)|^2 = (N/2) \int_{-\infty}^{\infty} |H(w)|^2 df = (N/2) \int_{-\infty}^{\infty} |h(t)|^2 dt \quad (2.6)$$

olarak bulunur.

Çıkıştaki sinyal gürültü oranı  $SNR_0$  aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$SNR_0 = \frac{(2\alpha/N)^2 \left| \int_{-\infty}^{\infty} h(t)s(-t)dt \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} |h(t)|^2 dt} \quad (2.7)$$

$SNR_0$  değerini artırmak için payı büyütmemiz gerekir, paydaki ifade için aşağıdaki Schwartz eşitsizliği kullanılır;

$$\left| \int f_1(t)f_2^*(t)dt \right|^2 \leq \int |f_1(t)|^2 dt \int |f_2^*(t)|^2 dt \quad (2.8)$$

Bu eşitsizlikte sol taraf en büyük değerini ancak eşitlik durumunda alabilmektedir ki bu durumda da  $f_1(t) = kf_2(t)$  (k rastgele bir sabit) olmaktadır. Eşitsizliğin sol tarafı  $SNR_0$  ifadesinin payına benzetilecek olursa,  $f_1(t) = h(t)$  ve  $f_2(t) = s^*(-t)$  için;

$$SNR_0 \leq (2\alpha/N)^2 \int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt = 2E/N \quad (2.9)$$

(E: alınan sinyalin toplam enerjisi)

elde edilir.  $f_1(t) = kf_2(t)$  dolayısıyla  $h(t) = s^*(-t)$  (k=1 için) seçilirse sinyal-gürültü oranı en büyük değerine ulaşmaktadır. Alınan sinyal enerjisi E, eşitlik 2.10'daki gibi ifade edilir;

$$E = P_s \tau_p \quad (P_s : \tau_p \text{ sinyal süresi üzerinden ortalama güç}) \quad (2.10)$$

Eğer alıcının gürültü bant genişliği  $B_n$  ise ulaşılabacak ortalama sinyal gürültü oranı  $SNR_0$ ,

$$SNR_0 = E / N = P_s \tau_p / (P_n / B_n) = B_n \tau_p SNR_i \quad (2.11)$$

olacaktır. Eşitlik 2.11'de görüldüğü gibi uyumlu filtre kullanılmasıyla çıkıştaki sinyal-gürültü oranında zaman-bant genişliği çarpımı ( $B_n \tau_p$ ) kadar iyileşme sağlanabilmektedir. Basit bir darbe için darbe süresi ve bant genişliği arasındaki ilişki  $\tau \cong 1 / B_n$  olduğundan zaman-bant genişliği çarpımı sinyal gürültü oranında önemli bir iyileşme sağlamıyor gibi görünse de giriş ve çıkış sinyal-gürültü oranları arasındaki ilişki bize seçmemiz gereken filtre ile ilgili ipuçları sağlamaktadır. Örneğin alıcının bant genişliği sinyali olabildiğince geçirecek gürültüyü olabildiğince bastırarak şekilde ayarlanmalıdır. Bu durumda filtrenin şekli gönderilen sinyalin zarfıyla olabildiğince uyumlu olmalıdır.

Uyumlu filtrenin çıkışındaki sinyal-gürültü oranının iyileşme sağlamanın yanı sıra çözünürlükte de iyileştirme sağlayacak şekilde kullanılabilmesi radar tarafından gönderilecek sinyalin doğru seçilmesine bağlıdır. Darbe sıkıştırma başlığı altında sinyalin nasıl seçilmesi gerektiği anlatılacaktır.

### 2.1.2. Darbe Sıkıştırma

Basit bir darbe sinyalinde darbe süresiyle doğru orantılı olan çözünürlük ( $\Delta R_g = \frac{c\tau_p}{2}$ ), doğrusal frekans modülasyonu uygulanmış bir darbe gönderildiğinde bant genişliğiyle ters orantılı olacak şekilde ( $\Delta R_g = \frac{c}{2} \cdot \frac{1}{B}$ ) değişmektedir. Bu şekilde bir uygulama ile frekans düzleminde daha büyük bir bant genişliğine yayılan sinyal zamanda aynı darbe süresine ( $\tau_p$ ) sıkıştırılmış olmaktadır, bu yüzden bu işleme darbe sıkıştırma (pulse compression) denmektedir.

Sıkıştırılarak gönderilen  $a(t)$  genliğe sahip  $p(t)$  sinyali;

$$p(t) = a(t) \cdot \exp(j\beta t + j\alpha t^2) \quad (2.12)$$

$\alpha$  : ötüş sinyali fazı kuadratic katsayısı (ötüş hızı)

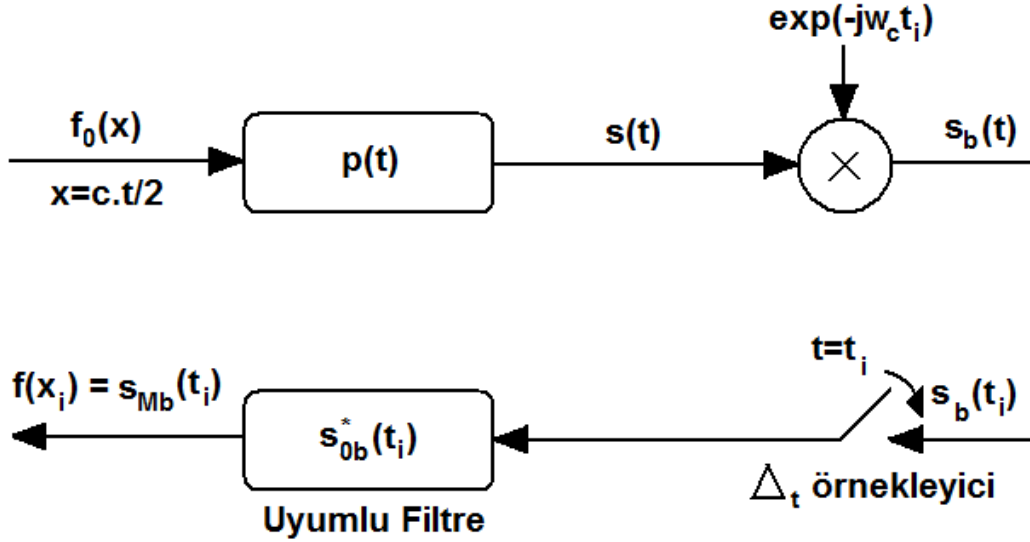
$\beta$  : ötüş sinyali fazı doğrusal katsayısı

şeklinde yazılır.

Sıkıştırılmış darbe için bant genişliği arttıkça çözünürlükte iyileşme sağlanmakta, yeterli darbe süresiyle de sinyal gürültü oranındaki iyileşme korunmuş olmaktadır. Almacın bant genişliği sinyali en iyi alacak şekilde ayarlanır, ancak sıkıştırma ile elde edilen bant genişliğinin çok yüksek olduğu durumlarda pratikte karşılanması zor olacak yüksek örnekleme hızı gerekeceğinden, RF sinyali taban banda indirmenin yanı sıra darbenin çözülmesi de örneklemeden önce gerçekleştirilmelidir.

### 2.1.3. Darbe Çözme ve Menzilde Yansıtırlık Fonksiyonu Elde Etme

Darbe çözme (pulse decompression) bir uyumlu filtre uygulaması olarak görülebilir. Şekil 2.3'de, radar tarafından sıkıştırılarak gönderilen  $p(t)$  sinyalinin  $f_0(x)$  yansıtırlık fonksiyonuna sahip yüzeyden yansıyor  $s(t)$  sinyali olarak geri alınması ve almaçta bu sinyale uygulanan işlem basamakları gösterilmiştir [16].



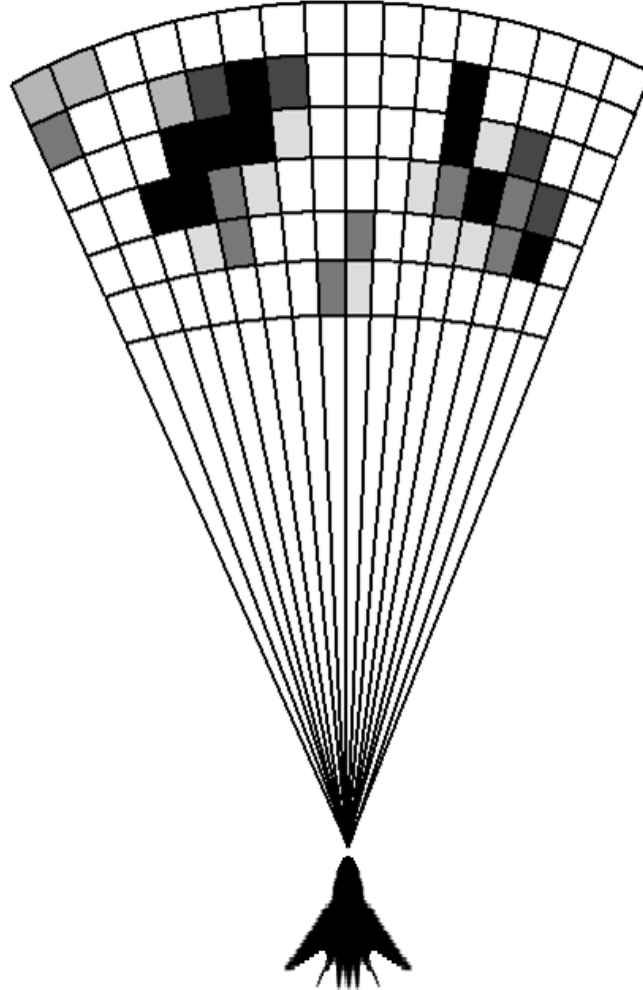
Şekil 2.3: Menzil Yansıtırlık Fonksiyonu Elde Etme

Yukarıdaki şekilde SAR tarafından gönderilen sinyal  $p(t)$ , menzilde ideal yansıtırlık fonksiyonu  $f_0(x)$  yüzeyden yansıyor gelen ve SAR tarafından geri alınan sinyal  $s(t)$  ile gösterilmiştir. Darbenin kodlanması, gönderilen sinyalin ( $p(t)$ ) ötüş sinyali olarak seçilmesiyle gerçekleştirilir. Bu sinyal, yüzeyden genliği ve fazı yüzeyin yansıtırlık fonksiyonuyla orantılı olarak değişerek yansdıktan sonra almaç tarafından alınır. Almaçta ilk olarak  $s(t)$ 'nin frekansı taban banda düşürülür ve örnekleme gerçekleştirilir. Daha sonra örneklenen sinyal uyumlu filtreden geçirilir, uyumlu filtrenin transfer fonksiyonu taban banda indirilmiş referans sinyalin eşleniği ( $s_{ob}^*(-t)$ ) olarak seçilmelidir. Böylelikle menzil yansıtırlık fonksiyonu elde edilir. Uyumlu filtreden geçirmekle darbe sıkıştırma işleminin tersi bir işlem yapıldığından bu basamak darbe çözme olarak adlandırılmaktadır. Uyumlu filtrenin çıkışında yüzeyin menzildeki tek boyutlu yansıtırlık fonksiyonu  $f_0(x)$  elde edilmiş olur [16].

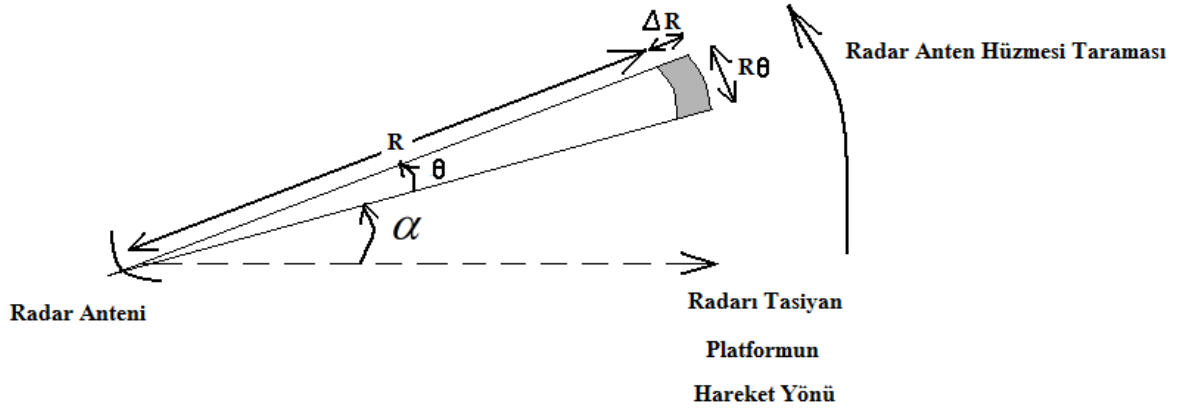
## 2.2. Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama (RBGM)

Görüntüleme yöntemlerini kronolojik ve karmaşıklık olarak sıraladığımızda ilk sırada gelen mod Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama modudur. Bu sebeple modların teorik yönlerinden bahsedilen bu bölümde ilk olarak RBGM anlatılacaktır.

Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama modunda radar, hareketli veya hereketsiz platformların üzerinden belirli açı aralıklarında sabit kalarak veya daha geniş bir aralığı mekanik olarak tarayarak en temel yer haritasını çıkarmaktadır [17]. Şekil 2.4'de görüldüğü gibi RBGM modunda sadece alınan sinyalin genlik bilgisi kullanılarak kaba bir görüntü oluşturulmaktadır. Daha iyi bir görüntü elde edebilmek için çözünürlükler iyileştirilmelidir.



**Şekil 2.4:** Gerçek Hüzme Haritalama



**Şekil 2.5:** RBGM Menzil - Çapraz Menzil Çözünürlükleri

Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama modunda çapraz menzil çözünürlüğü,  $d_{CR}$  kabaca antenin 3dB hüzme genişliği ile menzilin çarpımına eşittir.

$$\theta_{3dB} \cong \frac{\lambda}{L} \text{ radians} \quad (2.13)$$

$$d_{CR} \cong \theta_{3dB} \cdot R \cong \frac{\lambda}{L} \cdot R \quad (2.14)$$

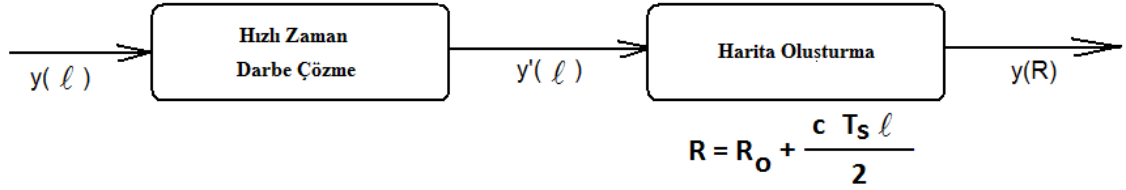
R: Menzil

L: Anten Boyu

$\lambda$  : Dalga Boyu

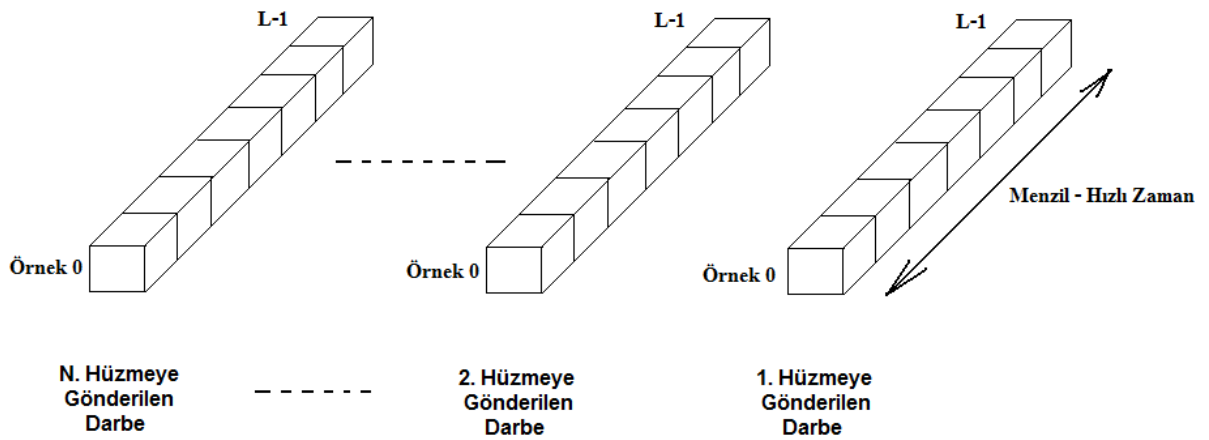
Hücrelerin büyüklükleri Şekil 2.4'de de görüldüğü gibi menzil arttıkça artmaktadır. Menzil çözünürlüğü tüm hücreler için sabitken, çapraz menzil çözünürlüğü uzak mesafelerde daha da kötüleşmektedir. Bu da RBGM modunun bir başka dezavantajını oluşturmaktadır. Ancak çapraz menzil çözünürlüğü yine Şekil 2.4'den, Şekil 2.5'den ve eşitlik 2.14'den de anlaşılacağı üzere taranan açıdan bağımsızdır. Yani hangi açı taranırsa taransın menzil değişmedikçe çözünürlük değişmemektedir. Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama modunu kullanarak uzak mesafelerden detaylı ve çözünürlüğü yüksek görüntüler elde edebilmek için çapraz menzil çözünürlüğünü iyileştirmek gerekmektedir. Eşitlik 2.14'de de belirtildiği gibi

çözünürlüğü istenen seviyelere getirmenin yolu pratik olarak mümkün olmayan boyutlarda uzun antenler kullanmak ya da düşük dalga boyunda sinyaller üretmektir. Düşük dalga boylarındaki sinyallerin atmosferde daha fazla soğurulup enerji kaybına neden olması ise bu yolu pratikte mümkün kılmamaktadır. Bu ikilemin cevabı ve sorunun çözümü de sentetik olarak istenen uzunlukta anten oluşturmaktan geçmektedir [18].



**Şekil 2.6:** RBGM Blok Diyagramı

Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama modunun blok diyagramı Şekil 2.6'da verilmiştir. Radar anteni yardımıyla taranan her hüzmeye gönderilen sinyal yeryüzünden yansdıktan sonra radar alıcı anteni tarafından Şekil 2.7'deki gibi alınır ve darbe çözme işleminden geçirilir ve yansıyan noktanın antene olan uzaklığı hesaplanır. Daha önceki bölümlerden menzil çözünürlüğünün anlatıldığı kısımda da değinildiği üzere darbe sıkıştırma ve çözmedeki amaç menzil çözünürlüğünü iyileştirmektir.



**Şekil 2.7:** RBGM Her Hüzmeden Alınan Darbeler

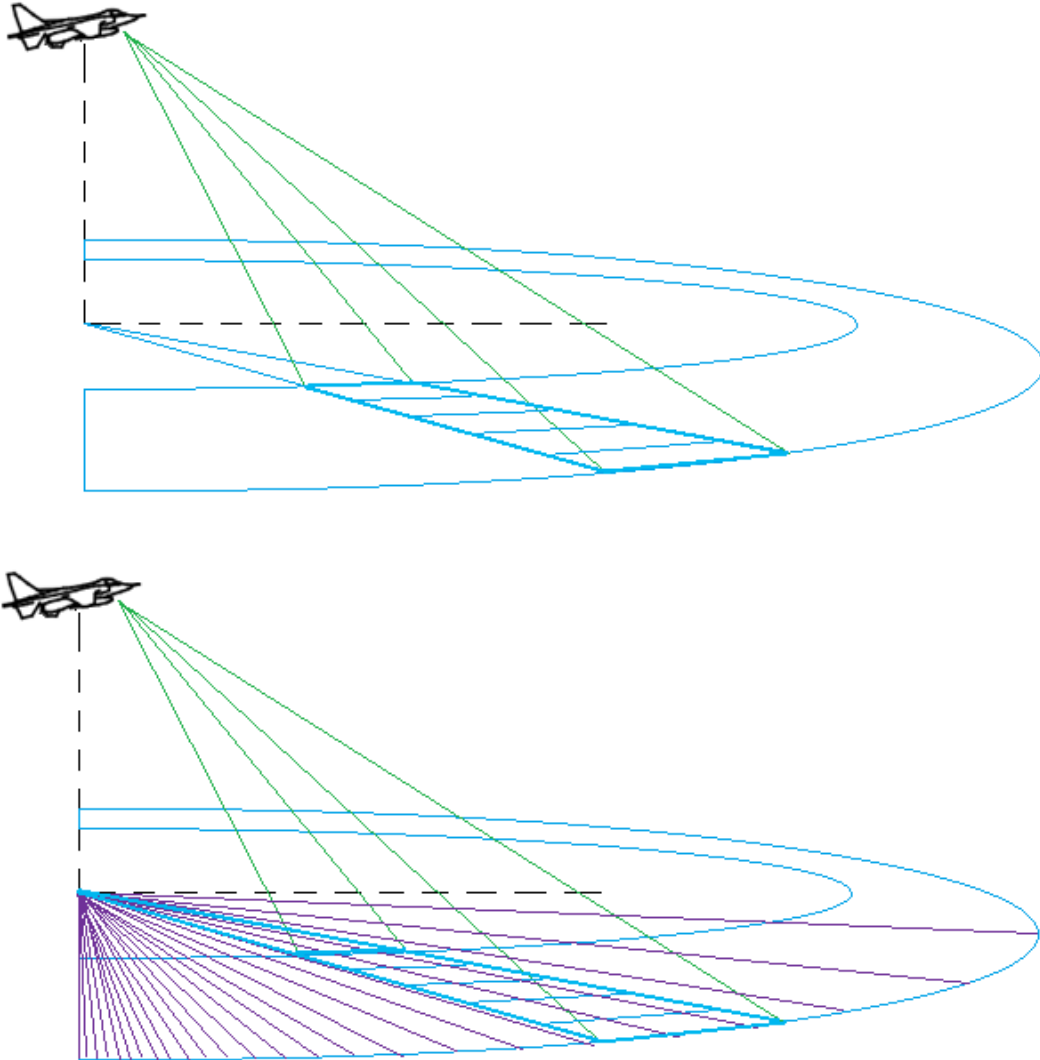


Çapraz menzil çözünürlüğü zaten hüzme genişliği ve menzil ile doğru orantılı olduğu için haritayı oluştururken tek bulunması gereken değer sinyalin yansıdığı yüzeyin antene olan uzaklığıdır. Bu bilgi Şekil 2.6'daki harita oluşturma bloğunda kullanılarak yansıyan noktanın koordinatları tam olarak belirlenmiş olur. Radar anteni tarafından alınan bu sinyalin genlik değeri yardımıyla da o çözünürlük hücresinin olması gereken yansıtırlık değeri hesaplanır. Bu işlemler ile RBGM modunda, taranan tüm alanda hüzme genişliğindeki her açı için yansıyan tüm noktaların koordinatları belirlenerek ve genlik bilgileri yardımıyla yansıtırlık değerleri bulunarak taranan tüm alanın haritası çıkarılır.

### 2.3. Doppler Hüzme Keskinleştirme (DBS)

Doppler Hüzme Keskinleştirme, hava platformlarındaki darbe Doppler radarlarının çapraz menzil çözünürlüğünü artırmak için kullanılan bir görüntüleme modudur [19].

DBS modu, bazı kaynaklarda SAR modunun alt modlarından biri olarak verilmiş olsada aslında SAR modlarından algoritmik olarak farklı olması sebebiyle bu tez kapsamında ayrı bir mod olarak incelenmiştir.



**Şekil 2.8:** RBGM (üst) ve DBS (alt) Yer Taraması

Doppler Hüzme Keskinleştirme modu Şekil 2.8’de görüldüğü üzere tıpkı Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama modunda olduğu gibi yerin haritasını çıkarırken antenine mekanik bir hareket yaptırmaktadır. Ancak bu modda; aynı hüzme içerisindeki ve aynı menzildeki farklı noktaların, farklı bağıl hızlarda olmaları ve dolayısıyla farklı Doppler frekanslarına sahip olmaları prensip olarak kullanılmaktadır [17].

DBS modu, farklı Doppler kaymalarını kullanarak verimli hüzme genişliğini daraltmaktadır [3], [4], [7]. Böylelikle çapraz menzil çözünürlüğü iyileştirilerek daha kaliteli ve çözünürlüğü yüksek görüntüler elde edilebilmektedir.

Doppler Hüzme Keskinleştirme metodu, platformun üzerindeki radar alıcı antenine yansıyan yeryüzü kargaşasının azaltılması için Doppler filtreler kullanarak antenin kerteriz hüzme genişliğini sentetik olarak daraltma işlemidir [20].

Aynı menzildeki iki farklı noktanın görüntüleme modu tarafından farklı noktalar olarak tanımlanabilmesi için gerekli en küçük frekans farkı bize belirli hızda giden bu platformun Doppler çözünürlüğünü vermektedir. Aralarında en düşük bu Doppler kayması kadar frekans farkı oluşturan noktalar farklı hücreler içinde kalmaktadırlar.

$v$  (m/s) sabit hızıyla gitmekte olan uçakta, platformun hareket yönüne göre  $\theta$  (derece) açıda bir hedefin oluşturacağı Doppler kayması ( $f_d$ )

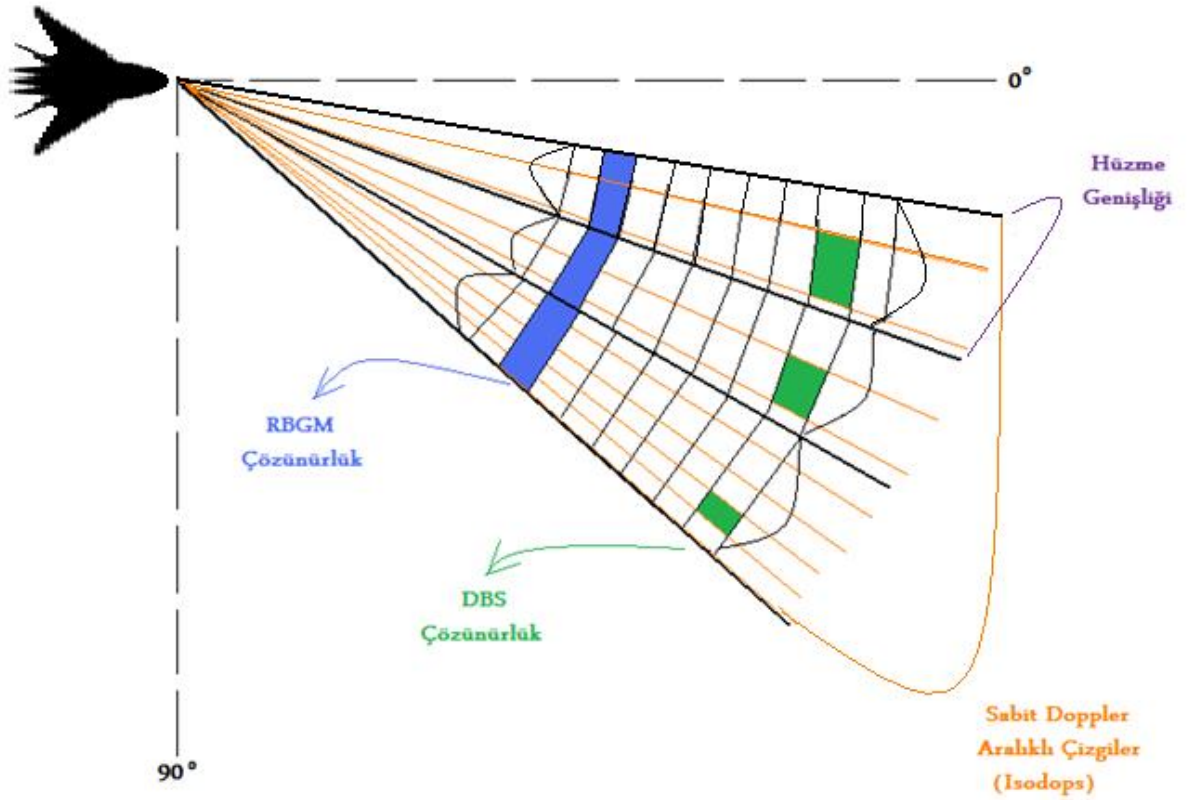
$$f_d = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \cos(\theta) \quad (2.15)$$

formülüyle bulunur.

Prensip olarak farklı noktalardaki Doppler kaymalarının birbirinden farklı olması bilgisinin kullanıldığı bu modda, bağıl hız farkı arttıkça Doppler kaymaları arasındaki fark artacağı için çözünürlük uçağın hızının artışına bağlı olarak iyileşecektir.  $(-90^\circ)$ - $(+90^\circ)$  arasının taranabildiği bu modda en yüksek çözünürlük tam olarak  $+90^\circ$ ’de ve  $-90^\circ$ ’de, en düşük çözünürlük ise  $0^\circ$ ’de elde edilecektir [9]. Çünkü Doppler çizgileri  $0^\circ$ ’den  $\pm 90^\circ$ ’ye doğru gidildikçe birbirlerine yaklaşacaktır.

Bu sebeple her açıdaki çapraz menzil çözünürlüğü birbirinden farklı olacaktır. RBGM modunda çapraz menzil çözünürlüğü tüm taranan açılar için sabit ve hüzme genişliğine eşitken, DBS modunda değişiklik göstermesi ve çözünürlüğün artırılması iki modu birbirinden ayıran temel farktır.

Şekil 2.9, RBGM modu ile DBS modunun karşılaştırması niteliğindedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, RBGM modu için çapraz menzil çözünürlüğü hüzme genişliği kadarken DBS modu için Doppler çizgileri (isodop) arasındaki sabit frekans farkı kadardır. Ancak frekans uzayındaki bu sabit fark zaman uzayında farklı açısal farklılara denk gelmektedir. Bu sebeple de DBS modu için çapraz menzil çözünürlüğü açı değiştikçe değişmektedir.



**Şekil 2.9:** RBGM - DBS Karşılaştırması

İki mod arasındaki benzer olan nokta ise çapraz menzil çözünürlüklerinin menzilin artmasıyla kötüleşmesidir. Hem RBGM modunda hem de DBS modunda çapraz

menzil çözünürlüğü hedef uzaklığından bağımsız değildir. Şekil 2.9'da da görüldüğü gibi çözünürlük hücreleri her iki mod için de menzil arttıkça çapraz menzil doğrultusunda büyümektedir.

Şekil 2.9'da görülen Doppler çizgilerinin (isodops) arasında sabit Doppler frekans farkı vardır. Ancak açisal olarak hareket yönüne göre  $\pm 90$  dereceye doğru gittikçe birbirlerine yaklaştıkları görülmektedir. Aralarında sabit frekans bulunan bu çizgilerin konumlandıkları açı değerlerini hesaplamak için kullanılan formül;

$$\theta_N = \arccos\left[1 - \frac{N \cdot \Delta v}{v}\right] \quad (2.16)$$

şeklinde olacaktır.

Doppler çizgilerinin (isodop) açı arttıkça birbirlerine nasıl yaklaştıklarını örnekle açıklamak için hızı  $v = 250 \text{ m/s}$  ve  $\Delta v = 1.25 \text{ m/s}$  olarak alalım. Yukarıdaki açı formülünü kullanarak oluşturduğumuz çizelge aşağıdaki gibi olacaktır.

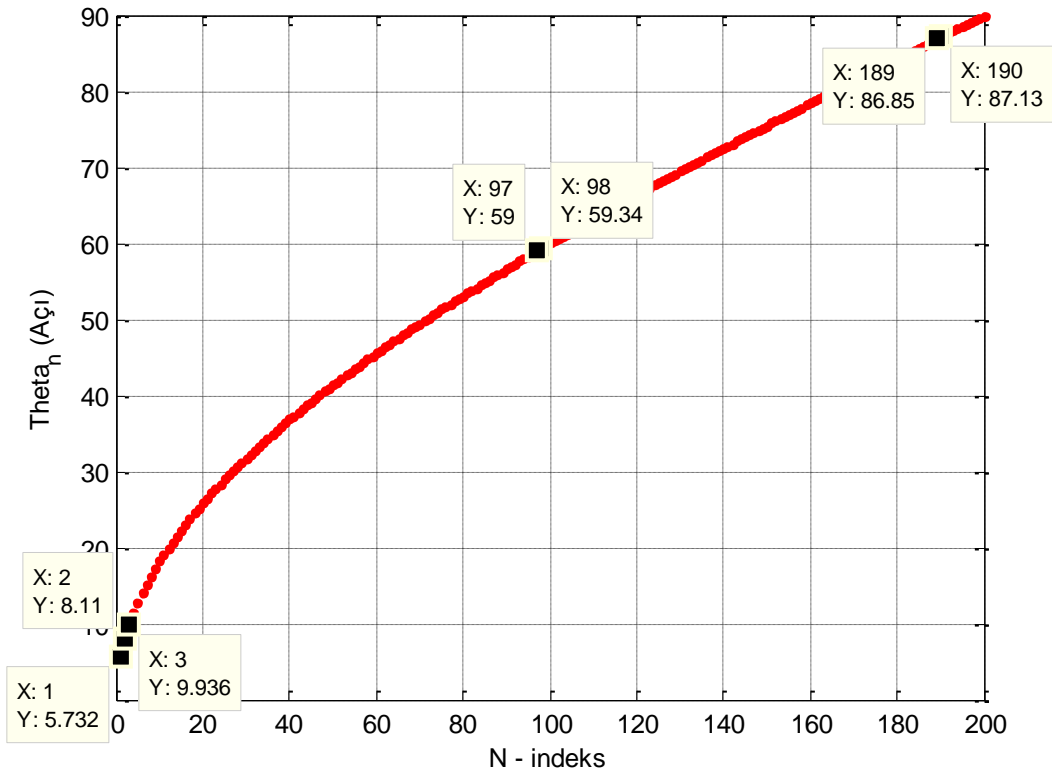
**Çizelge 2.1: Doppler Çizgileri**

Hız (m/s) $\Delta v$	Doppler Çizgilerinin Açıları (derece) $\theta_N$	Açılar Arasındaki Fark (derece) $\theta_N - \theta_{N-1}$
1,25	5,73	5,73
2,5	8,11	2,38
3,75	9,93	1,82
5	11,48	1,55
6,25	12,84	1,36
7,5	14,07	1,23

Çizelge 2.1'den da anlaşılacağı üzere aralarında sabit Doppler frekansı fark bulunan Doppler çizgileri arasındaki açı değerleri azalarak artmaktadır. Böylelikle,

kerteriz açısındaki artışa bağılı olarak Doppler çizgileri birbirlerine yaklaşmaktadır ve çapraz menzil çözünürlüğünde iyileşme olmaktadır.

Kerteriz açısının sıfırdan  $\pm 90$  derecelere doğru belirli sabit frekans aralığında gitmesine rağmen açısal değerin azalarak artmasının altında yatan sebep ise arccosinus fonksiyonunun kendisinden kaynaklıdır. Şekil 2.10'da da çok açık bir şekilde görüldüğü gibi arccosinus fonksiyonunun değeri her bir indeks değeri için azalarak artmıştır. İlk dört indeksin değerine bakacak olursak tıpkı Çizelge 2.1'de olduğu gibidir. Ancak Çizelge 2.1'den göremediğimiz daha büyük indekslerde açılar arasındaki fark daha düşük indeksler arasındaki farka göre daha da azalmıştır. Şekil 2.10'da da görülen bu azalarak artmanın sayesinde Doppler Hız Keskinleştirme modunda en yüksek çözünürlük  $\pm 90$  derecelerde elde edilmektedir.



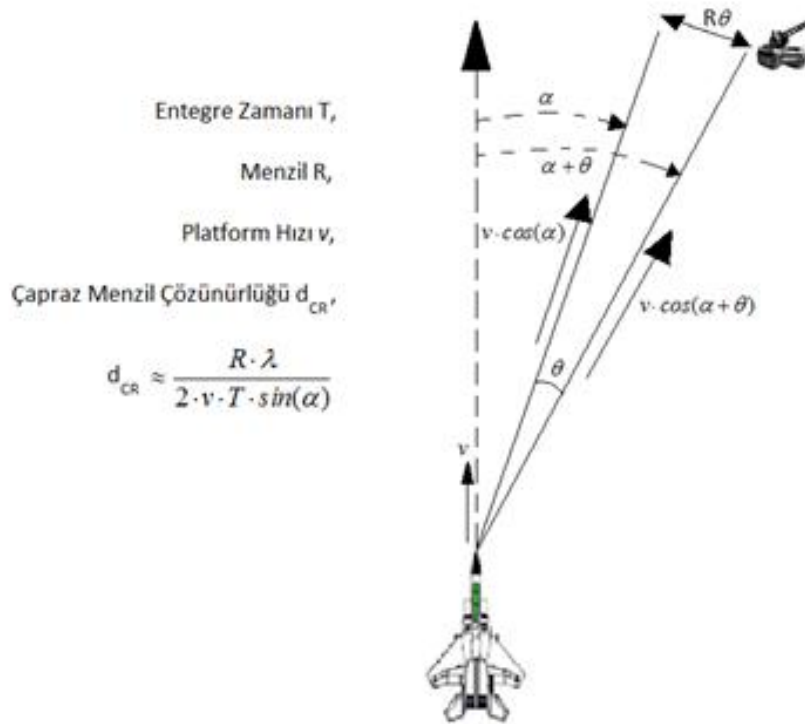
**Şekil 2.10:** Arkkosinus Fonksiyonu Değişim Grafiği

Doppler Hüzme Keskinleştirme modu için çapraz menzil çözünürlük değeri açıya göre değişkenlik göstermektedir. Çözünürlük değerinin denklemini oluşturmak adına bazı parametreler belirlenecek olursa;

Şekil 2.11'de de belirtildiği üzere DBS modunu bulunduran sistemin olduğu platformun / uçağın  $v$  (m/s) hızında hareket etmekte olduğu düşünülecektir. Radar anten hüzme genişliğinin  $\theta$  (derece) olduğu ve anlık olarak  $\alpha$  (derece) ile  $\alpha + \theta$  (derece) arasını aydınlattığı kabul edilmiştir. Bu kabulden yola çıkarak anten hüzmesinin açısal olarak başlangıç ve bitiş noktalarında uçağa göre oluşturacağı bağıl hızlar ise;

$$v \cdot \cos(\alpha) \quad \text{ve} \quad v \cdot \cos(\alpha + \theta)$$

olacaktır.



**Şekil 2.11:** DBS Modu Çapraz Menzil Hesaplanması ([17]'den uyarlanmıştır)

Radar çalışma frekansının  $f$  olduğu düşünülecek olursa; bu noktalara denk gelen Doppler frekans kayması;

$$\frac{2 \cdot v \cdot f \cdot \cos(\alpha)}{c} \quad \text{ve} \quad \frac{2 \cdot v \cdot f \cdot \cos(\alpha + \theta)}{c}$$

olarak bulunacaktır.

Ölçüm periyodu değeri  $T$  için, frekans çözünürlüğü  $1/T$  olacaktır. Hüzme boyunca farklı Doppler frekansları için gerekli Doppler filtre sayısı ise,  $N_{DF}$ ;

$$N_{DF} = \frac{[2 \cdot v \cdot f \cdot \cos(\alpha) / c] - [2 \cdot v \cdot f \cdot \cos(\alpha + \theta) / c]}{1/T} \quad (2.17)$$

denklemini elde edilir.

Sonuç olarak çapraz menzil çözünürlüğü,  $d_{CR}$ , yaklaşık olarak gerçek anten çapraz menzil çözünürlüğünün,  $R \cdot \theta$ , denklemde hesapladığımız Doppler filtre sayısına bölünmesiyle bulunacaktır.

Tüm bu bilgiler ışığında çapraz menzil çözünürlüğünü bulmak için kullanılacak olan formül ise;

$$d_{CR} = \frac{c \cdot R \cdot \theta}{2 \cdot v \cdot f \cdot T \cdot [\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \theta)]} \quad (2.18)$$

olacaktır. Eşitlik 2.18'de paydadaki açısal toplam açılınca;



$$d_{CR} = \frac{c \cdot R \cdot \theta}{2 \cdot v \cdot f \cdot T \cdot [\cos(\alpha) - [\cos(\alpha) \cdot \cos(\theta) - \sin(\alpha) \cdot \sin(\theta)]]} \quad (2.19)$$

olacaktır. Burada hız genişliğinin  $\theta$  küçük bir değer olduğunu düşünerek eşitlik 2.19 yeniden gözden geçirilirse;

$$d_{CR} \approx \frac{c \cdot R \cdot \theta}{2 \cdot v \cdot f \cdot T \cdot [\cos(\alpha) - [\cos(\alpha) - \theta \cdot \sin(\alpha)]]} \quad (2.20)$$

olacaktır.  $c = \lambda \cdot f$  olduğunu hatırlayarak gerekli tüm sadeleştirilmeler yapıldığında çapraz menzil çözünürlüğü

$$d_{CR} \approx \frac{R \cdot \lambda}{2 \cdot v \cdot T \cdot \sin(\alpha)} \quad (2.21)$$

olarak en sade halini alacaktır.

Uçağın hareketi dolayısıyla taranan bölgedeki sabit bir noktanın uçağa göre bağıl hızı doğal olarak sürekli değişecektir. Bu da Doppler frekansında sürekli değişime sebep olacaktır. Doppler frekansındaki sürekli değişimin kompanse edilmesi bir sonraki bölümde üzerinde duracağımız Sentetik Açıklıklı Radar modunun temel prensibini oluşturmaktadır. Doppler Hız Keskinleştirme modu ile Sentetik Açıklıklı Radar modu arasındaki en temel fark; DBS'de radar verileri standart Doppler filtreler yardımıyla işleminden geçirilirken, SAR modunda ise veriler zaman karakteristiğine bağlı olarak değişen Doppler frekans değerlerinde işlenmektedir. Bu sebeple Doppler Hız Keskinleştirme modu, Gerçek Hızla Yer Haritalama ve Sentetik Açıklıklı Radar modu arasında bir harita çözünürlüğüne, yani orta seviye bir çözünürlük değerine sahiptir [17].

DBS ile ilintili bir diğer önemli parametre ise DBS 3dB verimli hüzme genişliğidir. Bu hüzme genişliği daha önce de bahsettiğimiz gibi 0°den ±90°'ye doğru gidildikçe darlaşmaktadır. Bu da çözünürlükte iyileşmeyi sağlamaktadır. Bu iyileşmeyi de bir katsayı ile ifade ederek denklemini oluşturmak mümkündür. İyileştirme katsayısı, anten hüzmesinin içine düşen DBS çizgileriyle oluşturulmuş verimli DBS hüzme sayısını ifade etmektedir [20].

$$f_{d_{3dB}} \cong f_d \cdot \left( \sin(\alpha) \cdot \theta_{3dB} - \frac{\cos(\alpha) \cdot (\theta_{3dB})^2}{2} \right) \quad (2.22)$$

$\alpha$ : kerteriz açısı

$\theta_{3dB}$ : 3dB hüzme genişliği

$$T_d = 1 / B_D$$

$$I_{DBS} = \begin{cases} f_{d_{3dB}} \cdot T_d & , \text{ if } B_D > f_{d_{3dB}} \\ 1 & , \text{ if } B_D \leq f_{d_{3dB}} \end{cases} \quad (2.23)$$

$T_d$ : bekleme süresi

$I_{DBS}$ : iyileştirme katsayısı

$B_D$ : Doppler filtre bant genişliği

$$\theta_{DBS} = \frac{\theta_{3dB}}{I_{DBS}} \quad (2.24)$$

$\theta_{DBS}$ : DBS verimli hüzme genişliği

$$d_{CR} = R \cdot \theta_{DBS} \quad (2.25)$$

İyileştirme katsayısı, farklı kaynaklarda Hüzme Keskinleştirme Oranı (Beam Sharpening Ratio - BSR) olarak da tanımlanmaktadır. Hüzme Keskinleştirme Oranı RBGM modunun çapraz menzil çözünürlüğünün DBS modu çözünürlüğüne oranı olarak tanımlansa da aslında iyileştirme katsayısı ile aynı şeyi ifade etmektedir.

$$HKO = \frac{d_{CR}(\text{RBGM})}{d_{CR}(\text{DBS})} \quad (2.26)$$

Her iki mod için de çapraz menzil çözünürlük formülleri yerine koyulursa;

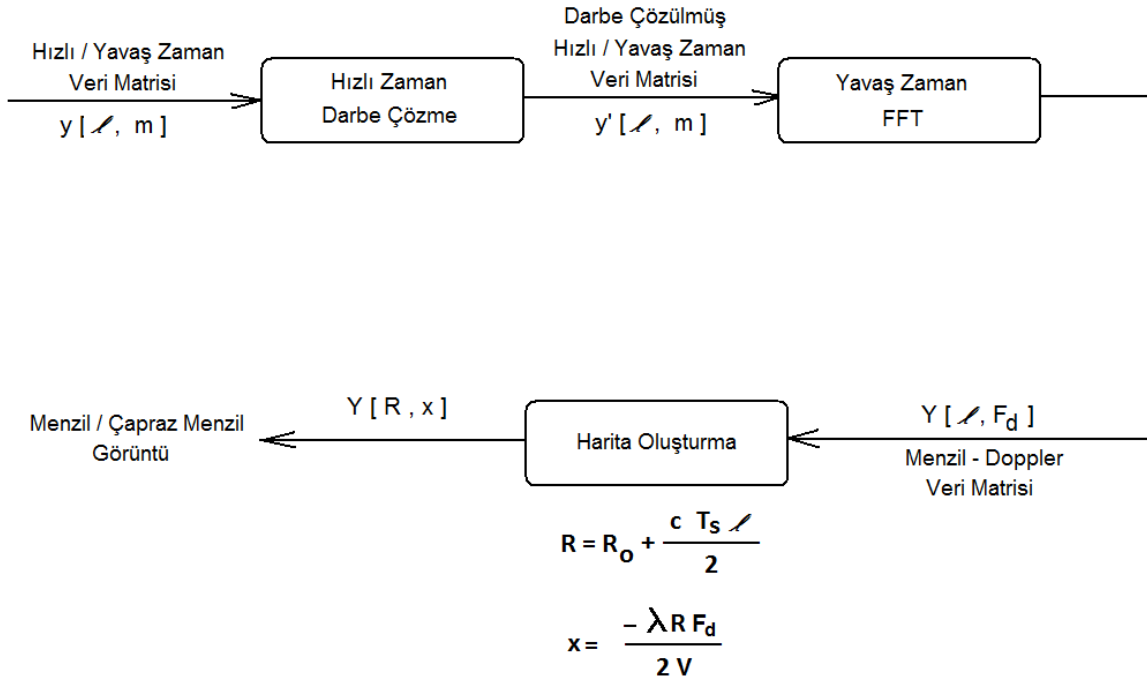
$$HKO = \frac{\frac{\lambda \cdot R}{L}}{\frac{\lambda \cdot R}{2 \cdot V \cdot T \cdot \sin(\alpha)}} = \frac{2 \cdot V \cdot T \cdot \sin(\alpha)}{L} \quad (2.27)$$

olarak hesaplanır.

Hem iyileştirme katsayısı hem de Hüzme Keskinleştirme Oranı  $0^\circ$  den  $\pm 90^\circ$  ye doğru gidildikçe artmaktadır.  $0^\circ$  civarında 1 olmasının sebebi DBS hüzme genişliğinin bu derecelerde anten hüzme genişliğinden büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden DBS modu ile platformun ön (burun) kısmında kalan kısmın görüntülenmesi yan kısımları gibi iyi bir çözünürlükle yapılamamaktadır. Bu dezavantaj literatürde DBS Boşluğu (DBS GAP) olarak geçmektedir [1].

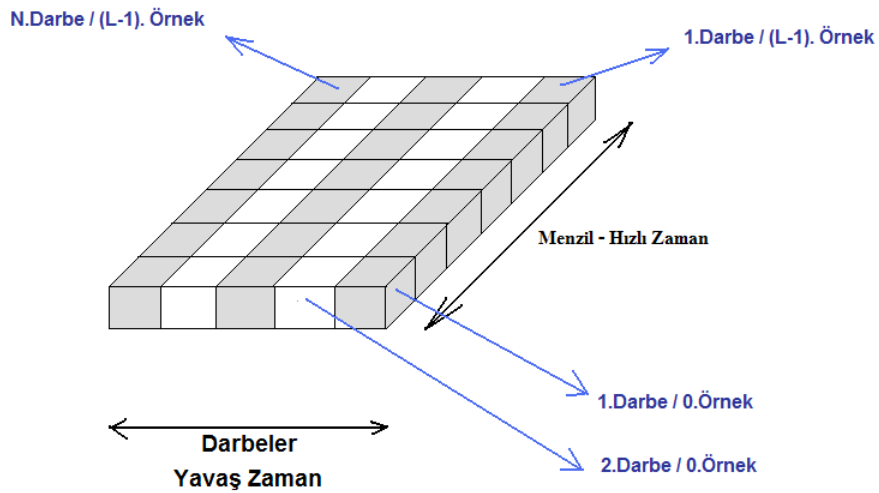
Doppler Hüzme Keskinleştirme modunun sinyal işleme blok diyagramı Şekil 2.12'de verilmiştir. Radar anteni yardımıyla gönderilen sinyaller yeryüzünden yansdıktan sonra radar alıcı anteni tarafından alınır ve biriktirilir. Böylelikle hızlı ve yavaş zaman veri matrisi Şekil 2.13'deki gibi oluşturulur. Burada her bir açığa gönderilmesi gereken en düşük darbe miktarı çok büyük önem arz etmektedir. Çünkü yavaş zamanda alınacak olan FFT işlemi sonrasında darbeler üzerine indüklenmiş olan Doppler frekansının çözülebilmesi için en az belirli bir sayıda

darbeye ihtiyaç olacaktır. Bu sayı uçağın hızına ve taranan açılara göre değişiklik göstermektedir.



**Şekil 2.12:** DBS Blok Diyagramı ([8]'den uyarlanmıştır)

Şekil 2.13'deki gibi matrisde biriktirilen darbeler ilk olarak Şekil 2.12'de ilk blokta görüldüğü gibi darbe çözme işleminden geçirilir ve yansıyan noktanın antene olan uzaklığı hesaplanır. Böylelikle o anda aydınlatılan alandaki yansıyan sinyallerin hangi menzil çözünürlük hücresi içerisine düşecekleri de belirlenmiş olur.



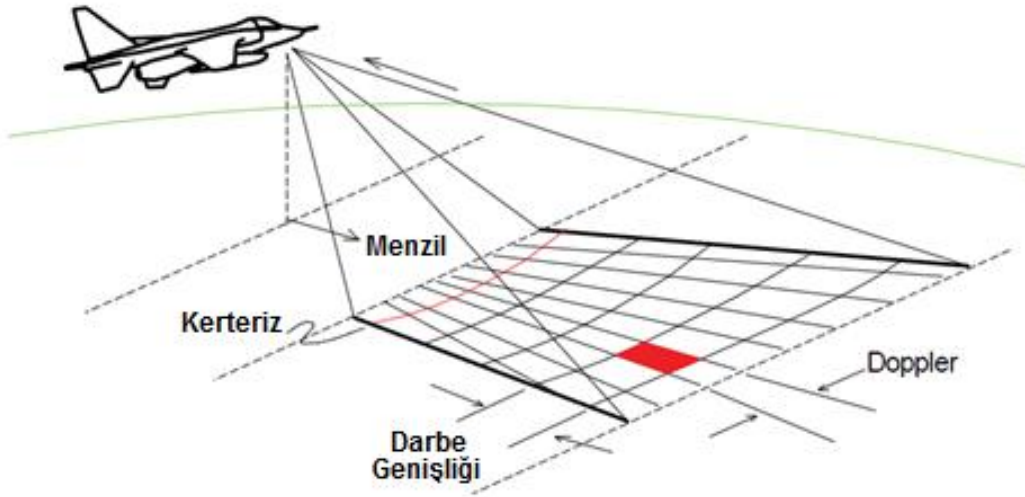
**Şekil 2.13:** DBS Data Matrisi

Çapraz menzil çözünürlüğü için ise Şekil 2.12'deki ikinci blok görev almaktadır. Antenin o anda aydınlatmakta olduğu açığa gönderilen sinyaller, üretildikleri frekansdan ek olarak yeryüzeyinden yansıyor ve geri radar anteni tarafından alındıktan sonra üzerlerinde yansydıkları noktanın uçağa göre bağıl hızından dolayı oluşan Doppler frekansı da taşımaktadırlar. İşte tam bu noktada üzerindeki Doppler frekansı hedefin tam olarak açısının hesaplanmasına ve hangi çapraz menzil çözünürlük hücresi içerisine düşmesine karar verilmesine olanak sağlayacaktır. Bu sebeple sinyaller üzerine endüklenmiş olan Doppler frekansının doğru tespiti çok büyük önem taşımaktadır.

Şekil 2.12'deki ilk blok yardımıyla hedefin menzili ve ikinci blok yardımıyla da üzerinde endüklenmiş olan Doppler frekansı belirlenmiş olur. Radar anteni tarafından alınan sinyallerinin genlik değerleri yardımıyla da o anda işlemde olan menzil - çapraz menzil çözünürlük hücresinin olması gereken yansıtırlık değeri hesaplanır. Son blokdaki işlemler ile de tüm bu bilgiler kullanılarak taranan bölgenin haritası oluşturulur.

## 2.4. Sentetik Açıklıklı Radar (SAR)

Sentetik Açıklıklı Radarı, bir bölgenin yüksek çözünürlüklü görüntü veya haritasını elde etmekte kullanılan, işlemcisinde büyük boyutlu bir antene eşdeğer sentezleme gerçekleştirerek çapraz menzilde yüksek çözünürlük sağlayan bir radar sistemidir [12].



Şekil 2.14: Sentetik Açıklıklı Radar [7]

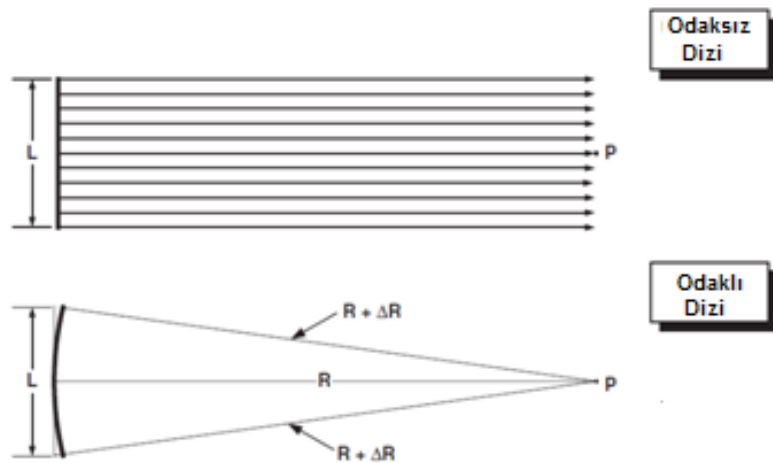
Tıpkı daha evvel üzerinde durduğumuz diğer görüntüleme modlarında olduğu gibi Sentetik Açıklıklı Radar modunda da Şekil 2.14'de görüldüğü üzere menzilde ve diğer modlara oranla çok daha yüksek çözünürlüğe sahip menzile dik olan çapraz menzilde iki boyutlu görüntü elde edilir. Tüm modlarda ortak olması sebebiyle en başta anlattığımız gibi menzilde çözünürlük taşıyıcı frekans etrafında zamanla değişen ötüş sinyali (Chirp) seçilerek geniş bant genişliği sağlanmakta ve yeterli uzunluktaki darbe süresi ile istenen menzil çözünürlüğüne ulaşılmaktadır.

Platformun hareketi boyunca tıpkı Doppler Hüzme Keskinleştirme modunda en yüksek çözünürlüğün elde edildiği  $\pm 90$  dereceye, yani uçağın tam sağına yada tam solunasinyaller gönderilerek, yansıyan sinyallerin toplanması ve birtakım sinyal işleme işlemlerinden geçirilmesi sonucunda tek bir radar anteni yerine açıklık boyunca sıralanmış sanal anten dizisi varmış gibi anten boyu sentetik olarak

artırılarak dar hüzme genişliği elde edilip görüntüleme modlarını birbirlerinden ayıran temel parametre olan çapraz menzilde yüksek çözünürlüğe ulaşılmaktadır.

Tüm görüntüleme yöntemleri kendi ışınımınlarını sağladığından gece ve gündüz operasyonel olabilmelerine olanak sağlamaktadır. Ancak görüntüleme mesafesinden bağımsız olarak istenen çözünürlüğü elde edebilmesi Sentetik Açıklıklı Radarın, optik sensörlerin yetersiz kaldığı durumlarda bile kullanılabilmesini sağlamaktadır [14]. Kullanım alanları olarak SAR, hem keşif amaçlı olarak yeryüzünün coğrafik özelliklerinin çıkarılması ve yerküredeki yapısal değişikliklerin takip edilmesi gibi sivil alanlarda önemli bir yere sahipken, hem de yer hedeflerinin takibi gibi askeri alanda birçok uygulamada kullanılmaktadır.

Tezin giriş bölümünde de özetle üzerinde durulduğu üzere Sentetik Açıklıklı Radar modunun iki adet alt modu bulunmaktadır. Radarın üzerinde bulunduğu platform hareket halinde olduğu için anten hüzmesi yön değiştirmese bile sürekli bir yer taraması yapmaktadır. Platformun hareketi sayesinde yeryüzünü aydınlatması süresince Şekil 1.4'de görüldüğü gibi belirli bir noktanın hüzme içerisine girdiği andan çıktığı ana kadar antene olan uzaklığını sabit değildir. Böylelikle SAR antenine uzaklığı değişen noktadan yansıyan sinyallerin fazı da uçağın hareketi boyunca değişiklik gösterecektir. Bu değişimin göz ardı edilip edilmemesi ise alt modlar arasındaki temel algoritmik farkı oluşturmaktadır.



**Şekil 2.15:** Odaksız SAR (üst) ve odaklı SAR (alt) [2]

### 2.4.1. Odaksız Sentetik Açıklıklı Radar (unfocused SAR)

Taranan yüzeydeki belirli bir noktanın uzaklığı anten hüzmesinin tam orta noktasına denk geldiği anda  $R$  iken, hüzmeye girdiği ilk anda ve hüzmeden çıktığı son anda antene olan uzaklığı  $R+\Delta R$  kadar olacaktır (bkz. Şekil 2.15). Eğer hüzmelerin aydınlattığı süre boyunca belirli bir noktadan gelen tüm sinyaller eşit uzaklıktan yansıyormuş gibi düşünülüp yani  $\Delta R$  ihmal edilip işlemlere tabi tutulursa bu herhangi bir odaklama işleminin olmadığı odaksız Sentetik Açıklıklı Radar altmodu olacaktır.

Yansıyan noktalara göre herhangi bir odaklama işlemi yapılmadığı için Odaksız Sentetik Açıklıklı Radarda çapraz menzil çözünürlüğü Odaklı Sentetik Açıklıklı Radara göre daha kötüdür ancak yine de daha evvel üzerinde durulan Gerçek Hüzmeye Yer Haritalama ve Doppler Hüzmeye Keskinleştirme modlarından daha iyi bir değere sahip olacaktır. Doppler Hüzmeye Keskinleştirme modu bir nevi Odaksız Sentetik Açıklıklı Radarın verimli bir şekilde kullanımınıdır [4], [17]. Ancak aralarında çapraz menzil çözünürlüğünde ve sinyal işleme anlamında belirgin farklar mevcut olup birbirinden farklı iki modu temsil etmektedirler. Doppler Hüzmeye Keskinleştirme modunun en yüksek çapraz menzil çözünürlüğüne ulaşıldığı  $+90$  ve  $-90$  derecelerde bile çözünürlüğü odaksız SAR modundan kötü olmaktadır.

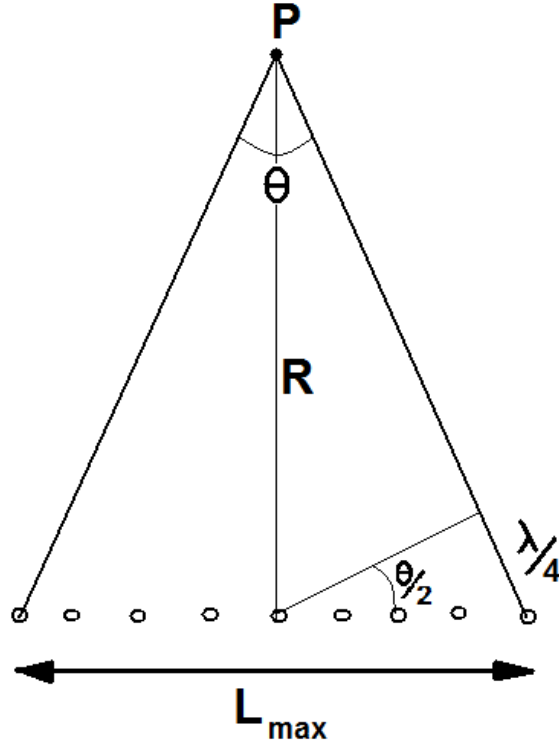
Odaksız Sentetik Açıklıklı Radar modunun çapraz menzil çözünürlük değeri ( $d_{CR}$ ),

$$d_{CR} = \frac{\lambda \cdot R}{2 \cdot L_{max}} \quad (2.28)$$

olacaktır [7].

Odaksız Sentetik Açıklıklı Radar modunda çapraz menzil çözünürlüğünü düzgün bir şekilde hesaplamak için en önemli parametrelerden birisi de  $L_{max}$  değerinin belirlenmesidir.





**Şekil 2.16:** Olabilecek En Yüksek Sentetik Açıklık

Faz hatasının  $\lambda / 4$  değerine ulaştığı limit durumunda;

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{L_{max}}{2} \sin(\theta / 2) \quad (2.29)$$

olacaktır. Şekil 2.16'dan da görüleceği üzere;

$$\sin(\theta / 2) \approx \frac{L_{max} / 2}{R} \quad (2.30)$$

yaklaşık olarak eşitliği sağlanacaktır. Denklemler üzerinden işlemlere devam edilecek olursa;

$$\frac{\lambda}{4} \approx \frac{(L_{max})^2}{4 \cdot R} \quad (2.31)$$

$$L_{max} = \sqrt{R \cdot \lambda} \quad (2.32)$$

Sentetik açıklığın olabilecek en yüksek değeri hesaplanmış olacaktır. Bu noktada  $L_{max}$  için belirlenen formül çapraz menzil çözünürlüğü için yazdığımız formülde yerine konulduğunda, odaksız Sentetik Açıklıklı Radar için çapraz menzil çözünürlüğü ;

$$d_{CR} = \frac{\lambda \cdot R}{2 \cdot L_{max}} \quad (2.33)$$

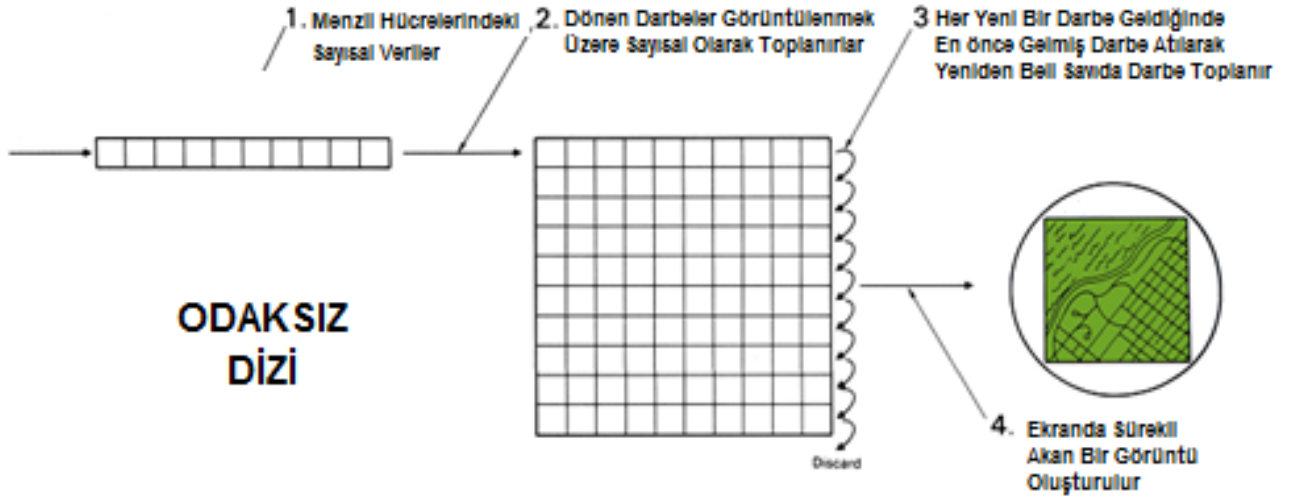
$$d_{CR} = \frac{\sqrt{\lambda \cdot R}}{2} \quad (2.34)$$

olacaktır.

Literatürde odaksız Sentetik Açıklıklı Radarın çapraz menzil çözünürlük değeri için birçok farklı formül bulunmaktadır. Curlander, bu değer için  $\sqrt{2 \cdot \lambda \cdot R}$  'dan  $\sqrt{\lambda \cdot R / 8}$  'a kadar değişkenlik gösterebildiğine kitabında değinmiştir. Çapraz menzil çözünürlüğünde formüllerin farklılık göstermesi, izin verilen en yüksek kuadratik faz hatasına dayanmaktadır [8].

Odaksız Sentetik Açıklıklı Radar için sinyal işleme algoritmasından bahsedilecek olursa; üzerinde durulması gereken en önemli noktanın isminden de anlaşılacağı üzere herhangi bir odaklama işleminin yapılmaması olduğu vurgulanmalıdır. Hüzme içerisine düşen tüm noktaların sensöre olan uzaklıkları aydınlatılma süresince sürekli değişmesine rağmen herhangi bir faz düzeltme yapmaksızın

Şekil 2.17'deki gibi alınan sinyallerin toplanarak ekrana bastırılması ile görüntü elde edilmektedir. Dolayısıyla görüntüde odaklama olmamasından ötürü görüntü kalitesi RBGM'e göre daha iyi, DBS'e göre de nispeten iyi iken odaklı SAR'a göre ise daha kötü olacaktır.



Şekil 2.17: Odaksız Sentetik Açıklıklı Radar Algoritması ([2]'den uyarlanmıştır)

#### 2.4.2. Odaklı Sentetik Açıklıklı Radar (focused SAR)

Literatürde ve kaynak kitapların birçoğunda Sentetik Açıklıklı Radar konusundan bahsedildiğinde aslında üzerinde durulan odaklı Sentetik Açıklıklı Radardan başkası değildir. Neredeyse Sentetik Açıklıklı Radar taşıyan sistemlerin tamamında odaksız SAR modu da olmasına rağmen odaklı SAR'a göre düşük çözünürlüklü görüntüler üretmesinden ötürü odaksız SAR'ın pek üzerinde durulmamakta ve daha ziyade odaklı SAR kullanımını tercih edilmektedir.

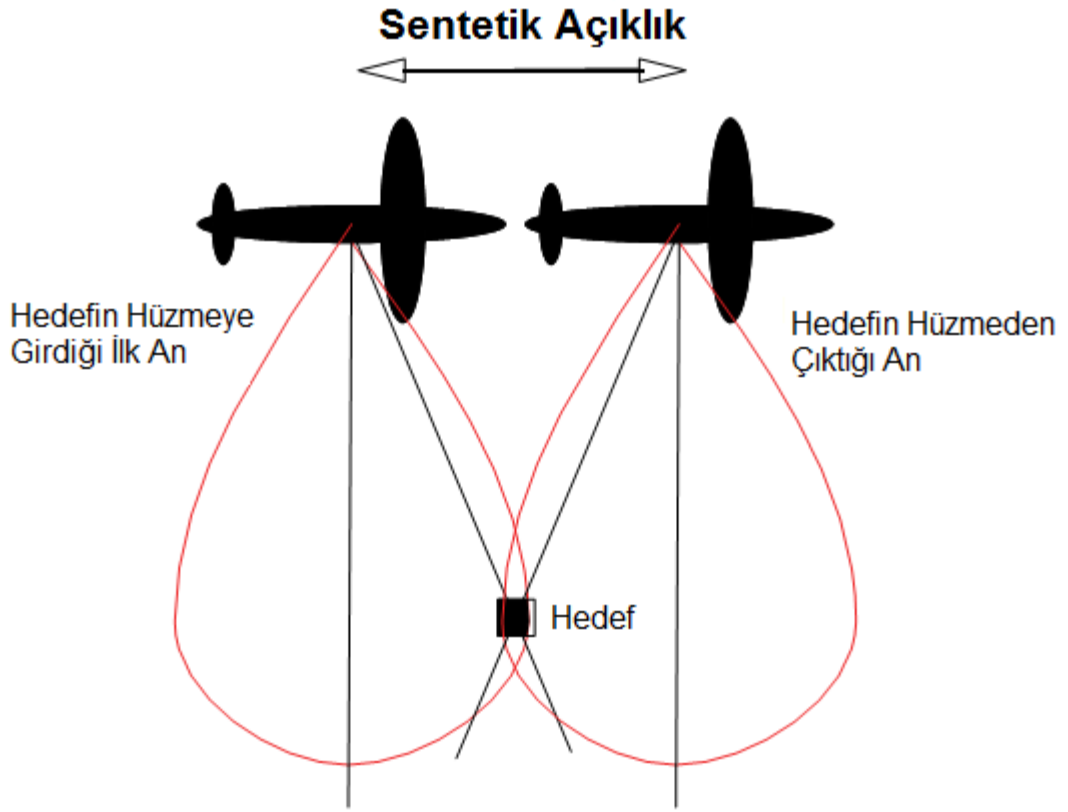
Sinyal işleme ve algoritmik olarak bakıldığında tüm görüntüleme modlarında olduğu gibi odaklı Sentetik Açıklıklı Radar modunda da görüntüleme eksenlerinden biri SAR'ı taşıyan hareketli platformun hareket yönüne dik olan menzil akseni, bir diğeri ise hareket yönüne paralel olan çapraz menzil aksenidir. Menzil de doğrusal frekans modülasyonlu sıkıştırılmış darbeler kullanılarak çözünürlükte iyileşme sağlanırken çapraz menzilde yüksek çözünürlük sağlamak için küçük boyutlu bir antenle elde edilen çoklu gözlemler bütünleştirilerek büyük bir antenin sentezlenmesiyle gerçekleştirilmektedir [9]. Odaklı Sentetik Açıklıklı Radar taşıyan platform hareket ederken, bir yandan da belli bir bölgeye darbeler göndererek aydınlatma yapar ve topladığı yansıyan sinyalleri faz uyumlu olacak şekilde birleştirip işleyerek yani bir nevi odaklama yaparak taranan bölgenin yüksek çözünürlüklü haritasını çıkarır [21].

Odaklı Sentetik Açıklıklı Radarda en önemli parametre olan çapraz menzil çözünürlüğü, SAR'ı taşıyan platformun hareketinden kaynaklanan Doppler etkisi temel alınarak açıklanabilmektedir [14].

Hüzme içerisine Şekil 2.18'deki gibi henüz girmiş bir noktadan yansıyan sinyallerin üzerindeki Doppler frekansı,

$$f_d = \frac{2 \cdot v_r}{\lambda} = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \cdot \cos(\theta_{3dB} / 2) \quad (2.35)$$

olacaktır [7].



**Şekil 2.18:** En yüksek Açıklık için Anten Hüzme Genişliği Limiti

Dar hüzme genişliği için, Doppler frekansı doğrusal bir şekilde azalarak sıfıra doğru giderken, antenin hedef ile yaptığı açıda ( $\theta \approx \frac{v \cdot t}{R}$ ) artacaktır.

Zamanla değişen Doppler frekansı ise,

$$f_d(t) = \frac{2 \cdot v_r}{\lambda} = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \cdot \cos\left(\frac{v \cdot t}{R}\right) \quad (2.36)$$

olacaktır. Doppler frekansının değişim oranını bulmak için eşitliğin her iki tarafında zamana göre türevi alınır,

$$\frac{df_d}{dt} = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \cdot \frac{v}{R} \cdot \sin\left(\frac{v \cdot t}{R}\right) \quad (2.37)$$

olmalıdır. Burada olası en yüksek değer ise

$$\frac{df_d}{dt} = \frac{2 \cdot v^2}{\lambda \cdot R} \quad (2.38)$$

denklemlerle elde edilecektir.  $\theta = -\theta_{3dB} / 2$  ile  $\theta = \theta_{3dB} / 2$  arasında  $T_d$  zamanı boyunca Doppler kaymasının doğrusal frekans değişimi ise

$$\Delta f_d = \frac{2 \cdot v^2}{\lambda \cdot R} \cdot T_d \quad (2.39)$$

olacaktır. Doğrusal frekans modülasyonlu menzil çözünürlüğünde sinyalin uyumlu filtre çıkışıındaki spektral çözünürlüğü,

$$\delta f = \frac{1}{T_d} \quad (2.40)$$

olacaktır. Odaklı Sentetik Açıklıklı Radarın çapraz menzil çözünürlüğü ise bu durumda, gerçek hızın optimum çapraz menzil çözünürlüğünün oluşan Doppler kaymasının spektral çözünürlüğüne bölünmesiyle elde edilecektir.

$$d_{CR} = L_{\max} \cdot \frac{\delta f}{\Delta f_d} \quad (2.41)$$

Eşitlik 2.41'deki değişkenler eşitlik 2.40 ve 2.39 ile açılacak olursa,

$$d_{CR} = L_{\max} \cdot \frac{R \cdot \lambda}{2 \cdot v^2 \cdot T_d} \cdot \frac{1}{T_d} = L_{\max} \cdot \frac{R \cdot \lambda}{2 \cdot v^2 \cdot T_d^2} \quad (2.42)$$

olacaktır. Bilinmesi gereken önemli bir parametrede maksimum açıklıktır ve formülize etmek gerekirse

$$L_{\max} = v \cdot T_d = \frac{R \cdot \lambda}{D} \quad (2.43)$$

olacaktır. Buradaki  $D$  parametresi ise anten açıklığını sembolize etmektedir. Sonuç olarak odaklı Sentetik Açıklık Radarın anteninin sabit bir açıyla bulunduğu platformun üzerinden yeryüzünü aydınlatarak taramasıyla bir şerit boyunca harita çıkardığı şerit haritalama modunda çapraz menzil çözünürlüğü

$$d_{CR} = \frac{R \cdot \lambda}{2 \cdot L_{\max}} = \frac{R \cdot \lambda}{2} \cdot \frac{D}{R \cdot \lambda} \quad (2.44)$$

$$d_{CR} = \frac{D}{2} \quad (2.45)$$

olacaktır. Denklemden de anlaşılacağı üzere odaklı Sentetik Açıklıklı Radarın en yaygın kullanımı olan şerit haritalama modunda çapraz menzil çözünürlüğü menzilden bağımsızdır. Bu da bu altmodu diğer tüm görüntüleme mod ve altmodlarından üstün kılmaktadır. Çünkü uzak ya da yakın görüntülenmek istenen tüm bölgelerin en yüksek çözünürlükde haritasının çıkartılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Ayrıca odaklı Sentetik Açıklıklı Radarın çapraz menzil çözünürlüğü için sentetik açıklık boyunca farklı gözlem noktalarından görüntülenecek alana darbe gönderilip toplanmasıyla benzetimi yapılan anten dizisi etkisiyle de açıklanabilmektedir [22].

Stimson ise kitabında çapraz menzil çözünürlüğünü anlatırken biraz daha farklı olarak çapraz menzil çözünürlük değerini formülize etmiştir [18]. Homojen dağılmış gerçek bir dizinin tek yön 3dB hüzme genişliği

$$\theta_{3dB} = 0.88 \cdot \frac{\lambda}{L} \quad (2.46)$$

olmalıdır. Bu noktadan hareketle çift yön 3dB hüzme genişliği ise bu değer yarısına eşit olacaktır.

$$\theta_{3dB} = 0.44 \cdot \frac{\lambda}{L} \quad (2.47)$$

Hüzme genişliği eşitliğini (2.47) basitleştirmek için genellikle 1dB daha aşağı olan 4dB hüzme genişliği formülü kullanılmaktadır ki bu da dalgaboyunun açıklık uzunluğuna oranının tam yarısına eşit olacaktır.

$$\theta_{4dB} = 0.5 \cdot \frac{\lambda}{L} \quad (2.48)$$

Formüller kullanılarak çapraz menzil çözünürlüğü hesaplanırsa,



$$d_{CR} = \theta_{4dB} \cdot R = \frac{\lambda}{2 \cdot L} \cdot R \quad (2.49)$$

olacaktır. Çift yön 3dB hüzme genişliği ise bu değerin yarısına eşit olacaktır. Daha evvel de verildiği üzere maksimum olabilecek sentetik açıklık formülü de yerine konulduğunda çapraz menzil çözünürlüğü,

$$d_{CR} = \frac{\lambda}{2 \cdot \frac{\lambda \cdot R}{D}} \cdot R \quad (2.50)$$

$$d_{CR} = \frac{D}{2} \quad (2.51)$$

olarak bulunacaktır. Odaklı Sentetik Açıklık Radarında çapraz menzil çözünürlüğü şerit altmodu için yukarıda verildiği üzere anten açıklığının yarısına eşit iken noktasal ışık altmodunda ise daha farklı olacaktır. Sentetik açıklığın orta noktasının tam olarak yanına düşen bir nokta için yani radarın açıklığın merkezindeyken n. noktaya bakış açısının ( $\Theta_n$ ) sıfır olduğu durumda çapraz menzil çözünürlüğü,

$$d_{CR} = \frac{R \cdot \lambda}{D_{eff}} \quad (2.52)$$

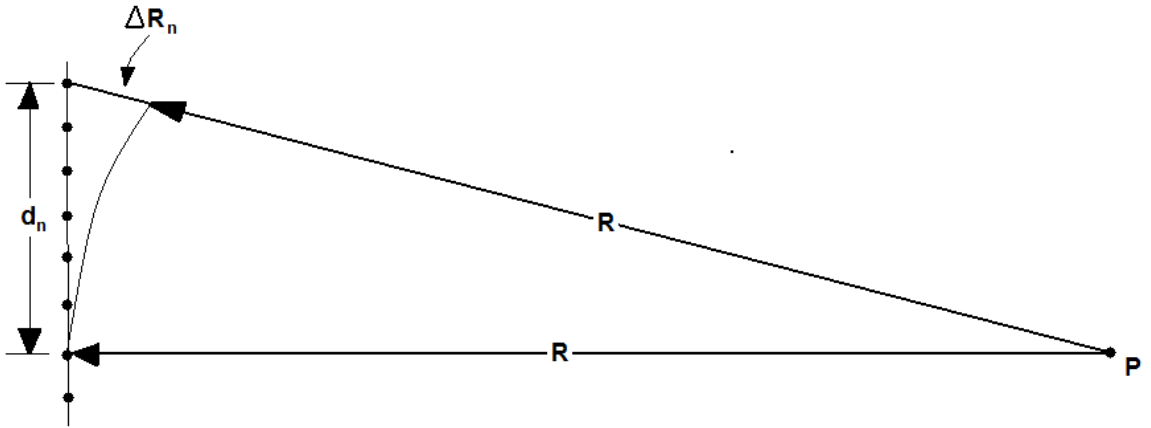
şeklinde ifade edilecektir.

Kullanılan modelde etkin anten boyutu  $D_{eff} = 2 \cdot L$ , dalganın gidiş-dönüşü gözönüne alınarak etkin dalga boyu  $\lambda_{eff} = \lambda / 2$  ve  $\theta_n \neq 0$  olduğu genel durumda n. nokta için çapraz menzil çözünürlüğü aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [16].

$$d_{CR_n} = \frac{R_n \cdot \lambda}{4 \cdot L \cdot \cos(\theta_n)} \quad (2.53)$$

Şerit altmodunda çapraz menzil çözünürlüğü sadece anten açıklığına bağlıyken, noktasal ışık altmodunda çapraz menzil çözünürlüğü spot gözlem açısının değişimine, menzile ve gönderilen darbenin merkez frekansına (dolayısıyla dalgaboyuna) bağlıdır.

Odaklı Sentetik Açıklıklı Radar için sinyal işleme algoritmasındaki en önemli nokta hüzmeye düşen ve sensöre göre uzaklığı sürekli değişmekte olan noktaların fazlarındaki değişimin görüntüleme öncesindeki sinyal işleme işlemleri sırasında düzeltilmesi ve böylelikle odaklama yapılarak görüntü kalitesinin artırılmasıdır.



**Şekil 2.19:** SAR Geometrisinde Hedef Menzilin Değişmesi

Hüzmeye düşen noktadan yansıyan sinyallerin faz hatasını formülize etmek için basit bir pisagor eşitliği yazılmalıdır.

$$(R + \Delta R_n)^2 = R^2 + d_n^2 \quad (2.54)$$

$$R^2 + \Delta R_n^2 + 2 \cdot R \cdot \Delta R_n = R^2 + d_n^2 \quad (2.55)$$

$$2 \cdot R \cdot \Delta R_n \cdot \left(1 + \frac{\Delta R_n}{2 \cdot R}\right) = d_n^2 \quad (2.56)$$

şeklinde ifade edilecektir. Burada  $\Delta R_n \ll 2 \cdot R$  olarak kabul edilirse,

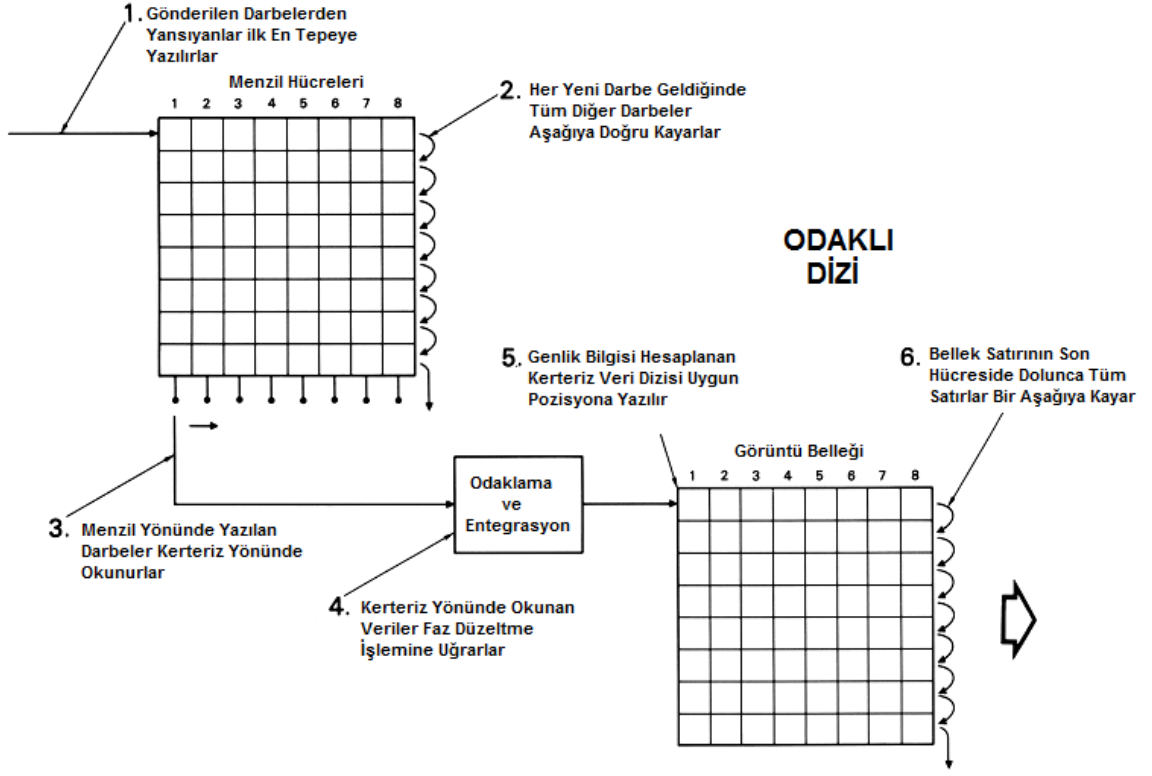
$$\Delta R_n \approx \frac{d_n^2}{2 \cdot R} \quad (2.57)$$

şeklinde sadeleşecektir. Böylelikle faz hatası,

$$\theta_n = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (2\Delta R_n) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left(\frac{d_n^2}{R}\right) \quad (2.58)$$

olacaktır.

Odaklı Sentetik Açıklık Radarı, sinyal işleme işlemleri sırasında faz düzeltme işlemi yapacaktır. Bu işlemleri yaparken yukarıda formülleri verildiği üzere her bir noktanın faz hatasını hesaplayıp ona göre gelen sinyalleri belirli işlemlerden geçirerek yüksek çözünürlüğe sahip görüntüyü Şekil 2.20'deki gibi ekrana basacaktır.



**Şekil 2.20:** Odaklı Sentetik Açıklıklı Radar Algoritması ([2]'den uyarlanmıştır)

### 3. GÖRÜNTÜLEME MODLARININ MODELLENMESİ

Tezin bu bölümünde, daha önceki bölümlerde detaylı bir şekilde teorik yönleriyle beraber anlatılan görüntüleme mod ve altmodlarının bir kısmının simülasyon ortamında modellenmesinden bahsedilecektir. Yapılan benzetimler MATLAB R2010a ortamında Intel Core2 Duo (2GHz) işlemci ve 2GB RAM özelliklerine sahip bir bilgisayar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1. Tüm Modlar için Senaryo Oluşturma

Görüntüleme mod ve altmodlarının benzetimlerini yaparken kullanılması gereken parametrelerin değerlerinin belirlenmesi aşamasında gerçek sistemlerin aynı parametreleri araştırılarak yakın değerler olmasına çaba gösterilmiştir. İlk etapta tüm modlar için ortak olan bazı parametreler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1:** Ortak Parametreler

Parametreler	Değerler
Frekans	10GHz (X Bant)
Platform Uçak Hızı	270 km/sa
Yükseklik	500 m
Menzil	1 km
3dB Hüzme Genişliği	4.5°
3db Dikey Hüzme Genişliği	10°
Bakış Açısı	60°
En Yüksek Menzil	1072 m
En Düşük Menzil	715 m

Verilen parametrelerde hareket ettiği düşünülen platformun uygulayacağı mod veya altmoda göre eklenecek başka parametreler de olabilecektir ancak bu parametreler tez içerisinde her bir mod alt mod benzetimi anlatırken verilecektir.

Ortak olan başka bir konu ise taranacak haritanın sentetik olarak oluşturulması işlemidir. Platformun üzerinden uçtuğu ve tarayarak haritasını çıkardığı alanı belirli yansıtırlık değerleri ile sanki yeryüzeyi gibi oluşturulması işlemi büyük önem arz etmektedir. Taranacak haritada her iki nokta arası 1 metre gibi düşünülerek tasarlanmıştır. Buradaki en önemli nokta Şekil 3.1’de de görüldüğü gibi haritanın büyük çoğunluğunun yansıtırlık değerinin sıfır olmasıdır. Yani benzetim yapılırken gönderilen darbelerin büyük çoğunluğu bu noktalardan geri yansıma yapamayacak ve işlem yükünü hafifleteceklerdir. Ancak haritanın içine serpiştirilmiş bazı sıfırdan büyük sayılar bulunmaktadır. Bu sayılar o noktanın yansıtırlık katsayısını göstermektedir. Bu noktalara çarpan darbeler o noktanın yansıtırlık katsayısı ile doğru orantılı bir güç seviyesi ile geri platforma yansıyacaklardır. Yansıyan darbeler üzerinden de işlemler başlayacak ve kullanılan görüntüleme moduna ait menzil ve çapraz menzil çözünürlüğünde görüntü çıkarılacaktır.

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	<b>1</b>	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>8</b>	0	<b>3</b>	0	0	0	0	0	<b>4</b>
0	0	0	0	0	<b>2</b>	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	<b>5</b>	0	0	0	0	<b>8</b>
0	<b>4</b>	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

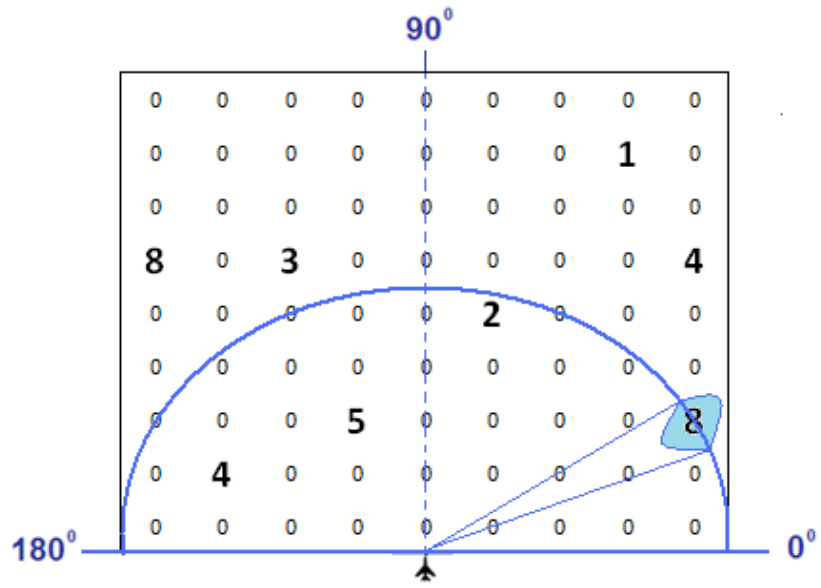
**Şekil 3.1:** Taranacak Harita

Şekil 3.1’de örnek olarak 9x9 metre büyüklüğünde bir harita üretilmiştir. Bu haritada sadece 8 ayrı sabit noktanın geri yansıtıcılığı bulunmaktadır. Bu

noktaların geri yansıtıcılık değerleri ise o noktalardaki değerle doğru orantılıdır. Diğer noktalara gönderilen darbeler ise noktaların değerlerinin sıfır olmasından ötürü sönümlendikleri ve platform üzerindeki almaca geri dönmedikleri düşünülecektir. Böylelikle modellemedeki işlemler sadece sıfırdan farklı değerlerdeki noktalardan geri dönen darbeler üzerinden yapılacaktır. Bu da hem işlem yükünü azaltırken hem de modellemenin amacına uygun düşecektir.

Tez için yapılan benzetimde ise üzerinde radar sinyal üretici ve almacını bulunduran ve uygulayacağı yöntemler ile yeryüzünün haritasını çıkaracak olan platform, haritanın alt kenar tam orta noktasından uçuşa başlayarak üst kenara doğru dikey bir şekilde belirli bir sabit hızla ilerleyecektir. Belirlenen parametrelere göre en yüksek menzil değerinin 1072 metre olmasından dolayı taranacak olan haritanın eni 2200 metre olarak seçilmiştir. Yani aslında harita, yatay ekseninde 2201 noktadan oluşmaktadır. Böylelikle uçak üzerindeki radar anteni tam sağa yada tam sola baktığında bile en yüksek menzilin aydınlattığı son nokta harita içerisinde kalacaktır.

Harita üzerinden çıkarılacak gerekli bilgiler oluşturulurken; Şekil 3.2'deki gibi uçağın haritanın alt kenar orta noktasından dikey olarak yukarıya doğru ilerlediği düşünülmektedir. Her bir mod için ilerleyen bölümlerde ayrı ayrı daha detaylı bahsedilmek üzere uçağın belli bir süre bir noktada sabit kaldığı ve o süre boyunca moda bağlı olarak belirli açılar arasına belli sayıda darbeler gönderdiği; daha sonra başka bir konuma ilerleyerek aynı işlemi tekrarladığı düşünülmektedir. Böylelikle darbelerin gönderildiği açı aralığı ve menzil aralığında yansıtıcılık değeri olan bir nokta var ise o bölgeden darbeler geri yansıtacak ve radar almacı tarafından alınarak işlemleri başlatacaktır. Bu şekilde darbe gönderilen açı ve menzil aralığının görüntüsü oluşturulacaktır. İşlemler bu şekilde devam ettikçe haritanın belirli bir bölgesinin görüntüsü çıkarılmaktadır.



**Şekil 3.2:** Benzetim Senaryosu



### 3.2. Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama (RBGM)

RBGM modunun benzetiminde 0° ile 180° arası taranmaktadır. Her bir taranan alan, bir sonraki taranan alandan tamamen ayrı olmak suretiyle (sıfır örtüşme) 3dB hüzme genişliğinin 4.5° olduğunu düşünerek 40 hüzmede bir tur tamamlanmaktadır. Her hüzme içerisine bu mod için tek darbe göndermek yeterli olmaktadır ve böylelikle platformun sabit durduğu her noktada 40 hüzme için toplam 40 darbe göndermektedir. Tüm bu darbeleri gönderip yansımalarını aldıktan sonra platformun en yüksek menzile ile en düşük menzile arasındaki fark kadar ileri hareket ettiği düşünülmektedir. Böylelikle bir sonraki taranan alan, bir önceki taranan alan ile kesişmeyecektir. Bu da modelleme işlemlerinde kesikli hareket modelinin kullanıldığını göstermektedir. Bu şekilde kullanılan bir ön kabul görüntüleme yöntemlerinden hiç biri ile çelişmediği gibi hesaplamalarda da belli kolaylıklar sağlamıştır.

Benzetim yapılırken ilk olarak platformun sabit olduğunun düşünüldüğü noktada iken tarayabileceği tüm alan en yüksek menzile bilgisi ve taranan açı aralıkları bilgisi sayesinde belirlenir. Daha sonra bu alan içerisine düşen noktalar tek tek kontrol edilir ve alan içine düşen sıfırdan farklı olan tüm değerler için uçağın o anki konumuna olan uzaklığı ve açısı hesaplanır. Böylelikle yapılan benzetimdeki radar tarafından aydınlatılan alan içine düşmesi muhtemel tüm noktalar kartezyen koordinat sisteminde tek tek incelenip sıfırdan farklı tüm noktalar için uçağın o anki konumuna bağlı olarak açı ve menzile bilgileri çıkartılıp Çizelge 3.2'deki gibi bir tablo haline getirilir.

**Çizelge 3.2:** RBGM işlemleri öncesi Çıkartılan Hedef Bilgileri

NOKTA	AÇI	MENZİL	DEĞER
1	6,3402	905,54	1
2	40,601	921,95	6
3	54,782	1040,4	9
4	75,772	1013,1	17
5	84,237	985,98	14
6	90,059	975	11
7	95,856	980,11	13
8	103,1	1019,5	19
10	112,21	1060,7	18
11	125,26	1041	10
12	139,44	922,71	7
13	173,67	906,53	4

Çizelge 3.2'den de anlaşılacağı üzere uçağın taradığı 0° ile 180° arasında ve radarın haritadaki nadir noktasına olan uzaklıkları 715 metre 1072 metre menzil değerleri içine düşen yansıtıcılık değeri sıfırdan büyük toplam 13 nokta bulunmaktadır. Yani tablo bir tam taramanın (0° - 180°) çıktılarını göstermektedir. Benzetimin devamında bu açılar arasındaki 40 farklı hüzme genişliği değerindeki açıya RBGM modu için tek darbe gönderilecek ve bu noktalardan yansımaları düşünülen sinyaller üretilecektir.

RBGM modunda modellememiz için ürettiğimiz darbelerin parametreleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

**Çizelge 3.3: RBGM Model Parametreleri**

<b>Parametreler</b>	<b>Değerler</b>
Simülasyon Frekansı	1 GHz
Sinyal Frekansı	100 MHz
Darbe Genişliği	1 $\mu$ s
Darbe Tekrarlama Aralığı	10 $\mu$ s
LFM Bant Genişliği (Beta)	8.8235 MHz
Menzil Çözünürlüğü	$c / (2 * \text{Beta})$ 17 metre
En Yüksek Menzil	1072 m
En Düşük Menzil	715 m

Bu modda yapılan sadece menzil çözünürlüğünü artırmak için kullandığımız darbe sıkıştırma ve çözme işlemidir. Gönderilen sinyalin frekansı taşıyıcı frekans etrafında zamanla değişen ötüş sinyali olarak seçilmiş ve böylelikle doğrusal frekans modülasyonlu sinyal elde edilip daha geniş bant genişliği ve yeterli uzunlukta darbe süresi sağlanarak menzilde çözünürlük iyileştirilmiştir.

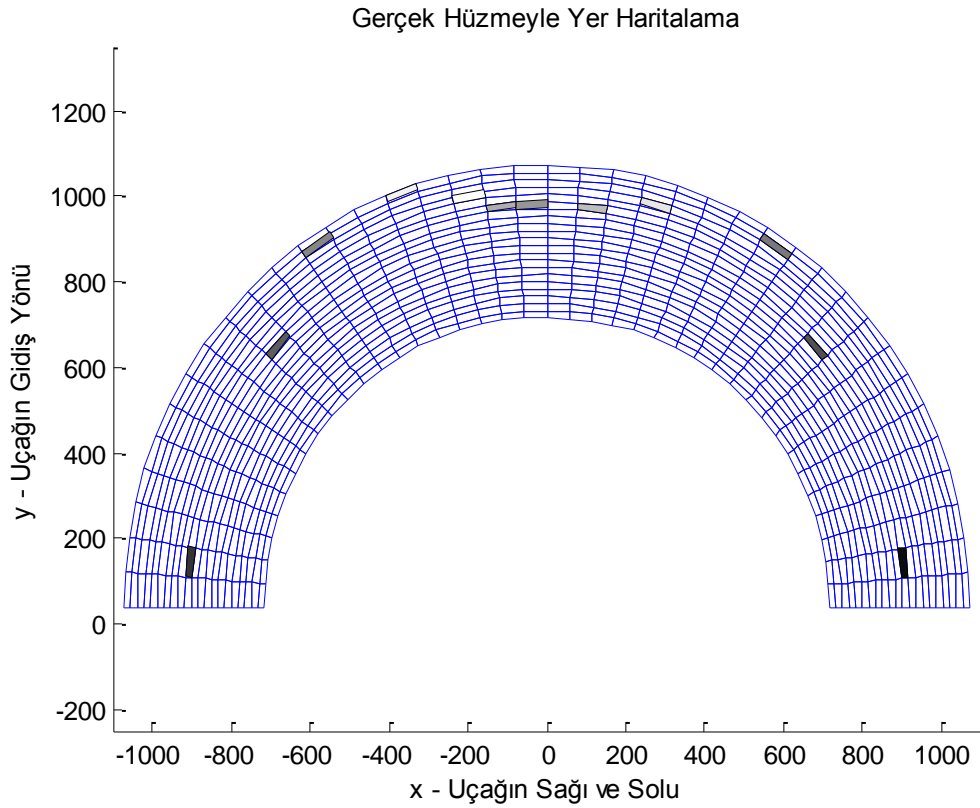
Çizelge 3.3'deki parametre değerlerinde üretilen radar darbeleri oluşturulan sentetik harita üzerindeki yansıtıcılık değeri sıfırdan farklı olan noktalardan yansıtılarak almaç tarafından alınmışlardır. Alınan sinyaller herhangi bir sinyal işleme işlemine tabi tutulmaksızın uyumlu filtreden geçirilerek yansıdığı noktanın

menzil bilgisi elde edilmiş ve sinyalin genliğinden de yansıdığı noktanın yansıtıcılık değeri hesaplanarak Çizelge 3.4 ve Şekil 3.3 oluşturulmuştur.

**Çizelge 3.4:** Yansıyan Darbelerden Elde Edilen Bilgiler

NOKTA	AÇI	MENZİL	DEĞER
-	0 – 4.5	-	-
<b>1</b>	<b>4.5 – 9</b>	<b>906</b>	<b>1.3968</b>
-	9 – 13.5	-	-
-	13.5 – 18	-	-
-	18 – 22.5	-	-
-	22.5 – 27	-	-
-	27 – 31.5	-	-
-	31.5 – 36	-	-
<b>2</b>	<b>40.5 – 45</b>	<b>922</b>	<b>8.3808</b>
-	45 - 49.5	-	-
-	49.5 - 54	-	-
<b>3</b>	<b>54 - 58.5</b>	<b>1041</b>	<b>12.571</b>
-	58.5 - 63	-	-
-	63 - 67.5	-	-
-	67.5 - 72	-	-
<b>4</b>	<b>72 - 76.5</b>	<b>1014</b>	<b>23.746</b>
-	76.5 - 81	-	-
<b>5</b>	<b>81 - 85.5</b>	<b>986</b>	<b>19.555</b>
-	85.5 - 90	-	-
<b>6</b>	<b>90 - 94.5</b>	<b>976</b>	<b>15.365</b>
<b>7</b>	<b>94.5 - 99</b>	<b>981</b>	<b>18.158</b>
<b>8</b>	<b>99 - 103.5</b>	<b>1020</b>	<b>26.539</b>
-	103.5 - 108	-	-
<b>9</b>	<b>108 - 112.5</b>	<b>1061</b>	<b>25.142</b>
-	112.5 - 117	-	-
-	117 - 121.5	-	-
<b>10</b>	<b>121.5 - 126</b>	<b>1042</b>	<b>13.968</b>
-	126 - 130.5	-	-
-	130.5 - 135	-	-
<b>11</b>	<b>135 – 139.5</b>	<b>923</b>	<b>9.7776</b>
-	139.5 – 144	-	-
-	144 - 148.5	-	-
-	148.5 – 153	-	-
-	153 – 157.5	-	-
-	157.5 – 162	-	-
-	162 – 166.5	-	-
-	166.5 - 171	-	-
<b>12</b>	<b>171 – 175.5</b>	<b>907</b>	<b>5.5872</b>
-	175.5 - 180	-	-

Çizelge 3.2'de platformun darbeleri göndermeye başladığı ilk noktadan itibaren belirli bir açı aralığı ve menzilde aydınlatabildiği alan içerisindeki yansıtılık değerleri sıfırdan farklı olan noktaların platforma olan uzaklıkları ve hangi açıda buldukları verilmiştir. Çizelge 3.4'de ise 40 farklı açı aralığına gönderilen ve yansıyan darbelerin alınıp işlendikten sonra hesaplanan menzil değerleri ve yansıtılık katsayıları gösterilmiştir. Dikkatle incelendiğinde çok büyük bir doğruluk oranıyla değerler hesaplanmış ve bu hesaplanan değerler yardımıyla Şekil 3.3'deki gibi ilk taramanın haritası çıkartılmıştır.

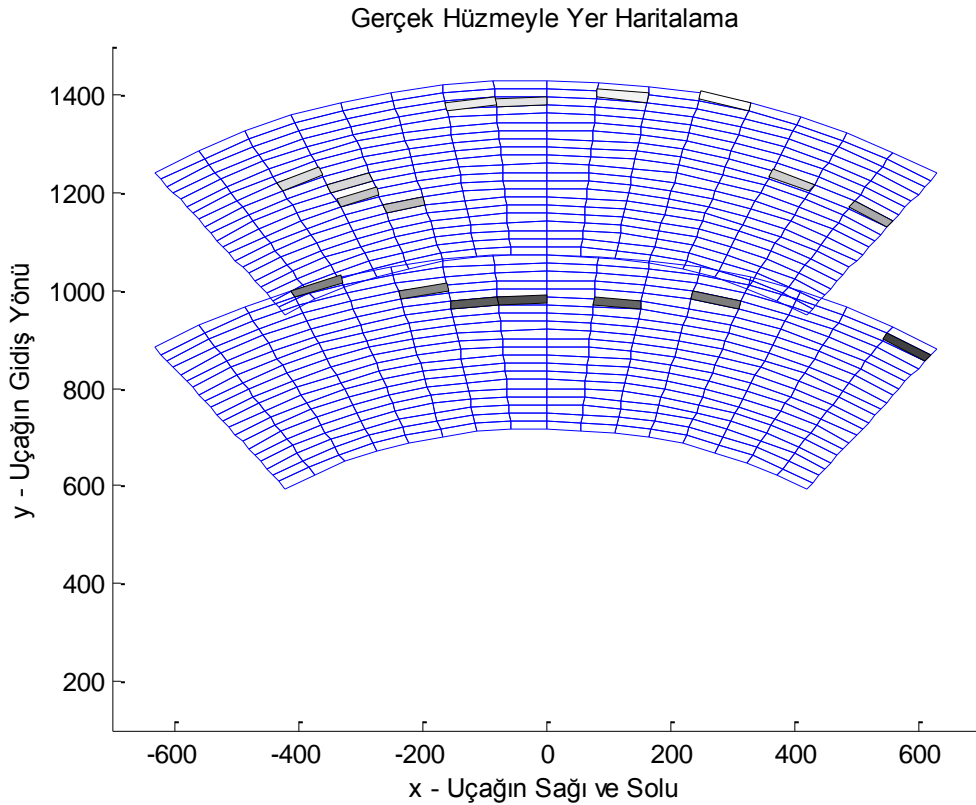


**Şekil 3.3:** RBGM Modu Kullanılarak Oluşturulan Harita

Şekil 3.3'de oluşturulmuş olan haritada sadece uçağın göreve başladığı ilk noktadan gönderdiği darbelerin alınıp haritası çıkarılmıştır. Yani sadece taranan ilk 40 hüzmeyle gönderilen darbelerin oluşturduğu harita gösterilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta çapraz menzil çözünürlüğünün hüzme genişliği ile aynı olduğudur. Tek bir noktadan yansıyan sinyal haritada ancak hüzme genişliği kadar bir yerle gösterilebilmiştir. RBGM modunda bu sebeple çözünürlük

oldukça düşüktür. Ayrıca hüzme genişliği menzil büyüdükçe arttığı için çapraz menzil çözünürlüğü uzaktaki noktalar için daha da kötüleşmektedir. Bu modda çapraz menzil çözünürlüğü ancak hüzme genişliği azaltılarak iyileştirilebilmektedir. Taranan alanların farklı renkte olması ise farklı yansıtıcılık değerlerine sahip olmalarından kaynaklanmaktadır.

Darbeler hüzme genişliği kadar tüm açı aralıklarına gönderildikten sonra platform en yüksek menzil ile en düşük menzil arasındaki fark kadar ileride bir noktaya taşınır ve aynı işlemler burada tekrarlanır. Bu şekilde platform burun kısmındaki  $54^\circ$  ile  $126^\circ$  arasını tarayarak ve gerçek zamanlı olarak haritasını da çıkararak ilerler. Şekil 3.4'de ise bahsi geçen bu işlemler 2 kez peşpeşe tekrarlanarak daha büyük bir bölgenin haritası çıkartılmıştır.



**Şekil 3.4:** RBGM Modu Kullanılarak Oluşturulan Harita-2

### 3.2. Doppler Hüzme Keskinleştirme (DBS)

Platformun darbeler göndererek aydınlattığı alan içerisinde hareketsiz bir şekilde durmakta olan noktalardan yansıyor dönen sinyallerde uçağın kendi hızından ve yansıyor döndüğü noktaya yaptığı açıdan ötürü oluşan Doppler kayması olmaktadır. Doppler Hüzme Keskinleştirme modu işte bu Doppler kaymasını kullanarak çapraz menzilde daha iyi bir çözünürlük elde etmektedir. Taranan açı aralığı içine düşen ve en yüksek menzil değeri ile en düşük menzil değeri arasında bulunan noktaların platformun kendi hızından dolayı oluşturacakları Doppler frekanslarının doğru bir şekilde hesaplanması bu nedenle çok büyük önem arz etmektedir.

Benzetimin RBGM modunun benzetimi ile ortak sayılabilecek kısımlardan birisi harita üzerindeki sıfırdan farklı noktaların uçağa ve uçağın o anki konumuna göre açı ve menzil bilgilerinin çıkartılmasıdır. Böylelikle uçağın konumuna göre radar hüzmesinin içine düşen bu noktaların açı, menzil bilgileri bilinip simulasyon sonucunda bulunan değerle karşılaştırılabilecektir. Ayrıca bu modda yansıtıcılık değerleri sıfırdan farklı olan noktaların platform hızından kaynaklı olarak oluşturdukları Doppler etkisi de simulasyon başlamadan hesaplanacak ve böylelikle simulasyon sonucunda bulunan değerle kıyaslanabilecektir. Bu modda en önemli parametrenin bahsi geçen Doppler değeri olduğu düşünüldüğünde; simulasyon sonucunda hedeflerin Doppler bilgisinin, uçağın konumu ve hızına göre en doğru şekilde hesaplanması da büyük önem taşımaktadır

DBS modunun benzetiminde  $54^{\circ}$  ile  $126^{\circ}$  arası taranmaktadır. Her bir taranan alan, bir sonraki taranan alandan tamamen ayrı olmak suretiyle (sıfır örtüşme) 3dB hüzme genişliğimizin 4.5 derece olduğunu düşünerek 16 hüzmede bir tur tamamlanmaktadır. Her hüzme içerisine oluşabilecek en yüksek Doppler kaymasını doğru hesaplayabilmek için 42 darbe göndermek yeterli olmaktadır ve böylelikle uçak sabit durduğu her noktada 16 hüzme için toplam 672 darbe göndermektedir. 42 darbe göndermemizdeki amaç; yansıtıcılık değeri sıfırdan farklı olan noktalardan dönen sinyallerin üzerindeki doppler bilgisini çıkartarak bu bilgi yardımıyla daha iyi bir çapraz menzil çözünürlüğü elde edebilmektir.

Tüm bu darbeleri gönderdikten sonra tıpkı RBGM modunda olduğu gibi kesikli hareket modeli kullanılarak uçağın en yüksek menzil ile en düşük menzil

arasındaki fark kadar ileri hareket ettiği düşünölmektedir. Böylelikle bir sonraki taranan alan, bir önceki taranan alan ile büyük ölçüde kesişmeyecektir.

DBS modunda modelimizdeki radar tarafından aydınlatılan alan içine düşmesi muhtemel tüm noktalar kartezyen koordinat sisteminde tek tek incelenip sıfırdan farklı tüm noktalar için uçağın o anki konumuna bağılı olarak açı, menzil ve RBGM modundan farklı olarak oluşturdukları Doppler frekansı bilgileri çıkartılıp Çizelge 3.5 oluşturulur.

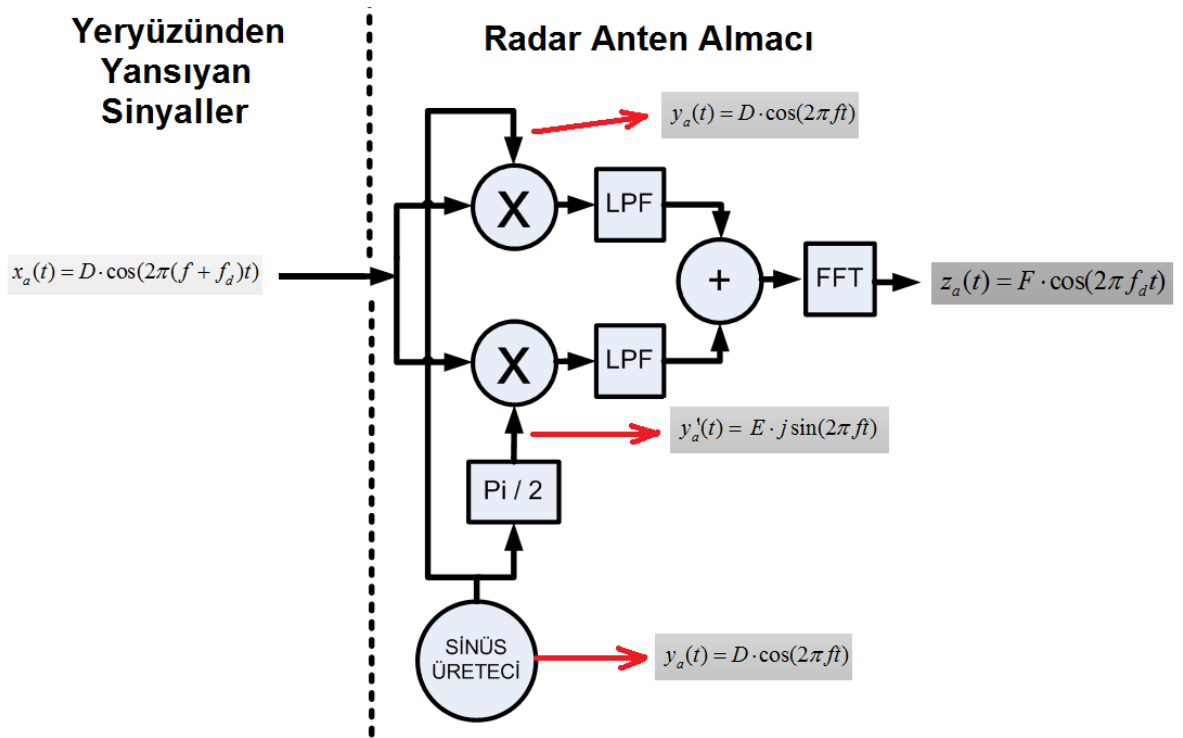
**Çizelge 3.5:** DBS İşlemleri Öncesi Çıkartılan Hedef Bilgileri

NOKTA	DOPPLER	AÇI	MENZİL	DEĞER
1	2042.4	54.782	1040.4	9
2	2423.3	75.772	1013.1	17
3	2487.4	84.237	985.98	14
4	2500	90.059	975	11
5	2487	95.856	980.11	13
6	2435	103.1	1019.5	19
7	2390	107.06	1026.1	16
8	2041	125.26	1041	10

Çizelge 3.5'den de anlaşılacağı üzere uçağın taradığı 54° ile 126° arasında ve radarın haritadaki nadir noktasına olan uzaklıkları 715 metre 1072 metre arasında olan toplam 8 noktanın yansıtırlık değerleri sıfırdan farklıdır. Çizelge 3.5 bir tam taramanın çıktılarını göstermektedir.

DBS modunun benzetimi için üretilen darbelerin parametreleri tıpkı RBGM modundaki gibidir. DBS modunda da menzil çözünürlüğünü artırmak için darbe sıkıştırma metodu kullanılmış ve menzil çözünürlüğü iyileştirilmiştir. Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama modundan farklı olarak Doppler Hüzme Keskinleştirme modunda her hüzme en az belli sayıda darbe gönderilmesi gerekmektedir. Benzetimde gönderilmesi gereken en düşük darbe sayısı 42'dir. Bu sayı platformun hızı ile oluşturabileceği en yüksek Doppler frekansı olan 2500Hz'i hesaplayabilmek için gönderilmesi gerekli minimum darbe adedidir.

Hüzme genişliğindeki açı aralıklarına gönderilen darbe dizisi oluşturulan sentetik harita üzerindeki yansıtıcılık değeri sıfırdan farklı olan noktalardan yansıyarak geri döner ve almaç tarafından alınarak belirli işlemlerden geçmek üzere veri matrisine kaydedilirler. Doppler Hüzme Keskinleştirme modundaki en önemli nokta darbe dizisi gönderilen hüzme içerisindeki farklı açıdaki noktaları birbirinden ayırt edebilmektir. Bu da algoritmanın temelini oluşturmaktadır. Bu sebeple teorik kısımda anlatıldığı üzere yavaş zamanda darbeler işlemlere alınarak darbelerin üzerindeki Doppler bilgisi hesaplanmalıdır. Bu sebeple Şekil 3.5'deki gibi yansıyıp alınan darbe dizisi öncelikle aynı taşıyıcı frekans değerindeki bir sinyalin (LO) gerçek ve hayali bileşenleri (I & Q) ile çarpılır. Daha sonra iki parçadan oluşan bu sinyal alçak geçiren filtreden geçirilerek temel banda indirilmiş olur ve FFT bloğu yardımıyla da temel banttaki sinyalin frekans bilgisine ulaşılır. Hesaplanan bu frekans yansıyan darbelerin üzerindeki Doppler kayma miktarıdır. Bu algoritma sayesinde hüzme içerisindeki farklı açılardaki noktaların birbirlerinden farklı miktarlarda Doppler kayması oluşturmasından dolayı daha dar bir sentetik hüzme oluşacak ve çapraz menzil çözünürlüğü ciddi oranda iyileşecektir.



Şekil 3.5: Doppler Frekansının Çıkartılması Blok Diyagramı

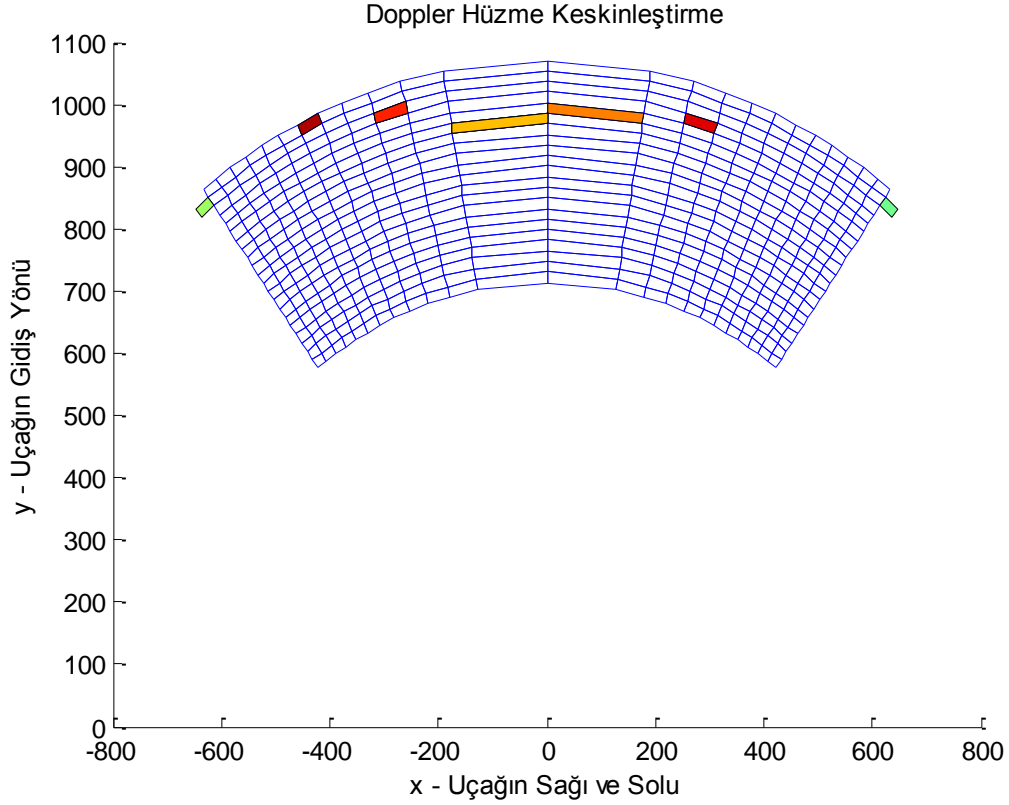


Aynı zamanda darbelerin çarpıp geri gelme sürelerinden menzil bilgisi ve darbelerin genliklerinden de yansıdıkları noktanın yansıtıcılık değerleri hesaplanarak Çizelge 3.6 oluşturulacaktır.

**Çizelge 3.6:** Yansıyan Darbelerden Elde Edilen Bilgiler

HÜZME	DOPPLER	AÇI	MENZİL	DEĞER
1	2007.8	53.428	1041	9
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	2.392	73.096	1014	17
6	0	0	0	0
7	2490.7	85.062	986	14
8	0	0	0	0
9	2500	90+1.2074e-006i	976	11
10	2490.8	94.905	981	13
11	2392	106.91	1020	19
12	2381	107.75	1027	16
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0
16	2007.8	126.57	1042	10

Çizelge 3.5’de işlemler öncesinde bilinen değerler ile Çizelge 3.6’da açı aralıklarına gönderilen ve yansıyan darbelerin alınıp işlendikten sonra hesaplanan menzil değerleri, yansıtıcılık katsayıları ve modun en önemli parametresi olan açıların birbirlerine ne kadar yakın olduğu görülmektedir. Hesaplanan bu değerler yardımıyla ve moda ait teorik yönlerinin anlatıldığı daha önceki bölümlerden de hatırlanacağı üzere sentetik dar hüzmeler oluşacak ve böylelikle Şekil 3.6’daki gibi ilk tarama turunun haritası çıkartılmıştır.

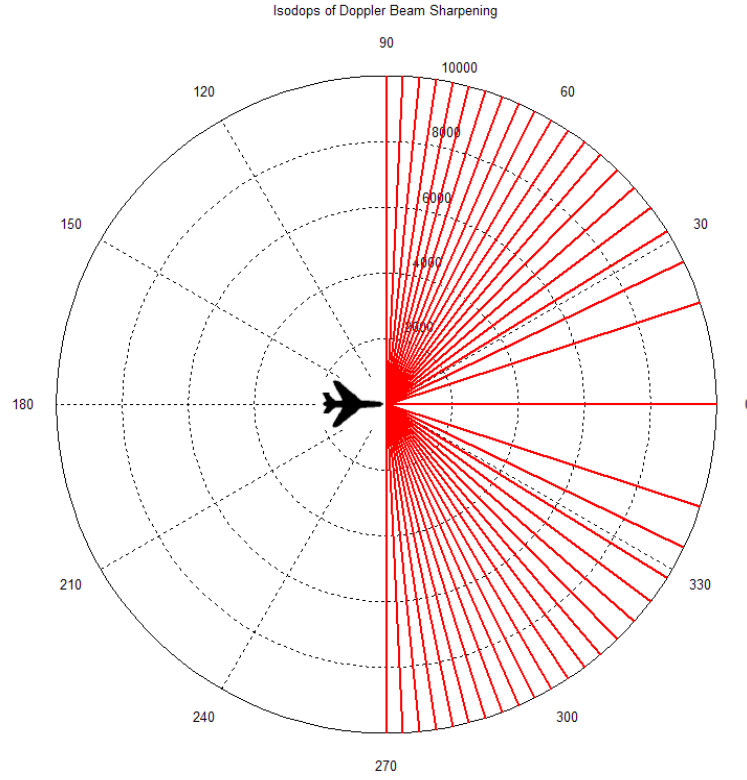


**Şekil 3.6:** DBS Modu Kullanılarak Oluşturulan Harita

Şekil 3.6'da oluşturulmuş olan haritada sadece uçağın ilk durduğu noktadan gönderdiği darbelerin alınıp haritası çıkarılmıştır. Yani sadece taranan ilk 16 hüzmeye gönderilen darbelerin oluşturduğu harita gösterilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta çapraz menzil çözünürlüğünün hüzmeye genişliği ile aynı olmadığıdır. Çapraz menzil çözünürlüğü uçağın burun kısımlarında hüzmeye genişliğinden bile daha büyükken uçağın yan kısımlarına doğru küçülmeye başlamıştır. Buradan anlaşılacağı üzere çözünürlüğün en yüksek olduğu nokta uçağın tam sağına ya da tam soluna taramasıyla elde edilebilmektedir. Literatürde "DBS Gap" olarak bahsedilen kavram ise; uçağın burun kısmında çözünürlüğün RBGM gibi herhangi bir sinyal işleme işlemi olmayan moddan bile daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 3.6'da dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise  $54^\circ$  önce ve  $126^\circ$  sonra iki alanın taralı gösterilmiş olmasıdır. Buradaki yanlışlık ise sinyal işleme işlemleri sırasında noktaların Doppler frekanslarının bir miktar yanlış hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Tablolar incelendiğinde görülecektir ki Doppler frekanslarının

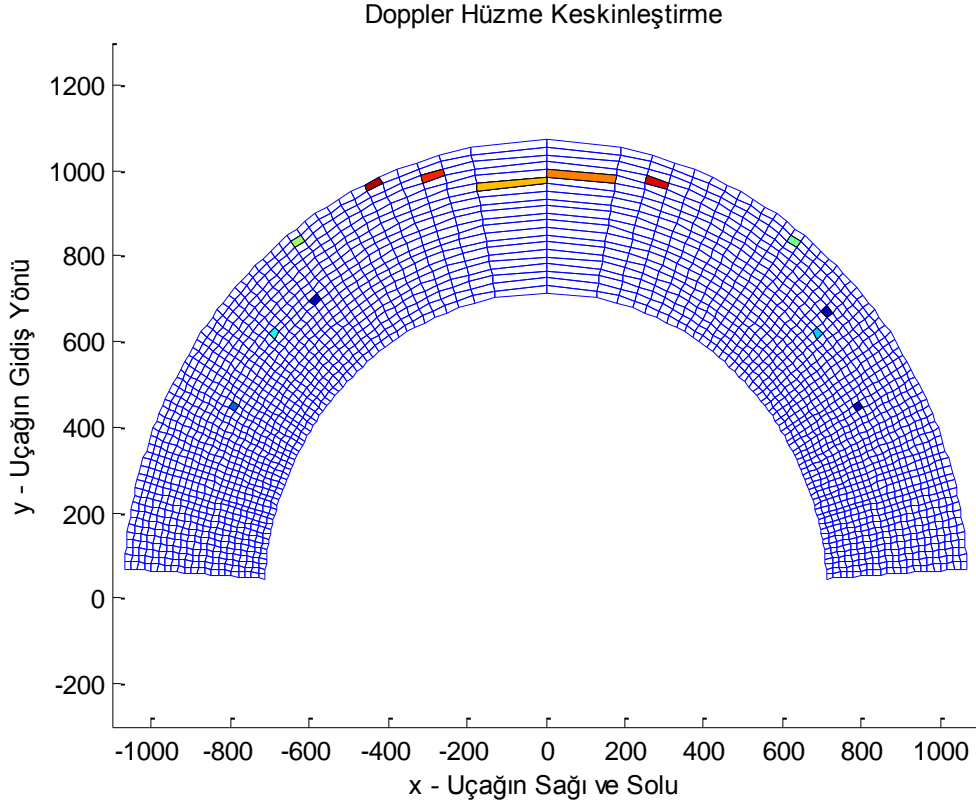
bir miktar yanlış hesaplanmasıyla açılarda yanlış hesaplanacak ve taranması gereken alanın değilde bi yan komşu alan taranmış olacaktır.



**Şekil 3.7:** Sentetik Hüzme Aralıkları

Sentetik hüzme genişliklerinin  $\pm 90^\circ$ 'ye gidildikçe daraldığı ve uçağın platform kısmında ise en geniş halini aldığı Şekil 3.7'de net olarak görülmektedir. Bu sebeple tarama yapılırken antenin tam sağa ya da tam sola baktığı anlarda daha iyi çözünürlükde görüntüler elde edilmektedir.

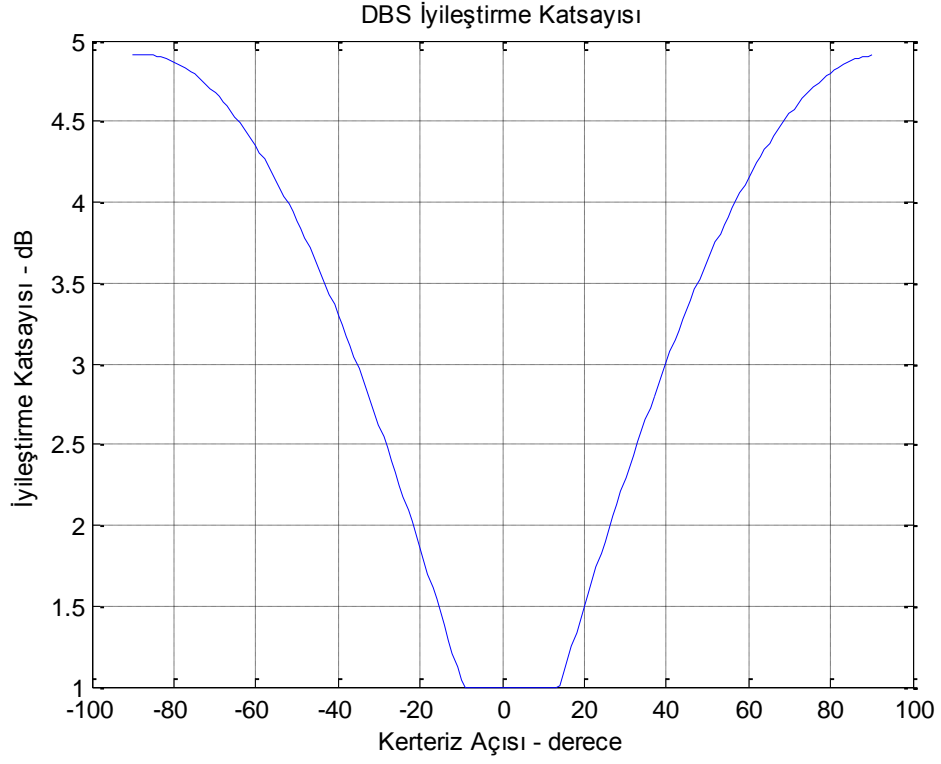
Şekil 3.8'de de bu sefer aynı harita aynı noktadan  $4.5^\circ$  önce ve  $175.5^\circ$  arası aydınlatılarak taranmış ve haritası çıkarılmıştır. Tıpkı evvelden de bahsedildiği üzere doppler çizgilerinin  $\pm 90^\circ$ 'ye gidildikçe birbirlerine yaklaştıkları ve çapraz menzil çözünürlüğünü iyileştirdikleri net bir şekilde görülmektedir. Bu sebeple DBS kullanılırken tam sağa ya da tam sola anten baktırılarak tarama yapmak en uygundur.



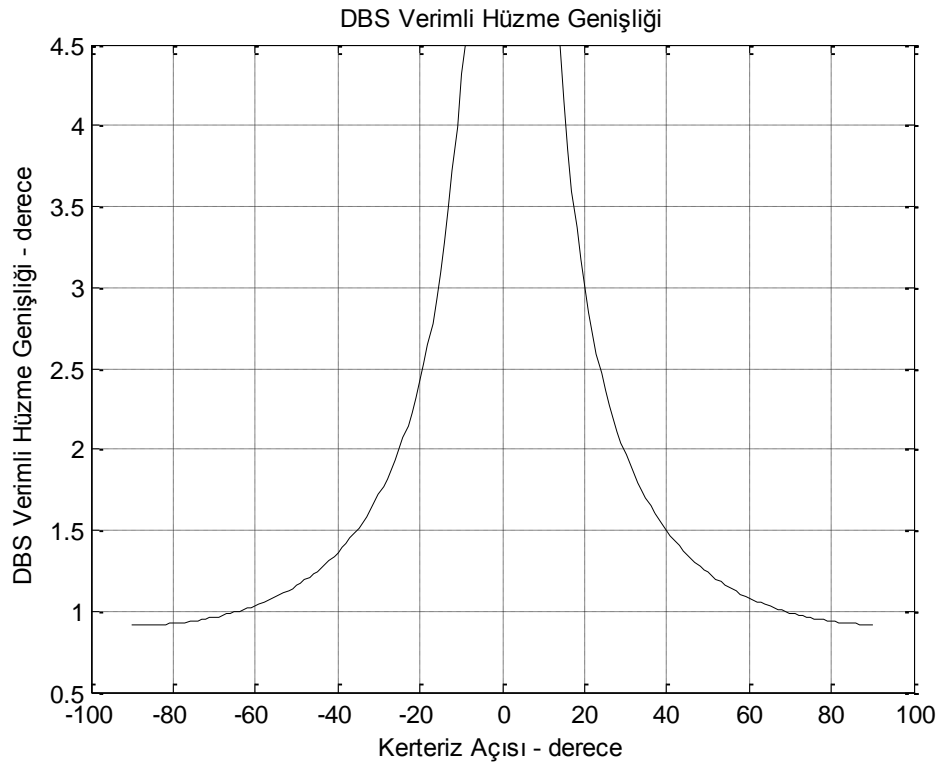
**Şekil 3.8:** DBS Modu Kullanılarak Oluşturulan Harita – 2

Ayrıca burada önemli olan bir diğer parametre ise teorik kısımlarda da sıklıkla üzerinde durulan Hüzme Keskinleştirme Oranıdır (HKO). Bazı kaynaklarda iyileştirme katsayısı olarak da geçen bu oran bize bir gerçek hüzmenin içerisine ne kadar sentetik hüzme düştüğünü göstermektedir. Böylelikle hangi açı aralığında, çapraz menzil çözünürlüğünde ne kadar iyileştirme yapıldığının anlaşılmasına imkan tanımaktadır.

Şekil 3.9'a bakıldığında  $\pm 90^\circ$  arasındaki tüm açıların iyileştirme katsayıları verilmiştir. Aslında bu sayı Hüzme Keskinleştirme Oranını da göstermektedir. Bu da bakılan açıda bir gerçek hüzmenin içerisine kaç adet sentetik hüzme düştüğü hakkında bilgi verir. Şekli yorumlamak adına bakıldığında, yaklaşık  $\pm 15^\circ$  arasında gerçek hüzme içerisine bir tane sentetik hüzme düşmüş görünmektedir. Bu da bahsi geçen "DBS Gap" kavramını göstermektedir. Ancak açı iyileştirme katsayısının arttığı net bir şekilde söylenebilir.  $-40^\circ$ 'de gerçek hüzme içerisine 2.5 adet sentetik hüzme düşmüştür.

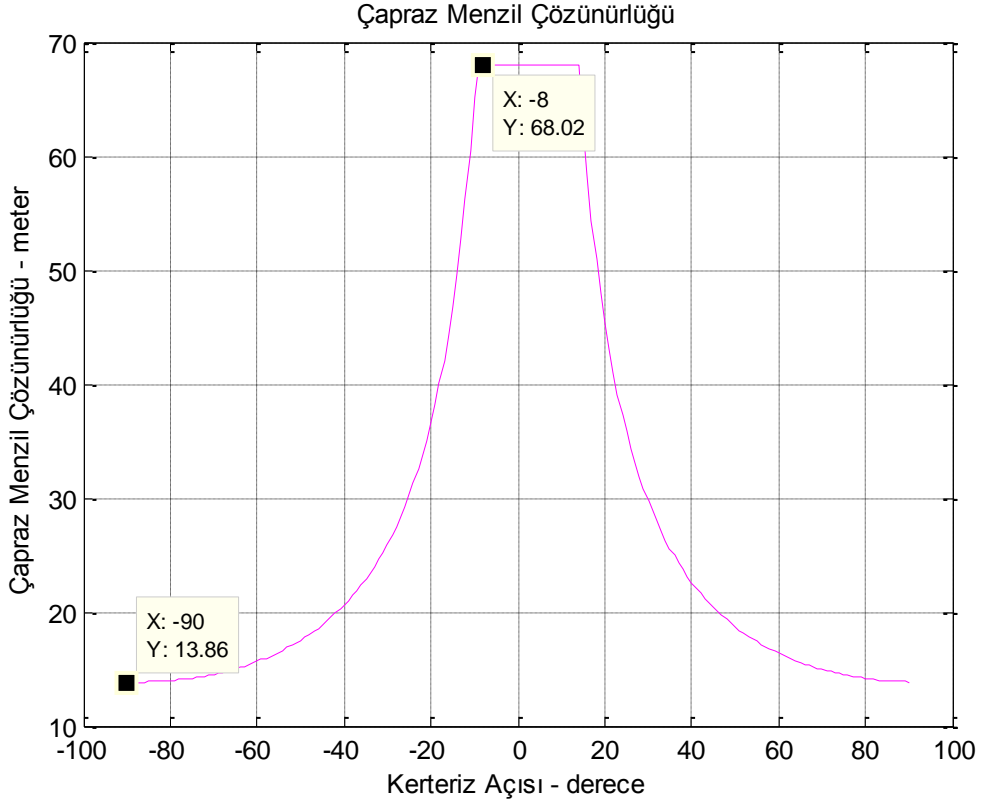


**Şekil 3.9:** DBS İyileştirme Katsayısı



**Şekil 3.10:** ±90° DBS Verimli Hüzme Genişliği

Şekil 3.10'da  $\pm 90^\circ$  arasındaki her açıdaki sentetik hüzme genişliğinin ne kadar olduğunu gösterilmiştir. Açı değeri  $\pm 90^\circ$ 'ye yaklaştıkça sentetik hüzme genişliği de daralmaktadır. Doppler Hüzme Keskinleştirme modunun isminden de anlaşılacağı üzere hüzme daraltılarak çözünürlük iyileştirilmektedir.



**Şekil 3.11:** Çapraz Menzil Çözünürlüğü

Şekil 3.11'de ise çapraz menzil çözünürlüğünün iyileştirildiği daha net görülebilir. Burada  $\pm 90^\circ$  arasında çapraz menzil çözünürlüğü değişimi verilmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere en iyi çözünürlüğe antenin tam sağa ya da tam sola baktığı anlarda ulaşılmaktadır. Bu sebeple SAR modlarında hareketsiz anten kullanılmış ve anten direk uçağın tam sağına ya da tam soluna darbe gönderecek şekilde sabitlenmiştir.

### 3.4. Odaksız Sentetik Açıklıklı Radar (unfocused SAR)

Odaksız Sentetik Açıklıklı Radar SAR modunun alt modlarından bir tanesi olarak ele alınmaktadır. Kimi kaynaklarda Doppler Hüzme Keskinleştirme Modu bile SAR modunun altmodlarından biri gibi ele alınsada bu tez kapsamında ayrı bir görüntüleme modu olarak incelenmiştir. Literatürde odaksız SAR modunu DBS modunun verimli kullanılan hali gibi anlatan kaynaklar olsa bile aslında çözünürlük performansları ve sinyal işleme algoritmaları açısından ciddi farklılıkları mevcuttur.

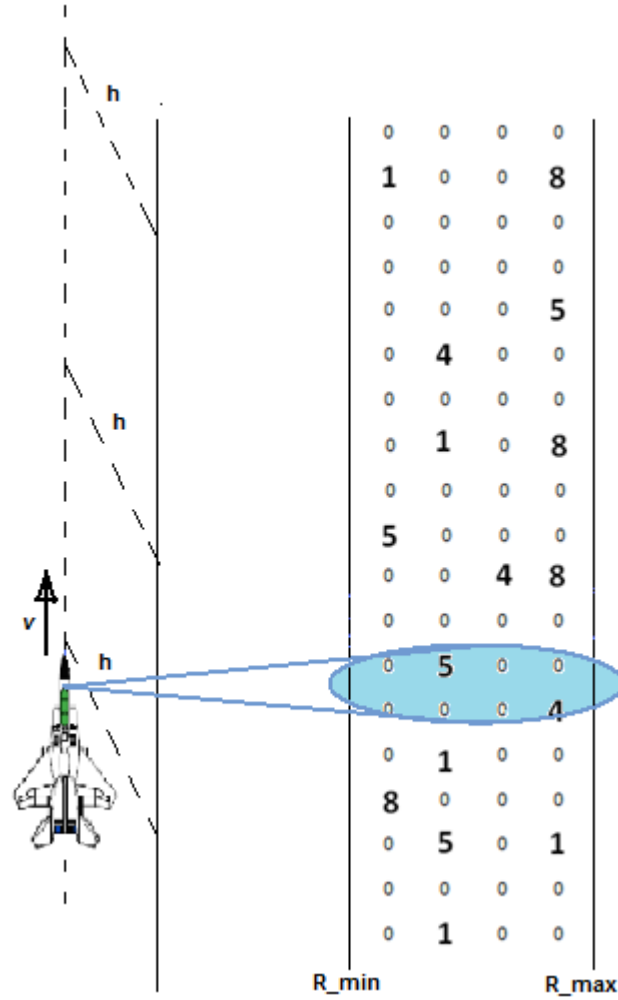
Odaksız Sentetik Açıklıklı Radar benzetiminde platformun sabit hızla uçtuğu kabul edilirken aydınlatma yapacak antenin uçağın gidiş eksenine dik olacak şekilde hareketsiz durduğu düşünülmüştür. Hali hazırda kullanılan SAR sistemlerinde de zaten anten hareketsiz durmakta olduğu için benzetim gerçek hayata ters düşmemektedir. Odaksız SAR'ın bazı kaynaklarda DBS modunun verimli kullanımı olarak tariflenmesinin altında yatan sebep ise DBS modu kullanıldığında elde edilebilecek en iyi çözünürlüğün antenin hareket eksenine dik baktığı anda ( $\pm 90^\circ$ ) olmasından kaynaklanmaktadır.

Benzetimde Şekil 3.12'deki gibi çoğunluğu sıfırlardan oluşan sentetik haritamızın 500 metre yükseklikle üzerinden uçan platform  $60^\circ$  eğiklik açısı ile sabit duran anteni ile taradığı bölgeye darbeler gönderip yansıyan darbeleri alarak işlemektedir. Daha önceki modların benzetiminde olduğu gibi bu modda da darbeleri gönderirken sabit durduğu düşünülen platform daha sonra bir en küçük çözünürlük hücresinin çapraz menzil çözünürlük değeri kadar ilerideki bir noktaya hareket etmekte ve tekrar aynı işlemi gerçekleştirmektedir. Burada en küçük hücre hüzme genişliğinden oldukça küçük olduğu için bir sonraki taranan alan ile önceki taranan alan büyük oranda örtüşecektir. Böylelikle haritadaki bir nokta birçok kez aydınlatılmış olacaktır. Bu da Sentetik Açıklıklı Radar algoritması ile açıklanmaktadır.

Gönderilen darbeler yansdıktan sonra alınacak ve veri matrisinde biriktirilecektir. Biriktirilen darbelerden aynı hüzmeden yansıyanların ilk örnekleri tıpkı Şekil 3.13'deki gibi alınarak herhangi bir odaklama işlemi yapmaksızın toplanacaklardır. Aslında farklı lokasyonlardaki farklı noktalardan yansıyan bu darbelerin fazları birbirinden farklıdır ancak bu modda herhangi bir odaklama işlemi yapılmadığı için

bu örnekler toplanacak ve bu toplam üzerinden hızmenin tam ortasına düşen o noktaya ait genlik bilgisi çıkartılacaktır.

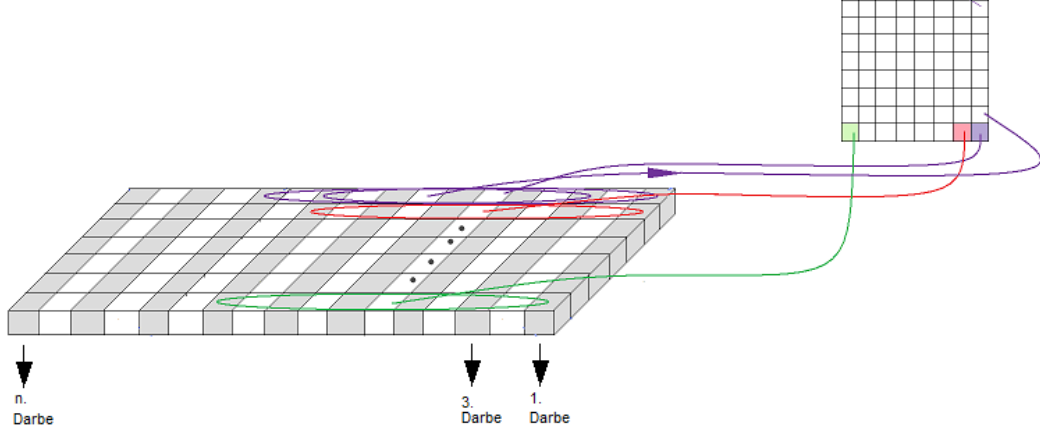
Bu işlem veri matrisindeki aynı darbelerin diğer tüm örnekleri için yapılarak hızmenin tam ortasına düşen en düşük menzilden en yüksek menzile kadar olan çözünürlük hücrelerinin genlik değerleri hesaplanacaktır.



**Şekil 3.12:** Odaksız SAR Benzetimi

Şekil 3.13'de de görüldüğü üzere veri matrisinde toplanan veriler parça parça alınıp işlenerek görüntü oluşturulmaktadır. Daha sonra platform bir sonraki noktaya hareket etmekte ve bir önceki ile büyük oranda kesişen yeni bölgeye darbeler gönderip o bölgeden gelen yansımaları veri matrisine kaydetmektedir. Daha sonra da bu verileri işlemektedir. Bu şekilde uçağın hareketi boyunca haritada uzayarak oluşmaktadır.





**Şekil 3.13:** Odaksız SAR Veri Matrisi

Sentetik olarak ürettiğimiz haritanın üzerinden platformun uçtuğunu düşündüğümüzde ilk hüzmeye içerisine düşen belli noktalar olmuştur. Bu noktalara ait olan parametreler Çizelge 3.7’de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere sıfırdan farklı olan bu noktalar hüzmeyi aydınlattığı alan içerisine düşmektedirler. Menzilleri en yüksek menzile en düşük menzile arasındayken; açıları ise o anda uçağın bulunduğu nokta ile yaptıkları açıdır ve hüzmeye genişliğinden daha küçüktürler.

**Çizelge 3.7:** Odaksız SAR işlemleri öncesi Çıkarılan Hedef Bilgileri

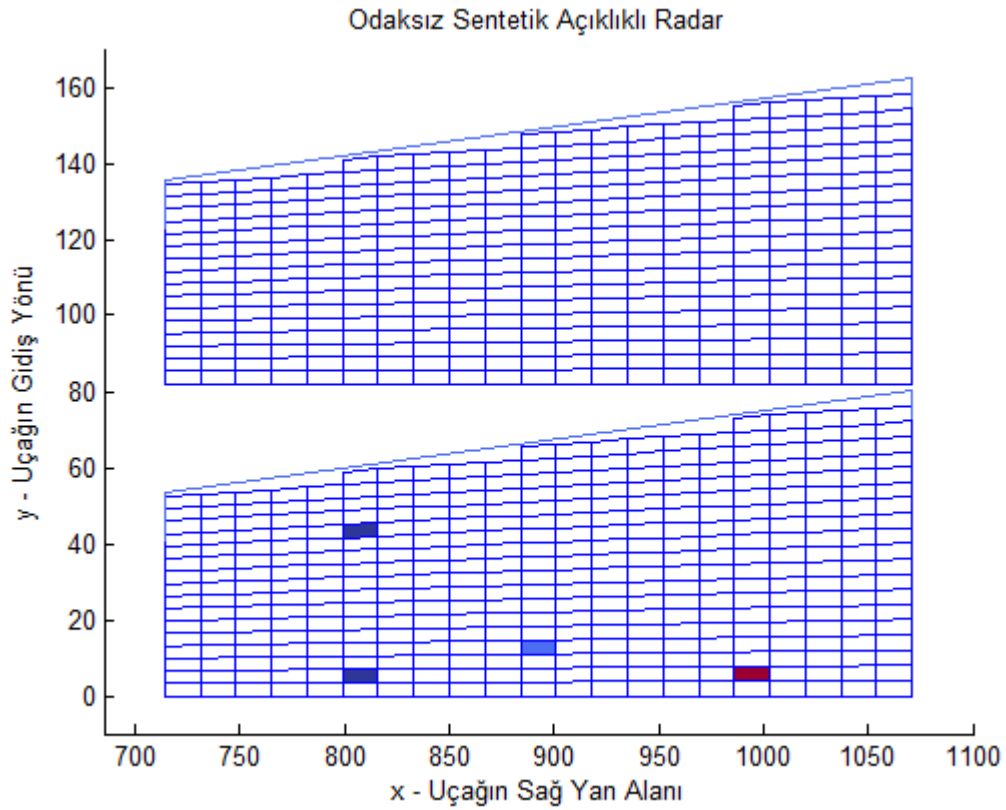
NOKTA	AÇI	MENZİL	DEĞER
1	0.48	801.3	49
2	2.98	801.7	45
3	1.01	900.14	47
4	0.38	1000	54

Bu noktalardan yansıyan darbeler modellenip veri matrisinde biriktirilir ve anlatıldığı üzere işlemlerden geçirildikten sonra bu noktalara ait hesaplanan sonuçlar Çizelge 3.8’de verilmiştir.

**Çizelge 3.8:** Yansıyan Darbelerden Elde Edilen Bilgiler

NOKTA	MENZİL	DEĞER
4	807.5	49
2	807.5	45
3	892.5	47
4	994.5	132

Sentetik harita üzerinde sadece bir hüzme genişliği kadar alan aydınlatılmış ve sonuçları tabloda verilmiştir. Sonuçta oluşan görüntü ise Şekil 3.14'de verilmiştir.



**Şekil 3.14:** Odaksız SAR Modu Kullanılarak Oluşturulan Harita

Şekil 3.14'de dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise çözünürlük hücrelerinin boyutunun değişmesidir. Hem RBGM hemde DBS modunda çapraz menzil

Çözünürlüğü menzil artışıyla beraber kötüleşmiştir. Yani özünürlük hücreleri menzil arttıkça büyümüşür. Odaksız SAR modunda da durum farklı değildir ancak teorik yönlerinin anlatıldığı bölümlerden de hatırlanacağı üzere odaksız SAR modunda çözünürlük menzilin karekökü ile orantılıdır. Bu sebeple Şekil 3.14 dikkatle incelendiğinde menzilin en düşük olduğu yerde 16 çözünürlük hücresi varken en yüksek olduğu yerde ise 20 çözünürlük hücresi görölmektedir.

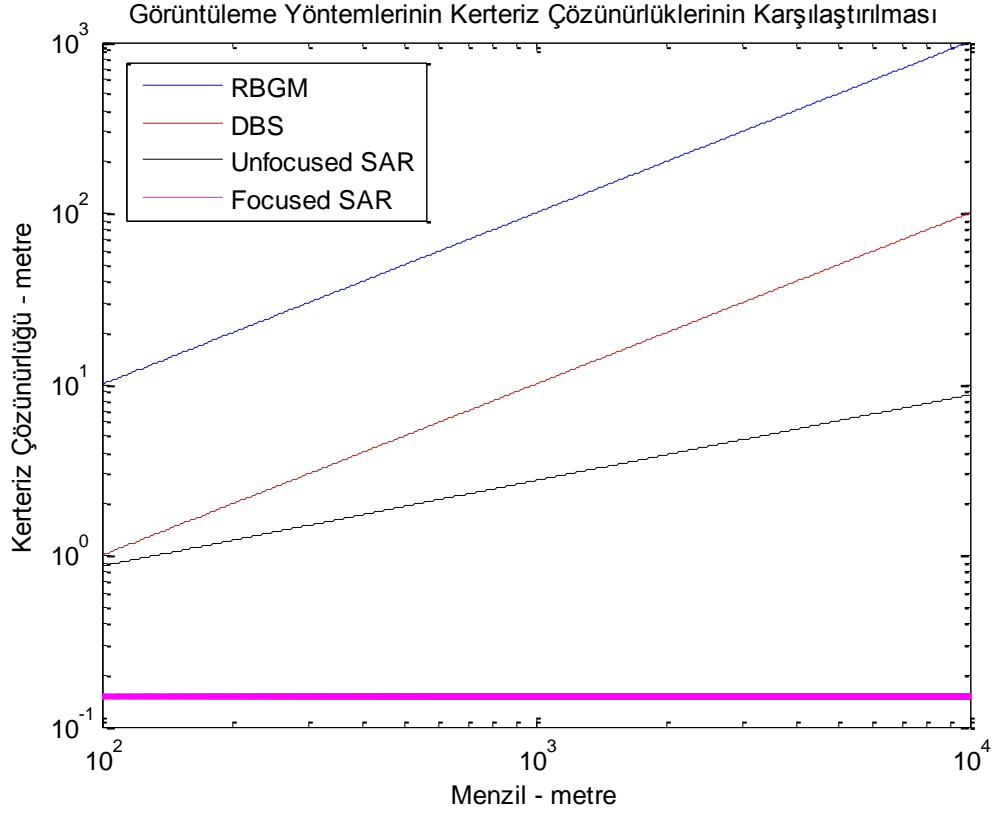
#### 4. GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Görüntüleme modları anlatılırken birçok kez tekrarlandığı üzere menzil çözünürlükleri açısından hiçbir modun veya altmodun birbirine karşı herhangi bir üstünlüğü yoktur. Menzil çözünürlüğünü iyileştirmek için yapılan metod geleneksel radar sistemlerinde olandan farksızdır. Bu sebeple görüntüleme modları arasındaki temel farklılık çapraz menzil çözünürlüğüdür. Bunun dışında RBGM modu ve DBS modunda yer taraması yaparken anten mekanik olarak hareket edip belirli açı aralıklarına darbeler gönderebilirken SAR modlarında ise anten sabit tutulmaktadır.

RBGM modu ve DBS modu kullanılarak aynı bölgenin görüntüleri elde edildiğinde görüntülerin çözünürlük kalitesi açısından büyük farklılıkları olduğu görülmektedir. Bunun sebebi modların ulaşabilecekleri en yüksek çapraz menzil çözünürlüklerinin farklı olmasıdır. Bu farklılık DBS modunu RBGM moduna göre daha avantajlı duruma getirmiştir. Hüzme Keskinleştirme Oranı olarak detaylı bir şekilde anlattığımız bu oran tam olarak DBS modunun RBGM moduna göre kaç kat daha iyi çözünürlükte görüntü oluşturabileceğini göstermektedir. Ancak DBS moduda çapraz menzil çözünürlüğü açısından SAR'a göre dezavantajlı konumdadır. Bunu menzil değişimine bağlı olarak çapraz menzil çözünürlüklerin değişimlerini gösteren grafik ile anlamak mümkündür.

Şekil 4.1'deki grafik menzil artışının modların çapraz menzil çözünürlüklerini nasıl etkilediğini göstermektedir. Grafiğe bakıldığında çapraz menzil çözünürlüğü en iyi olan modun odaklı SAR; en düşük olan modun ise RBGM modu olduğu görülmektedir.

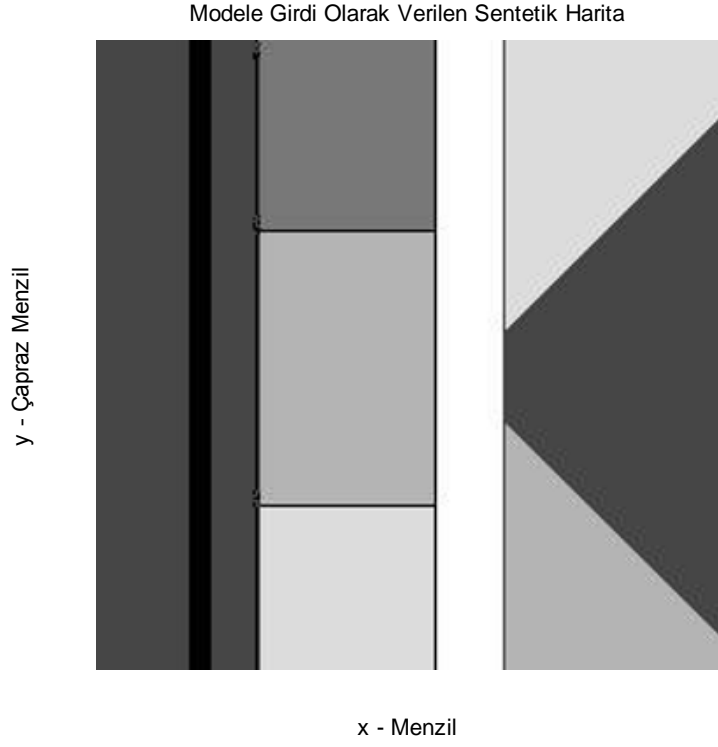
Dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise odaklı Sentetik Açıklıklı Radar modunun menzil artışına rağmen çözünürlüğünün hiç değişmediğidir. Diğer tüm modlarda menzildeki artış çapraz menzil çözünürlüğünü kötüleştirse de odaklı SAR modunda etkilememektedir. Odaksız SAR modunda ise çapraz menzil çözünürlüğünün menzildeki artışa bağlı olarak daha yavaş kötüleşmesinin sebebi ise menzilin karekökü ile doğru orantılı olmasından kaynaklanmaktadır.



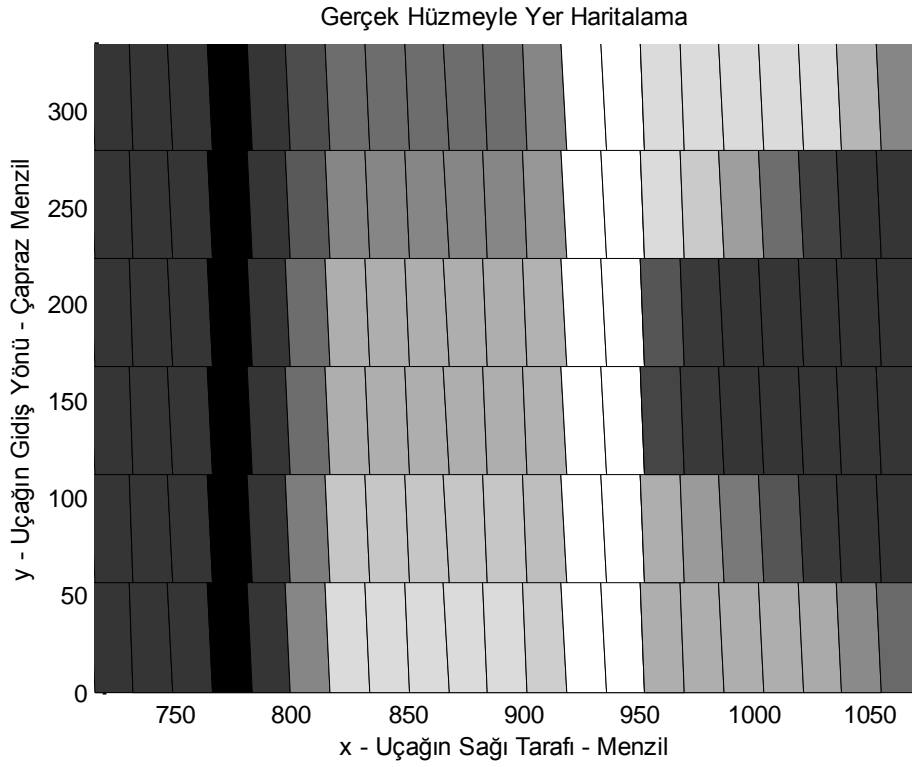
**Şekil 4.1:** RBGM-DBS-SAR Performans Karşılaştırması

Modların çapraz menzil çözünürlüklerini grafik olarak karşılaştırmanın yanında aynı alanları tarayarak çıkan sonuçları gözlemlemek görüntüleme modlarını karşılaştırmalı incelemek adına değerlendirmesi daha kolay bir yöntem olacağı için bu bölümde benzetimlere girdi olarak aynı sentetik haritalar verilmiştir. Her bir modun modellenmesine girdi olarak verilen aynı sentetik haritanın sonuçları ise sırasıyla paylaşılmıştır.

Şekil 4.2'de ve Şekil 4.6'da oluşturulan sentetik haritalar neredeyse tamamı yansıtıcılık katsayısı sıfırdan farklı noktalardan oluşmaktadır. Modların karşılaştırmasını daha iyi yapabilmek adına tüm modlarda anten uçağın gidiş yönüne dik olacak şekilde sabit tutulmuş ve sadece uçağın hareketi sayesinde tarama yapılmıştır. Böylelikle uçağın aydınlatabildiği mesafe en düşük menzil değeri olan 715 metre ile en yüksek menzil değeri olan 1072 metre arasındadır.



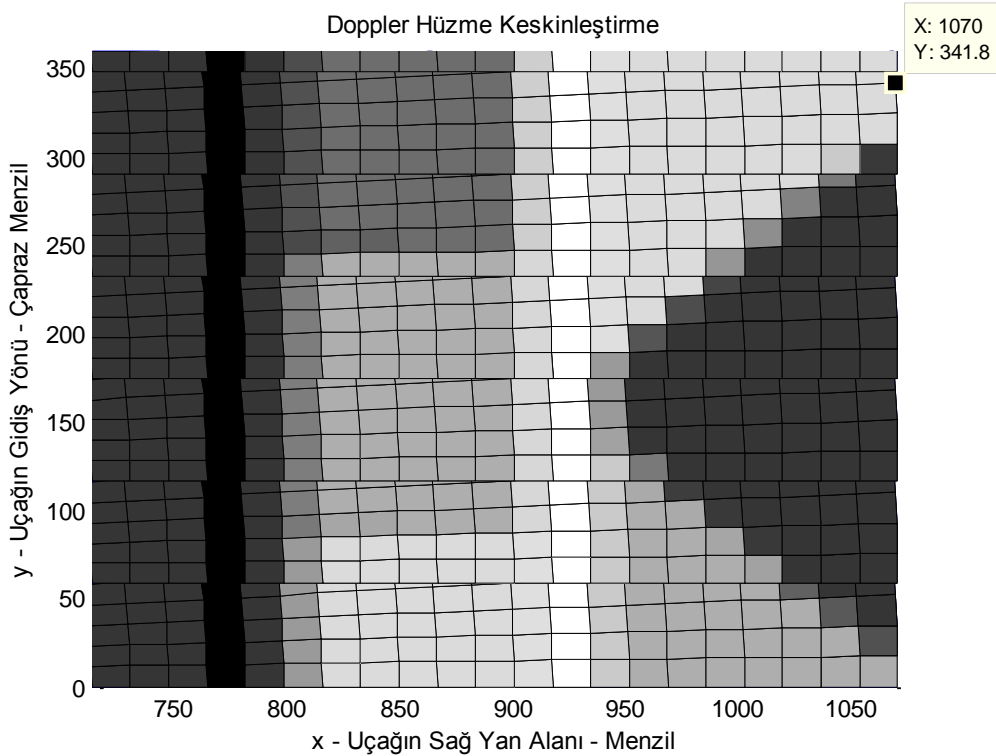
**Şekil 4.2:** Benzetimlere Girdi Yapılan Sentetik Harita – 1



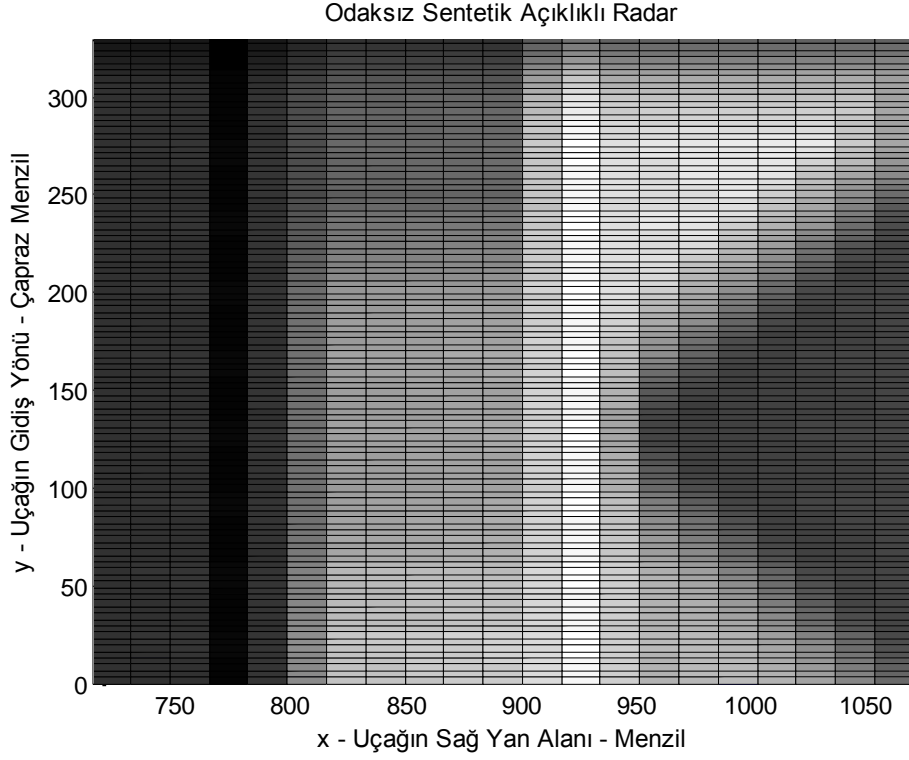
**Şekil 4.3:** RBGM Modu Çıktısı – 1

Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama (RBGM) modunda diğer tüm modlarda da olduğu gibi menzil çözünürlüğü 17 metredir. Çapraz menzil çözünürlüğü ise aydınlatılan en düşük menzilde yaklaşık 56 metre iken en yüksek menzilde ise yaklaşık 84 metre civarındadır. Ancak taranan haritada boşluklar kalmaması adına her aydınlatılan alan bir önceki aydınlatılan alandan 56 metre kadar ileridedir. Bu sebeple Şekil 4.3’de tüm çözünürlük hücreleri birbiri ile aynı büyüklükte görünmektedir.

Doppler Hüzme Keskinleştirme (DBS) modunda da menzil çözünürlüğü 17 metredir. Ancak çapraz menzil çözünürlüğü RBGM moduna göre yaklaşık 5 kat daha iyidir. Şekil 3.9’da da görüldüğü üzere 90° civarında iyileştirme katsayısı yaklaşık olarak 5’tir. Bu da 90° civarında bir hüzme içerisine aynı menzilde yaklaşık 5 tane çözünürlük hücresi düştüğünü göstermekte ve Şekil 4.4’ün bir nevi doğrulamasını yapmaktadır. Sonuç olarak çapraz menzil çözünürlüğü en düşük menzilde yaklaşık 11 metredir. Menzil arttıkça çözünürlük hücreleri büyümektedir ve en yüksek menzilde çapraz menzil çözünürlüğü 17 metre civarında olmaktadır.



Şekil 4.4: DBS Modu Çıktısı – 1



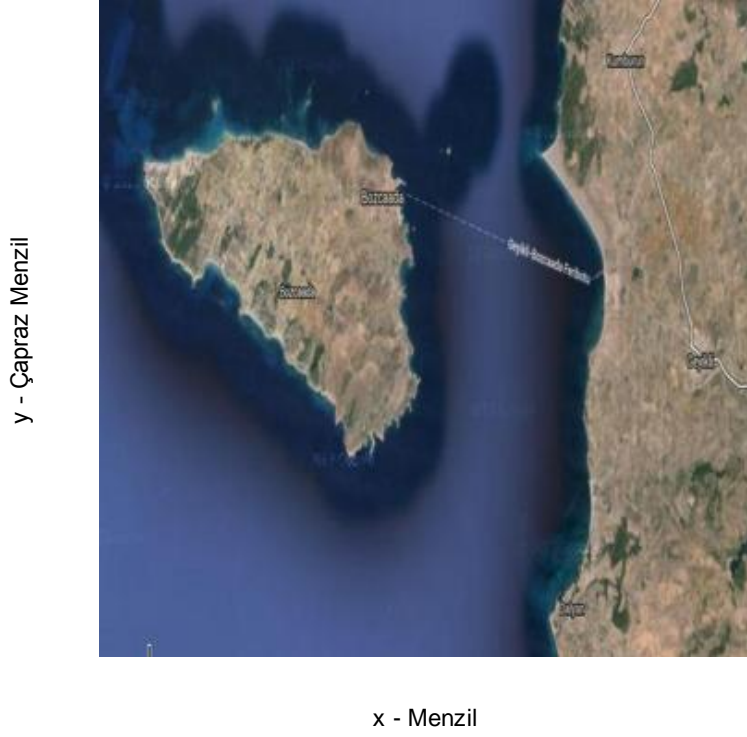
**Şekil 4.5:** Odaksız SAR Modu Çıktısı – 1

Odaksız Sentetik Açıklıklı Radar benzetimi ise benzetimi yapılan 3 yöntem içerisinde çözünürlük ve görüntü kalitesi açısından en iyi sonuçları vermiştir. Odaksız SAR modu çapraz menzil çözünürlüğü açısından DBS modundan da RBGM modundan da daha iyi durumdadır ve çapraz menzil çözünürlük değeri yaklaşık 2.5 metredir. Şekil 4.5'te de görüldüğü üzere çözünürlük hücreleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'deki çözünürlük hücrelerinden daha küçüktür. Bu sebeple görüntü kalitesi daha yüksektir.

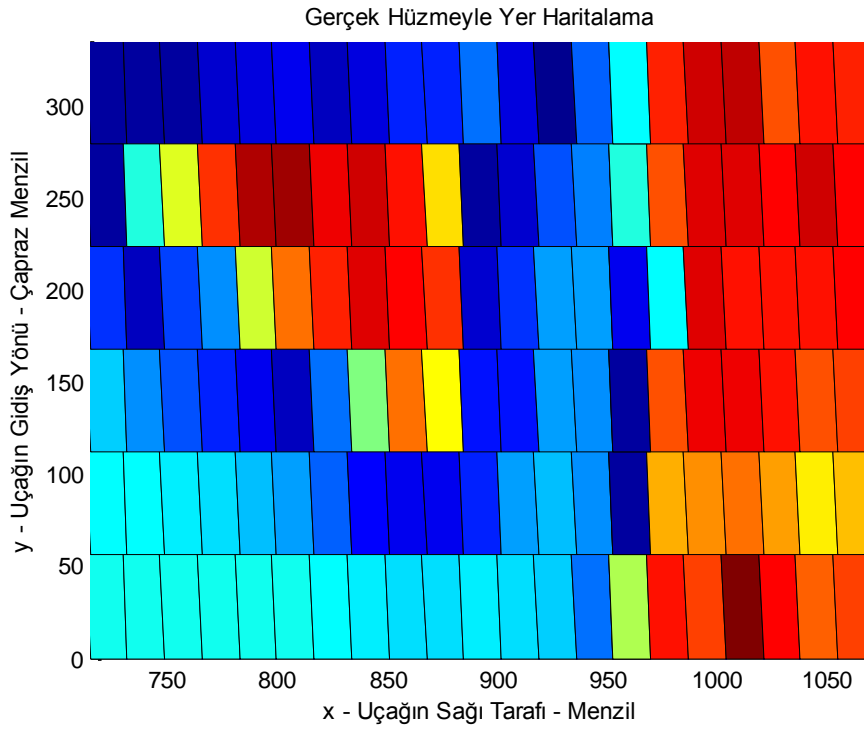
Şekil 4.6' da Bozcaada ve Geyikli kıyısının olduğu alan benzetimlere girdi olarak verilmiştir. Haritadaki piksel değerleri yansıtırlık katsayısı olarak sisteme girdi yapmaktadırlar.



Modele Girdi Olarak Verilen Harita

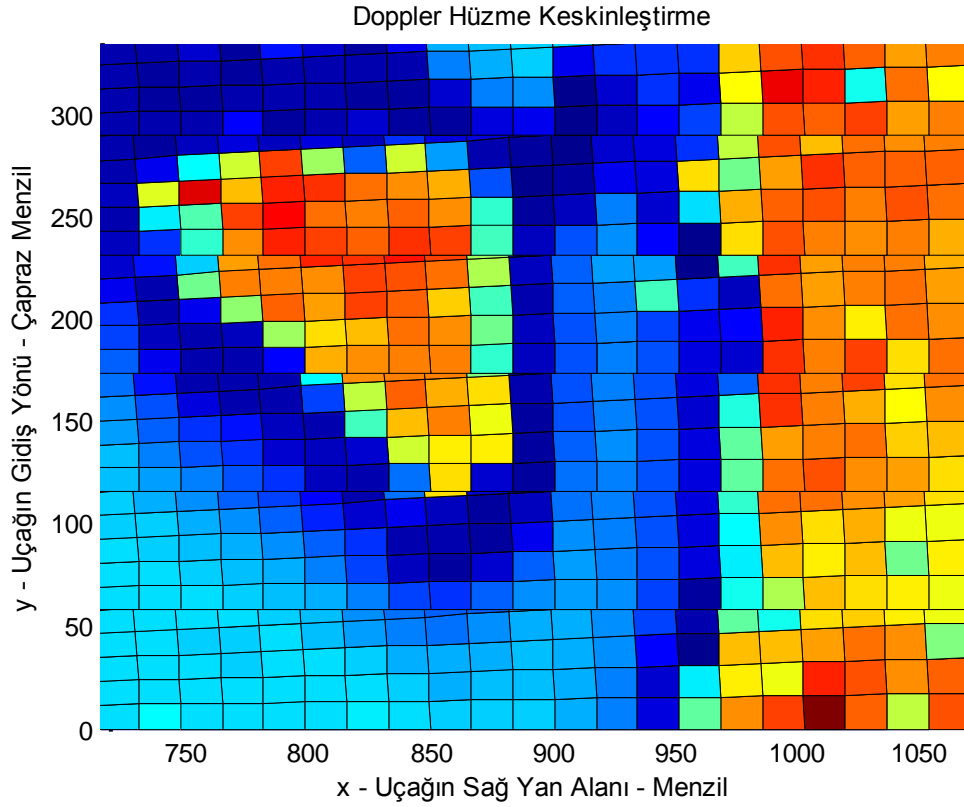


Şekil 4.6: Benzetimlere Girdi Yapılan Sentetik Harita – 2



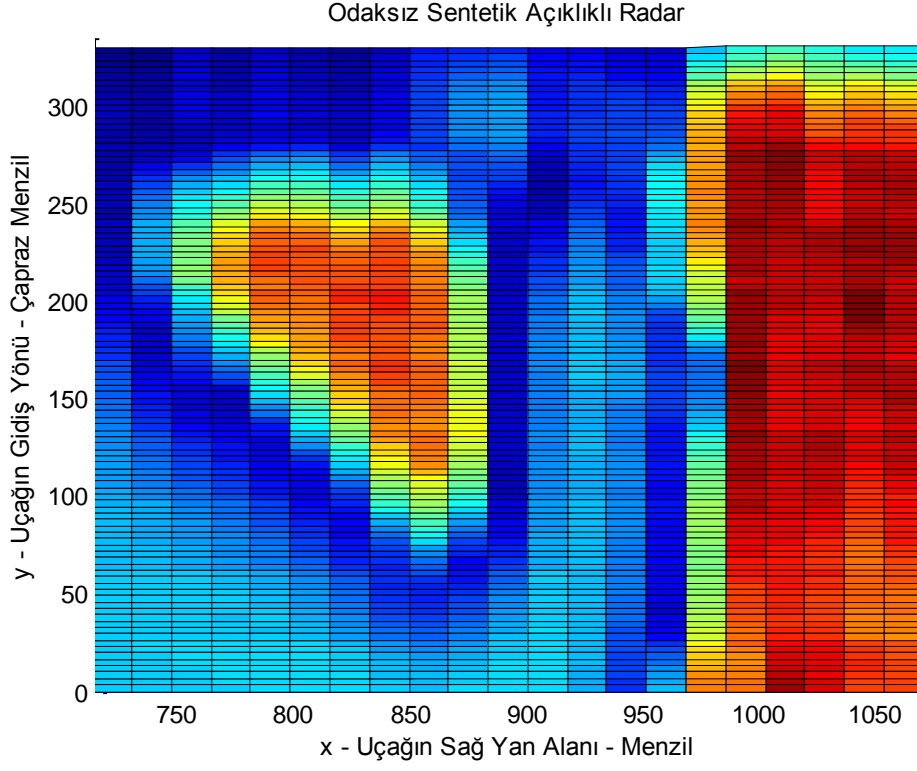
Şekil 4.7: RBGM Modu Çıktısı – 2

Şekil 4.7’de Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama modunun benzetim sonucu verilmiştir. Çapraz menzil çözünürlüğünün ciddi seviyede düşük olmasından dolayı görüntü sert geçişlerden oluşmaktadır. Ancak yine de denizin derinleştiği yerler, kıyı şeridi ve ada görüntüden anlaşılabilir. Ancak yine de denizin derinleştiği yerler, kıyı şeridi ve ada görüntüden anlaşılabilir.



**Şekil 4.8:** DBS Modu Çıktısı – 2

Şekil 4.8’de Doppler Hüzme Keskinleştirme modunun benzetim sonucu verilmiştir. Uçağın uçuş yönüne göre anten tam sağa baktırılarak tarama ve harita çıkarımı yapıldığı için çapraz menzil çözünürlüğü olabilecek en iyi değerlerdedir ve en düşük menzilde yaklaşık 11 metredir. Bu sebeple RBGM moduna göre daha kaliteli bir görüntü elde edilmiştir. Kıyı şeridi ve ada gerçek haritaya şeklen benzemektedir. Denizin derinleştiği kısımlardaki renk ton farkı da Şekil 4.8’e bakılarak anlaşılabilir.



**Şekil 4.9:** Odaksız SAR Modu Çıktısı – 2

Odaksız SAR modu benzetiminin çıktısı Şekil 4.9'da verilmiştir. Benzetimi yapılan modlar arasında çapraz menzil çözünürlüğü en iyi olan mod olması sebebiyle en kaliteli görüntü beklenildiği gibi bu modda elde edilmiştir.

## 5. SONUÇLAR

Tez kapsamında muharip uçaklarda kullanılan görüntüleme yöntemleri olan Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama (RBGM), Doppler Hüzme Keskinleştirme (DBS), Odaksız Sentetik Açıklıklı Radar (unfocused SAR) ve Odaklı Sentetik Açıklıklı Radar (focused SAR) incelenmiştir. İkinci bölümde yöntemlerin ortak noktası olan menzil çözünürlüğü ile ilgili teknik detaylar paylaşılmış ve daha sonrada tüm yöntemlerin algoritmik özellikleri hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde ise bu yöntemlerden ilk üçünün MATLAB ortamında benzetimleri yapılarak görüntüleme yöntemlerinin simülasyonları oluşturulmuştur.

Gerçek Hüzmeyle Yer Haritalama (RBGM) modu algoritmik detaylarının anlatıldığı ikinci bölümde de vurgulandığı gibi çözünürlük olarak tüm diğer modlardan geridedir. Bu modda herhangi bir sinyal işleme işlemi olmaması sebebiyle modelleme sonucunda da çapraz menzil çözünürlüğünün oldukça düşük olduğu görülmektedir. Görüntülerin sadece aydınlatılan açıdan yansıyan sinyalin genlik bilgisi kullanılarak oluşturulmasından dolayı da görüntüler taranan alan hakkında çok genel bir bilgi verebilmektedir.

Doppler Hüzme Keskinleştirme Modu (DBS) ise çapraz menzil çözünürlüğü anlamında RBGM'den daha üstün bir noktadadır. Bu modda uçağın kendi hareketi sebebiyle oluşan taranan bölgeden yansıyan sinyallerin üzerindeki farklı Doppler bilgisi kullanılarak aynı hüzme içerisinde farklı çapraz menzil hücreleri oluşturulabilmektedir. Bu da çözünürlüğü iyileştirerek daha işlevsel görüntüler elde edilmesini sağlamaktadır. Yapılan benzetimde de görüntülerin çözünürlük anlamında ciddi oranda iyileştiği görülmektedir.

Odaksız Sentetik Açıklıklı Radar modunda ise hem RBGM hem de DBS moduna göre daha iyi çözünürlükte görüntüler elde edilmektedir. Simülasyon sonuçlarına bakıldığında da benzetimi yapılan modlar içerisinde odaksız SAR modu en kaliteli görüntüleri vermiştir.

Algoritmik olarak ikinci bölümde detaylı olarak anlatılan odaklı Sentetik Açıklıklı Radar modu ise bu tez kapsamında modellenmemiştir. Odaklama işleminin ciddi bir işlem yükü getirmesi sebebiyle odaklı SAR modunun benzetimi yapılmayarak ileri bir çalışma olarak tek başına incelenmesi önerilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Blasband. C., Jorch. W., Sigda. M., *Real-Time Imaging Radar Simulation*, Photon Research Associates, Inc. **1998**
- [2] Moir. I., Seabridge. A., *Military Avionics Systems – Aerospace Series*, AIAA Education, **2006**
- [3] Zhizhong Zhang, *The Principle and Technique of Doppler Beam Sharpening (DBS)*, International Conference on Radar (CIE), Beijing, China, **1991**
- [4] Li. M., Wei. H., Sun. J., Wu. Y., *Keeping Sharpening Ratio Constant For DBS of Airborne Mechanic Scanning Radar*, IET Radar Conference, **2009**
- [5] Wiley, Carl A., *Pulsed Doppler Radar Methods and Apparatus*, United State Patent Office, 3,196,436, Patented July 20, **1965**
- [6] Ulaby. F., Moore. R., Fung. A., *Microwave Remote Sensing – Volume II*, Artech House, **1986**
- [7] High Angular Resolution Techniques,  
<http://www.acfr.usyd.edu.au/pdfs/training/sensorSystems/09Lec%20-%20High%20Angular%20Resolution.pdf> (Eylül, **2011**).
- [8] Mark A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, McGraw-Hill, **2005**
- [9] Donald R. Wehner, *High - Resolution Radar*, 2nd Eds, Artech House, **1995**
- [10] Kulpa, K., Nalecz, M., Sliwa, E., *Algorithms for Radar Signal Processing in DBS Systems*, Proc. Nat. Conf. Circuit Theory and Electronic Networks, Szczyrk, Poland, **1992**
- [11] Pietrzyk, G., Samczynski, P., Gorzelanczyk, A., Kulpa, K., *Real-time Implementation of Doppler Beam Sharpening Technique with Simple Motion Estimation*, European Radar Conference, Amsterdam, **2004**
- [12] Skolnik, M. I., *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill, **2001**

- [13] Çetin, M, *Feature-enhanced Synthetic Aperture Radar*, Ph.D. Dissertation, Boston University College of Engineering, **2001**
- [14] Curlander, J. C., McDonough, R.N., *Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing*, John Wiley & Sons, **1991**.
- [15] Yavuz Konuşlu, A., *SAR Noktasal Işık Modu Benzetimi ve Kalman Filtre Kullanarak Görüntü Geriçatımı*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2007**.
- [16] Soumekh, M, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms*, John Wiley & Sons, **1999**.
- [17] Tait. P., *Introduction to Radar Target Recognition*, **2009**
- [18] George W. Stimson , *Introduction to Airborne Radar* , 2nd Eds, Scitech Publishing, **1998**
- [19] Sun, H., Liu, G., Gu, H., Su, W., *The Development of DBS Imaging Based on Airborne Pulse Doppler Radar in China*, Microwave Journal, **2001**
- [20] Schleher. D. Curtis., *MTI and Pulsed Doppler Radar With MATLAB*, Artech House, **2010**
- [21] Wiley, Carl A., *Synthetic Aperture Radars, A Paradigm for Technology Evolution*, IEEE Transactions of Aerospace and Electronic Systems, Volume Aes-21, No.3, **1985**.
- [22] Munson, Jr. D. C., Visentin, R.L., *A Signal Processing View of Strip-Mapping Synthetic Aperture Radar*, IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, Volume 37, No.12, pp.2131-2147, **1989**.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Emrah ONAT

Doğum Yeri : Kayseri

Medeni Hali : Evli

E-posta : [eonat87@yahoo.com](mailto:eonat87@yahoo.com)

Adresi : Atıf Bey Mah. Altındağ Cad. Gökçenefe Sitesi B2  
Blok Daire 36 Altındağ / ANKARA

### Eğitim

Lise : 2001-2004, Kayseri Fen Lisesi

Lisans : 2004-2009, Boğaziçi Üniversitesi,

Elektrik - Elektronik Mühendisliği

Lisans : 2007-2008, Oklahoma Üniversitesi (Değişim Öğrencisi),

Elektrik - Bilgisayar Mühendisliği

### İş Deneyimi

2009-2012 : TÜBİTAK - BİLGEM / İLTAREN, Araştırmacı

2013- : SDT A.Ş. (Space & Defence Technologies A.Ş.),  
Uzman Sistem/Donanım Mühendisi

## Yabancı Dil

Yabancı Dil : İngilizce

## Tez Dışı Yayınlar

- Onat, E., Serin, M., *Implementation of Digital Pulse Doppler Radar Signal Generator and Receiver*, SIU **2011**
- Onat, E., Özdil, Ö., İspir, M., Serin, M., *Implementation of Doppler Noise Jamming Techniques Using DRFM*, SIU **2012**
- Özdil, Ö., İspir, M., Onat, E., Yıldırım, A., *Automated Fixed-Point Precision Optimization*, SIU **2012**
- Özdil, Ö., İspir, M., Onat, E., Yıldırım, A., *Implementation of a FPGA-based Overlap-Add Filter*, SIU **2012**
- İspir, M., Özdil, Ö., Onat, E., Yıldırım, A., *K-Distributed Radar Clutter Sequence Generator on FPGA*, SIU **2012**
- Özdil, Ö., İspir, M., Onat, E., Yıldırım, A., *Implementation of a FPGA-based FFT Convolution*, IET International Conference on Radar Systems (Radar **2012**)
- Serin, M., Onat, E., Orduyılmaz, A., Yıldırım, A., Şahin, M.A., *Amplitude and Phase Difference Tolerance Analysis of Cross-Eye Jamming Technique*, SIU **2013**