
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

SENTETİK AÇIKLIKLI RADARLARIN GÖRÜNTÜLEME PERFORMANSINI ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN MODELLENMESİ

Fatih Kağan DURMAZ

YÜKSEK LİSANS
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EYLÜL 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Fatih Kağan DURMAZ

16/09/2021

SENTETİK AÇIKLIKLI RADARLARIN GÖRÜNTÜLEME PERFORMANSINI ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN MODELLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Fatih Kağan DURMAZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2021

ÖZET

Sentetik Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar - SAR), günümüzde askeri ve sivil pek çok alanda kullanılan, radar ile görüntüleme sistemidir. Bu sistemlerin performansının ana bileşeni görüntüleme yeteneği olduğundan, radar tasarımı yapılırken görüntüleme performansını etkileyen faktörlerin değerlendirilmesi gerekir. Bu çalışmada öncelikle radar görüntüleme alanı içerinde bulunan bir nokta hedefin SAR görüntüsünün benzetimi, MATLAB simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu benzetimde lineer frekans modülasyonu dalga formu kullanılarak hedef aydınlatılmış ve hedef özelliklerine göre geri yansıyan sinyaller "heterodin" almaç yapısı ile sinyal işleme adımlarına getirilmiştir. Sinyal işleme adımları içerisinde sırasıyla uyumlu filtreleme ile menzil sıkıştırma ve geri projeksiyon yöntemi ile çapraz menzil işleme adımları uygulanarak nokta hedefin SAR görüntüsü oluşturulmuştur. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında, SAR sisteminin performansını etkileyen donanım kaynaklı faktörlerden gürültü sayısının ve grup gecikmesinin bozucu etkileri; hedefin menzil ve çapraz menzil doğruluğu, menzil ve çapraz menzil çözünürlüğü, maksimum yan kulak oranı ve SAR görüntüsü üzerinden incelenmiştir.

Bilim Kodu	:	90524
Anahtar Kelimeler	:	Sentetik Açıklıklı Radar (SAR), SAR görüntüleme performansı, Gürültü Sayısı, Grup Gecikmesi
Sayfa Adedi	:	83
Danışman	:	Prof. Dr. Nursel AKÇAM

MODELING THE FACTORS AFFECTING THE IMAGING PERFORMANCE OF SYNTHETIC APERTURE RADARS

(M. Sc. Thesis)

Fatih Kağan DURMAZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2021

ABSTRACT

Synthetic Aperture Radar (SAR) is a radar imaging system used in many military and civilian areas today. Since the main component of the performance of these systems is the imaging capability, the factors affecting the imaging performance should be evaluated while designing the radar. In this study, first of all, the simulation of the SAR image of a point target deployed in the radar imaging area is handled in the MATLAB simulation environment. In this simulation, the target is illuminated by using the linear frequency modulation waveform and the reflected signals according to the target properties are brought to the signal processing steps with the heterodyne receiver structure. Within the signal processing steps, the SAR image of the point target is created by performing matched filtering for range compression and back projection method for cross range processing is implemented respectively. In the later parts of the study, the distortion effects of noise figure and group delay, which are among the hardware-induced factors affecting the performance of the SAR system, are examined on the target's range and cross-range accuracy, range and cross-range resolution, peak side lobe ratio and SAR image.

Science Code	:	90524
Key Words	:	Synthetic Aperture Radar (SAR), SAR imaging performance, Noise Figure, Group Delay
Page Number	:	83
Supervisor	:	Prof. Dr. Nursel AKÇAM

TEŞEKKÜR

Öncelikle, bu tezin hazırlanması sırasında bana her konuda yardımcı olan saygıdeğer hocam ve danışmanım Prof. Dr. Nursel AKÇAM'a teşekkürlerimi sunarım.

Aynı zamanda, yüksek lisans çalışmalarımı destekleyen ASELSAN A.Ş.'ye ve ASELSAN REHİS Hava Platformu Radarları Sistem Mühendisliği Müdürlüğü bölümündeki çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca beni bugünlere getiren, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme sonsuz saygı ve sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

1. GİRİŞ 1

2. SAR KONSEPTİ 9

2.1. SAR Geometrisi 9

2.2. SAR Veri Toplama, Çözünürlük ve Darbe Tekrarlama Frekansı 12

2.2.1. SAR veri toplama 12

2.2.2. Çözünürlük 14

2.2.3. Darbe tekrarlama frekansı 19

3. SAR SİNYAL İŞLEME 23

3.1. SAR Dalga Biçimi 23

3.1.1. LFM dalga biçimi 23

3.2. Radar Menzil Denklemi 26

3.3. Alıcı Termal Gürültüsü 28

3.4. Sinyal Gürültü Oranı 29

3.5. “Heterodin” Almaç (HA) 31

3.6. SAR Görüntüleme 34

3.6.1. Uyumlu filtreleme ile menzil işleme 34

3.6.2. Geri projeksiyon yöntemi ile çapraz menzil işleme 38

4. SAR GÖRÜNTÜLEME PERFORMANSINI ETKİLEYEN BOZUCU ETMENLER 43

Sayfa

4.1. Gürültü Sayısı ve SAR Görüntüleme Performansına Etkisi 43

4.2. Grup Gecikmesi ve SAR Görüntüleme Performansına Etkisi 58

5. SONUÇ 79

KAYNAKLAR 81

ÖZGEÇMİŞ 83

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Simülasyon kapsamında kullanılan parametreler 45

Çizelge 4.2. Gürültü sayısının SAR görüntüsü üzerindeki etkileri..... 55

Çizelge 4.3. Grup gecikmesinin SAR görüntüsü üzerindeki etkileri..... 69

Çizelge 4.4. Bilgisayar donanımı özellikleri..... 77

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Sentetik açıklık kavramı 10

Şekil 2.2. Şerit haritalama SAR 11

Şekil 2.3. Tarama SAR 12

Şekil 2.4. Nokta aydınlatma SAR 12

Şekil 2.5. Geleneksel darbeli radar 13

Şekil 2.6. Tek darbenin hızlı zaman örnekleri 13

Şekil 2.7. Bir evre uyumlu işlem aralığındaki hızlı zaman-yavaş zaman matrisi 14

Şekil 2.8. Çözünürlük Hücreleri 14

Şekil 2.9. Huzme geometrisi 15

Şekil 2.10. Çözünürlük hücresi geometrisi 17

Şekil 2.11. Huzme içerisindeki bir saçının menzil zaman grafiği 18

Şekil 2.12. Saçıcının Doppler geçmişi 18

Şekil 2.13. Sentetik açıklık uzunluğu 19

Şekil 2.14. Menzil Belirsizliği 20

Şekil 2.15. Doppler geçmişi hesabı 21

Şekil 3.1. LFM dalga biçimli darbe 24

Şekil 3.2. LFM dalga biçimi anlık frekans-zaman grafiği 25

Şekil 3.3. Zaman-bant genişliği çarpımı karşılaştırması 26

Şekil 3.4. HA Yapısı 31

Şekil 3.5. Uyumlu filtre uygulaması 35

Şekil 3.6. Alınan LFM sinyalin frekans alanı gösterimi 36

Şekil 3.7. Uyumlu filtrenin frekans alanında ifadesi 36

Şekil 3.8. Menzil grafiği 37

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.9. Uyumlu filtreleme öncesi görüntü 38

Şekil 3.10. Nokta hedefin uyumlu filtre çıktısı görüntüsü 38

Şekil 3.11. Görüntü pikselleri 39

Şekil 3.12. Geri projeksiyon yöntemi gösterimi 40

Şekil 3.13. Nokta hedefin SAR görüntüsü 41

Şekil 3.14. Geri projeksiyon yöntemi sözde kodu 41

Şekil 4.1. İki kademeli yapıda bir sistem 44

Şekil 4.2. Elektromanyetik dalgaların tek yol atmosferik kayıpları 46

Şekil 4.3. 15 dB gürültü sayısı olan bir sistemin nokta hedef SAR görüntüsü 47

Şekil 4.4. Gürültü Sayısı 15 dB olan sistemin çapraz menzil çözünürlüğü kontrolü -1 48

Şekil 4.5. Gürültü Sayısı 15 dB olan sistemin çapraz menzil çözünürlüğü kontrolü -2 49

Şekil 4.6. Gürültü Sayısı 15 dB olan sistemin menzil çözünürlüğü kontrolü -1 50

Şekil 4.7. Gürültü Sayısı 15 dB olan sistemin menzil çözünürlüğü kontrolü -2 50

Şekil 4.8. 25 dB gürültü sayısı olan bir sistemin nokta hedef SAR görüntüsü 51

Şekil 4.9. Gürültü Sayısı 25 dB olan sistemin çapraz menzil çözünürlüğü kontrolü -1 52

Şekil 4.10. Gürültü Sayısı 25 dB olan sistemin çapraz menzil çözünürlüğü kontrolü -2 53

Şekil 4.11. Gürültü Sayısı 25 dB olan sistemin menzil çözünürlüğü kontrolü -1 54

Şekil 4.12. Gürültü Sayısı 25 dB olan sistemin menzil çözünürlüğü kontrolü -2 54

Şekil 4.13. 30 dB gürültü sayısı olan bir sistemin nokta hedef SAR görüntüsü 56

Şekil 4.14. 35 dB gürültü sayısı olan bir sistemin nokta hedef SAR görüntüsü 56

Şekil 4.15. 40 dB gürültü sayısı olan bir sistemin nokta hedef SAR görüntüsü 57

Şekil 4.16. 45 dB gürültü sayısı olan bir sistemin nokta hedef SAR görüntüsü 57

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.17. Filtreleme yapısı 58

Şekil 4.18. BPF genlik-frekans grafiği 60

Şekil 4.19. BPF grup gecikmesi-frekans grafiği 60

Şekil 4.20. BPF frekans-faz grafiği 61

Şekil 4.21. Grup gecikmesiz sistemin SAR görüntüsü 62

Şekil 4.22. Grup gecikmeli sistemin SAR görüntüsü 63

Şekil 4.23. Grup gecikmesiz sistemin menzil çözünürlüğü kontrolü -1 64

Şekil 4.24. Grup gecikmesiz sistemin menzil çözünürlüğü kontrolü -2 65

Şekil 4.25. Grup gecikmeli sistemin menzil çözünürlüğü kontrolü -1 65

Şekil 4.26. Grup gecikmeli sistemin menzil çözünürlüğü kontrolü -2 66

Şekil 4.27. Grup gecikmesiz sistemin çapraz menzil çözünürlüğü kontrolü -1..... 67

Şekil 4.28. Grup gecikmesiz sistemin çapraz menzil çözünürlüğü kontrolü -2..... 68

Şekil 4.29. Grup gecikmeli sistemin çapraz menzil çözünürlüğü kontrolü -1..... 68

Şekil 4.30. Grup gecikmeli sistemin çapraz menzil çözünürlüğü kontrolü -2..... 69

Şekil 4.31. Grup gecikmesiz sistemin iki hedefli SAR Görüntüsü..... 71

Şekil 4.32. Grup gecikmesiz sistemin iki hedefli menzil çözünürlüğü kontrolü-1..... 72

Şekil 4.33. Grup gecikmesiz sistemin iki hedefli menzil çözünürlüğü kontrolü -2..... 72

Şekil 4.34. Grup gecikmeli sistemin iki hedefli SAR görüntüsü 73

Şekil 4.35. Grup gecikmeli sistemin iki hedefli menzil çözünürlüğü kontrolü -1 74

Şekil 4.36. Grup gecikmeli sistemin iki hedefli menzil çözünürlüğü kontrolü -2 74

Şekil 4.37. Grup gecikmeli sistemin yakın iki hedefli SAR görüntüsü 75

Şekil 4.38. Grup gecikmeli sistemin yakın iki hedefli menzil çözünürlüğü kontrolü -1..... 76

Şekil 4.39. Grup gecikmeli sistemin yakın iki hedefli menzil çözünürlüğü kontrolü -2..... 77

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 1.1. Süveyş kanal kazası sonrası kanalın SAR görüntüsü 1

Resim 2.1. SAR görüntüsü..... 10

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamalarıyla birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
c	Işık Hızı
dB	Desibel
GHz	Giga Hertz
Hz	Hertz
m	Metre
MHz	Mega Hertz
s	Saniye

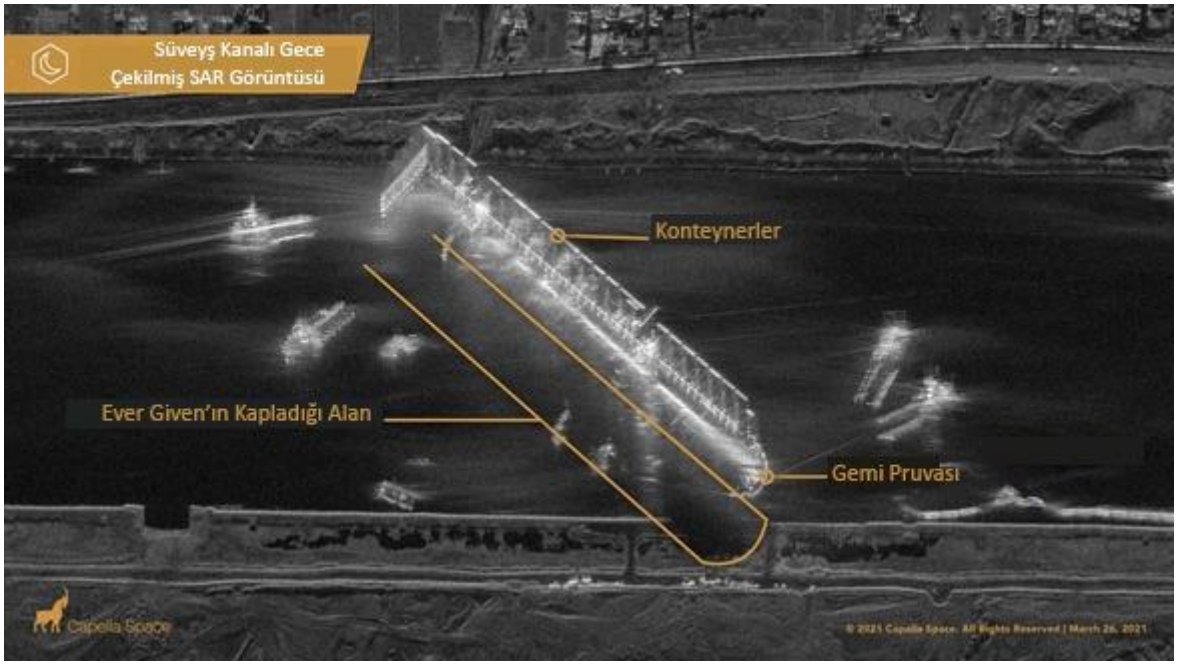
Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ADC	Analog-Digital Converter (Analog-Sayısal Dönüştürücü)
BPF	Band Pass Filter (Bant Geçirgen Süzgeç)
CW	Continous Wave (Sürekli Dalga)
FPGA	Field-Programmable Gate Array (Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri)
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave (Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga)
GD	Group Delay (Grup Gecikmesi)
I	In Phase
IF	Intermediate Frequency (Ara Frekans)
LFM	Linear Frequency Modulation (Lineer Frekans Modülasyonu)
LNA	Low Noise Amplifier (Düşük Gürültülü Yükselteç)
LO	Local Oscillator (Lokal Osilatör)
LPF	Low Pass Filter (Düşük Geçirgen Süzgeç)
MMW	Millimeter Wave (Milimetre Dalga)

Kısaltmalar	Açıklamalar
NF	Noise Figure (Gürültü Sayısı)
PLL	Phase-Locked-Loop (Faz Kilitlemeli Döngü)
PRI	Pulse Repetition Interval (Darbe Tekrarlama Aralığı)
PRF	Pulse Repetition Frequency (Darbe Tekrarlama Frekansı)
PSLR	Peak Sidelobe Ratio (En Yüksek Yan Kulak Oranı)
Q	Quadrature
RADAR	Radio Detection and Ranging (Radyo ile Tespit Etme ve Menzil Tayini)
RF	Radio Frequency (Radyo Frekansı)
RFADC	Radio Frequency Analog to Digital Converter (Radyo Frekans Analog-Sayısal Çevirici)
RFDAC	Radio Frequency Digital to Analog Converter (Radyo Frekans Sayısal-Analog Çevirici)
SAR	Synthetic Aperture Radar (Sentetik Açıklıklı Radar)
SNR	Signal to Noise Ratio (Sinyal-Gürültü Oranı)

1. GİRİŞ

Günümüzde sivil ve askeri pek çok alanda yer edinmiş olan radar sistemlerinin önemi, ihtiyaçların değişmesi ve teknolojinin gelişmesi ile daha da artmış; bu sistemler mühendisliğin hem teorik hem de pratik alanlarında ilgi odağı olmuştur. Radar sinyalleri, radyo dalgalarının hedefe gönderilmesi ve hedeften dönen bu dalgaların, sistemin kullanım amacına göre, genlik ve/veya faz bilgilerinin işlenmesi ile anlam kazanır. Genlik ve faz bilgilerinin bir arada kullanılması ile hem askeri hem sivil amaçlar için anlamlı bilgi üreten radar tekniklerinden birisi de Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) teknolojileridir.

SAR sistemlerinin askeri uygulamalarında keşif, gözetleme, hareketli hedef tespiti, savaş hasar değerlendirmesi, yer hedefi sınıflandırması ve tanımlama; sivil uygulamaları arasında ise haritacılık, arazi kullanım analizi, jeoloji, oşinografi, ormancılık, tarım, doğal afet değerlendirmesi gibi birçok uygulama alanı bulunur (Resim 1.1).



Resim 1.1. Süveyş kanal kazası sonrası kanalın SAR görüntüsü [1]

Tüm bu uygulama alanlarında kullanılan SAR sistemlerinin görüntü performanslarını etkileyen birçok değişken bulunur. Bu değişkenlerden bazıları radar sisteminde kullanılan donanımlardan, bazıları ise dünya üzerindeki kaçınılmaz etkilerden kaynaklanır. Bu çalışmada SAR görüntülerinin performansını etkileyen donanım kaynaklı etkilerden gürültü

sayısı ve grup gecikmesinin bozucu etkileri nokta hedef SAR sistem simülasyonunda incelenmiştir.

Çalışmada öncelikle SAR sistemlerinin özellikleri, temel kullanım modları, çalışma prensibi, simülasyonda kullanılacak dalga biçimi olan Lineer Frekans Modülasyonu (Linear Frequency Modulation - LFM) dalga biçiminin temelleri, "heterodin" almaç yapısının özellikleri ve radar menzil denklemi incelenmiştir.

Literatürde birçok alanda kullanılan bu SAR sistemleri çeşitli kitap ve makalelerde incelenmiş olup bunlardan birkaçı aşağıda sıralanmıştır.

Ding, Manlai, ve diğerleri, W frekans bandında bir mini-SAR sistemi insansız hava araçları için tasarlayarak sistem bileşenlerine kısaca değinmiştir. Çalışmada; Yüksek doğrusal özellikli frekans modülasyonu kaynağı, milimetre dalga kılavuzu anten, üç boyutlu entegrasyon ve hareket "kompanzasyonu" metotları W bandında SAR sistemini minimal boyutta, düşük ağırlıkta ve düşük güç tüketiminde gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, çok rotorlu insansız hava aracının taşıyabileceği W band mini-SAR prototipi geliştirilmiş ve SAR görüntüleme testi yapılmıştır. Test sonucunda, yüksek odaklama ve SNR performansına sahip SAR görüntüleri elde edilmiştir. Çalışma sonucunda, W bant mini SAR sistemlerinin, küçük çok rotorlu İHA platformları için uygun ve iyi bir performansa sahip olduğu gözlenmiştir [2].

Düşük maliyetli ve esnek uçuşun avantajları nedeniyle, küçük dronlar birçok uygulama alanında yüksek beklentiler göstermektedir. Hao, Jubo, ve diğerleri çalışmasında, kamusal alanları görüntülemeyi hedefleyen drone filosu için bir sentetik açıklıklı radar (SAR) modeli oluşturulmuştur. Bu modelde her bir radar küçük bir drone üzerine monte edilerek ilgilenilen alan aydınlatılmakta ve dronlar bir dizi şeklinde düz bir şekilde ileriye doğru uçmaktadır. Radarlar arası girişimi önlemek için frekansta bölünmüş sinyaller kullanılmıştır. Ayrıca, geleneksel 2 boyutlu SAR görüntüleme tekniği ve sensör dizisi sinyal işleme yönteminin birleştirilmesiyle 3 boyutlu görüntülemeler gerçekleştirilmiştir. Dizi yönünde sıkıştırma için huzme biçimlendirme (beamforming) benimsenmiştir. 3 boyutlu görüntülemede bu dron filosu SAR modelinin kullanımı, esnek veri toplama modeli ve hızlı görüntüleme algoritması ile gerçek zamanlı görüntülemelerde büyük potansiyele sahiptir. Çalışma kapsamında nokta hedefler üzerinde simülasyonlar gerçekleştirilmiş olup, görüntüleme sonuçları, önerilen

görüntüleme modelinin ve 3 boyutlu görüntü oluşturma algoritmasının etkinliğini doğrulamıştır [3].

Mini insansız hava araçlarının giderek artan uygulamalarıyla, kullanılan radar sensörlerinin düşük hacim ve ağırlıkta olmasında yüksek bir talep bulunmaktadır. Ding, Manlai, ve diğerlerinin çalışmasında, hafif ve minyatür bir Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga (Frequency Modulated Continuous Wave - FMCW) SAR geliştirilmiş ve gösterilmiştir. Bu SAR sisteminde yeni devre mimarisi ve yüksek yoğunluklu entegre çipler kullanılmıştır. Sistem boyut, ağırlık ve güç tüketimi açısından dikkate değer ilerleme kaydetmiştir. Radar, K bandında çalışmaktadır ve 2 GHz'den daha geniş bir sinyal bant genişliği üretmekte olup bu özelliği de 7,5 cm'lik bir menzil çözünürlüğü elde edilmesini sağlar. Kompakt tasarım elde etmek için sistem, mikrodalga çok katmanlı PCB üzerinde geliştirilmiş ve performansı deneylerle kanıtlanmıştır [4].

Son zamanlarda, optik kamera, LIDAR (Light Detection and Ranging), radar ve benzeri pek çok yüksek çözünürlüklü sensör otonom arabalarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Bu tür sensörlerin önemli özelliği, yoğun sis, şiddetli yağmur ve kar yağışı gibi kötü hava koşullarında dahi yüksek çözünürlüklü görüntüleme performansını sürdürmesidir. Milimetre dalga (MW) radarı birkaç GHz bant genişliği kullanabilir, bu nedenle santimetre mertebesinde menzil çözünürlüğü elde edilebilir. Ancak, yüksek çapraz menzil çözünürlüğü elde etmek için geniş bir açıklık dizisi gerekmektedir bu da radarın ana dezavantajıdır. Bu dezavantajın üstesinden gelmek amacıyla, Yamada, Hiroyoshi, ve diğerlerinin çalışmasında, otomobil radarı için sentetik açıklıklı radar (SAR) tekniğinin kullanımı önerilmektedir. Önerilen MW-SAR tekniği, aracın eğik olarak ileriye bakan “squint” SAR modudur. Tekniğin performansını göstermek için çalışmada deneysel sonuçlar da sağlanmıştır [5].

Zoraya, Alfonso ve Bolaños, Rosa’nun çalışmada, Ekvador Uzay Enstitüsünde MIT LFM-CW radarının bir versiyonunun uygulanması ile yakın ve çok yakın mesafelerin ve boş alan kaybının görüntü işleme performansındaki etkileri teorik olarak yenilenmiştir. Sonuçta entegre edilen radar küçük bir test sahası üzerinde bir görüntüleme kampanyasında test edilmiş ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir [6].

Sentetik Açıklıklı Radar, araştırma ve savunma alanındaki en son gelişmelerden biri olarak kabul edilen ve bir arazinin haritalanması için yaygın olarak kullanılan evre uyumlu, hava

veya uzaydan yana bakan radar sistemidir. Bu teknolojinin yardımıyla manzaralar, arazi görüntüleri gibi nesnelerin 3 boyutlu görüntüleri çok yüksek hassasiyet ve doğrulukla elde edilebilmektedir. Radarın açıklığı artırılırsa, söz konusu arazinin görüntü çözünürlüğü de artar, bu kavram, ister gerçekten geniş bir fiziksel alana sahip olsun, isterse "sentetik" olsun, tüm radarlar için geçerlidir. Bu teknolojinin yardımıyla yaklaşık 10 cm'lik bir çözünürlük elde edilebilir hatta çözünürlüğün birkaç milimetre mertebesinde olacak şekilde çalışıldığı araştırmalar da yapılmıştır. Bu çalışmada, LFM dalga kullanan bir SAR sisteminin simülasyonu anlatılmıştır [7].

Temel SAR geometrisi, menzil ve çapraz menzil boyutlarında SAR sinyallerinin ifadesi, SAR tasarım parametrelerinden darbe tekrarlama frekansının seçimi, azimut sinyal gücü ve Doppler geçmişi, hedef aydınlanma süresi, “demodülasyon” kavramı, iki boyutta ham veri toplanması, menzil ve çapraz menzil çözünürlükleri gibi SAR sistemi ve işleyişi literatürde [8-11] işlenmiştir.

Darbe sıkıştırma teknikleri SAR sinyal işleme için, hassas bir harita çözünürlüğü elde etmeyi, iletilen tepe güç seviyesini azaltmayı ve algılanan hedefin Sinyal Gürültü Oranını (Signal to Noise Ratio - SNR) artırmayı amaçlar. [12] nolu çalışmada, literatürde sıklıkla kullanılan LFM darbe sıkıştırma tekniklerinden olan uyumlu filtreleme ve “stretch” işleme tekniklerinin performansına değinilmiştir. Korelasyon işleme olarak da bilinen uyumlu filtreleme dar bantlı ve bazı orta bantlı radar uygulamalarda kullanılırken, “stretch” işleme genellikle yüksek bant genişlikli LFM sinyal işleme için kullanılmıştır. LFM sinyalinin özellikleri ve iki sıkıştırma tekniği frekans ve zaman alanında incelenen çalışmada ayrıca; sabit faz kavramının, LFM sinyali ve uyumlu filtre çıktısı için frekans özelliklerinin türetilmesindeki kullanımı araştırılmıştır. Her bir sıkıştırma tekniği için, donanım entegrasyonunda da kullanılmak üzere matematiksel model türetilmiştir. Bu iki teknik üzerinde darbe sıkıştırma oranı ve tepe yan kulak oranı gibi bazı kantitatif analizlerle performans karşılaştırması yapılmıştır.

[13] nolu çalışma yakın menzil hedef tespit etme sistemlerinin gerekliliği olan menzil ve çapraz menzil çözünürlüğüne odaklanan bir makale olup geniş bantlı gerçek zamanlı bir SAR görüntüleme sistemi tasarımı yapılmıştır. Uzun/Kısa (Long/Short - L/S) frekans bantları arasında LFM sinyal üreten ve radar eko sinyallerinin ön işleme adımlarını tamamlayarak, gerçek zamanlı SAR görüntüleme algoritmalarını çalıştırıp oluşturulan SAR

görüntülerini yine gerçek zamanlı olarak karşıya yükleme yeteneğine sahip "FPGA+RFADC+RFDAC" alt yapılı bir sistem tasarımı yapılmıştır. Sistemin sahip olduğu her bir işlevin etkinliği simülasyon ve gerçek ölçümlerle doğrulanmıştır.

Yüksek performanslı modern radar sistemlerinde, eskiden yoğun olarak kullanılan analog bileşenler, yerlerini sayısal sinyal işleme tekniklerine bırakmıştır. Sayısal filtrelerin ve bağdaştırıcıların performanslarını kesin olarak tahmin edebilmek için bazı ince noktalar ve özelliklerin bilinmesi gerekmektedir. [14] nolu çalışmada lineer frekans modülasyonu cıvıltı sinyalini işleyen temsili bir sayısal sinyal işleme zinciri, radar alıcısındaki sayısal sinyal işleme adımlarından Ara Frekans (Intermediate Frequency – IF) örnekleme, sayısal aşağı indirme, veri azaltma ve son olarak bir sayısal bağdaştırıcıda darbenin sıkıştırılması bölümleri ile incelenmiştir.

Bunların yanında SAR sistemlerinde kullanılan darbe sıkıştırma teknikleri [15], uyumlu filtreleme [16-18] ve geri projeksiyon yöntemleri [19, 20] ile görüntüleme yöntemleri anlatılmıştır.

[21] nolu çalışmada yazarlar, milimetre dalga SAR sistemleri kullanarak otomobil çevresinde yüksek çözünürlüklü görüntüleme tekniklerini incelemiştir. Milimetre dalga SAR için görüntüleme algoritması olarak geri projeksiyon yöntemi kullanılmış ve bilgisayar simülasyonu ile SAR görüntüsü çıkarılmıştır.

Bütün uzaktan algılama sistemlerinde performansı sınırlayan temel etki, gerçek sistemlerde kaçınılmaz olarak bulunan rastgele sinyal hataları, gürültüdür. Radar sistemlerinde gürültü seviyesine göre, altında istenen hedef ekoların gizlendiği eşik değerleri ayarlanmaktadır. Sinyal işleme tekniklerinin birçoğu gürültünün zayıflatıcı etkisini azaltmak veya başka şekilde ortadan kaldırmak üzere tasarlanmaktadır. Buradan yola çıkarak bir radar alıcısının önemli bir özelliği, alıcı zincirindeki gürültü seviyesidir. Gürültü seviyesini belirten ortak parametre ise sistem tasarımına, kazanç ayarlarına, sıcaklık değerine ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebilen sistem gürültü faktörüdür. [22] nolu çalışmada temel gürültü kaynakları detaylandırılmış ve radar alıcısının sistem gürültü katsayısını hesaplamak için Y-faktör tekniği kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında, simülasyon adımlarını basitleştirmek adına literatürde [23, 24] SAR görüntüleme simülasyonları yapılırken sıklıkla kullanılan ilerle ve dur (stop and go) yaklaşımı uygulanmıştır.

Temel radar performans parametrelerinden olan sinyal gürültü oranının eşitlikleri birçok kaynakta verilmiş [8, 10] ve SAR görüntüsü üzerine etkileri işlenmiştir [25].

Literatürde [26] nolu çalışmada SAR sisteminin sistem seviyesinde tasarım, modelleme ve simülasyonu yapılmış olup sistem parametreleri, tüm kısıtlamalar ve pratik sınırlamalar göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Sistemin menzil çözünürlüğü ve çapraz menzil çözünürlüğü gibi performans ölçütleri oluşturulmuş ve istenen performans göz önünde bulundurularak sistem seviyesi özellikleri çalışılmıştır. MATLAB ana araç olarak kullanılarak, belirtilen sistem parametreleri test edilmiş olup, dalga formu tasarımı, hedef modelleme, lineer frekans modülasyonu darbe sıkıştırması, yan kulak kontrolü ve eşik tespitini içeren bir darbe "Doppler" radar simülasyonu yapılmış ve görüntü oluşturma algoritması kullanılarak SAR görüntüsü oluşturulmuştur.

[27] nolu çalışmada radarın çözünürlük hücrelerini kullanarak tekil ve çoklu hedeflerin ekolarından ham sinyal verilerini oluşturup, sinyal işleme tekniklerini kullanarak ham verileri SAR görüntüsüne dönüştüren bir modelleme ve simülasyon gerçekleştirilmiştir.

[18] nolu araştırmanın amacı, MATLAB'da sinyal türü ve parametrelerinin, sentetik açıklıklı radar görüntüsünün çözünürlüğü ve doğruluğu üzerindeki etkilerini araştırmak için SAR sistemi simülasyonu üretmektir. Araştırmada, SAR sistemlerinin karmaşıklığını algılayabilmek için SAR'ın temel bileşenlerinden menzil görüntüleme ve çapraz menzil görüntüleme simülasyonları yapılmıştır. Bu simülasyonlar kapsamında farklı dalga biçimi teknikleri (sinüzoidal dikdörtgen bir darbe, doğrusal frekans modülasyonu dalga biçimi ve bant sınırlı Gauss beyaz gürültüsü) kullanılarak dalga biçiminin SAR görüntüsüne etkileri incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda incelenen sinyal türlerinin her birinden kullanılabilir SAR görüntüleri üretmenin mümkün olduğu ancak lineer frekans modülasyonu dalga biçimi sinyalinin tutarlı bir şekilde en yüksek çözünürlüğü ürettiği gösterilmektedir.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde SAR sistemlerinin temel modları, çalışma geometrisi, ham veri toplama aşamaları, SAR görüntüsü üzerinde menzil ve çapraz menzil boyutları,

menzil ve çapraz menzil çözünürlükleri, SAR sistemi tasarımı sırasında dikkat edilmesi gereken faktörlerden darbe tekrarlama sıklığı gibi temel kavramlar anlatılmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde LFM dalga biçimi ve özellikleri, SAR sistemlerinde de geçerliliğini koruyan temel radar menzil denklemi, alıcı termal gürültüsü incelenmiş ve bunlardan yola çıkarak sinyal gürültü oranı ifadesine varılmıştır. SAR görüntü simülasyonu kapsamında kullanılan "heterodin" alıcı yapısı ayrıntılı olarak işlenmiş ve sinyal modeli çıkarılmıştır. Bu bölümde ayrıca demolülasyon kavramı işlenmiş olup, alıcı yapısında elde edilen karmaşık sinyalin gerçek ve sanal kısımları sinyal işleme adımlarına sokulmuştur. SAR görüntüsü sinyal işleme adımlarından uyumlu filtre ile menzil sıkıştırma ve geri projeksiyon yöntemi ile çapraz menzil işleme adımları incelenmiş olup verilen bir hedef için SAR görüntüsü benzetimi yapılmıştır.

Tezin dördüncü bölümünde önceki bölümlerde simülasyonu yapılmış SAR sistemi ve oluşturulmuş SAR görüntüsü üzerinde donanım kaynaklı bozucu faktörlerden gürültü sayısı ve grup gecikmesinin SAR görüntü performansı üzerindeki etkileri gözlenmiştir.

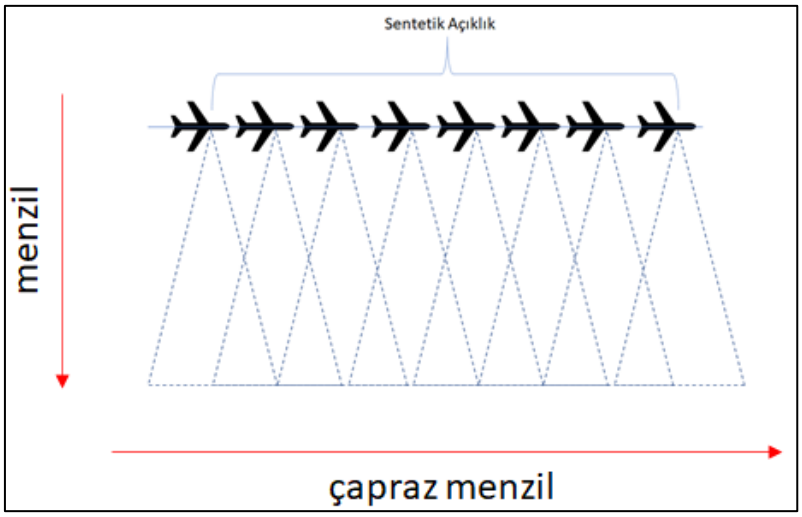
2. SAR KONSEPTİ

SAR sistemlerinin, aktif sensör (kendileri tarafından üretilen sinyallerin dış ortamla etkileşimlerini ölçen sensörler) olmaları dolayısıyla gece-gündüz eşit derecede iyi çalışması, yaygın radar frekanslarındaki elektromanyetik dalgaların bozulmalarının az olması veya hiç bozulma olmaksızın bulutlardan ve yağışlardan geçerek hava koşullarından minimum düzeyde etkilenmesi, radar enerjisinin materyalleri optik enerjiden farklı şekilde saçarak yüzey özelliklerinin optik sensörler ile tamamlayıcı, hatta bazı durumlarda daha iyi ayırt edilmesi, optik sensörlerin sağladığı görüntünün genlik bilgisinin yanında SAR sistemlerinin görüntünün hem genlik hem de faz bilgisini sağlaması gibi özellikleri neticesinde son zamanlarda görüntüleme uygulamalarında tercih edilmeye başlanmıştır.

SAR uygulamaları arasında tarım, toprak nemi, ormancılık, jeoloji, hidroloji, sel ve deniz buzu izleme, oşinografi, gemi ve petrol tabakası tespiti, kar ve buz tespiti, arazi örtüsü haritalama, yükseklik haritalama ve değişiklik tespiti (arazi çökmesi, buzul hareketi, volkanik aktivite) bulunur. Radar sinyalleri kuru kum gibi bazı malzemelere nüfus edebildiğinden, bazı yeraltı özellikleri bile SAR sistemleri tarafından görüntülenebilir [8].

2.1. SAR Geometrisi

SAR radarlarına ismini veren sentetik açıklık kavramı temelde, küçük boyutlu gerçek antenlerin platform hareketi sayesinde gerçekte kullanılamayacak kadar büyük bir yapay anten özelliği oluşturmasıdır (Şekil 2.1). Radar platformunun yol boyunca hareketi sırasında farklı zamanlarda yer yüzeyine gönderilen ve geri yansıyan elektromanyetik dalgaların tutarlı bir şekilde işlenmesi ile iki boyutlu görüntü oluşturulması sağlanır.



Şekil 2.1. Sentetik açıklık kavramı

SAR görüntüleri (Resim 2.1) menzil ve çapraz menzil olmak üzere birbirlerine dik iki boyutta incelenir (Şekil 2.1).



Resim 2.1. SAR görüntüsü [10 s. 661]

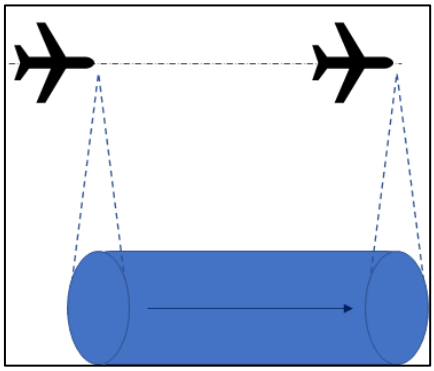
Menzil boyutu radar huzmesine paraleldir. Alınan ekonun zaman gecikmesi saçıcıya olan mesafe ile orantılıdır. Radar, zaman gecikmesini ölçerek, ekoyu görüntünün menzil ekseninde doğru mesafeye yerleştirir.

Çapraz menzil boyutu ise sensörün bağlı bulunduğu platformun hareketiyle ortaya çıkar. Platform, nominal olarak düz bir çizgi boyunca hareket ederken, radar huzmesi görüntülenecek yüzeyi yaklaşık olarak aynı hızda tarar. Radar sistemi elektromanyetik enerji darbeleri yayar, darbelerden alınan ekolar sensörlerin mevcut konumuna göre işlenir ve görüntünün çapraz menzil (azimut) eksenine yerleştirilir. Böylece hem menzil hem de çapraz menzil ekseninde doğru koordinatlarda bir görüntü elde edilir.

SAR sistemlerinde temelde: şerit haritalama SAR (Stripmap SAR), tarama SAR (ScanSAR), nokta aydınlatma SAR (Spotlight SAR) olmak üzere farklı modlar bulunur.

Şerit Haritalama SAR

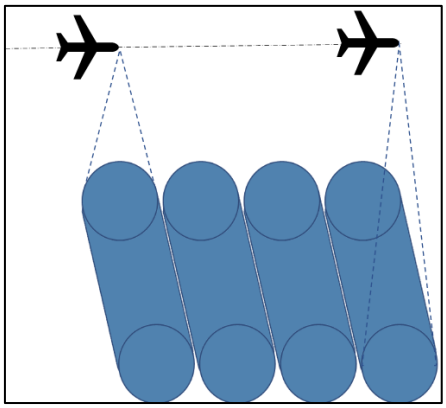
Şerit haritalama SAR sisteminde (aynı zamanda yan bakışlı SAR olarak da adlandırılır), Şekil 2.2'de gösterildiği üzere radar platformu hareket ederken anten doğrultusu sabit tutulur ve yer yüzeyi sabit bir hızda uçuş doğrultusuna paralel bir şekilde süpürülerek platformun hareket ettiği ve radarın yayın yaptığı süre boyunca zemin şeridinin görüntüsü oluşturulur.



Şekil 2.2. Şerit haritalama SAR

Tarama SAR

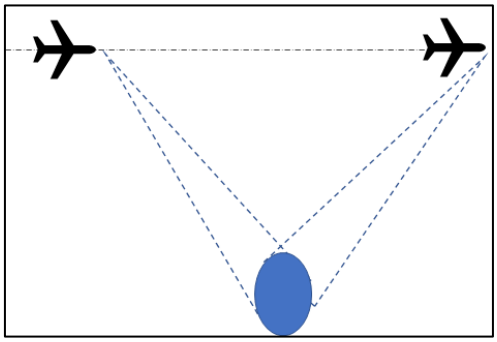
Şerit haritalaması SAR sisteminin bir varyasyonu olan tarama SAR sisteminde, hedef alan birkaç bölüme ayrılmıştır, radar platformu hareket ettikçe radar belirli bir süre bir bölümü aydınlatır, ardından başka bir bölümü aydınlatmak için geçiş yapar. Bu şekilde çok daha geniş bir alanın görüntüsü elde edilir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Tarama SAR

Nokta Aydınlatma SAR

Platform uçuş doğrultusu boyunca ilerledikçe, gerçek antenin bakış açısını kademeli olarak değiştirip, uygun faz düzeltmeleri uygulayıp, huzmeyi belirli bir bölgeye odaklayarak yüksek kaliteli görüntüleme yapan bir SAR operasyonudur (Şekil 2.4).



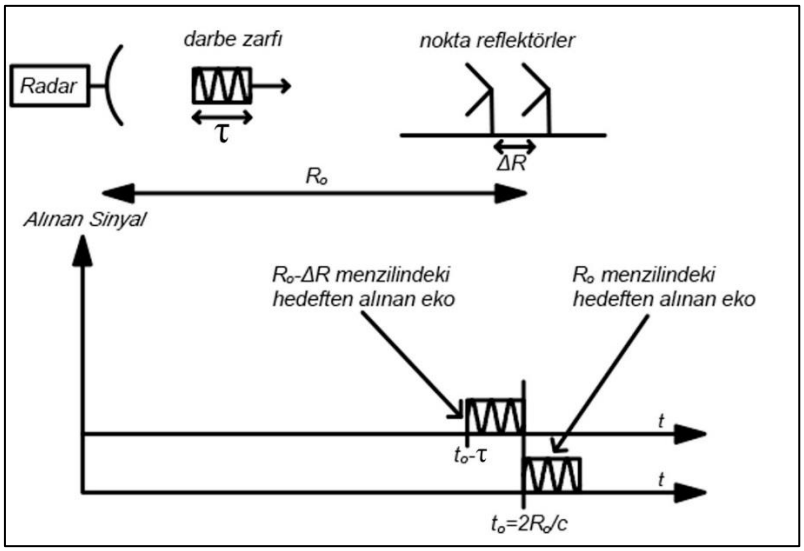
Şekil 2.4. Nokta aydınlatma SAR

Bu çalışmada SAR uygulamalarında baskın olarak kullanılan şerit haritalama SAR sistemi incelenecektir.

2.2. SAR Veri Toplama, Çözünürlük ve Darbe Tekrarlama Frekansı

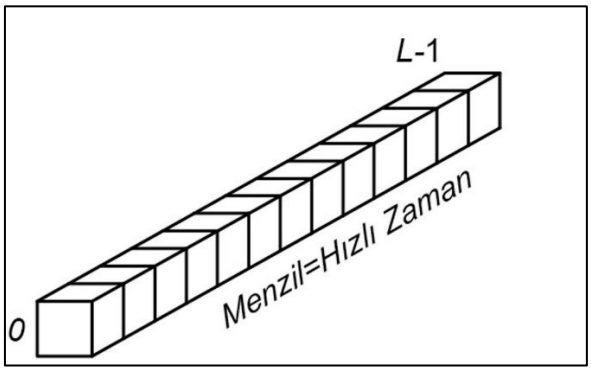
2.2.1. SAR veri toplama

Geleneksel darbeli radarlarda tek bir darbenin hedeften yansıması ve menzil çözünürlüğü Şekil 2.5'deki gibi verilir.



Şekil 2.5. Geleneksel darbeli radar

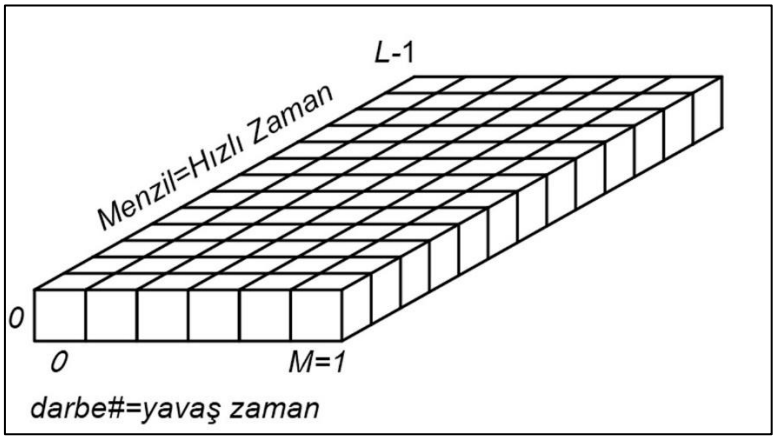
Eğer tek bir darbenin neden olduğu birçok eko, sistemde kullanılmak istenirse, evre uyumlu bir alıcı kullanması gerekir. Eko sinyal evre uyumlu alıcı kullanılarak "demodüle" edilir. Elde edilen karmaşık değerli temel bant sinyali, yüksek hızda örneklenir. Radar hedeflenen şerit aralığını örneklemek için R_1 ve R_2 sırasıyla şeridin başlangıç ve bitiş noktasına olan uzaklık olmak üzere, örneklemeye $t_1 = 2R_1/c$ zamanında başlar ve $t_2 + \tau = (2R_2/c) + \tau$ zamanında bitirir. Burada τ, R_2 menzilinden gelen ekoyu alabilmek için ilave edilen süredir. Elde edilen örnekler her bir küpün temel bant örneğini temsil ettiği Şekil 2.6'da gösterildiği gibi sayısal bellekte saklanır [10].



Şekil 2.6. Tek darbenin hızlı zaman örnekleri

Sentetik açıklıklı radarlarda platformun hareketi boyunca birden çok darbe iletilir ve iletilen her darbenin birden çok örneği toplanır. Böylece iki boyutlu bir matris oluşturulur (Şekil

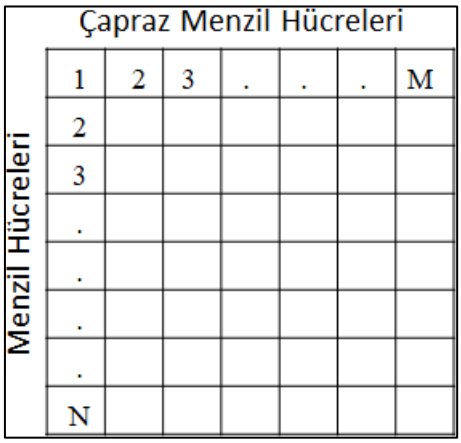
2.7). Darbeler evre uyumlu işlem aralığı (Cohorent Process Interval - CPI) adı verilen aralıkta tekrarlanır. Oluşan yeni boyuta darbe sayısı veya yavaş zaman boyutu adı verilir.



Şekil 2.7. Bir evre uyumlu işlem aralığındaki hızlı zaman-yavaş zaman matrisi

2.2.2. Çözünürlük

SAR sistemleri tarafından üretilen yeryüzü görüntülerinin performansı çözünürlük parametresine göre belirlenir. Çözünürlük, radarın menzil veya çapraz menzilde, yakın konumdaki iki hedefi ayırt etme yeteneği olarak tanımlanır. SAR görüntülerinde çözünürlük, menzil çözünürlüğü ve çapraz menzil çözünürlüğü olmak üzere 2 farklı parametre ile incelenir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Çözünürlük Hücreleri

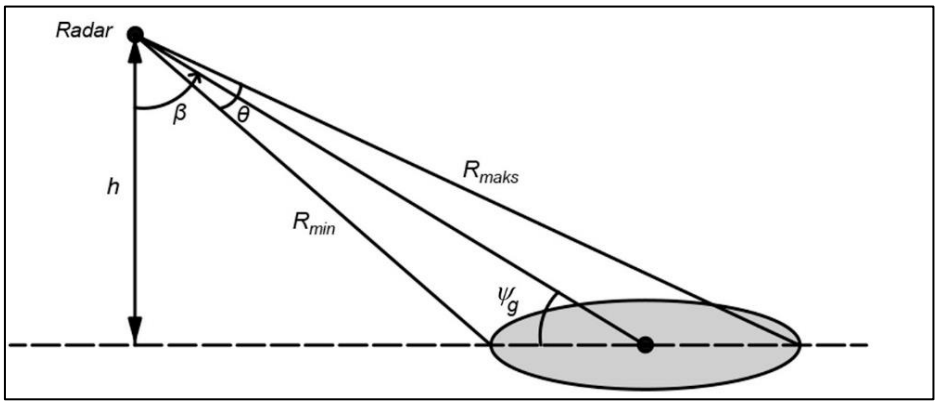
Menzil Çözünürlüğü

Menzil çözünürlüğü (Δr) diğer radar sistemlerinde olduğu gibi SAR sistemlerinde de Eş 2.1'de gösterildiği gibi ifade edilir.

$$\Delta r = \frac{c}{2B} \tag{2.1}$$

Burada Δr menzil çözünürlüğünü, c ışık hızını, B bant genişliğini ifade etmektedir.
Menzil çözünürlüğünün yer düzlemi üzerindeki iz düşümü ise yer menzili çözünürlüğü olarak ifade edilir ve menzil çözünürlüğünün "grazing" açısı (Şekil 2.9) ile çarpımına eşittir.

$$\Delta r_g = \frac{c}{2B} sec\, \psi_g \tag{2.2}$$



Şekil 2.9. Huzme geometrisi

Eş. 2.2'den de görüldüğü gibi SAR sistemlerinde kullanılan darbe sinyalinin frekans bant genişliği B, daha iyi menzil çözünürlüğü elde etmek için yeterince geniş seçilmelidir. Bu darbe "Fourier" teorisine göre incelendiğinde, zaman alanında kısa olduğu görülür. Bununla birlikte kısa bir darbenin enerjisi de düşük olacağı için, gürültü tabanının üzerinde alınan sinyali algılamak zor olacaktır. SAR sistemlerinde bu ikilemi çözmek için genellikle darbe sıkıştırma teknikleri kullanılır (Bölüm 3.1'de detaylı incelenecektir).

Çapraz Menzil Çözünürlüğü

İyi bir çapraz menzil çözünürlüğü (azimut çözünürlüğü), radar platformu düz bir yol boyunca hareket ederken sentetik açıklık içerisindeki farklı konumlardan ölçülen hedefin elektromanyetik yayılmalarının tutarlı bir şekilde işlenmesiyle elde edilir.

Çapraz menzil çözünürlüğü (Δcr) gerçek antenli sistemlerde Eş. 2.3'de gösterilen şekilde hesaplanır. Burada θ 3dB huzme genişliği (radyan), R menzil olarak ifade edilir.

$$\Delta cr = \theta R \tag{2.3}$$

Huzme genişliği, yaklaşık olarak dalga boyunun anten uzunluğuna oranı olduğundan eşitlik, Eş. 2.4'deki hali alır. Burada λ dalga boyu, D_{SA} ise sentetik açıklık uzunluğu olarak ifade edilir.

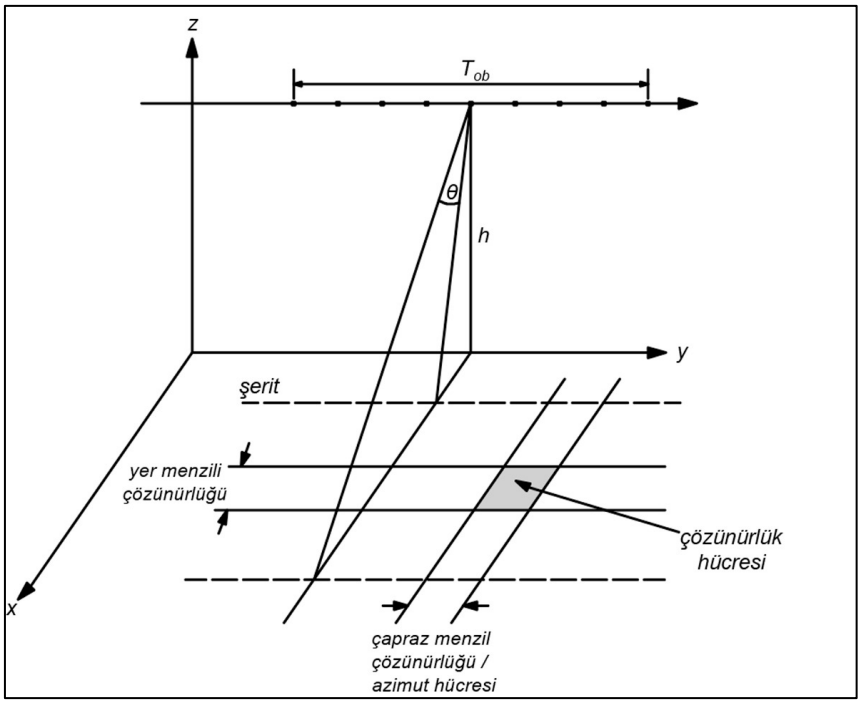
$$\Delta cr = \frac{R\lambda}{D_{SA}} \tag{2.4}$$

Efektif sentetik açıklık uzunluğu gerçek antenin iki katı olduğundan [28] çapraz menzil Eş. 2.5'deki gibi ifade edilir.

$$\Delta cr = \frac{R\lambda}{2D_{SA}} \tag{2.5}$$

Sentetik açıklık uzunluğu, platformun hızı (v) ile, evre uyumlu entegrasyon aralığının (T_{ob}) (Şekil 2.10) çarpımına eşit olduğundan eşitlik Eş. 2.6'daki gibi ifade edilir.

$$\Delta cr = \frac{R\lambda}{2D_{SA}} = \frac{R\lambda}{2vT_{ob}} \tag{2.6}$$

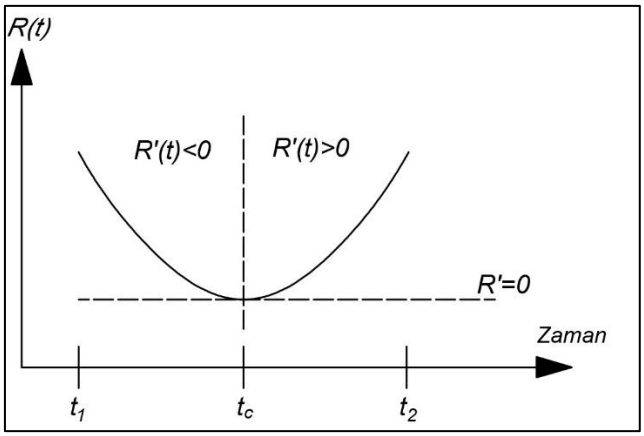


Şekil 2.10. Çözünürlük hücresi geometrisi

Azimut çözünürlüğü, bir huzme içindeki saçıcıların Doppler değişiminden yararlanılarak iyileştirilebilir. Radar platformu uçuş boyunca ilerlerken, huzme içindeki bir yer saçıcısına göre olan "radyal" hız, radarın bu saçıcı yönündeki "radyal" hızının bir fonksiyonu olarak değişir. Belirli bir saçıcı için, bu Doppler frekansı değişimine Doppler geçmişi denir. Eğer $R(t)$ saçıcıya olan mesafenin zamana bağlı değişimi olarak ifade edilirse, v_r karşılık gelen "radyal" hız olmak üzere, Doppler kayması Eş. 2.7'deki gibi ifade edilir. Burada $R'(t)$ saçıcıya olan mesafenin zamana göre türevidir [28].

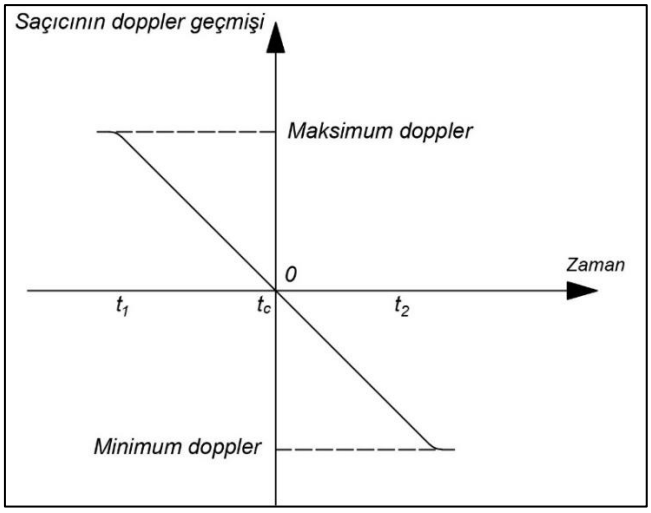
$$f_d = -\frac{2R'(t)}{\lambda} = \frac{2v_r}{\lambda} \tag{2.7}$$

Şekil 2.11'de huzme içerisindeki bir saçının menzil-zaman grafiği gösterilmektedir. Burada t_1 saçıcının huzme içerisine girdiği, t_2 ise huzmeden çıktığı zamanı, öte yandan t_c radar platformu ile saçıcı arasındaki minimum menzil anını ifade etmektedir.



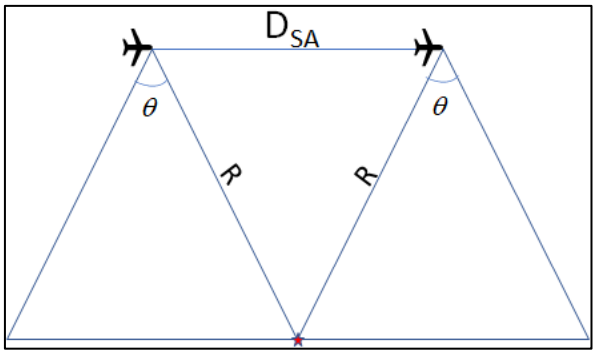
Şekil 2.11. Huzme içerisindeki bir saçının menzil zaman grafiği

"Radyal" hız, $R(t)$'nin zamana göre türevi olarak ifade edilebildiğinden Şekil 2.12'de görülebileceği üzere Doppler frekansı t_1 anında maksimum, t_c anında sıfır ve t_2 anında minimum değerdedir.



Şekil 2.12. Saçıcının Doppler geçmişi

Bu Doppler kayması kullanılarak, kilometrelik bir yapay açıklık sentezlenebilir ve buna uygun olarak iyileştirilmiş bir çözünürlük elde edilebilir. Diğer taraftan elde edilebilecek azimut çözünürlüğü Eş. 2.5'ten devam edilerek incelendiğinde, sentetik açıklık uzunluğu $D_{SA} = \lambda R/L$ olduğundan (Şekil 2.13), çözünürlük Eş. 2.8'deki ifadeye evrilir.



Şekil 2.13. Sentetik açıklık uzunluğu

Burada dikkat edilmesi gereken nokta, çapraz menzil çözünürlüğü artık menzil ve frekanstan bağımsız olarak yalnızca gerçek anten uzunluğuna (L) bağlıdır.

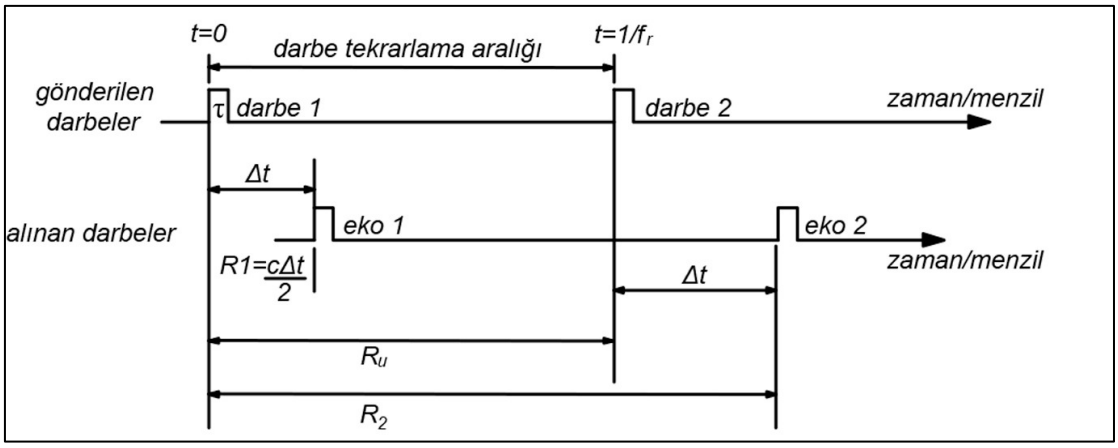
$$\Delta_{cr} = \frac{\lambda R}{2\left(\frac{\lambda R}{L}\right)} = \frac{L}{2} \tag{2.8}$$

Anten uzunluğu ne kadar küçülürse çapraz menzil çözünürlüğü o kadar iyi olur. Ancak burada dikkat edilmesi gereken önemli bir etki, anten boyutu çok küçültülürse veya menzil aşırı yüksekse, sinyal gürültü oranı kabul edilemez seviyelere ulaşır (Sinyal gürültü oranı Bölüm 3'te ayrıntılı olarak incelenecektir).

2.2.3. Darbe tekrarlama frekansı

SAR sistemlerinde darbe tekrarlama frekansı (Pulse Repetation Frequency - PRF) seçilirken minimum ve maksimum iki sınır göz önünde bulundurulur.

Radar tarafından gönderilen bir darbe maksimum menzildeki hedeften geri dönene kadar, bir sonraki gönderilecek darbe bekletilmelidir. Aksi halde bir menzil belirsizliği oluşur (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Menzil Belirsizliği

Maksimum PRF (f_r) değeri sistemde menzil belirsizliği oluşturmayacak şekilde seçilir. Menzil belirsizliği olmadan ölçülebilecek en uzak menzil (R_u) ifadesi Eş. 2.9'da verilmiştir.

$$R_u = \frac{c}{2f_r} \tag{2.9}$$

SAR sistemlerinde R_u en az ayak izi (footprint) kadar geniş olmalıdır. Maksimum menzilden alınan darbe, bir sonraki darbe gönderilmeden radar tarafından alınmalıdır. SAR sistemlerinde menzil belirsizliği olmadan ölçülebilecek en uzak mesafe Eş. 2.10'da verilmiştir.

$$R_u = R_{max} - R_{min} \tag{2.10}$$

Eş. 2.9 ve Eş. 2.10 birleştirildiğinde maksimum PRF değeri Eş. 2.11'deki biçimde bulunur.

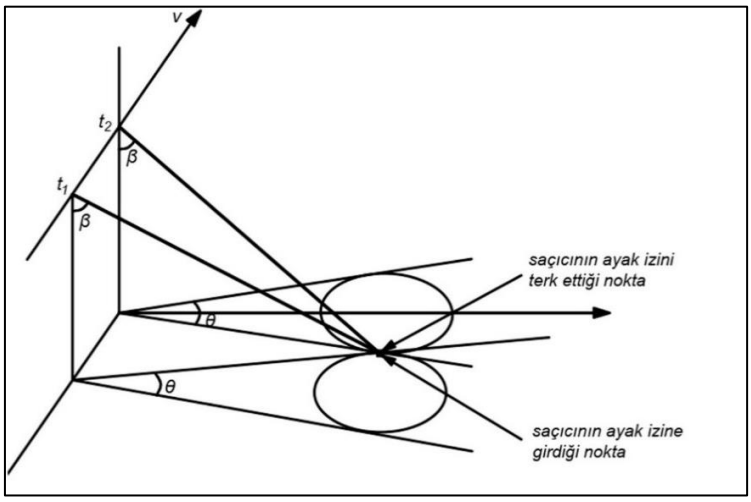
$$f_{r_{max}} \leq \frac{c}{2(R_{max} - R_{min})} \tag{2.11}$$

Minimum PRF seçimi yapılırken ayak izi içerisindeki maksimum Doppler yayılmasından büyük bir PRF seçilerek Doppler belirsizliğinden kaçınılır.

Şekil 2.12 ve Şekil 2.15 birlikte incelendiğinde maksimum Doppler frekansı ($f_{d_{max}}$) t_1 anında ve Eş. 2.12'de belirtildiği gibi, minimum Doppler frekansı ($f_{d_{min}}$) ise t_2 anında ve Eş. 2.13'de belirtildiği gibi ifade edilir.

$$f_{d_{max}} = \frac{2V}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\beta \tag{2.12}$$

$$f_{d_{min}} = -\frac{2V}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\beta \tag{2.13}$$



Şekil 2.15. Doppler geçmişi hesabı

Eş. 2.12, Eş. 2.13 ve küçük açı yaklaşımı birlikte değerlendirildiğinde Doppler saçılması ifadesi Eş. 2.14'de belirtilmiştir.

$$\Delta f_d = \frac{4V}{\lambda} sin\left(\frac{\theta}{2}\right) sin\,\beta \approx \frac{4V}{\lambda}\left(\frac{\theta}{2}\right) sin\,\beta = \frac{2V}{\lambda}\theta\, sin\,\beta \tag{2.14}$$

Eş. 2.14'ten yola çıkarak minimum PRF değeri Eş. 2.15'te ifade edilmiştir.

$$f_{r_{min}} \geq \frac{2V}{\lambda}\theta \sin\beta \tag{2.15}$$

Eş. 2.11 ve Eş. 2.15 birlikte incelendiğinde SAR sisteminin PRF değeri sınırları Eş. 2.16'daki gibi ifade edilir.

$$\frac{c}{2(R_{max}-R_{min})} \geq f_r \geq \frac{2V}{\lambda}\theta \sin\beta \tag{2.16}$$

3. SAR SİNYAL İŞLEME

3.1. SAR Dalga Biçimi

Bir darbenin, genliği (A) ve süresi (τ) olmak üzere iki parametresi bulunur. Bölüm 2.2.2'de de incelendiği üzere menzil çözünürlüğü darbe süresi ile orantılıdır. Daha iyi bir menzil çözünürlüğü elde etmek için, daha kısa bir darbe kullanılması gerekir.

Hedef üzerinde algılama ve tahmin performansını arttırmak için ise darbe enerjisinin yüksek olması beklenir. Darbe enerjisi (E), Eş. 3.1'de gösterildiği gibi darbenin genliği ve süresi ile orantılı bir ifadedir. Burada görüleceği üzere yüksek enerji, uzun darbe süresi ile elde edilir.

$$E = A^2\tau \tag{3.1}$$

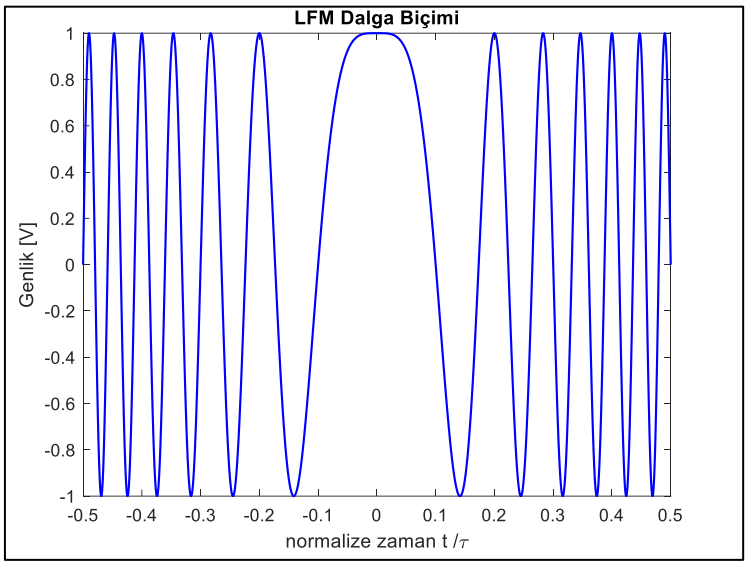
Özetle menzil çözünürlüğünü iyileştirmek için kısa süreli darbeler gerekirken, algılama ve tahmin performansını arttırmak için uzun süreli darbeler kullanılması gerekir. Bu ikilemi çözmek için sentetik açıklıklı radarlarda darbe sıkıştırma teknikleri kullanılır. Basit bir darbenin bant genişliği $B = 1/\tau$ Hz ve uyumlu filtre uzunluğu zaman alanında τ saniye olduğundan zaman-bant genişliği çarpımı ($B\tau$) 1'dir. Darbe sıkıştırma tekniği kullanılan bir dalga biçiminde ise $1/\tau$'dan çok daha büyük bir değer bant genişliği için kullanılır. Aynı zamanda, aynı bant genişliğine sahip basit bir darbeninkinden çok daha büyük bir τ süresi vardır. Buradan yola çıkarak darbe sıkıştırma tekniği kullanılan bir dalga biçiminin zaman-bant genişliği çarpımı 1'den çok daha büyüktür. Darbe sıkıştırma dalga biçimleri basit bir darbeye frekans veya faz modülasyonu eklenerek elde edilir.

Bu çalışmada sentetik açıklıklı radar sistemi tasarımında darbe sıkıştırma tekniklerinden frekans modülasyon tekniği kullanılan, LFM dalga biçimi kullanılmıştır.

3.1.1. LFM dalga biçimi

Cıvıltı dalga biçimi olarak da adlandırılan LFM dalga biçimi (Şekil 3.1) temelde, A dalga biçiminin genliği, B bant genişliği τ darbe süresi olmak üzere Eş. 3.2'deki gibi ifade edilir.

$$x(t) = A\cos\left(\pi\frac{B}{\tau}t^2\right); \quad -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \tag{3.2}$$



Şekil 3.1. LFM dalga biçimli darbe

Radar sistemi tarafından gönderim yapılırken LFM darbe, RF (Radyo Frekansı) frekansta bir sinyal üzerinde gönderilir (Eş. 3.3).

$$x_{RF}(t) = A\cos\left(2\pi f_0 t + \pi\frac{B}{\tau}t^2\right); \quad -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \tag{3.3}$$

Birçok sistemde olduğu gibi bu çalışmada da Bölüm 3.5'de ifade edilen heterodin almaç yapısı içerisinde RF sinyal taban banda indirilir ve I (in-phase) ve Q (quadrature) formuna çevrilir. Elde edilen taban banttaki bu karmaşık sinyal Eş. 3.4 'de gösterilmiştir.

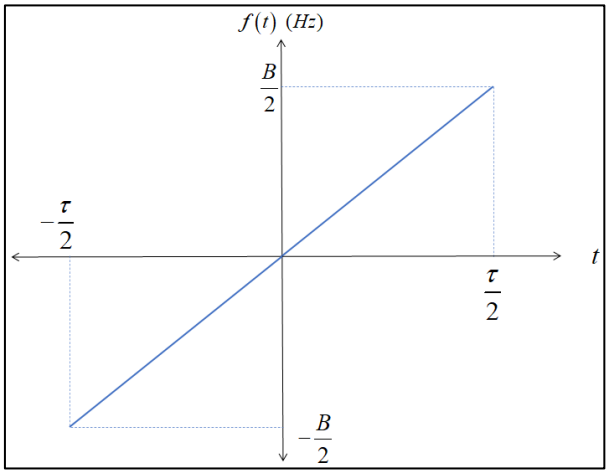
$$x(t) = A\,exp\left(j\pi\frac{B}{\tau}t^2\right) = exp\big(j\theta(t)\big); \quad -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \tag{3.4}$$

LFM dalga biçiminin zamana bağlı faz ifadesi ($\theta(t)$) Eş. 3.5'de ifade edilmiştir.

$$\theta(t) = \pi\frac{B}{\tau}t^2; \quad -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \tag{3.5}$$

Faz fonksiyonunun zaman alanında türevi alındığında anlık frekans ($f(t)$) Eş. 3.6'da gösterildiği şekilde ifade edilir (Şekil 3.2).

$$f(t) = \frac{1}{2\pi}\frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{B}{\tau}t\ (Hz); \quad -\frac{\tau}{2} \le t \le \frac{\tau}{2} \tag{3.6}$$



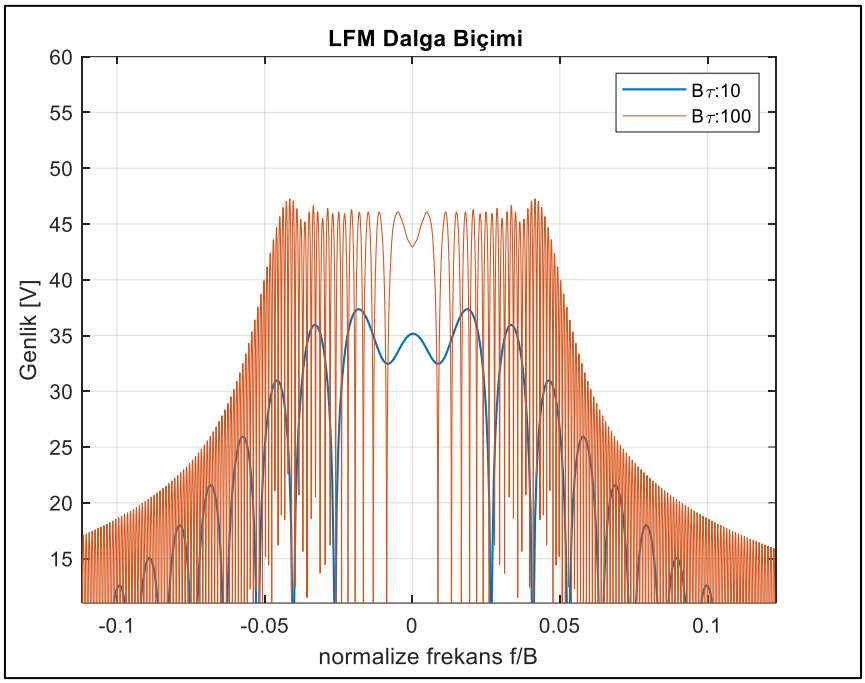
Şekil 3.2. LFM dalga biçimi anlık frekans-zaman grafiği

Burada bant genişliği (B) sıfırdan büyük olduğunda LFM dalga biçimi yüksek cıvıltılı (upchirp) olarak, sıfırdan küçük olduğunda ise düşük cıvıltılı (downchirp) olarak adlandırılır. Zamana bağlı anlık frekans grafiğinin eğimi B/τ, rampa oranı, tarama oranı olarak ifade edilir (K_r).

LFM dalga biçiminin frekans alanında ifadesi Eş. 3.7'de verilmiştir.

$$X(\omega) \approx |X(\omega)|\, exp\left(-j\frac{1}{4\pi}\frac{\tau}{B}\omega^2\right) exp\left(j\frac{\pi}{4}\right); \tag{3.7}$$
$$|X(\omega)| \approx 1, -\pi B \le \omega \le \pi B$$

Zaman-bant genişliği çarpımı artıkça spektrum daha dikdörtgensel bir şekil alır ve $-B/2 \le f \le B/2$ aralığında daha çok enerjiye sahip olur (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Zaman-bant genişliği çarpımı karşılaştırması

3.2. Radar Menzil Denklemi

Enerjiyi her yöne eşit şekilde yayan anteni (izotropik anten) olan bir radar sisteminde, anten küresel yayılım modeline sahip olduğundan, radar vericisinin sağladığı toplam maksimum güç P_t (watt), uzaydaki bir noktanın menzili R (m) iken, bu noktadaki güç yoğunluğu (Q_i) Eş. 3.8'deki şekilde ifade edilir.

$$Q_i = \frac{P_t}{4\pi R^2} \tag{3.8}$$

Tüm radar sistemleri, "izotropik" bir huzme modeli yerine, iletilen gücün genellikle hem azimut hem de yükseklik düzlemlerinde (elevation) birkaç derece genişliğe sahip sonlu bir açısal kapsamda yoğunlaştığı yönlü bir huzme modeline sahip anten kullanır. Bu durumda, anten huzme modelinin merkezindeki güç yoğunluğu, "izotropik" bir antenden gelen güç yoğunluğundan daha yüksektir. Çünkü iletim gücü, kürenin yüzeyinde daha küçük bir alana yoğunlaşmıştır. Kayıpsız yönlü bir anten ile bir "izotropik" antenin güç yoğunluğu arasındaki oran, yönlülük olarak adlandırılır. Bir antenin kazancı, G, sinyalin giriş portundan atmosfere fırlatıldığı noktaya giderken karşılaştığı kayıplarla azalan, yönlülüktür.

A_e antenin efektif açıklığı, λ dalga boyu olarak alındığında yönlü antenin kazancı ve efektif açıklığı arasında Eş. 3.9'daki gibi bir bağlantı bulunur.

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \tag{3.9}$$

Anten kazancı aynı zamanda radyan cinsinden antenin azimut düzlemindeki huzme genişliği (θ_a) ve yükseklik düzlemindeki huzme genişliği (θ_e) ile de Eş. 3.10'da gösterildiği gibi orantılıdır. Burada K sabiti 1'den küçük eşittir ve fiziksel antenin şeklinde bağlıdır.

$$G = K\frac{4\pi}{\theta_e\theta_a} \tag{3.10}$$

Literatürde Eş. 3.10 genellikle Eş. 3.11'de verildiği şekilde yakınsar, ancak burada θ_e ve θ_a derece olarak tanımlanmaktadır.

$$G \approx \frac{26000}{\theta_e\theta_a} \tag{3.11}$$

Yönlü verici antenin kazancı G_t olan bir radar sisteminin R menzilindeki güç yoğunluğu Eş. 3.12'de verildiği gibidir.

$$Q_i = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \tag{3.12}$$

Yayılan radar enerjisi bir hedefe çarptığında, o hedef üzerindeki indüklenen yüzey akımları bir kısmı tekrar radar kaynağına geri yansıyacak şekilde her yöne elektromanyetik enerji yayar. Yayılan enerjinin miktarı, Radar Kesit Alanı (RKA) (σ) adı verilen, hedefe özgü tek bir parametrede bir araya getirilen hedef boyutu, yönelim, fiziksel şekil ve malzemeyle orantılıdır. Hedef tarafından radara geri yansıyan sinyalin gücü (P_{refl}) Eş. 3.13'te ifade edilmektedir.

$$P_{refl} = Q_i\sigma = \frac{P_t G_t \sigma}{4\pi R^2} \tag{3.13}$$

Hedeften yansıyan sinyal, bir R mesafesi boyunca radar sistemine doğru geri yayılır, böylece radar alıcı antenindeki güç yoğunluğu (Q_r) Eş. 3.14'deki gibi ifade edilir.

$$Q_r = \frac{P_{refl}}{4\pi R^2} \tag{3.14}$$

Eş. 3.13 ve Eş. 3.14 birlikte değerlendirildiğinde radar alıcı antenine gelen güç yoğunluğu Eş. 3.15'deki gibi ifade edilir.

$$Q_r = \frac{Q_i \sigma}{4\pi R^2} = \frac{P_t G_t \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \tag{3.15}$$

Hedeften dönen güç yoğunluğu Eş. 3.15'de gösterildiği gibi ifade edilen radar sinyali, efektif anten boyutu A_e olan anten ile alındığında, radar tarafından alınan güç (P_r) Eş. 3.16'da gösterildiği gibi ifade edilir.

$$P_r = Q_r A_e = \frac{P_t G_t A_e \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \tag{3.16}$$

Eş. 3.16 ve Eş. 3.9 birlikte değerlendirildiğinde ve G_r alıcı anteni kazancı olarak ifade edildiğinde, alınan güç ifadesi, Eş. 3.17'deki gibi ifade edilir.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \tag{3.17}$$

3.3. Alıcı Termal Gürültüsü

Tüm elektronik cihazlara ve sistemlere benzer şekilde, radarlar da iç gürültü ve dış gürültü varlığında işlev gösterirler. Ana iç gürültünün kaynağı, ısının neden olduğu elektronların çarpışmasındandır. Elektronik ekipmanın içindeki ısı aynı zamanda güneş, dünya ve binalar gibi çevresel kaynaklardan da kaynaklanabilir. Bu tip gürültü, termal gürültü olarak tanımlanır. Alıcı termal gürültüsü bir radar sistemindeki aktif devreler nedeniyle oluşur [9]. Hedef tespitinin gerçekleşmesi için, hedef sinyalin gürültü sinyalini aşması ve hedefin istatistiksel yapısına bağlı olarak, bazen hedefin yüksek olasılıkla tespit edilebilmesi için önemli bir marjla geçmesi gerekir.

Termal gürültü (beyaz gürültü) gücü tüm radar frekanslarına eşit olarak dağıtılır; yani, güç spektral yoğunluğu sabit veya tekdüzedir. Ancak, gürültü sinyallerinden yalnızca radarın alıcısı tarafından tespit edilebilen frekans aralığındakiler sistemin performansı üzerinde bir etkiye sahiptir. Alıcı bant genişliği, radarın gürültü sinyallerine duyarlı olduğu frekans aralığını belirler.

$$P_n = kT_sB = kT_0FB \tag{3.18}$$

Alıcı termal gürültüsünü (P_n) ifade eden Eş. 3.18'de k Boltzmann sabiti olup değeri $1.38x10^{-23}\ W/(Hz\ x\ K^o)$'dir, T_s sistem gürültü sıcaklığı, T_0 standart sıcaklık (290 K), B anlık alıcı bant genişliği (Hz), alıcı alt sisteminin gürültü sayısını F ifade etmektedir.

3.4. Sinyal Gürültü Oranı

Sinyal gürültü oranı (Signal to Noise Ratio - SNR), alınan sinyal gücünün, gürültü gücüne oranı olarak ifade edilir (Eş. 3.19).

$$SNR = \frac{P_tG_tG_r\lambda^2\sigma}{(4\pi)^3R^4kT_0FB} \tag{3.19}$$

SAR sistemlerinde Bölüm 2.2'de de verildiği üzere birden fazla darbe evre uyumlu bir biçimde entegre edilerek (işleme alınan sinyallerin hem genliği hem de fazı kullanılır, böylece darbeler birbirleri ile faz uyumlu olarak toplanabilir) gürültü varlığında bir hedefi tespit etme yeteneğini geliştirmek için kullanılırlar. Evre uyumlu olarak entegre edilen darbeler (n_p) sonucu, yeni sinyal gürültü oranı (SNR_c) Eş. 3.20'de gösterildiği şekilde ifade edilir.

$$SNR_c = \frac{P_tG_tG_r\lambda^2\sigma n_p}{(4\pi)^3R^4kT_0FB} \tag{3.20}$$

Burada evre uyumlu olarak entegre edilen darbeler (n_p), evre uyumlu entegrasyon aralığının (T_{ob}), darbe tekrarlama aralığına (Pulse Repetation Interval - PRI) oranı veya PRF ile çarpımı olarak ifade edilir (Eş. 3.21).

$$n_p = T_{ob} PRF = \frac{T_{ob}}{PRI} \tag{3.21}$$

Sinyal gürültü oranına, sinyal işleme adımlarının etkisi (G_{sp}) sonucu yeni ifadesi (SNR_t) ise Eş. 3.22'deki gibi ifade edilir. Bu çalışmada Bölüm 3.1'de bahsi geçen lineer frekans modülasyonu dalga biçimi kullanıldığından $G_{sp} = \beta\tau$ olarak ifade edilir. Burada β darbe modülasyon bant genişliğini, τ darbe uzunluğunu ifade etmektedir.

$$SNR_t = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma n_p G_{sp}}{(4\pi)^3 R^4 k T_0 F B} \tag{3.22}$$

Gönderilen güç (P_t), ortalama güç cinsinden ifade edilir (Eş. 3.23), gönderme ve alma antenlerinin sistemde özdeş olduğu varsayımı altında kazanç ifadeleri antenin efektif açıklığı cinsinden tekrar yazılırsa (Eş. 3.24), gerekli sadeleştirmeler sonucu sinyal gürültü oranı Eş. 3.25'da gösterildiği biçimde uygulanır.

$$P_t = \frac{P_{av}(PRI)}{\tau} \tag{3.23}$$

$$G = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right) A_e \tag{3.24}$$

$$SNR_{csp} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma T_{ob} \beta\tau}{(4\pi)^3 R^4 k T_0 F B (PRI)} = \frac{P_{av} A_e^2 \sigma T_{ob}}{4\pi \lambda^2 R^4 k T_0 F} \tag{3.25}$$

Bu noktaya kadar, SNR bağıntısı kayıplar göz önünde bulundurulmadan, ideal ortamda incelenmiştir. Ancak bu kayıplar dahil edildiğinde sinyal gücü önemli ölçüde düşer ve performansı kötüleşir. Atmosferik kayıplar, sistem bileşenleri kaynaklı kayıplar ve ideal olmayan sinyal işleme koşulları, SNR performansının idealin altında kalmasına neden olur. Eş. 3.26'da toplam sistem kayıplarının ifadesi verilmiştir.

$$L_s = L_t L_a L_r L_{sp} \tag{3.26}$$

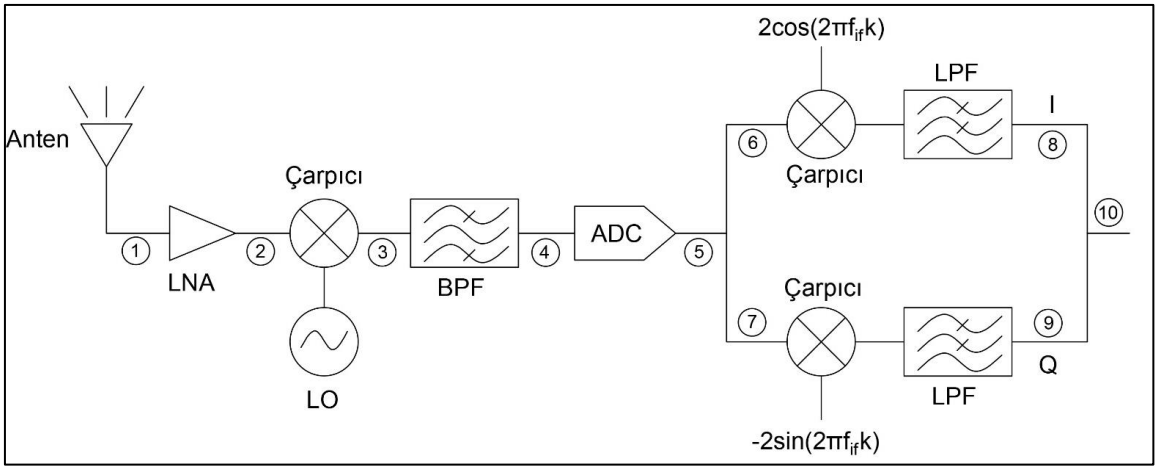
Burada L_s sistem kayıpları, L_t gönderici kayıpları, L_a atmosfer kayıpları, L_r almaç kayıpları, L_{sp} sinyal işleme kayıplarını ifade etmektedir.

Eş. 3.25'teki sinyal gürültü oranı ifadesine kayıplar da dahil edildiğinde sinyal gürültü oranı son olarak Eş. 3.27'deki şekilde ifade edilir.

$$SNR = \frac{P_{av} A_e^2 \sigma T_{ob}}{4\pi\lambda^2 R^4 k T_0 F L_s} \tag{3.27}$$

3.5. "Heterodin" Almaç (HA)

Hedeften alınan RF eko sinyallerinden istenen bilgiye ulaşabilmek için bu sinyallerin video sinyaline dönüştürülmesi gerekir. Bu dönüşümü yapmak için bu çalışmada HA yapısı kullanılmıştır (Şekil 3.4). HA sisteminin temel özelliği bahsi geçen RF sinyali temel banda iki veya daha fazla aşamada indirmesidir. İlk olarak sinyal IF indirilir, ardından taban bant sinyaline çevrilir. Direkt olarak temel bant sinyaline çevrilmesi daha yüksek bir dönüşüm kaybına neden olur ve alıcı hassasiyetini azaltır.



Şekil 3.4. HA Yapısı

İlk olarak antenden alınan RF sinyal (Eş. 3.28), düşük gürültülü bir yükseltece (Low Noise Amplifier - LNA) sokularak yükseltilir (Eş. 3.29).

$$x_1(t) = A\cos\left(2\pi f_o t + \pi\frac{B}{\tau}t^2\right) \tag{3.28}$$

$$x_2(t) = A'\cos\left(2\pi f_o t + \pi\frac{B}{\tau}t^2\right) \tag{3.29}$$

Burada; $A^{'}$, sistem bileşeninin özelliğine göre genlikte artmayı veya azalmayı ifade etmektedir. Bu aşamada kullanılan LNA tüm sistemin gürültü sayısını önemli ölçüde etkiler, ayrıntıları Bölüm 4.1'de verilmiştir. Ardından bu sinyal çarpıcının bir koluna, lokal "osilatör" den gelen sinyal ise diğer koluna sokulur. Çarpıcıda karıştırılan bu iki sinyal arasında sabit bir frekans farkı vardır. Frekanstaki bu fark IF olarak adlandırılır (Eş. 3.30).

$$f_{IF} = |f_{lokal\ \text{osilatör}} - f_{RF}| \tag{3.30}$$

$$\begin{aligned} x_3(t) &= x_2(t)\, cos\big(2\pi\big(f_0 - f_{if}\big)t\big) \\ &= \Big(A^{'} cos\left(2\pi f_o t + \pi \frac{B}{\tau} t^2\right)\Big)\big(cos\big(2\pi\big(f_0 - f_{if}\big)t\big)\big) \\ &= A^{'}\left[\frac{cos\left(4\pi f_o t + 2\pi f_{if} t + \pi\frac{B}{\tau}t^2\right) + cos\left(2\pi f_{if} t + \pi\frac{B}{\tau}t^2\right)}{2}\right] \end{aligned} \tag{3.31}$$

Çarpıcı aşaması sonrası ortaya çıkan karışım frekanslarından (Eş. 3.31) istenilen IF sinyali elde etmek için sonraki aşamada bant geçiren bir filtre kullanılır (Eş. 3.32). İstenen frekans aralığındaki tüm sinyalleri geçirecek kadar geniş olması gereken bant geçiren filtre, sinyal enerjisini etkilemeyecek şekilde mümkün olduğunca dar (keskin) olmalıdır. Ancak mümkün olduğunca dar (keskin) olarak kullanılan bu filtrelerin dezavantajları da olur. Bölüm 4.2'de bu dezavantajlardan grup gecikmesi bozulması ve etkileri incelenecektir.

$$x_4(t) = x_3(t) * h(t) = A^{'}\left[\frac{cos\left(2\pi f_{if} t + \pi\frac{B}{\tau}t^2\right)}{2}\right] \tag{3.32}$$

Sonraki aşamada bir analog-sayısal çevirici kullanılarak analog sinyal örneklenerek işlenebilir sayısal sinyal haline çevrilir (Eş. 3.33).

$$x_5[k] = A^{'}\left[\frac{cos\left(2\pi f_{if} k + \pi\frac{B}{\tau}k^2\right)}{2}\right] \tag{3.33}$$

HA yapısının önemli özelliklerinden birisi de "demodulasyon" işlevidir. Örnekleme modülü sonrası sinyal iki kanala ayrılır. Bu kanalların biri I, diğeri Q kanalı olarak ifade edilir. I kanalında, sinyal lokal "osilatör" ile, Q kanalında ise aynı frekansta ancak 90^o kaymış fazlı lokal "osilatör" ile çarpılarak toplam ve fark frekansları oluşturulur (Eş. 3.34, Eş. 3.35).

$$x_6[k] = x_5[k]2\,cos(2\pi f_{if}k)$$
$$= A'\left[\frac{cos\left(2\pi f_{if}k+\pi\frac{B}{\tau}k^2\right)}{2}\right]2\,cos(2\pi f_{if}k) \quad (3.34)$$
$$= \frac{A'}{2}\left[cos\left(4\pi f_{if}k + \pi\frac{B}{\tau}k^2\right) + cos\left(\pi\frac{B}{\tau}k^2\right)\right]$$

$$x_7[k] = x_5[k] - 2\,sin(2\pi f_{if}k)$$
$$= A'\left[\frac{cos\left(2\pi f_{if}k+\pi\frac{B}{\tau}k^2\right)}{2}\right] - 2\,sin(2\pi f_{if}k) \quad (3.35)$$
$$= \frac{A'}{2}\left[sin\left(4\pi f_{if}k + \pi\frac{B}{\tau}k^2\right) + sin\left(\pi\frac{B}{\tau}k^2\right)\right]$$

Toplam terimi düşük geçirgen bir filtre ile elenir (Eş. 3.36, Eş. 3.37). Böylece gerçek sinyal I ve Q bileşenlerine ayrılarak, genlik ve faz bilgisinin ayrı ayrı elde edildiği bir karmaşık sinyale dönüştürülür.

$$x_8[k] = x_6[k] * h[n] = \frac{A'}{2}\left[cos\left(\pi\frac{B}{\tau}k^2\right)\right] \quad (3.36)$$

$$x_9[k] = x_7[k] * h[n] = \frac{A'}{2}\left[sin\left(\pi\frac{B}{\tau}k^2\right)\right] \quad (3.37)$$

Genlik ve faz bilgisi elde edilmiş bu sayısal sinyal (Eş. 3.38) sonrasında sinyal işleme bloğuna sokularak Bölüm 3.6'da verilen SAR görüntüleme adımlarına aktarılır.

$$x_{10}[k] = x_8[k] + jx_9[k]$$
$$= \frac{A'}{2}\left[cos\left(\pi\frac{B}{\tau}k^2\right) + sin\left(\pi\frac{B}{\tau}k^2\right)\right] \quad (3.38)$$
$$= \frac{A'}{2}exp\left(j\left(\pi\frac{B}{\tau}k^2\right)\right)$$

3.6. SAR Görüntüleme

Görüntü oluşturma algoritmalarının amacı, hedefe sinyalleri gönderip alarak bilgi toplamak ve alınan sinyal verilerini işleyerek o nokta hedefin görüntüsünü oluşturmaktır. SAR sistemlerinde görüntü oluşturma sürecinde, hedeften yansıyan sinyaller, SNR'nı maksimize etmek ve hedefin görüntü kalitesini iyileştirmek için sıkıştırılır. SAR görüntüsü oluşturmak için temelde menzil ve çapraz menzil boyutlarında sinyal işleme yapılması gerekir. Literatürde birçok menzil ve çapraz menzil işleme yöntemleri bulunur. Bu çalışmada LFM dalga formunda sıkça kullanılan menzil yönünde işleme tekniklerinden uyumlu filtreleme (UF) ile menzil işleme; çapraz menzil yönünde ise geri projeksiyon (GP) ile çapraz menzil işleme yöntemleri kullanılmıştır.

3.6.1. Uyumlu filtreleme ile menzil işleme

Uyumlu filtre SAR uygulamalarında temelde sistemde bir x(t) sinyalinin sıkıştırılmış bir çıktısı alınmak istenildiğinde kullanılan, x(t) sinyalinin istenilen bir fazıyla eşleştirilmiş bir filtre yapısıdır. Uyumlu filtre, bu x(t) sinyalinin zaman alanında tersi alınmış karmaşık eşleniğidir. Filtreleme işlemi sırasında evirişimi yapılan bu iki sinyalin fazının uyumlu olması, buradaki temel noktadır.

Eş. 3.38'de elde edilen taban bant karmaşık sinyal, kendisiyle uyumlu filtreden (Eş. 3.39) geçirildiğinde Eş. 3.40'da belirtildiği şekilde formüle edilir.

$$uf[k] = exp\left(-j\pi \frac{B}{\tau} k^2\right) \tag{3.39}$$

$$\begin{aligned} y[k] &= x[k] * uf[k] \\ &= \frac{1}{\tau} \int exp\left(j\pi \frac{B}{\tau} \alpha^2\right) exp\left(-j\pi \frac{B}{\tau} (k-\alpha)^2\right) d\alpha; \quad -\tau \leq k \leq \tau \end{aligned} \tag{3.40}$$

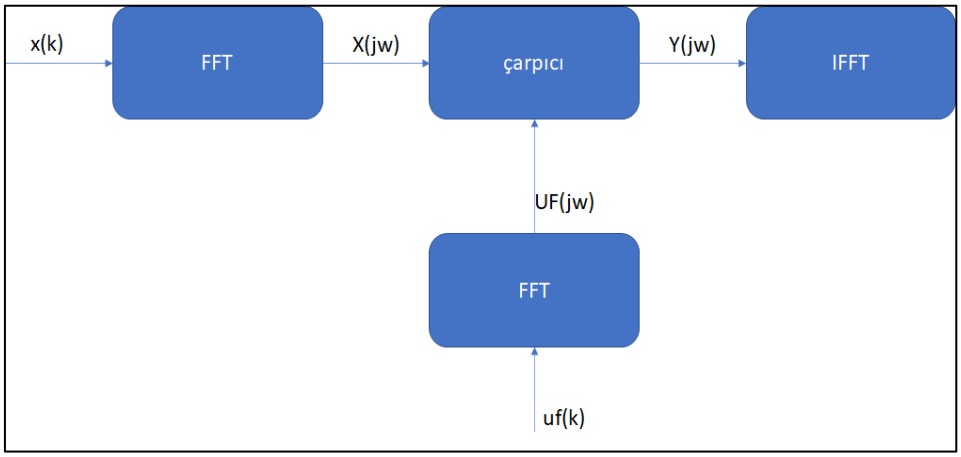
Kullanılan sinyal ve uyumlu filtre birim enerjiye "normalize" edilir. Eş. 3.40 çözümlendiğinde Eş. 3.42'de belirtilen bir "sinc" fonksiyonu ile $-\tau \leq k \leq \tau$ aralığı haricinde sıfır değerini alan bir üçgen fonksiyonunun çarpımı şeklinde ifade edilir.

Burada bahsedilen “sinc” fonksiyonu temelde Eş. 3.41’de gösterilen ve literatürde “normalize sinc fonksiyonu” olarak ifade edilen fonksiyondur.

$$sin\,c\,(x) = \frac{sin(\pi x)}{\pi x},\ \mathrm{x} \neq 0 \tag{3.41}$$

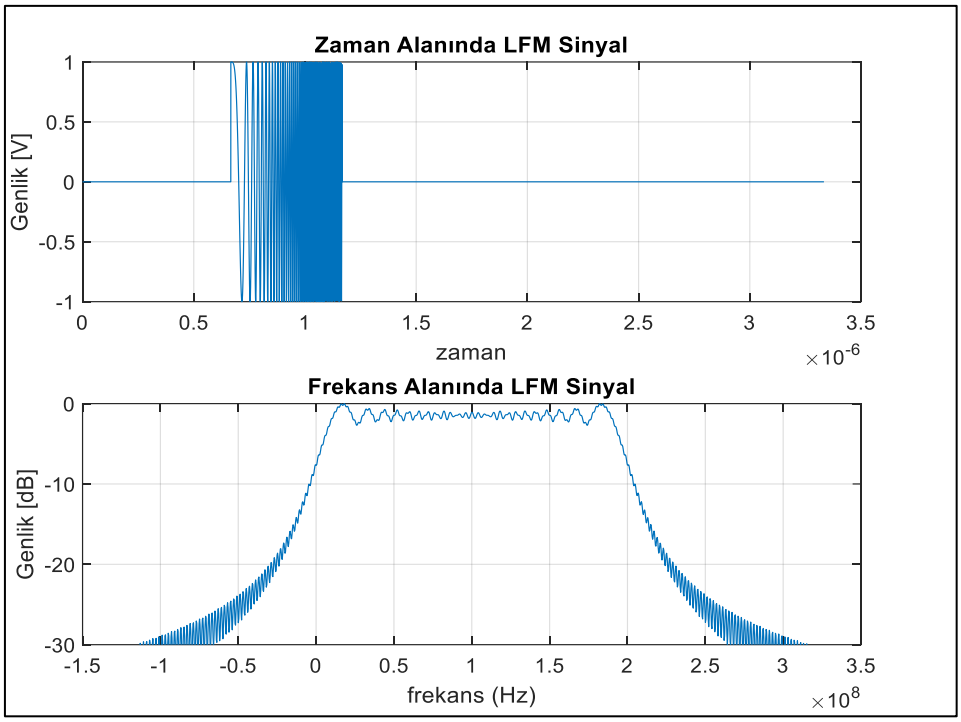
$$y[k] = \left(1 - \frac{|k|}{\tau}\right) \frac{sin\left[\left(1-\frac{k}{\tau}\right)\pi B\tau\right]}{\left(1-\frac{|k|}{\tau}\right)\pi B\tau}, \quad |k| \leq \tau \tag{3.42}$$

Eş. 3.42 incelendiğinde, $k \ll \tau$ olduğu durumda sinüs fonksiyonun içerisi $\pi B\tau$ ifadesine yakınsar. Böylece tepe değerin yakınında, üçgen fonksiyonla ağırlıklandırılmış tam bir “sinc” fonksiyonu elde edilmiş olur. Uyumlu filtreden geçirilmiş bir LFM darbe aynı menzil çözünürlüğüne sahip basit bir darbeye oranla $B\tau$ kadar sinyal işleme kazancına sahiptir. Uyumlu filtreleme radar sistemlerinde genellikle frekans alanında uygulanır (Şekil 3.5).

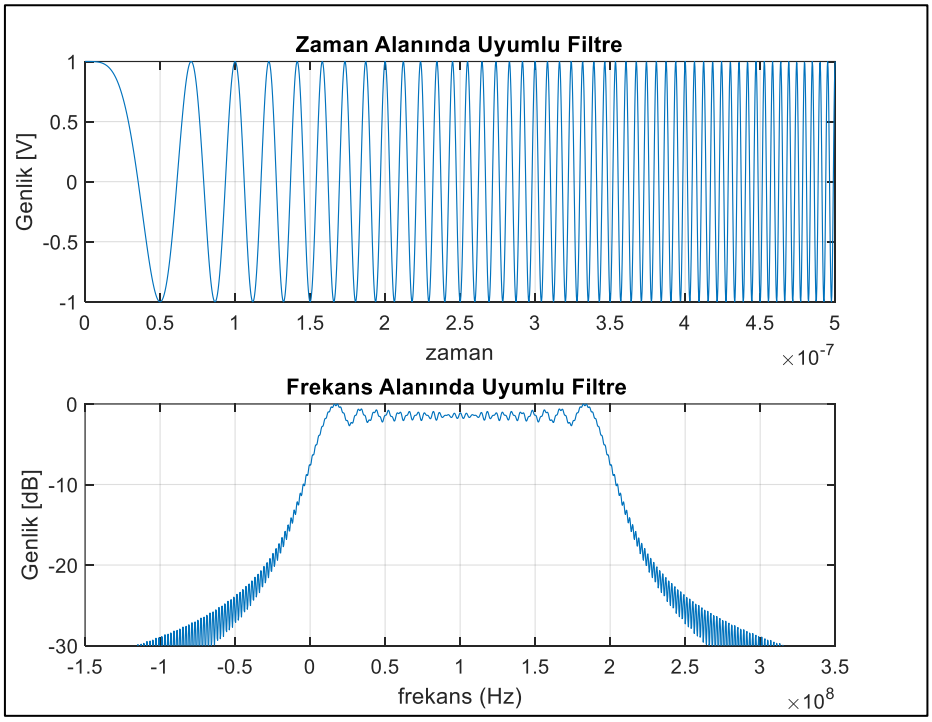


Şekil 3.5. Uyumlu filtre uygulaması

Şekil 3.6’da 100 m menzildeki hedeften alınmış bir LFM sinyalin frekans alanındaki benzetimi gösterilmiştir. Şekil 3.7’de ise bu LFM sinyal ile çarpılacak uyumlu filtrenin frekans karakteristiği verilmiştir. Şekil 3.5’de gösterilen yapıda verildiği üzere bu iki sinyal çarpılıp ardından ters hızlı Fourier dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform – IFFT) ile tekrar zaman alanına dönülür. Bu işlem sonrası zaman eksenindeki ifade temel zaman-menzil ifadesine (Eş. 3.43) konularak belirtilen menzile ulaşılır (Şekil 3.8).

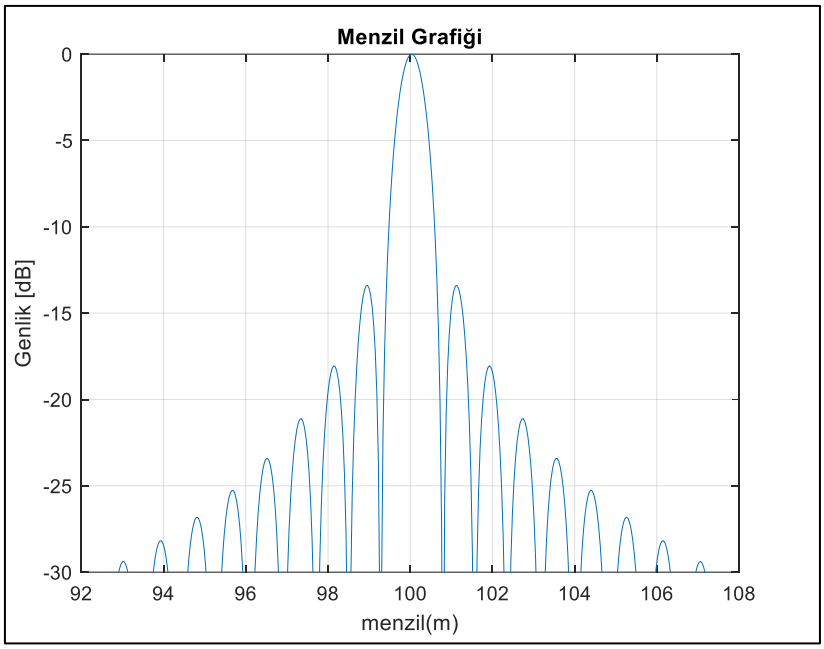


Şekil 3.6. Alınan LFM sinyalin frekans alanı gösterimi



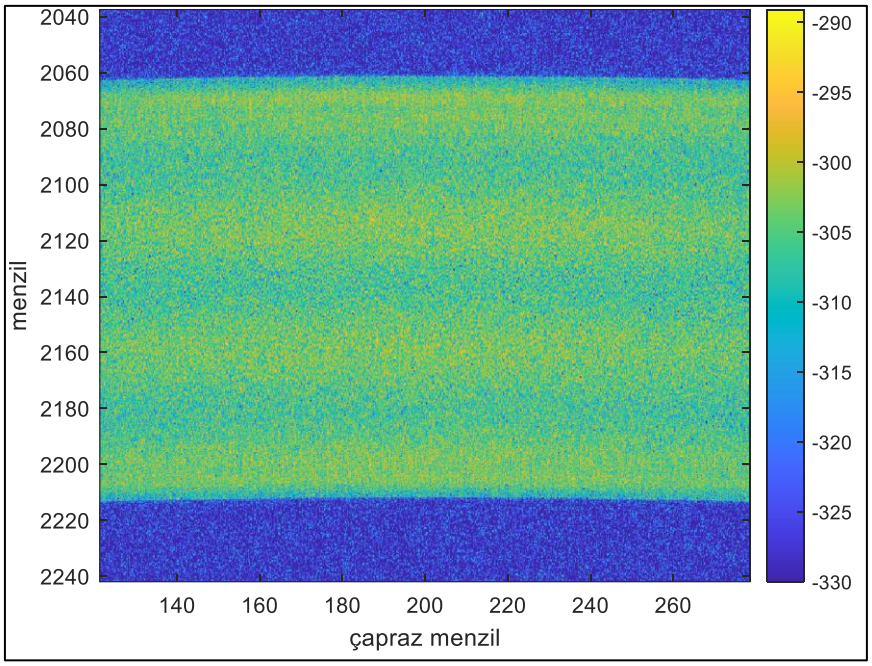
Şekil 3.7. Uyumlu filtrenin frekans alanında ifadesi

$$R = \frac{ct}{2} \tag{3.43}$$

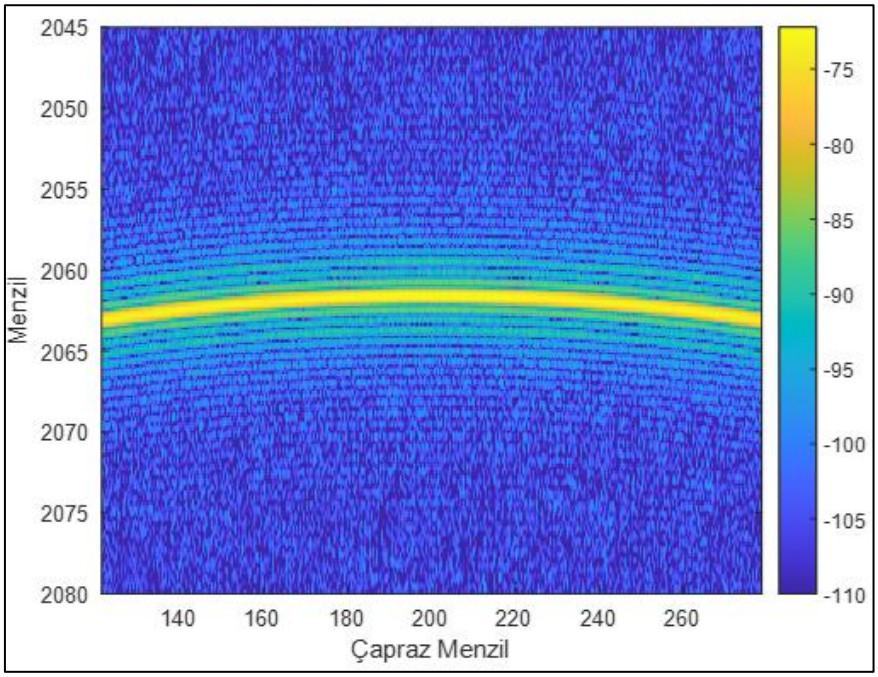


Şekil 3.8. Menzil grafiği

SAR görüntülemesi esnasında platform hareketi boyunca tüm çapraz menzil noktalarında alınan sinyal (Şekil 3.9), uyumlu filtrelemeden geçirilerek menzil boyutunda sıkıştırma işlemi tamamlanır. Oluşan bu görüntü tek bir nokta hedef için çapraz menzil boyutunda yayılan bir hiperbol şeklindedir (Şekil 3.10).



Şekil 3.9. Uyumlu filtreleme öncesi görüntü



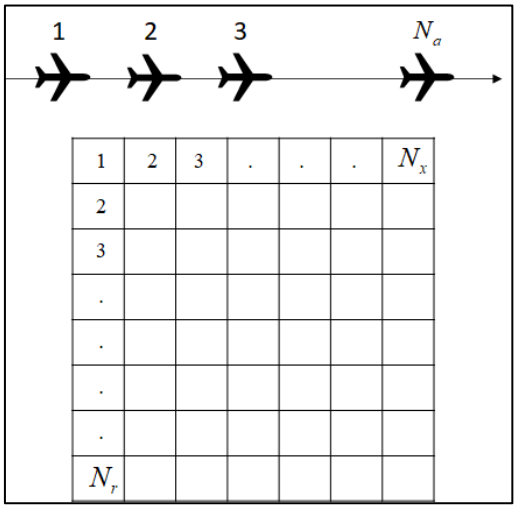
Şekil 3.10. Nokta hedefin uyumlu filtre çıktısı görüntüsü

3.6.2. Geri projeksiyon yöntemi ile çapraz menzil işleme

Çalışmanın önceki bölümlerinde anlatıldığı üzere, SAR geometrisine göre sentetik açıklık boyunca hedef noktasına gönderilen ve geri alınan LFM dalga biçimli sinyaller uyumlu

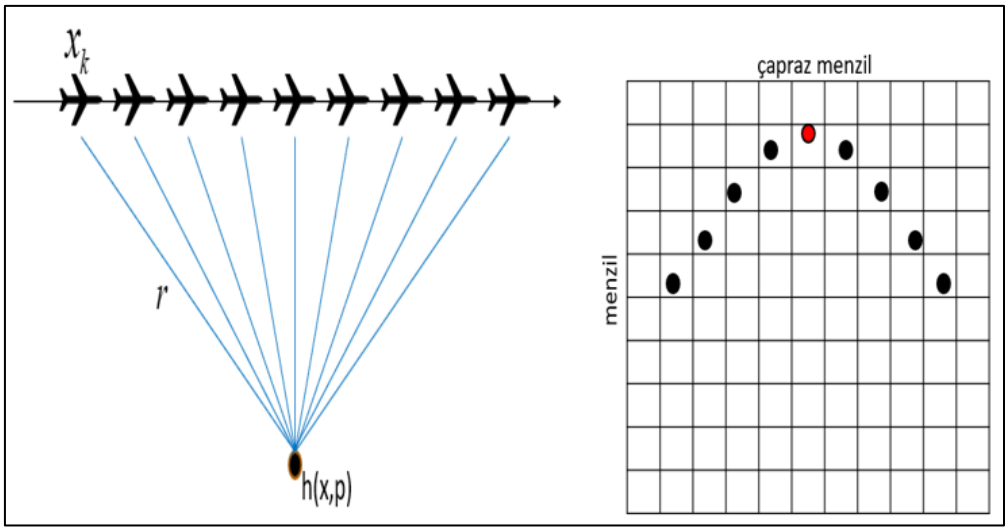
filtreden geçirilerek menzil sıkıştırılması yapılır. Menzilde sıkışmış bu darbeler, çapraz menzil boyutunda işlenerek görüntüye dönüştürülür.

N_x, azimuttaki görüntü piksellerinin sayısı, N_r menzil yönündeki görüntü piksellerinin sayısı, N_a sentetik açıklıktaki platform konumu olmak üzere, $N_x \times N_r$ piksellik bir görüntü alanı oluşturmak için (Şekil 3.11), geri projeksiyon yöntemi ile $N_a \times N_x \times N_r$ sayısı kadar işlem yapılır (Şekil 3.13).



Şekil 3.11. Görüntü pikselleri

Geri projeksiyon yöntemi temelde, yeryüzünde (x,p) noktasında konumlandırılmış sabit bir hedeften, sentetik açıklık boyunca platformun farklı noktalarında veri toplanması sonucu oluşturulan, Bölüm 2.2'de bahsi geçen data matrisinde o hedef için konumlandırılmış ve sonrasında menzil sıkıştırılması yapılmış verilerin evre uyumlu olarak toplanması ve görüntü matrisindeki her nokta için bu hesaplamanın tekrar edilmesi ilkesine dayanır ve görüntü oluşturulur (Şekil 3.12).



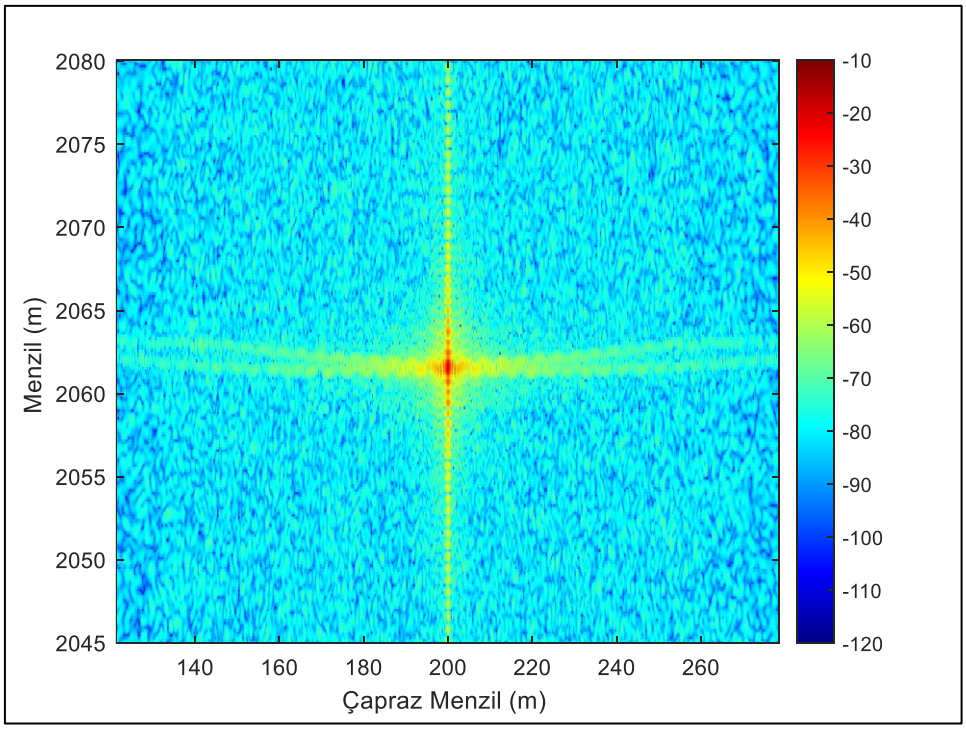
Şekil 3.12. Geri projeksiyon yöntemi gösterimi

Eş. 3.44'de belirtilen bu geri projeksiyon işleminde $h(x,p)$ geri projeksiyon sonucu elde edilen veri, x_k hareket boyunca platformun konumlarını, $g(x_k,r)$ ise menzil sıkıştırılması yapılmış hedef verisini ifade etmektedir.

$$h(x,p) = \sum_{k=1}^{N_a} g(x_k,r)\, exp\left(j\frac{4\pi r}{\lambda}\right) \tag{3.44}$$

Burada düz uçuş izli bir platform için, görüntü üzerindeki (x,p) noktasına uzaklık (r) Eş. 3.45'deki gibi ifade edilir.

$$r = \sqrt{(x_k - x)^2 + p^2} \tag{3.45}$$



Şekil 3.13. Nokta hedefin SAR görüntüsü

Geri projeksiyon yöntemi ile SAR görüntüsü oluşturmak için kullanılan sözde kod Şekil 3.14'deki gösterilmiştir.

```
for tt = 1:N_r
  for ii = 1:N_x
   sum_of_pixels = 0
    for k = 1:N_a
       r = sqrt((x_k - x_ii)^2 + p_tt^2)
       t = 2r/c
       fast_time_bini = round((t - t_min)/Δt) + 1
       sum_of_pixels = sum_of_pixels + (g(x_k, fast_time_bini) exp((j4πr)/λ))
    end
   h(tt,ii) = sum_of_pixels
  end
end
```

Şekil 3.14. Geri projeksiyon yöntemi sözde kodu

4. SAR GÖRÜNTÜLEME PERFORMANSINI ETKİLEYEN BOZUCU ETMENLER

4.1. Gürültü Sayısı ve SAR Görüntüleme Performansına Etkisi

Gürültü sayısı, sistemdeki bir bileşenin girişi ve çıkışı arasındaki sinyal-gürültü oranındaki bozulmanın ölçüsüdür. Sinyal gürültü oranı, istenen sinyal gücünün istenmeyen gürültü gücüne oranıdır ve bu nedenle sinyal gücüne bağlıdır. Gürültü ve istenen sinyal, gürültüsüz bir bileşenin girişine uygulandığında hem gürültü hem de sinyal aynı faktör tarafından zayıflatılır veya yükseltilir. Böylece sinyal gürültü oranı değişmez. Ancak gürültülü bir bileşenin girişine uygulandıklarında sistemin çıkışındaki gürültü gücü, istenen sinyalin gücünden daha fazla artar ve sinyal gürültü oranı azalır. Gürültü sayısı (Noise Figure - F) sinyal gürültü oranındaki bu azalmanın bir ölçüsüdür ve Eş. 4.1'deki gibi tanımlanır.

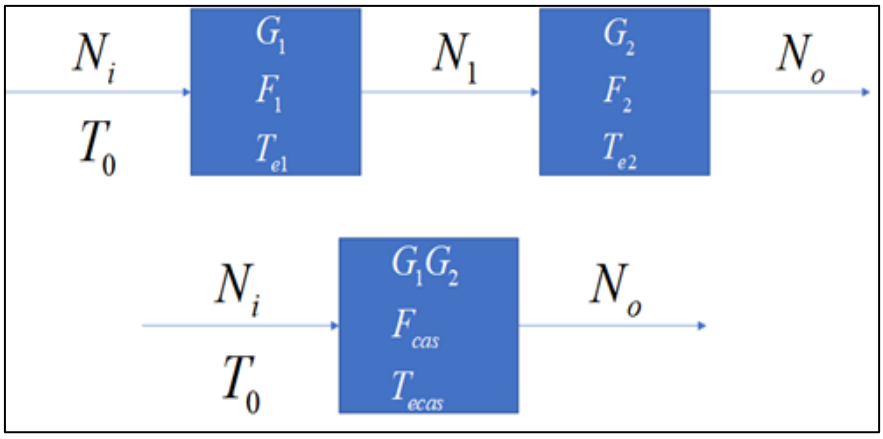
$$F = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} \geq 1 \tag{4.1}$$

Burada S_i ve S_o sırasıyla giriş ve çıkıştaki sinyal gücünü, N_i ve N_o ise sırasıyla giriş ve çıkıştaki gürültü gücünü tanımlar. Giriş gürültü gücü Eş. 4.2'de verilen şekilde ifade edilir.

$$N_i = kT_0B \;;\; T_0 = 290K^o \tag{4.2}$$

Burada B bant genişliği, k Boltzmann sabiti ($1.38x10^{-23}\, W/(Hz\ x\ K^o)$) olarak tanımlanır. İki kademeli yapıda bir sistemin (Şekil 4.1) gürültü sayısı hesaplanırken öncelikle ilk basamağın çıktısı hesaplanır (Eş. 4.4). Burada T_{e1} ilk basamağın eşdeğer gürültü sıcaklığını (Eş. 4.3), G_1 ise kazancını ifade etmektedir.

$$T_{e1} = (F_1 - 1)T_0 \tag{4.3}$$



Şekil 4.1. İki kademeli yapıda bir sistem

$$N_1 = G_1 k T_o B + G_1 k T_{e1} B \tag{4.4}$$

Ardından ikinci basamağın kazanç ve eşdeğer gürültü sıcaklığı kullanılarak sistemin çıkışındaki gürültü gücü hesaplanır (Eş. 4.5).

$$\begin{aligned} N_o &= G_2 N_1 + G_2 k T_{e2} B \\ &= \mathrm{G}_1 G_2 \mathrm{kB} \left(T_0 + T_{e1} + \frac{1}{G_1} T_{e2} \right) \\ &= \mathrm{G}_1 G_2 k B (T_{cas} + T_0) \end{aligned} \tag{4.5}$$

Buradan kademeli sistemin eşdeğer gürültü sıcaklığı çekildiğinde Eş. 4.6'daki ifade elde edilir.

$$T_{cas} = T_{e1} + \frac{1}{G_1} T_{e2} \tag{4.6}$$

Buradan Eş. 4.3 ve Eş. 4.6 birlikte kullanıldığında kademeli sistemin gürültü sayısı Eş. 4.7'deki şekilde ifade edilir.

$$F_{cas} = F_1 + \frac{1}{G_1} (F_2 - 1) \tag{4.7}$$

Eş. 4.7'deki ifade çok kademeli sistemler için genelleştirilirse Eş. 4.8'deki ifade elde edilir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli husus çok kademeli sistemlerde ilk bileşenin gürültü

sayısının, sistemin tümünün gürültü sayısını önemli ölçüde etkilemesidir. Özetle iyi bir sistem gürültü sayısı için, ilk bileşen düşük gürültü sayısına ve mümkün olduğunca yüksek kazanca sahip olmalıdır.

$$F_{cas} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \cdots \tag{4.8}$$

Bu çalışmada yapılan MATLAB simülasyonu kapsamında kullanılan sistem ve hedef parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Eş. 3.11 ve Çizelge 4.1'deki sistem ve hedef parametreleri kullanılarak anten kazancı Eş. 4.10'daki gibi hesaplanır. Burada antenin azimut düzlemindeki huzme genişliği derece cinsinden θ_a ve yükselme düzlemindeki huzme genişliği derece cinsinden θ_e olarak ifade edilir ve Eş. 4.9'daki şekilde hesaplanır.

Çizelge 4.1. Simülasyon kapsamında kullanılan parametreler

Merkez Frekans (f_s)	1 GHz
IF Frekans	300 MHz
Menzil Çözünürlüğü	0,6 m
Çapraz Menzil Çözünürlüğü	1 m
Yükselme düzleminde anten boyutu	0,6 m
Azimut düzleminde anten boyutu	2 m
Nokta hedefin radar kesit alanı	0,2 m^2
PRF	2000 Hz
Darbe Süresi	$1e^{-6}$ s
Gönderilen Güç	1 dB

$$\theta_e = \left(\frac{0.89\lambda}{D_e}\right)\frac{180}{\pi} = \left(\frac{0.89\left(\frac{c}{f}\right)}{D_e}\right)\frac{180}{\pi} \tag{4.9}$$

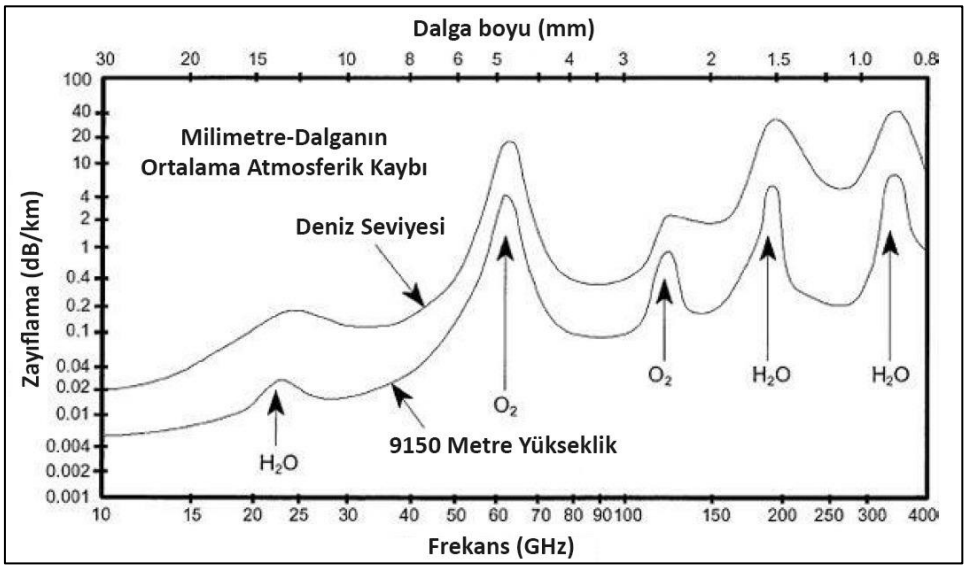
$$\theta_a = \left(\frac{0.89\lambda}{D_a}\right)\frac{180}{\pi} = \left(\frac{0.89\left(\frac{c}{f}\right)}{D_a}\right)\frac{180}{\pi}$$

$$G \approx \frac{26000}{\theta_e \theta_a} = \frac{26000}{\left[\left(\frac{\left(\frac{3e^8}{(10^9)}\right)}{0,6}0,89\right)\left(\frac{\left(\frac{3e^8}{(10^9)}\right)}{2}0,89\right)\right]\left(\frac{180}{\pi}\right)^2} = 133,3174 \tag{4.10}$$

Bu kazanç ifadesi (Eş. 4.10) dB skalasında ifade edilirse Eş. 4.1'deki biçimde ifade elde edilir.

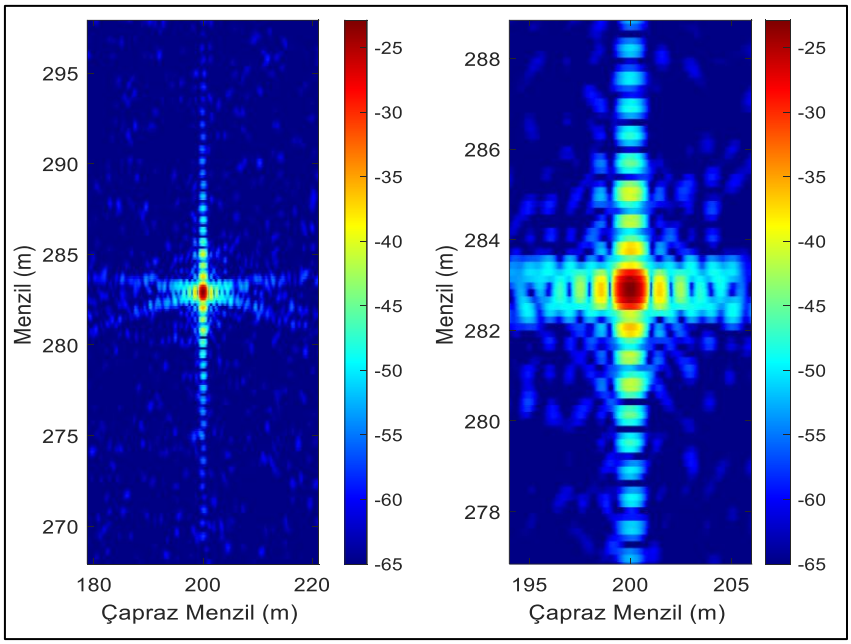
$$G(dB) = 10\,log_{10}(G) = 10\,log_{10}(133{,}3174) = 21{,}2489\,dB \tag{4.11}$$

Çizelge 4.1'de verilen kayıplar Eş. 3.36'da verilen sistem kayıpları ifadesinden gönderici, almaç ve sinyal işleme kayıplarını içermektedir. Sistem kayıplarının ve aynı zamanda sinyal gürültü oranının diğer bir parametresi olan atmosferik kayıpları ise literatürde belirtilen Şekil 4.2 kullanılarak çıkartılabilir. Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta verilen değerlerin tek yol kayıpları olmasıdır. Radar sistemlerinde hem gönderilen dalga hem de hedeften yansıyıp geri alınan dalga bu atmosferik kayba maruz kalacağından bu değerin iki katı kullanılmalıdır.



Şekil 4.2. Elektromanyetik dalgaların tek yol atmosferik kayıpları [10]

Çizelge 4.1'deki parametreler ve sistemin kademeli gürültü sayısı 15 dB alınarak benzetimi yapılan bir SAR sisteminde, nokta hedefin SAR görüntüsü Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3. 15 dB gürültü sayısı olan bir sistemin nokta hedef SAR görüntüsü

Burada nokta hedef, simülasyonun başında 282,8427 m menzile konuşlandırılmış olup SAR görüntüsü simülasyonu sonucunda 282,9871 m'de gözlenmiştir. Aradaki 0,1444 m fark kabul edilebilir bir seviyededir. Aynı hesap çapraz menzil yönünde yapıldığında, simülasyon başlangıcında 200 m çapraz menzile konuşlandırılmış hedef, simülasyon sonucunda 199,9868 m de gözlenmiştir, aradaki 0,0132 m fark kabul edilebilir seviyededir. Böylece hem çapraz menzil hem menzil boyutunda, hedef SAR görüntüsünde doğru konumda çıkmaktadır.

Çizelge 4.1, Eş. 3.24 ve Eş. 3.27 kullanılarak, 15 dB gürültü sayısına sahip kademeli bir sistemde, verilen nokta hedef üzerindeki SNR 26,2821 dB olarak hesaplanmaktadır.

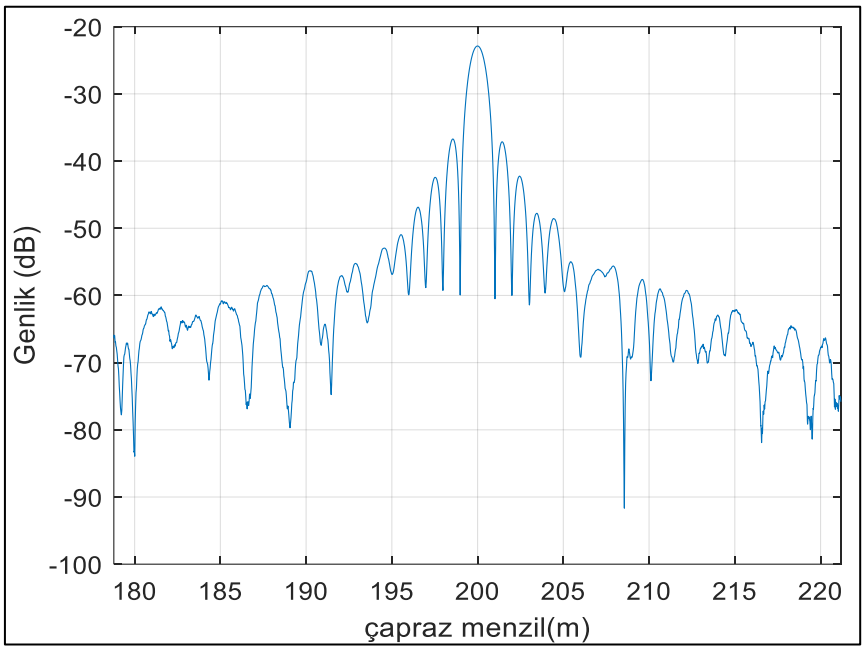
Çapraz Menzil Kesiti

Radar sistemi tarafından tüm HA almaç yapısı ve işleme adımlarından geçirilerek oluşturulmuş bu SAR görüntüsünde nokta hedefin bulunduğu menzilde, çapraz menzil boyutunda bir kesit alındığında Şekil 4.4'de gösterilen sinyal elde edilir.

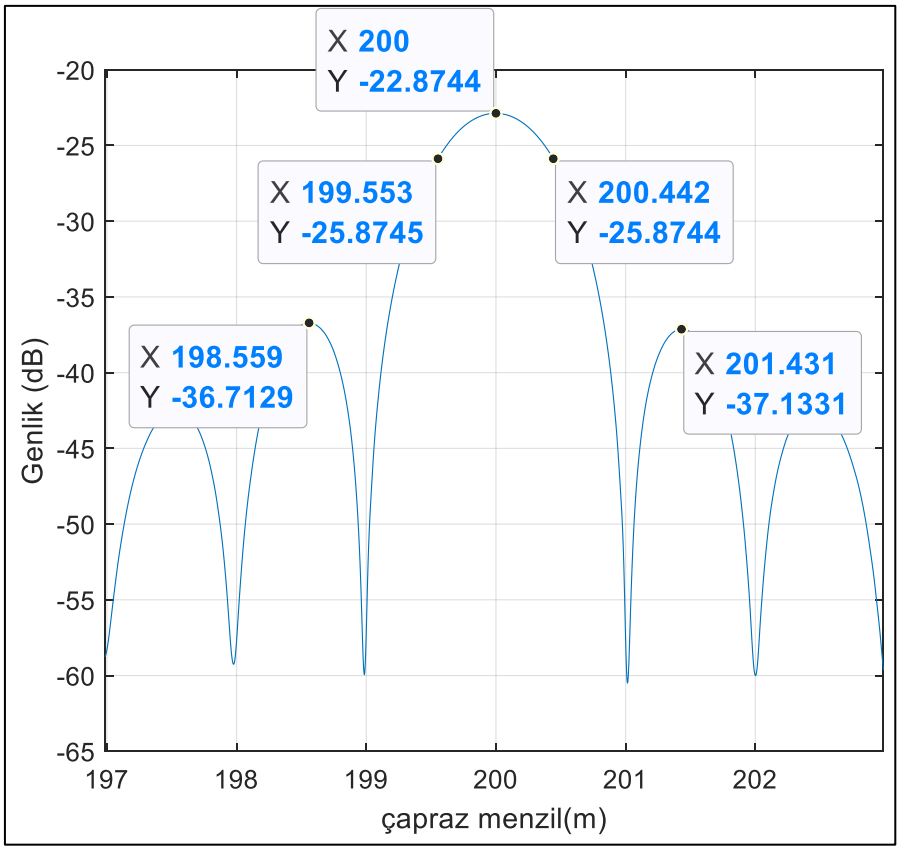
Hedefin bulunduğu tepe noktası ayrıntılı incelenecek olursa (Şekil 4.5), sinyal üzerinde sinyal seviyesinin 3 dB düştüğü noktalara bakıldığında, çapraz menzil çözünürlüğü değeri

200,442-199,553= 0,889 m olarak hesaplanır ve sistem tasarımı esnasında tasarım parametresi girdisi olarak kullanılan çapraz menzil çözünürlüğü değerine (Çizelge 4.1) uygun olduğu teyit edilir.

Ek olarak SAR sistemlerinin performans parametrelerinden biri olan, En Yüksek Yan Kulak Oranı (Peak Sidelobe Ratio - PSLR), yansıyan sinyalin ana kulağının maksimum genlikteki yan kulağa oranı, çapraz menzil kesitinden hesaplandığında, PSLR= -36,7129 - (-22,8744) = -13,8385 dB olarak bulunur.



Şekil 4.4. Gürültü Sayısı 15 dB olan sistemin çapraz menzil çözünürlüğü kontrolü -1

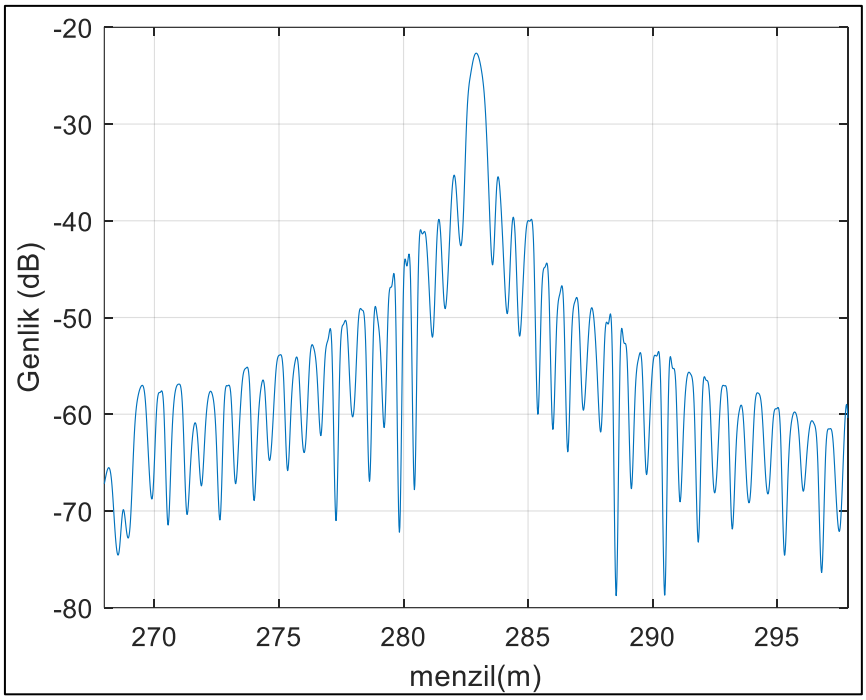


Şekil 4.5. Gürültü Sayısı 15 dB olan sistemin çapraz menzil çözünürlüğü kontrolü -2

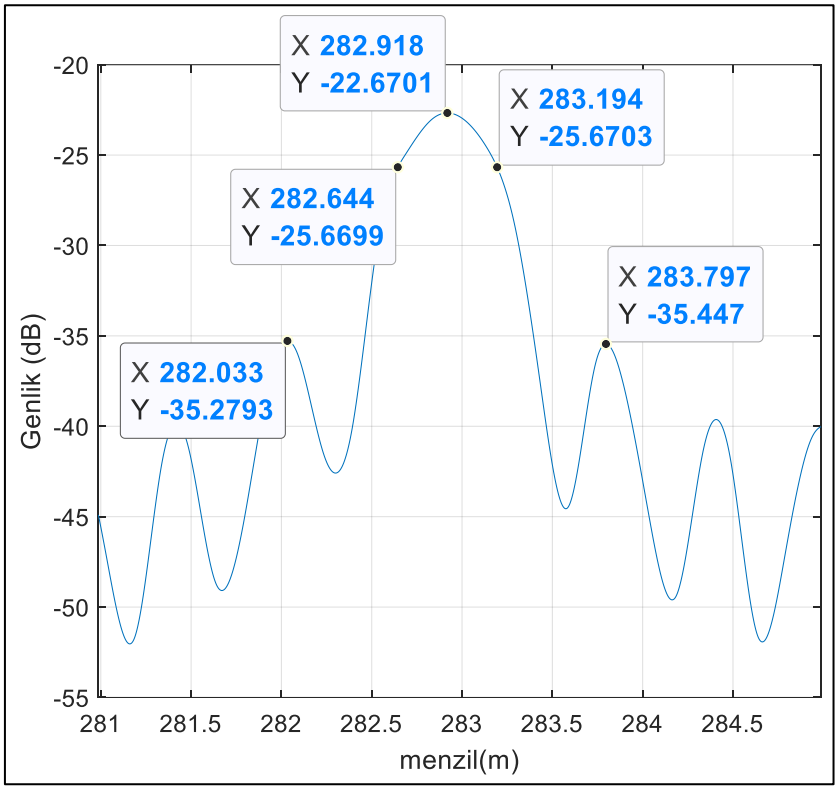
Menzil Kesiti

Bu SAR görüntüsü üzerinde nokta hedefin bulunduğu çapraz menzilde, menzil boyutunda bir kesit alındığında Şekil 4.6'da gösterilen sinyal elde edilir. Hedefin bulunduğu tepe noktası ayrıntılı incelendiğinde (Şekil 4.7), sinyal üzerinde sinyal seviyesinin 3 dB düştüğü noktalara bakılırsa menzil çözünürlük değeri 283,194-282,644 = 0,55 m olarak hesaplanır ve sistem tasarımı esnasında tasarım parametresi girdisi olarak kullanılan menzil çözünürlüğü değerine (Çizelge 4.1) uygun olduğu teyit edilir.

Menzil kesiti üzerinden PSLR hesabı yapıldığında, PSLR= -35,2793 - (-22,6701)= -12,6092 dB olarak bulunur.

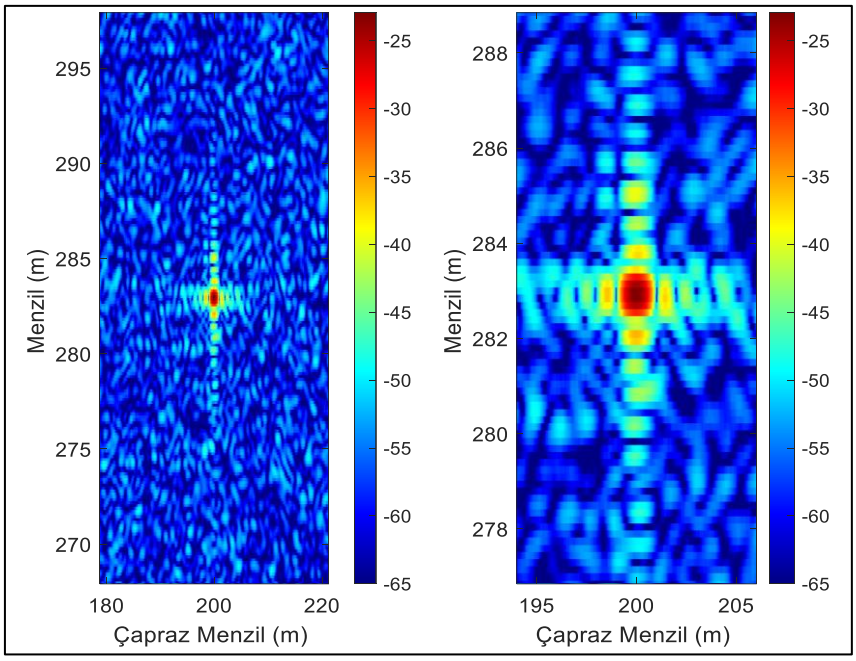


Şekil 4.6. Gürültü Sayısı 15 dB olan sistemin menzil çözünürlüğü kontrolü -1



Şekil 4.7. Gürültü Sayısı 15 dB olan sistemin menzil çözünürlüğü kontrolü -2

Şekil 4.8'de ise, gürültü sayısı 25 dB olarak verilmiş bir SAR sisteminde simülasyonu yapılan nokta hedefin SAR görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.8. 25 dB gürültü sayısı olan bir sistemin nokta hedef SAR görüntüsü

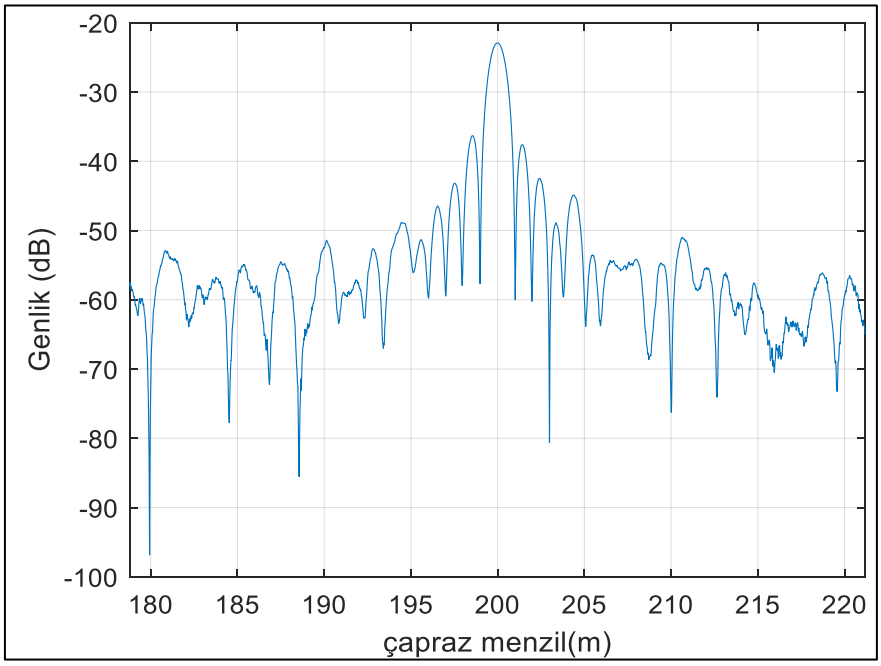
Nokta hedef, simülasyonun başında 282,8427 m menzile konuşlandırılmış olup SAR görüntüsü simülasyonu sonucunda 282,9871 m'de gözlenmiştir. Aradaki 0,1444 m fark kabul edilebilir bir seviyededir. Aynı hesap çapraz menzil yönünde yapıldığında, simülasyon başlangıcında 200 m çapraz menzile konuşlandırılmış hedef, simülasyon sonucunda 199.9868 m de gözlenmiştir. Aradaki 0,0132 m fark kabul edilebilir bir seviyededir. Böylece hem çapraz menzil hem menzil boyutunda, hedef SAR görüntüsünde doğru konumda çıkmaktadır.

Çizelge 4.1, Eş. 3.24 ve Eş. 3.27 kullanılarak, 25 dB gürültü sayısına sahip kademeli bir sistemde, verilen nokta hedef üzerindeki SNR 16,2821 dB olarak hesaplanmaktadır.

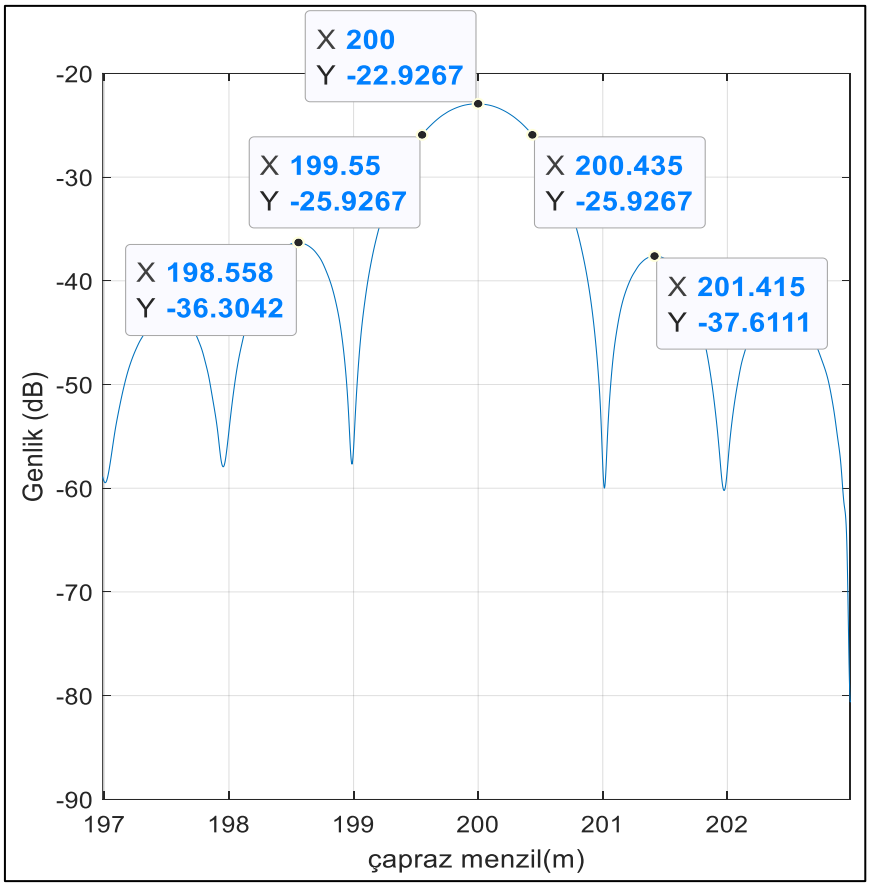
Çapraz Menzil Kesiti

Bu SAR görüntüsünde nokta hedefin bulunduğu menzilde, çapraz menzil boyutunda bir kesit alındığında Şekil 4.9'da gösterilen sinyal elde edilir. Hedefin bulunduğu tepe noktası ayrıntılı incelendiğinde (Şekil 4.10), sinyal üzerinde sinyal seviyesinin 3 dB düştüğü noktalara bakılırsa çapraz menzil çözünürlük değeri 200,435-199,55 = 0,885 m olarak hesaplanır ve sistem tasarımı esnasında tasarım parametresi girdisi olarak kullanılan çapraz menzil çözünürlüğü değerine (Çizelge 4.1) uygun olduğu teyit edilir.

Çapraz menzil kesitinden PSLR hesaplandığında, PSLR= -36,3042 - (-22,9267)= -13,3775 dB olarak bulunur.



Şekil 4.9. Gürültü Sayısı 25 dB olan sistemin çapraz menzil çözünürlüğü kontrolü -1

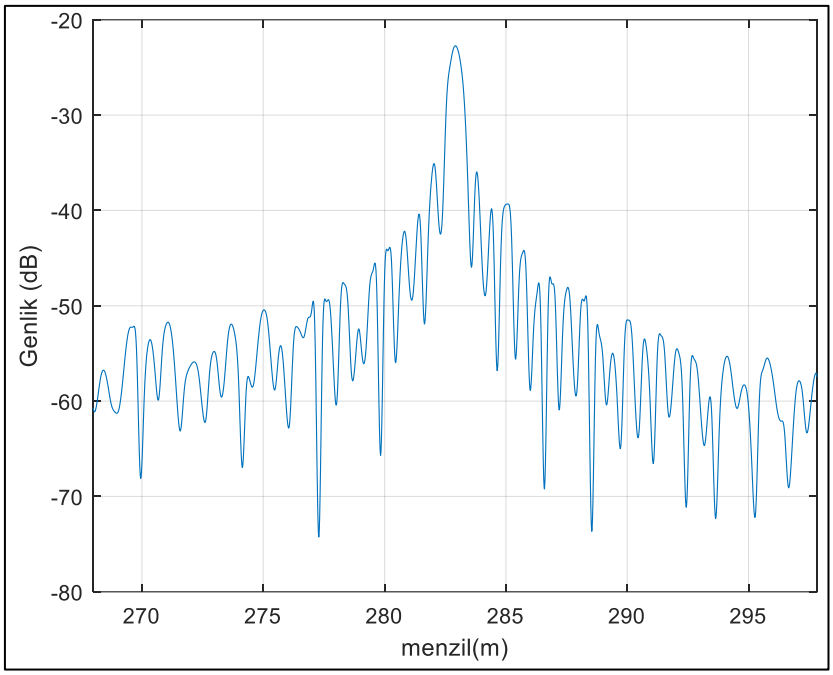


Şekil 4.10. Gürültü Sayısı 25 dB olan sistemin çapraz menzil çözünürlüğü kontrolü -2

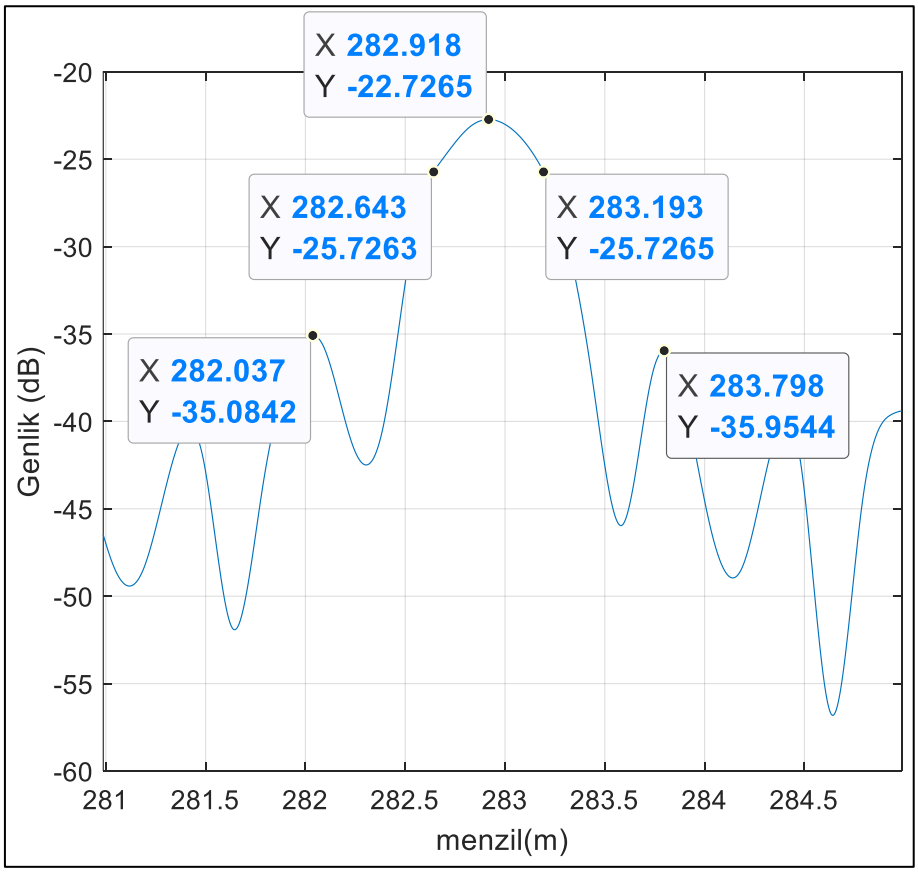
Menzil Kesiti

Bu 25 dB gürültü sayısı olan kademeli sistemin SAR görüntüsü üzerinde nokta hedefin bulunduğu çapraz menzilde, menzil boyutunda bir kesit alındığında Şekil 4.11'da gösterilen sinyal elde edilir. Hedefin bulunduğu tepe noktası ayrıntılı incelendiğinde (Şekil 4.12), sinyal üzerinde sinyal seviyesinin 3 dB düştüğü noktalara bakılırsa menzil çözünürlük değeri 283,193-282,643 = 0,55 m olarak hesaplanır ve sistem tasarımı esnasında tasarım parametresi girdisi olarak kullanılan menzil çözünürlüğü değerine (Çizelge 4.1) uygun olduğu teyit edilir.

Menzil kesiti üzerinden PSLR hesabı yapıldığında, PSLR= -35,0842 - (-22,7265)= -12,3577 dB olarak bulunur.



Şekil 4.11. Gürültü Sayısı 25 dB olan sistemin menzil çözünürlüğü kontrolü -1



Şekil 4.12. Gürültü Sayısı 25 dB olan sistemin menzil çözünürlüğü kontrolü -2

Gürültü sayısının SAR görüntüsü üzerindeki etkilerinin simülasyon sonuçları Çizelge 4.2'de özet olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Gürültü sayısının SAR görüntüsü üzerindeki etkileri

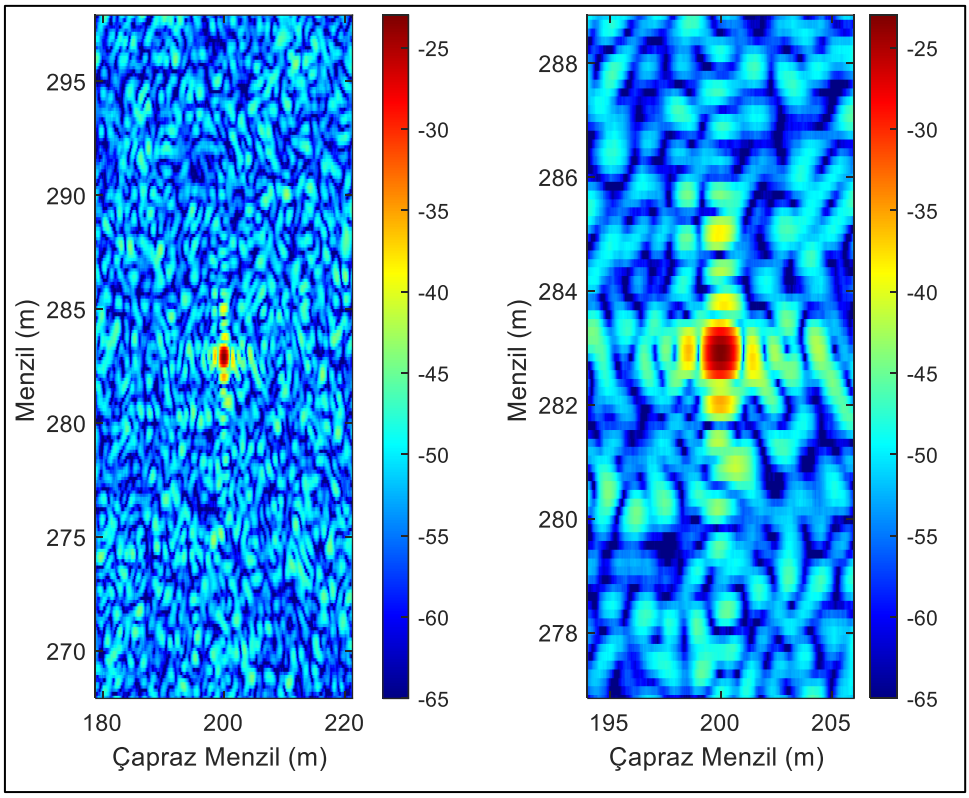
Gürültü Sayısı (db)	SNR (dB)	Menzil Hatası (m)	Çapraz Menzil Hatası (m)	Menzil Çözünürlüğü (m)	Çapraz Menzil Çözünürlüğü (m)	Menzil Kesitinde PSLR (dB)	Çapraz Menzil Kesitinde PSLR (dB)
15	26,2821	0,1444	0,0132	0,55	0,889	-12,6092	-13,8385
25	16,2821	0,1444	0,0132	0,55	0,885	-12,3577	-13,3775

Gürültü sayısı 15 dB olan sistemin SAR görüntüsü (Şekil 4.3) ve gürültü sayısı 25 dB olan sistemin SAR görüntüsü (Şekil 4.8) incelendiğinde, aynı menzil ve özelliklerdeki nokta hedeften alınan SNR değerleri sırasıyla 26,2821 dB ve 16,2821 dB'dir. Bu iki SNR değeri arasındaki fark incelendiğinde, 26,2821-16,2821 = 10 dB aradaki farkın kademeli sistemin tasarımı sırasında belirtilen gürültü sayıları arasındaki farka (25-15=10 dB) eşit olduğu görülür. Bu fark gürültü altında hedefin tespitinin azalmasına neden olmaktadır.

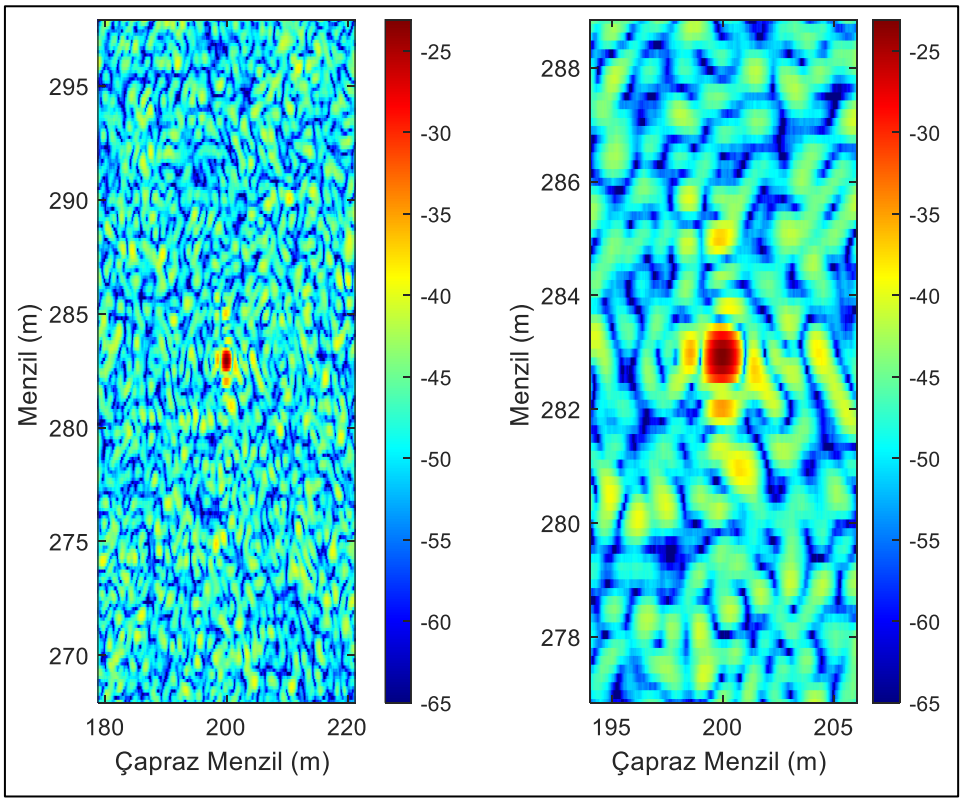
Öte yandan belirtilen iki sistemin de menzil ve çapraz menzil çözünürlükleri, hedefin bulunduğu menzilde, çapraz menzil kesitinden ve hedefin bulunduğu çapraz menzilde, menzil kesitinden incelendiğinde sistemin tasarımı sırasında dikkate alınan değerlerle uygun ve birbirine oldukça yakın/aynı olduğu gözlenmiştir.

Ayrıca PSLR değeri bu iki sistemde menzil ve çapraz menzil kesitinde incelendiğinde, gürültü sayısı değerinin bu parametreyi önemli ölçüde etkilemediği gözlenmiştir.

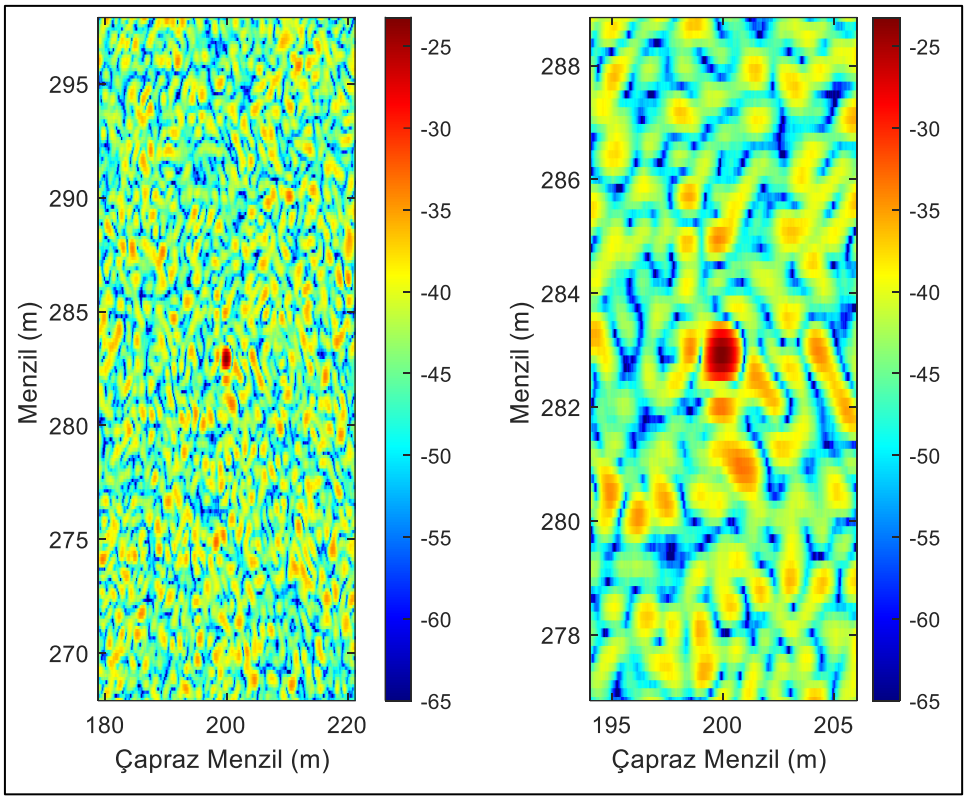
Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da sırayla 30, 35, 40, 45 dB gürültü sayılı sistemlerin nokta hedef SAR benzetimi sonucu elde edilen SAR görüntüleri verilmiştir. Bu hedeflerin SNR'ları sırasıyla 11,2821 dB, 6,2821 dB, 1,2821 dB, -3,2821 dB olarak ölçülmüştür. Bu SAR görüntülerinden de görüleceği üzere gürültü sayısı arttıkça, SNR azalmakta, nokta hedefin SAR görüntüsü üzerindeki tespiti zorlaşmaktadır.



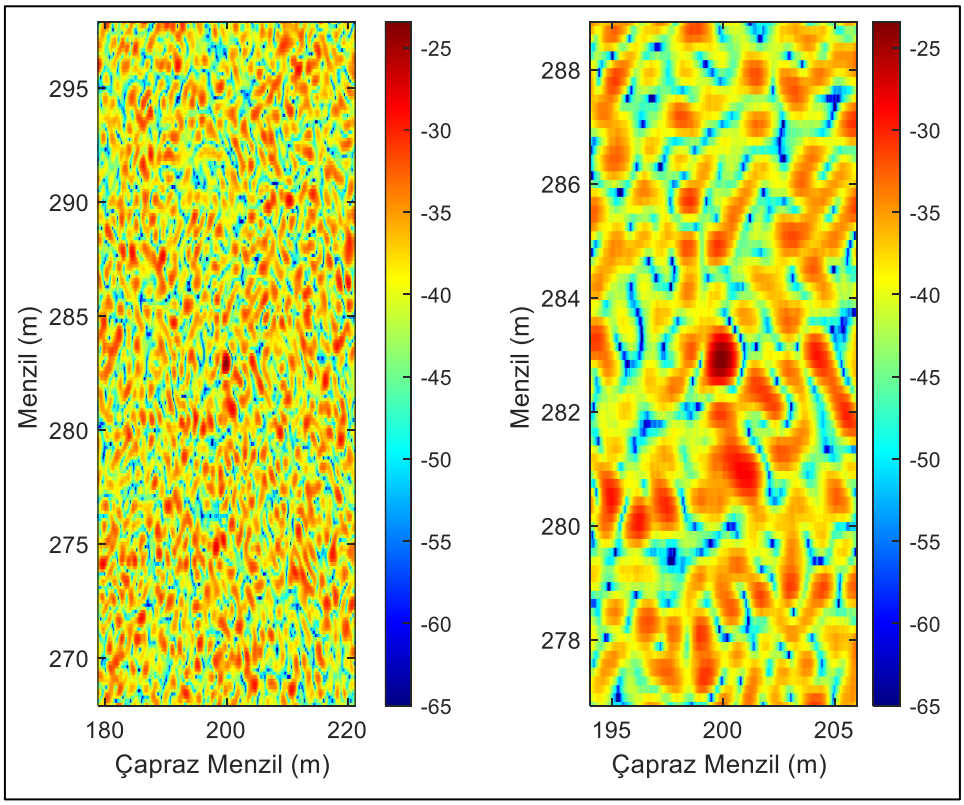
Şekil 4.13. 30 dB gürültü sayısı olan bir sistemin nokta hedef SAR görüntüsü



Şekil 4.14. 35 dB gürültü sayısı olan bir sistemin nokta hedef SAR görüntüsü



Şekil 4.15. 40 dB gürültü sayısı olan bir sistemin nokta hedef SAR görüntüsü



Şekil 4.16. 45 dB gürültü sayısı olan bir sistemin nokta hedef SAR görüntüsü

4.2. Grup Gecikmesi ve SAR Görüntüleme Performansına Etkisi

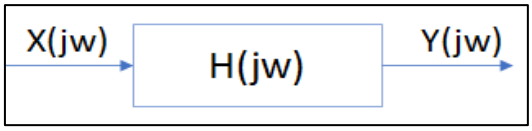
Bir sinyalin tüm frekans bileşenleri bir sistemden geçerken zaman gecikmesine uğrar. Grup gecikmesi, sinyalin sistemden geçmesi için geçen bu sürenin, frekansa bağlı olarak değişen ölçüsüdür. Aynı zamanda cihazın faz bozulmasının da bir ölçüsü olarak kabul edilir ve cihazın frekansa göre faz açısının değişim hızı olarak ifade edilir. Grup gecikmesinin birimi saniye olarak ifade edilir.

Bir cihazın grup gecikmesi ölçülürken, doğrusal faz kayması getiren sistem bileşeni sabit bir değere dönüştürülür ve bu değer ortalama gecikmeyi temsil eder. Yüksek dereceli faz kaydırma özelliğine sahip sistem bileşeni, sabit grup gecikmesinden sapmalara neden olur. Grup gecikmesindeki bu sapmalar tıpkı doğrusal fazdan sapmaların bozulmalara neden olması gibi sinyal bozulmalarına neden olur.

Frekansa karşı sabit ve tutarlı grup gecikmesi radar sistemlerinde oldukça önemlidir. Bir radar darbesinin frekansı yüksek bant genişliğine yayılmış olabilir. Darbe işlenmesi adımlarında, frekans bandının tümünde etkilerin aynı olması beklenir. Aksi takdirde bozulmalar radar menzili ölçümlerini yanlış hale getirir.

Filtreler, genellikle fiziksel olarak çok kompakt olmalarına rağmen, mikrodalga devrelerinde çok fazla gecikmeye neden olur. Bir filtrenin grup gecikmesi, filtrenin derecesi ile orantılı, filtre bant genişliği ile ters orantılıdır. Yani filtre derecesi ne kadar yüksek ve bant genişliği gereksinimleri ne kadar sıkı olursa, bir filtrenin getirdiği grup gecikmesi o kadar fazla olur. İdeal bir filtre için faz doğrusal olacak ve grup gecikmesi sabit olacaktır. Bununla birlikte, gerçek dünyada, farklı frekanslardaki sinyallerin bir filtreden geçmesi farklı miktarlarda zaman aldığından grup gecikmesi bozulmaları meydana gelir.

Filtreleme işlemi temelde Şekil 4.17'deki filtreleme yapısı ile gerçekleştirilir ve Eş. 4.12'de ifade edilen filtreleme adımları uygulanır.



Şekil 4.17. Filtreleme yapısı

$$
\begin{aligned}
X(j\omega) &= e^{j\omega t} \\
H(j\omega) &= |H(jw)|e^{j\theta(\omega)} \\
Y(j\omega) &= X(j\omega)H(j\omega) \\
&= e^{j\omega t}\left(|H(jw)|e^{j\theta(\omega)}\right) \\
&= |H(jw)|e^{j(\omega t+\theta(\omega))}
\end{aligned}
\tag{4.12}
$$

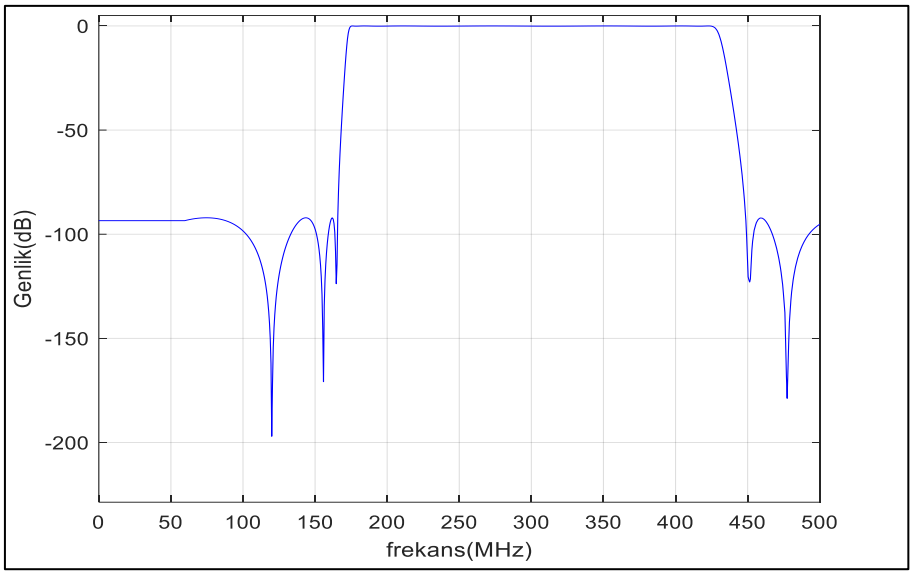
Burada $\theta(\omega)$ filtrenin frekansa bağlı faz ifadesidir ve Eş. 4.12'de de görüleceği üzere filtrenin çıkışında ekstra bir faz kayması olarak sisteme ilave edilmektedir. Grup gecikmesi, bu faz ifadesinin frekansa bağlı türevi olarak ifade edilir (Eş. 4.13).

$$\tau_g(\omega) = -\frac{d\theta(\omega)}{d\omega} \tag{4.13}$$

Burada $\tau_g(\omega)$, frekansa bağlı grup gecikmesi olarak ifade edilmektedir. $\tau_g(\omega)$ sabit, $\theta(\omega)$ lineer bir fonksiyon olduğunda ($\theta(\omega) = \omega\tau_{g_0}$), sinyalin farklı frekans bileşenleri aynı grup gecikmesine sahip olabilir. Böylece sinyal bu sistemden, dalga biçiminde bir bozulma olmadan geçebilir.

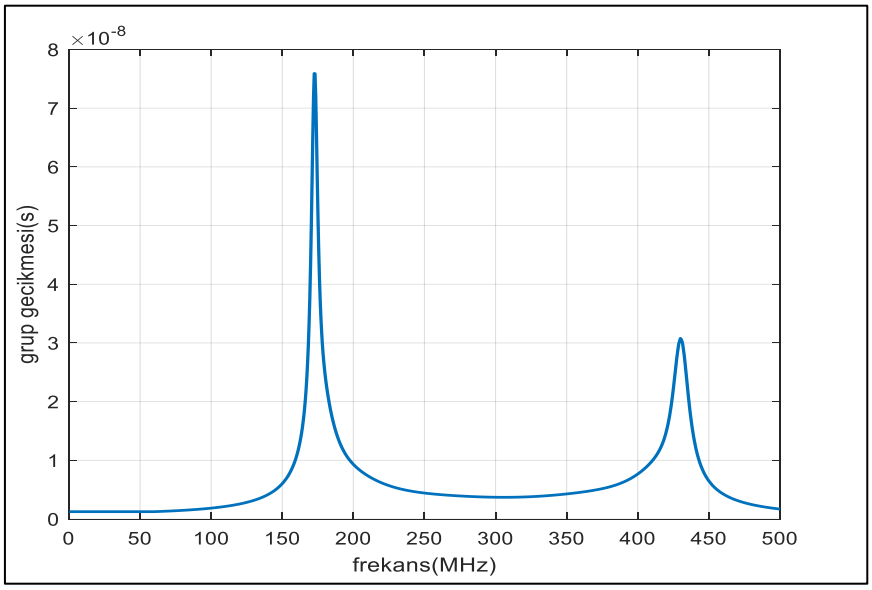
Tezin bu bölümünde bahsedildiği üzere sistemde grup gecikmesi bozulmalarının ana nedenlerinden olan filtre incelenmektedir. HA yapısında bulunan IF frekansları geçirmek üzere kullanılan bant geçiren filtre (Band Pass Filter - BPF), bu çalışmada en keskin şekilde tasarlanan ve yüksek bant genişliğinde olan filtre olduğundan grup gecikmesine katkısı en çok olan sistem bileşenidir. Bu bölümün devamında ise BPF filtrenin karakteristiği ve SAR görüntüsüne etkileri incelenmiştir.

Şekil 4.18'de bu çalışmada kullanılan 300 MHz merkez frekanslı, 250 MHz bant genişlikli BPF'nin frekansa karşı genlik grafiği, Şekil 4.19'de ise aynı filtrenin frekansa karşı grup gecikmesi grafiği verilmiştir.



Şekil 4.18. BPF genlik-frekans grafiği

Şekil 4.18'de görüldüğü üzere burada kullanılan filtre oldukça keskin bir biçimde tasarlanmıştır. Bu sayede frekans bandının istenmeyen bölümlerinden alınan sinyalleri oldukça iyi bastırabilmektedir. Ancak bu keskin tasarım beraberinde, Şekil 4.19'de gözlenebileceği üzere, filtrenin kesim frekanslarında yüksek grup gecikmesi değerleri getirmektedir. Filtrenin ortalama grup gecikmesinin üzerinde olan bu değerler, grup gecikmesi bozulması olarak ifade edilir.

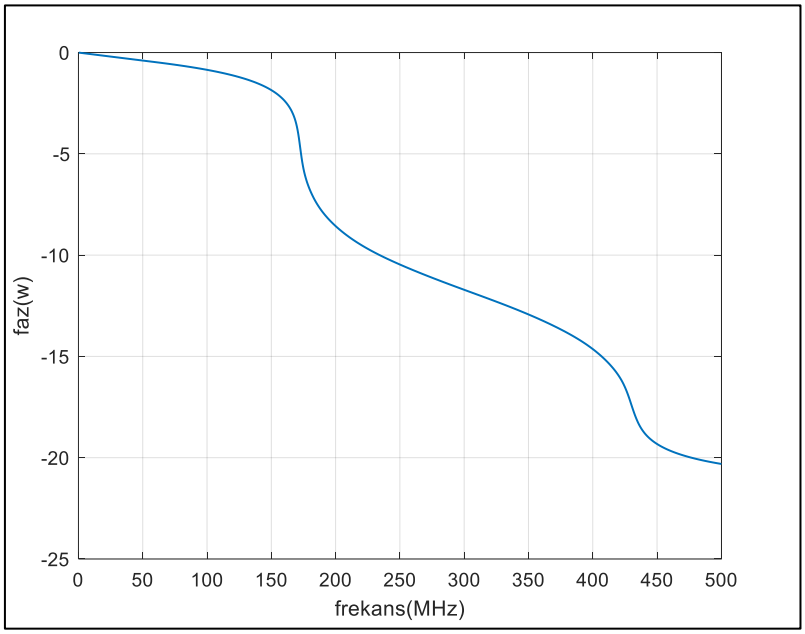


Şekil 4.19. BPF grup gecikmesi-frekans grafiği

Eş. 4.13'de belirtilen ifade kullanılarak frekansa bağlı grup gecikmesi değerinden frekansa bağlı faz değerine geçebilmek için Eş. 4.14'de verilen ifade kullanılır.

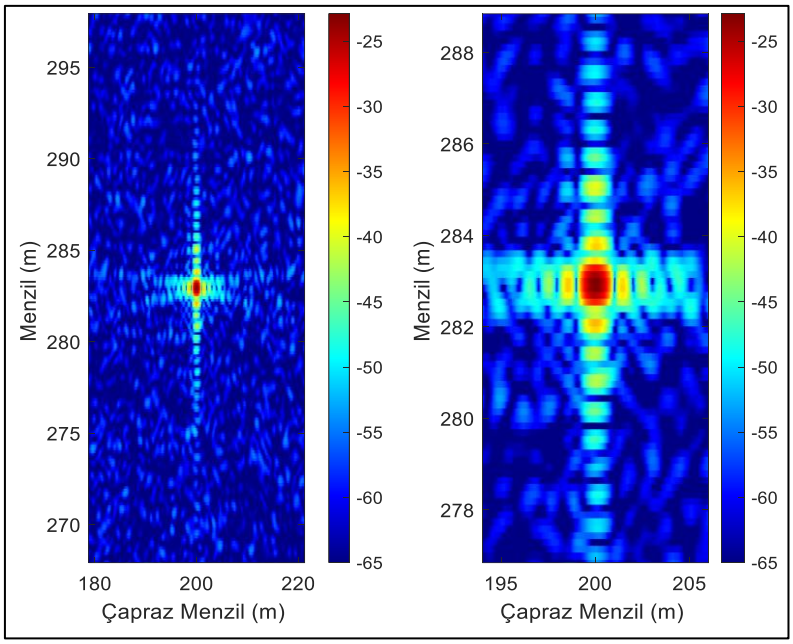
$$\theta(\omega) = -\int \tau_g(\omega)\, d\omega \tag{4.14}$$

Eş. 4.14 kullanılarak hesaplanan BPF'nin frekansa bağlı faz grafiği Şekil 4.20'da gösterilmiştir. Burada görüleceği üzere filtrenin kesim frekanslarında fazdaki lineerlik bozulmuştur.



Şekil 4.20. BPF frekans-faz grafiği

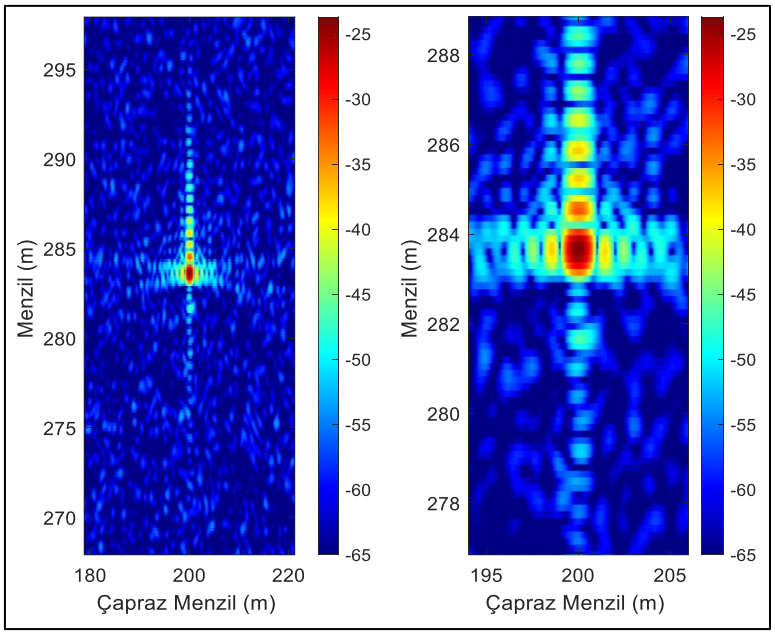
Grup gecikmesinin SAR görüntüsü üzerindeki etkilerinin incelendiği bu bölümde, Çizelge 4.1'deki parametreler ile benzetimi yapılan bir SAR sisteminde, sistemin kademeli gürültü sayısı 20 dB alınarak sırasıyla sisteme BPF'nin grup gecikmesi eklenerek ve eklenmeden simülasyon yapılmıştır. Grup gecikmesi eklenmeden yapılan simülasyon sonucunda nokta hedefin SAR görüntüsü Şekil 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Grup gecikmesiz sistemin SAR görüntüsü

Burada nokta hedef, simülasyonun başında 282,8427 m menzile konuşlandırılmış olup SAR görüntüsü simülasyonu sonucunda 282,9871 m'de gözlenmiştir. Aradaki 0,1444 m fark kabul edilebilir bir seviyededir. Aynı hesap çapraz menzil yönünde yapıldığında, simülasyon başlangıcında 200 m çapraz menzile konuşlandırılmış hedef, simülasyon sonucunda 199,9868 m de gözlenmiştir. Aradaki 0.0132 m fark kabul edilebilir bir seviyededir. Böylece hem çapraz menzil hem menzil boyutunda, hedef SAR görüntüsünde doğru konumda çıkmaktadır.

Grup gecikmesinin simülasyona eklenmesi neticesinde yine aynı nokta hedefin SAR görüntüsü Şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.22. Grup gecikmeli sistemin SAR görüntüsü

Grup gecikmesinin sisteme eklendiği bu simülasyonda ise nokta hedef, simülasyonun başında 282,8427 m menzile konuşlandırılmış olup SAR görüntüsü simülasyonu sonucunda 283,5871 m'de gözlenmiştir. Aradaki 0.7444 m fark, grup gecikmesinin getirdiği fazdan kaynaklı olarak hedefin yanlış konumda belirmesine neden olmuştur. Aynı hesap çapraz menzil yönünde yapıldığında, simülasyon başlangıcında 200 m çapraz menzile konuşlandırılmış hedef, simülasyon sonucunda 199,9868 m de gözlenmiştir. Aradaki 0.0132 m fark kabul edilebilir bir seviyededir. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 ayrıntılı olarak incelendiğinde, grup gecikmesi etkisinin eklenmiş olduğu simülasyon sonucundaki SAR görüntüsünde (Şekil 4.22) nokta hedefin bulunduğu menzilin ilerilerinde sinyal gücünün yoğunlaştığı fark edilecektir. Grup gecikmesinden kaynaklı bu etki hedefin bulunduğu çapraz menzilde, menzil boyutunda alınan kesit incelendiğinde daha net ortaya çıkmaktadır.

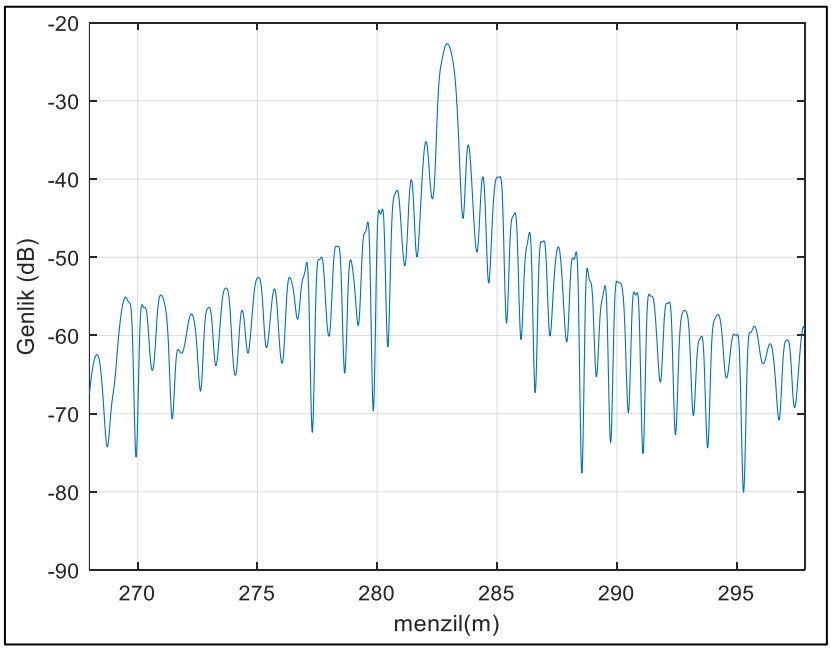
Menzil Kesiti

Şekil 4.23'de grup gecikmesi etkisi olmadan elde edilen SAR görüntüsünün nokta hedefin bulunduğu çapraz menzilde, menzil boyutunda alınan kesiti (tepe noktasının ayrıntılı gösterimi Şekil 4.24); Şekil 4.25'de ise grup gecikmesi etkisinin eklendiği simülasyonun yine aynı kesiti verilmiştir (tepe noktasının ayrıntılı gösterimi Şekil 4.26). Belirtilen şekillerden net bir biçimde görüldüğü üzere grup gecikmesi yan kulakların kabarmasına

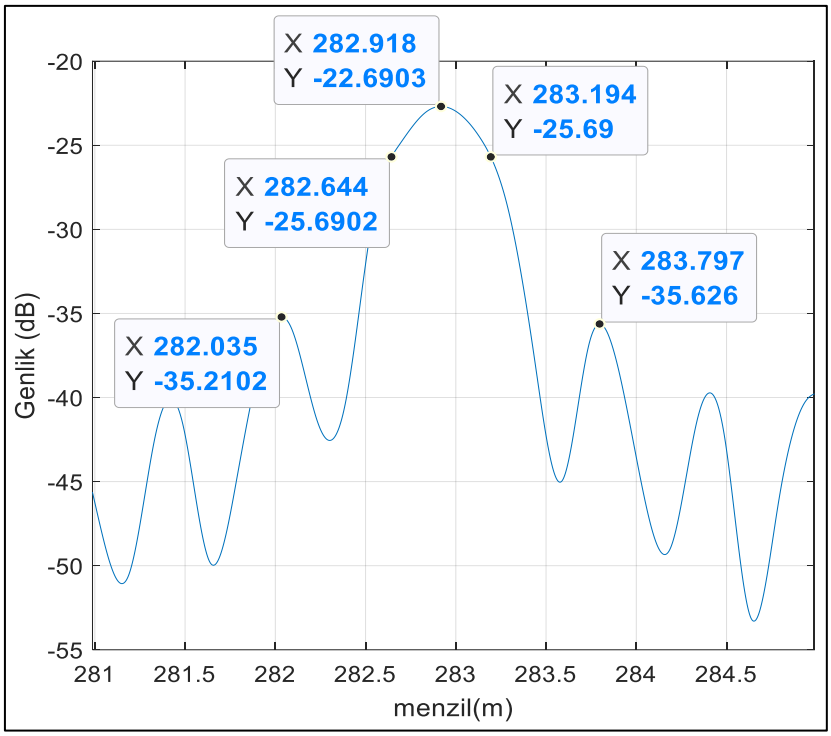
neden olmuştur. Bu kabarma SAR görüntüsü üzerinde istenmeyen gerçek dışı hedeflerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. PSLR hesabı her iki sistem için de yapılacak olursa:

Grup gecikmesi etkisi olmayan sistemde (Şekil 4.24):
PSLR = -35,2102 - (-22,6903) = -12,5199 dB

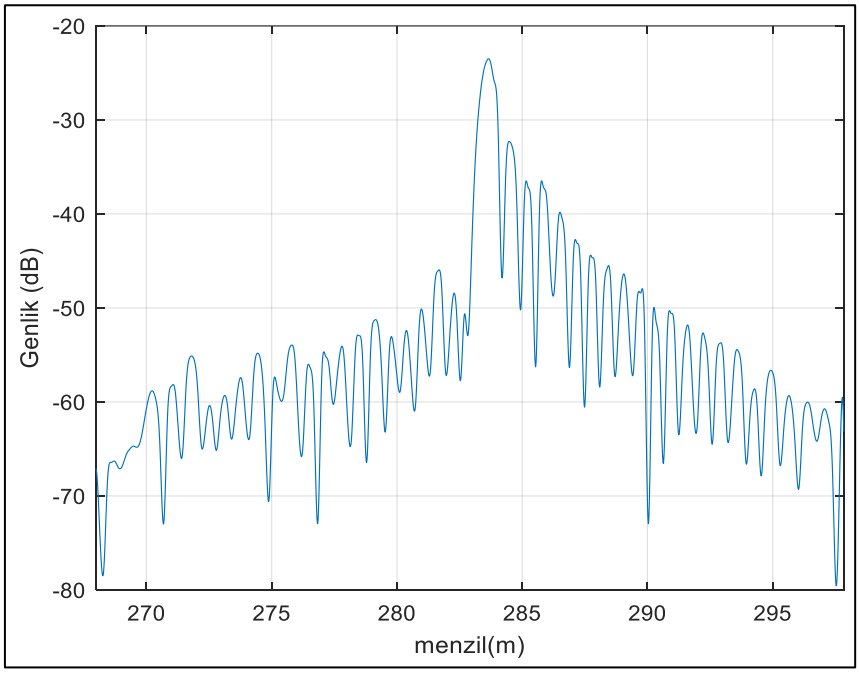
Grup gecikmesi dahilindeki sistemde (Şekil 4.26):
PSLR= -32,2893 - (-23,5005) = -8,7888 dB olarak hesaplanır.



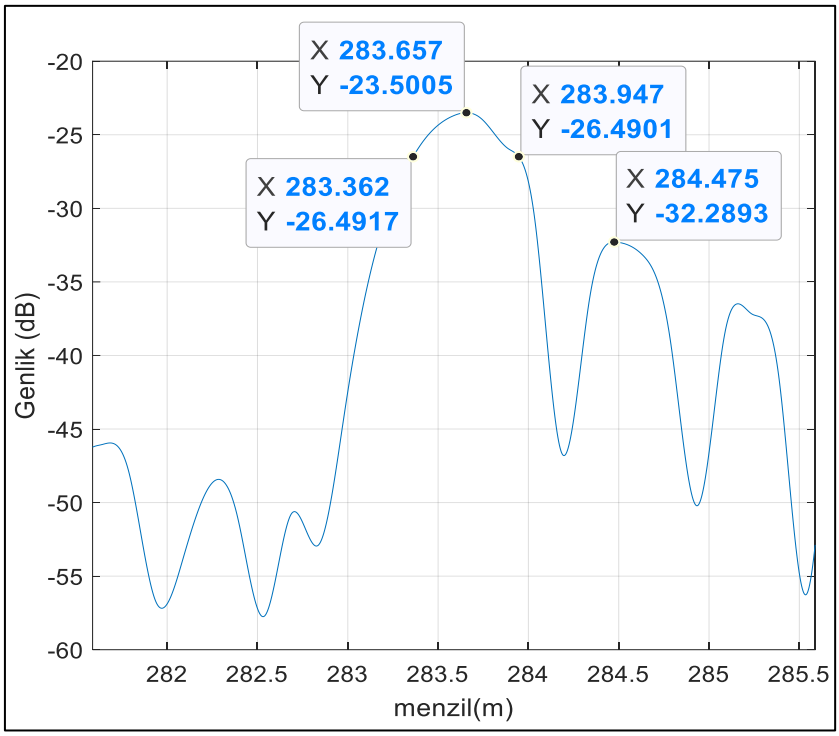
Şekil 4.23. Grup gecikmesiz sistemin menzil çözünürlüğü kontrolü -1



Şekil 4.24. Grup gecikmesiz sistemin menzil çözünürlüğü kontrolü -2



Şekil 4.25. Grup gecikmeli sistemin menzil çözünürlüğü kontrolü -1



Şekil 4.26. Grup gecikmeli sistemin menzil çözünürlüğü kontrolü -2

Grup gecikmesi etkisinin dahil edilmediği sistemde hedefin bulunduğu tepe noktası ayrıntılı incelendiğinde (Şekil 4.24) sinyal seviyesinin 3 dB düştüğü noktalara bakılırsa, menzil çözünürlük değeri 283,194-282,644 = 0,55 m olarak hesaplanır ve sistem tasarımı esnasında tasarım parametresi girdisi olarak kullanılan menzil çözünürlüğü değerine (Çizelge 4.1) uygun olduğu teyit edilir. Aynı hesap grup gecikmesinin dahil edildiği sistemde yapıldığında (Şekil 4.26), sinyal seviyesinin 3 dB düştüğü noktalar hesaba katıldığında menzil çözünürlük değeri 283,947-283,362 = 0,585 m olduğu görülür. Grup gecikmeli sistemin menzil çözünürlük değeri de sınır değerlerin içerisinde kalmasına rağmen buradan görüldüğü üzere grup gecikmesi etkisinin olmadığı sisteme göre kötü bir performansa neden olmaktadır.

Çapraz Menzil Kesiti

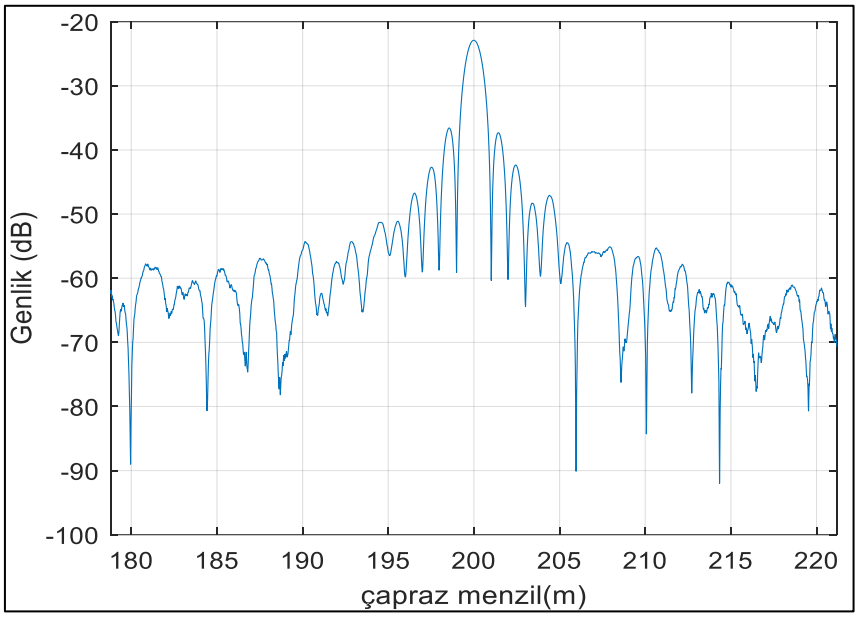
Grup gecikmesi etkisi dahil olmayan ve dahil olan bu iki sistemin SAR görüntülerinde nokta hedefin bulunduğu menzilde, çapraz menzil boyutunda alınan kesitler incelenecek olursa sinyal seviyesinin 3 dB düştüğü noktalar incelendiğinde grup gecikmesiz sistemin (Şekil 4.28) çapraz menzil çözünürlüğü 200,439-199,552=0,887 m; grup gecikmesinin dahil edildiği sistemin (Şekil 4.30) çapraz menzil çözünürlüğü ise 200,436-199,55=0,886 m olarak hesap edilir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta grup gecikmesinin

dahil edildiği sistemde, çapraz menzil çözünürlüğü değeri hesabı için menzil yönünde alınan kesit, grup gecikmesinden kaynaklı hedefin konumlandığı ileriki menzil esas alınarak hesaplanmıştır.

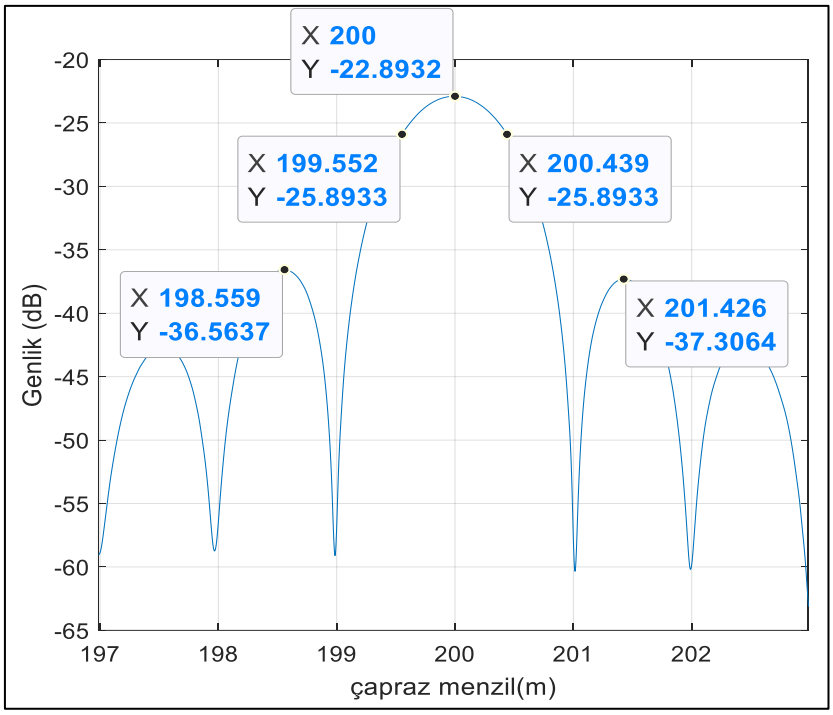
PSLR hesabı her iki sistem için de yapılacak olursa:
Grup gecikmesi etkisi dahil edilmeyen sistemde (Şekil 4.28):
PSLR = -36,5637 - (-22,8932) = -13,6705 dB

Grup gecikmesi dahilindeki sistemde (Şekil 4.30):
PSLR = -37,2494 - (-23,6976) = -13,5518 dB olarak hesaplanır.

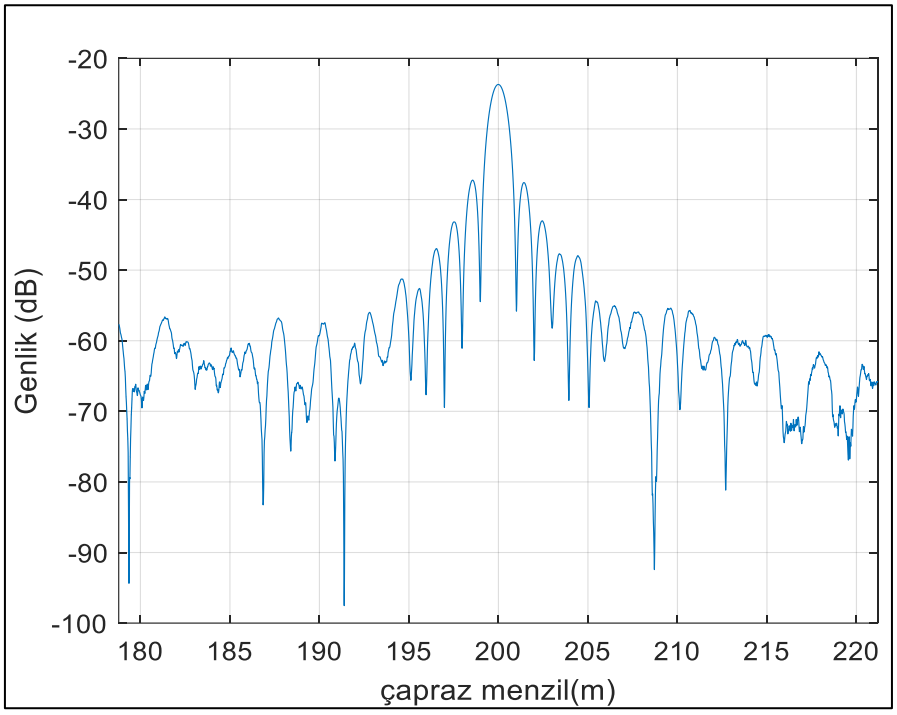
Burada dikkat edilecek olursa çapraz menzilden hesaplanan PSLR ve çözünürlükte, grup gecikmesi kaynaklı büyük bir etki gözlenmemiştir.



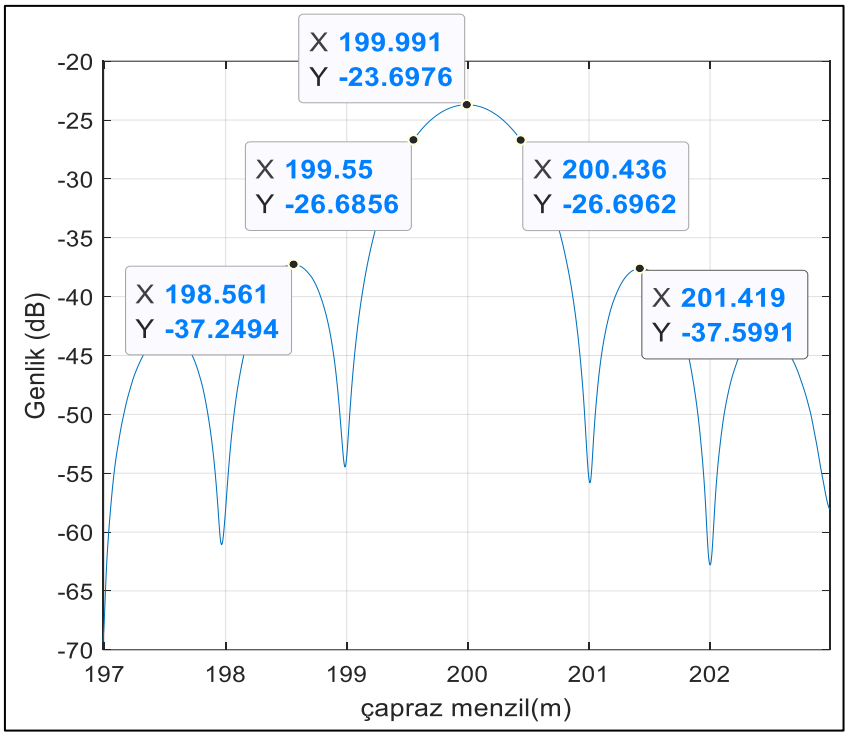
Şekil 4.27. Grup gecikmesiz sistemin çapraz menzil çözünürlüğü kontrolü -1



Şekil 4.28. Grup gecikmesiz sistemin çapraz menzil çözünürlüğü kontrolü -2



Şekil 4.29. Grup gecikmeli sistemin çapraz menzil çözünürlüğü kontrolü -1



Şekil 4.30. Grup gecikmeli sistemin çapraz menzil çözünürlüğü kontrolü -2

Grup gecikmesinin SAR görüntüsü üzerindeki etkilerinin simülasyon sonuçları Çizelge 4.3'de özet olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Grup gecikmesinin SAR görüntüsü üzerindeki etkileri

Grup Gecikmesi Etkisi	Menzil Hatası (m)	Çapraz Menzil Hatası (m)	Menzil Çözünürlüğü (m)	Çapraz Menzil Çözünürlüğü (m)	Menzil Kesitinde PSLR (dB)	Çapraz Menzil Kesitinde PSLR (dB)
Dahil Değil	0,1444	0.0132	0,55	0,887	-12,5199	-13,6705
Dahil	0,7444	0.0132	0,586	0,885	-8,7888	-13,5518

Aynı menzil ve çapraz menzilde konuşlu nokta hedef üzerinde gerçekleştirilmiş, grup gecikmesi etkisinin sisteme dahil edildiği ve dahil edilmediği benzetim sonuçları incelendiğinde, grup gecikmesi dahil edilmeyen sistemde menzil kesitindeki yan kulakların grup gecikmesinin dahil edildiği sisteme göre daha düşük seviyelerde olduğu böylece menzil kesitinden incelenen PSLR değerinin grup gecikmesiz sisteme göre daha düşük çıktığı görülmektedir. Grup gecikmesinin simülasyona dahil edildiği sistemde SAR görüntüsü incelendiğinde, grup gecikmesi bozulmasının getirdiği bu PSLR artışı etkisinin görüntü

üzerinde istenmeyen ve gerçek dışı hedefler ortaya çıkardığı görülmektedir. Grup gecikmesinin ortalama değeri ise benzetimi yapılan esas nokta hedefin menzilinin yanlış konumda gözlenmesine sebebiyet vermektedir.

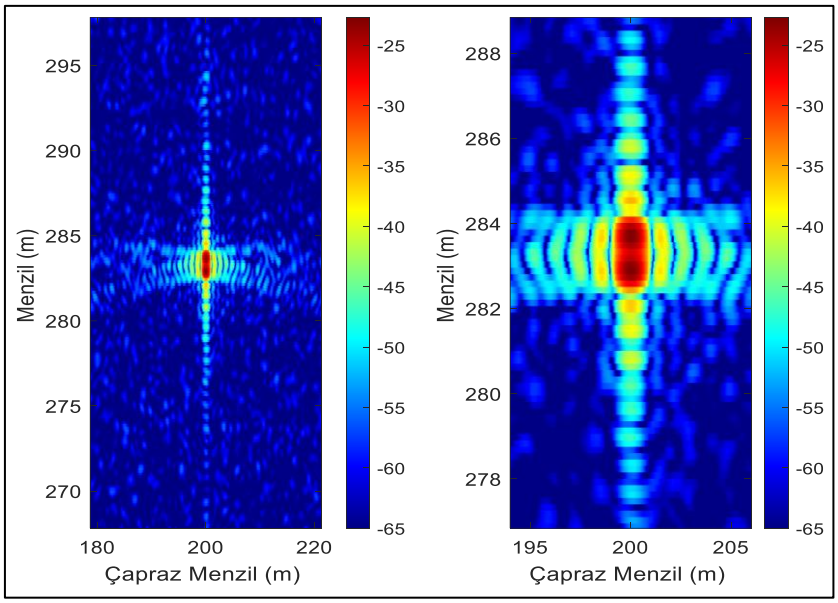
Bu iki benzetim menzil çözünürlüğü yönünden incelendiğinde, grup gecikmesinin dahil edildiği sistemde menzil çözünürlüğü değerinin grup gecikmesinin benzetime dahil edilmediği sisteme göre daha kötü performans gösterdiği gözlenmiştir. Grup gecikmesinin çapraz menzil boyutunda önemli bir etkisinin olmadığı yapılan benzetimler sonucunda gözlenmiştir.

İki Hedefli Benzetimin SAR Görüntüsüne Grup Gecikmesi Etkisi

Bu noktaya kadar olan simülasyonlarda grup gecikmesinin, tek bir nokta hedefin SAR görüntüsündeki bozulma etkileri incelenmiştir. Bu kısımda ise iki hedefli bir aydınlatma alanında grup gecikmesinin SAR görüntüsü üzerindeki bozucu etkileri incelenmiştir.

Bu bölümdeki benzetimlerde Çizelge 4.1'deki parametreler ile simülasyonu yapılan bir SAR sisteminde, sistemin kademeli gürültü sayısı 20 dB olarak kullanılmıştır.

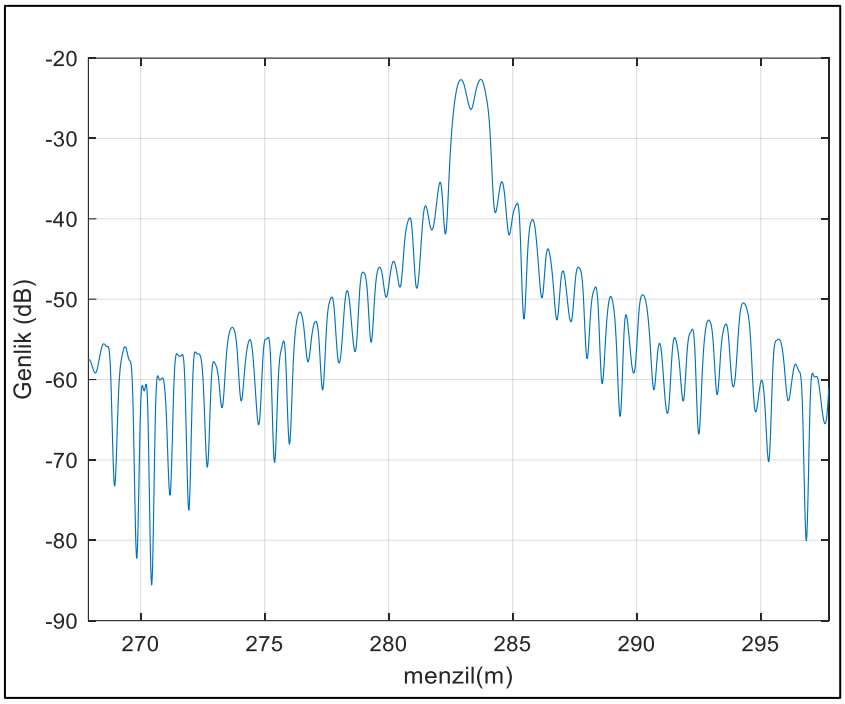
Şekil 4.31'de aydınlanma alanı içerisinde konuşlandırılmış birbirlerinden yaklaşık menzil çözünürlüğü (0,78 m) kadar ayrışmış 282,8427 m ve 283,6287 m menzillerdeki, 200 m çapraz menzildeki iki hedefin, grup gecikmesi etkisi dahil edilmeyen SAR sistemi ile görüntülenmesi sonucunda oluşan SAR görüntüsü verilmiştir. Burada dikkat edilecek olursa SAR görüntüsü üzerinde nokta hedefler birbirlerinden ayrışmış biçimde görülmektedir. Buradaki ayrışmanın 3dB seviyesinde olduğuna dikkat edilmelidir.



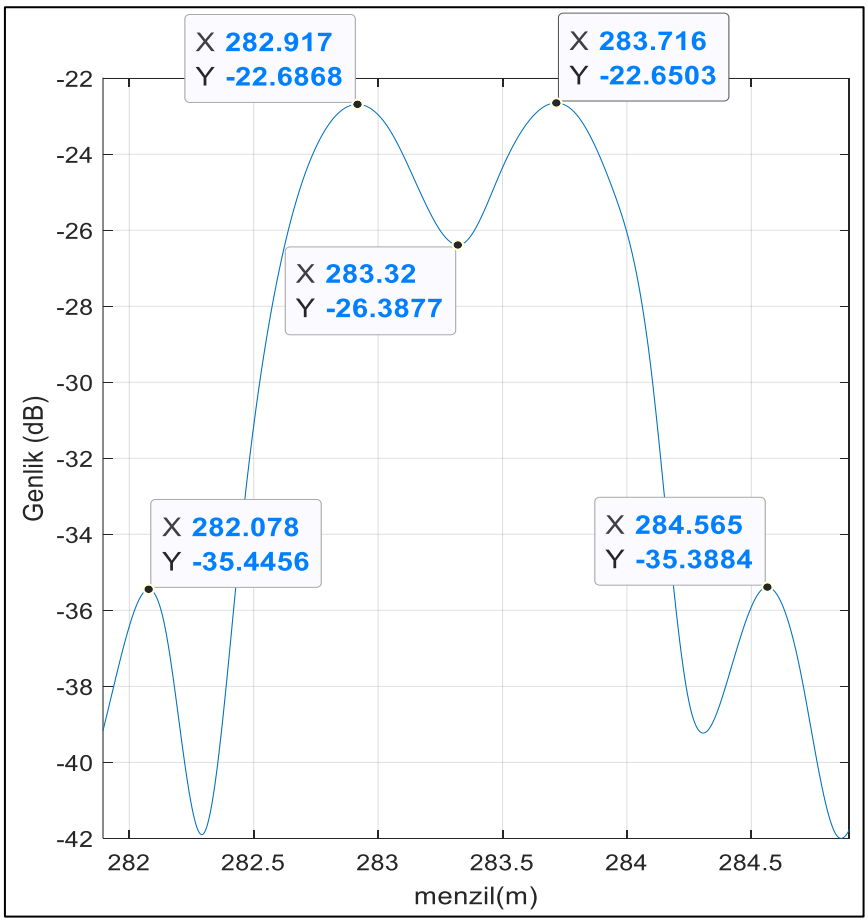
Şekil 4.31. Grup gecikmesiz sistemin iki hedefli SAR Görüntüsü

Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'da bu ayrışma daha detaylı olarak hedeflerin bulunduğu çapraz menzilde, menzil ekseninde alınmış kesit üzerinde incelenmiştir.

İki hedefin birbirinden ayrıldığı nokta, 282,8427 m de konuşlandırılmış hedefin tepe noktasından (-22,6868 - (-26,3877)) = 3,7009 dB düşük seviyededir. 3 dB den fazla olan bu seviye hedeflerin birbirinden ayrışmasını sağlamaktadır. Ek olarak yan kulak seviyesi incelendiğinde 283,6287 m menzildeki hedefin tepe noktası ile maksimum yan kulak seviyesi arasındaki fark (PSLR) (-35,3884 - (-22,6503)) = -12,7381 dB olarak hesaplanır. Hedeflerin menzil doğrulukları incelendiğinde 282,8427 m de konumlanmış hedef 282,917; 283,6287 m menzile konulmuş hedef ise 283,716 m de gözlenmiştir. Aradaki menzil hatası sırayla 0,0743 m ve 0,0873 m olarak kabul edilebilir seviyededir.

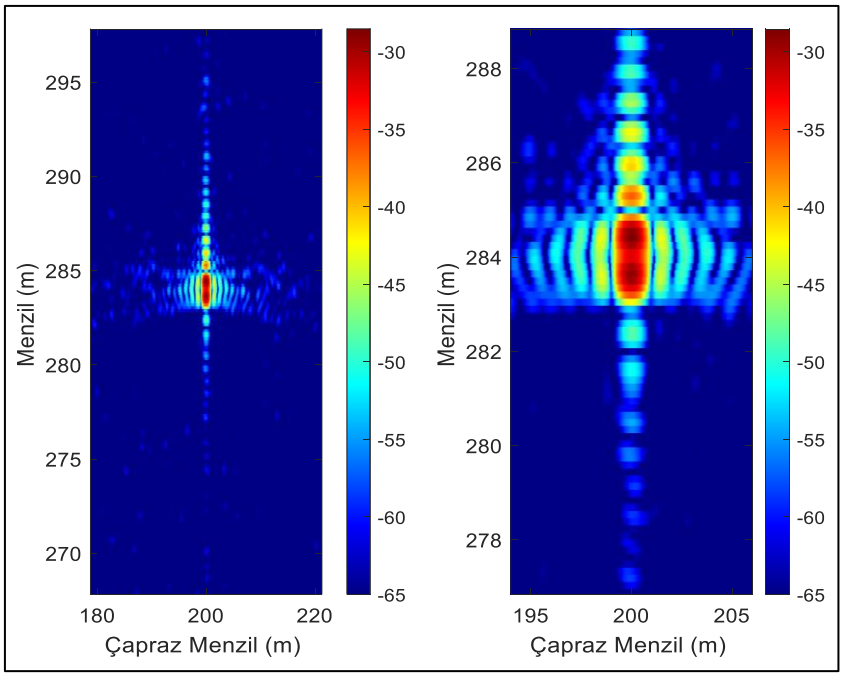


Şekil 4.32. Grup gecikmesiz sistemin iki hedefli menzil çözünürlüğü kontrolü-1



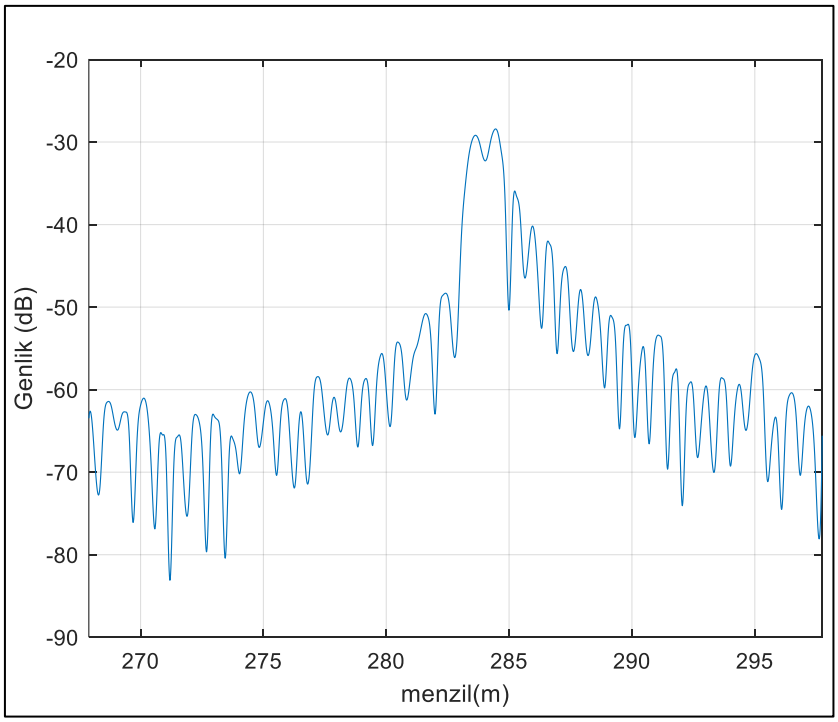
Şekil 4.33. Grup gecikmesiz sistemin iki hedefli menzil çözünürlüğü kontrolü -2

Şekil 4.34'de aydınlanma alanı içerisinde konuşlandırılmış birbirlerinden yaklaşık menzil çözünürlüğü (0,78 m) kadar ayrışmış 282,8427 m ve 283,6287 m menzillerdeki, 200 m çapraz menzildeki iki hedefin, grup gecikmesi etkisi dahil edilen SAR sistemi ile görüntülenmesi sonucunda oluşan SAR görüntüsü verilmiştir.

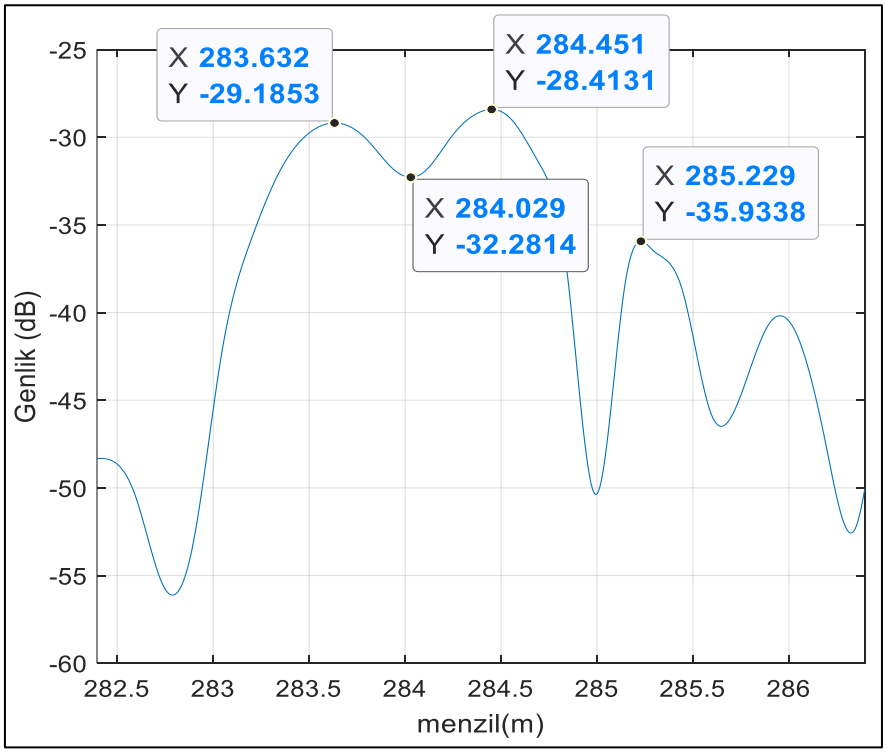


Şekil 4.34. Grup gecikmeli sistemin iki hedefli SAR görüntüsü

Burada dikkat edilecek olursa SAR görüntüsü üzerinde nokta hedefler birbirlerinden Şekil 4.31'ye göre daha az ayrışmış biçimde görülmektedir. Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'de bu ayrışma daha detaylı olarak hedeflerin bulunduğu çapraz menzilde, menzil ekseninde alınmış kesit üzerinde incelenmiştir.



Şekil 4.35. Grup gecikmeli sistemin iki hedefli menzil çözünürlüğü kontrolü -1



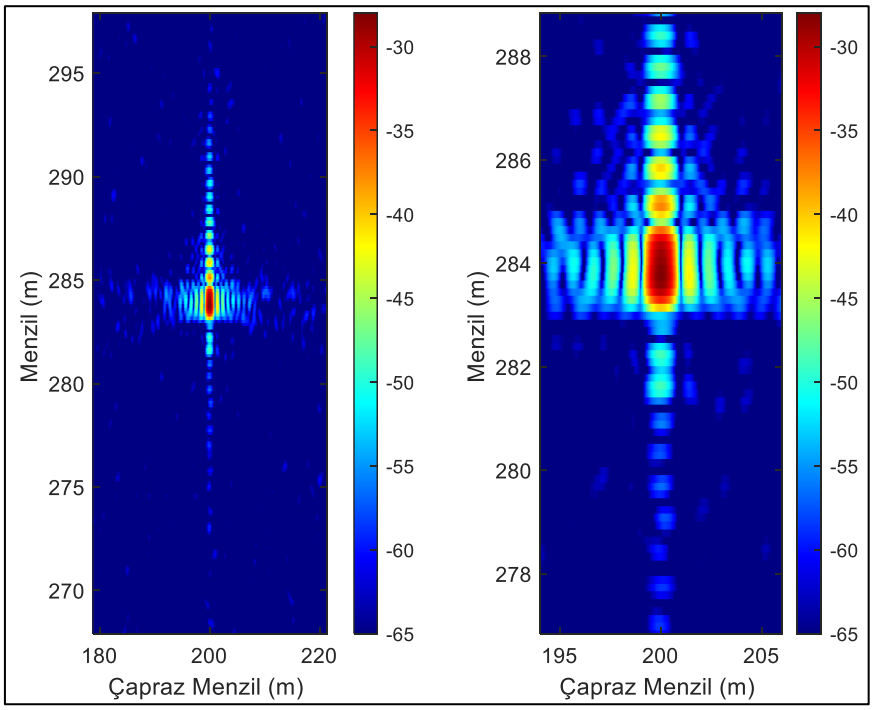
Şekil 4.36. Grup gecikmeli sistemin iki hedefli menzil çözünürlüğü kontrolü -2

İki hedefin birbirinden ayrıldığı nokta, 282,8427 m de konuşlandırılmış hedefin tepe noktasından (-29,1853 - (-32,2814)) = 3,0961 dB düşük seviyededir. Dikkat edilecek olursa

grup gecikmesinin dahil edilmediği sistemde, bu değer 3,7009 seviyesinin üzerinde olup SAR görüntüsü üzerinde hedeflerin daha çok ayrışmasına olanak sağlanmıştır; ancak grup gecikmesi dahilindeki sistemde hedefler bu seviyede ayrışmamıştır. Ek olarak yan kulak seviyesi incelendiğinde 283,6287 m menzildeki hedefin tepe noktası ile maksimum yan kulak seviyesi arasındaki fark (PSLR) (-35,9338 - (-28,4131)) = -7,5207 dB olarak hesaplanır.

Hedeflerin menzil doğrulukları incelendiğinde 282,8427 m de konumlanmış hedef 283,632 m de; 283,6287 m menzile konulmuş hedef ise 284,451 m de gözlenmiştir. Aradaki menzil hatası sırayla 0,7893 m ve 0,8223 m olmaktadır.

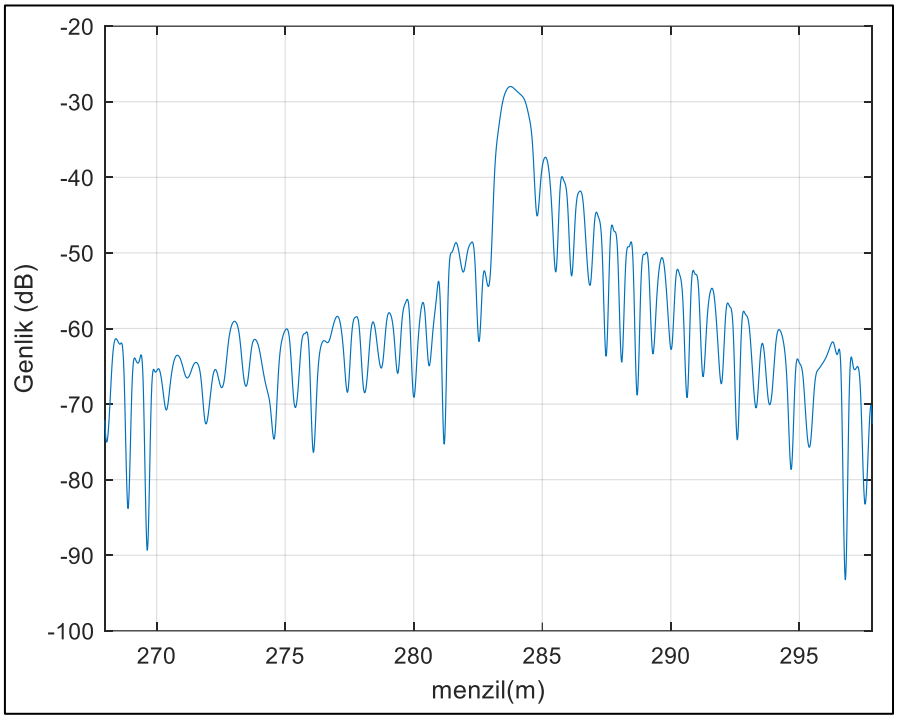
Şekil 4.37'de aydınlanma alanı içerisinde konuşlandırılmış birbirlerinden 0,5662 m kadar ayrışmış 282,8427 m ve 283,4090 m menzillerdeki, 200 m çapraz menzildeki iki hedefin, grup gecikmesi etkisi dahil edilen SAR sistemi ile görüntülenmesi sonucunda oluşan SAR görüntüsü verilmiştir.



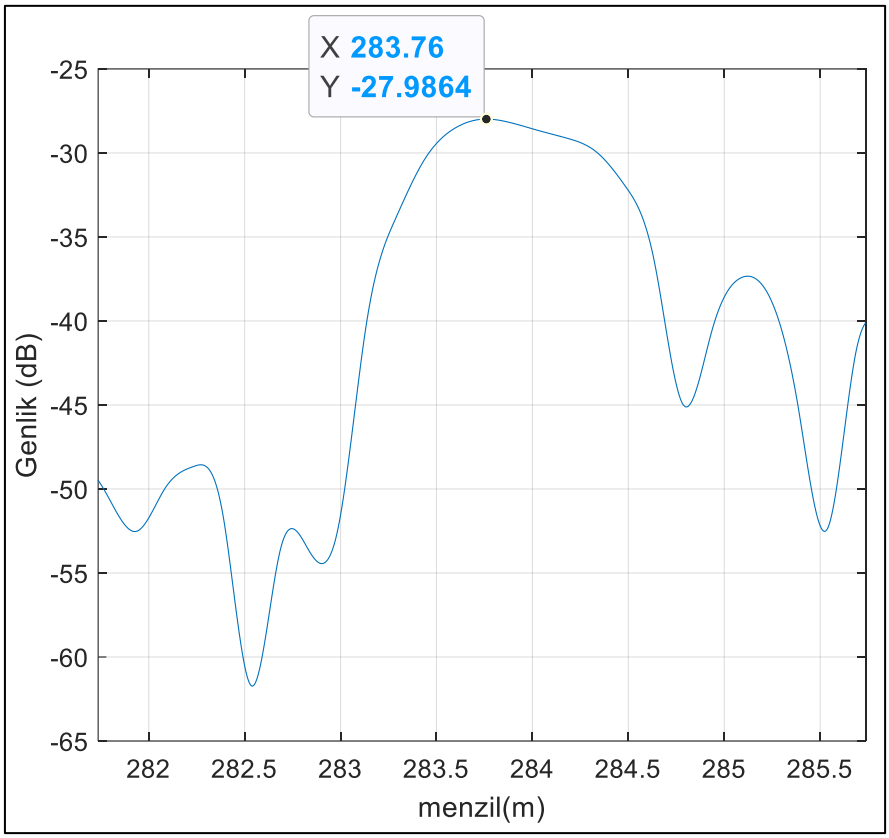
Şekil 4.37. Grup gecikmeli sistemin yakın iki hedefli SAR görüntüsü

Burada dikkat edilecek olursa SAR görüntüsü üzerinde nokta hedefler birbirlerinden Şekil 4.31 ve Şekil 4.34' göre daha az ayrışmış hatta ayrışmamış biçimde görülmektedir. Şekil

4.38 ve Şekil 4.39’da bu ayrışma daha detaylı olarak hedeflerin bulunduğu çapraz menzilde, menzil ekseninde alınmış kesit üzerinde incelenmiştir.



Şekil 4.38. Grup gecikmeli sistemin yakın iki hedefli menzil çözünürlüğü kontrolü -1



Şekil 4.39. Grup gecikmeli sistemin yakın iki hedefli menzil çözünürlüğü kontrolü -2

Şekil 4.39'da da görüleceği üzere hedefler birbirlerinden ayrışamamış olup, tek bir ana kulakta birleşmişlerdir, bu sebeple hedef menzillerini de doğru tayin etmek mümkün olmamaktadır.

Benzetim Ortamı

Bu çalışmadaki benzetim çıktılarının her biri Çizelge 4.4'de verilen donanım özelliklerine sahip bilgisayarla MATLAB R2020b ortamında ortalama 6 dk sürede gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.4. Bilgisayar donanımı özellikleri

İşlemci	Intel(R) Core(TM) i5-9300H CPU @ 2.40GHz 2.40 GHz
RAM	8,00 GB
İşletim Sistemi	Windows 10
Disk Kapasitesi	512 GB

5. SONUÇ

Bu çalışmada öncelikle sentetik açıklıklı radar kavramı ve tasarım parametreleri incelenmiş, veri toplama geometrisine göre hareket ettirilen platform üzerinde konumlandırılan sentetik açıklıklı radarın görüntüleme performansını etkileyen donanım kaynaklı bozucu etkilerden gürültü sayısı ve grup gecikmesinin etkileri MATLAB benzetim ortamında değerlendirilmiştir. Bu faktörlerin performans üzerindeki etkileri, hedefin menzil ve çapraz menzil doğruluğu, menzil ve çapraz menzil çözünürlüğü, maksimum yan kulak oranı ve SAR görüntüsü üzerinden incelenmiştir.

Gürültü sayısının SAR görüntüsü performansına etkisinin incelenmesi için kademeli gürültü sayısı 15 dB ve 25 dB olan iki sistemin benzetimi yapılarak SAR görüntüsü çıkartılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, gürültü sayısının hedeften dönen sinyalin, sinyal gürültü oranı ile ters orantılı olduğu gözlenmiştir. Görüntülerde hedefin bulunduğu menzilin çapraz menzil kesiti incelendiğinde maksimum yan kulak seviyesi ve çapraz menzil çözünürlüklerinin gürültü sayısından bağımsız olduğu; ayrıca hedefin bulunduğu çapraz menzilde menzil kesiti grafiği incelendiğinde menzil çözünürlüğü ve maksimum yan kulak seviyesinin gürültü sayısının değişmesinden etkilenmediği gözlenmiştir. İlaveten iki ölçümde de hedef menzilinin doğru konumda çıktığı gözlemlenmiştir.

Çalışmada incelenen diğer bir bozucu faktör grup gecikmesinin SAR görüntüsü üzerindeki etkisidir. Bu kapsamda benzetimi yapılan HA yapısı içerisinde, IF frekansları geçirmek için kullanılan BPF yapısının, keskin şekilde tasarlanması ve yüksek bant genişliğinde olması sebebiyle grup gecikmesine en çok etki eden sistem bileşeni olduğu değerlendirilmiştir. Bu etkileri çalışmada incelemek için, grup gecikmesi etkisinin dâhil edildiği ve etkinin yok sayıldığı benzetimler yapılmıştır. Bu benzetimler sonucunda grup gecikmesinin ortalama değeri; sinyale, frekansa bağlı doğrusal bir faz eklentisi getirdiğinden, görüntü üzerinde hedefin yanlış konumda belirmesine sebebiyet vermektedir. Frekansa bağlı olarak değişen grup gecikmesi, hedeften dönen radar sinyalinin farklı frekanslarına farklı faz kayması getirdiğinden, hem menzil çözünürlüğüne bozucu yönde etki etmekte hem de yan kulaklardaki sinyal seviyesinin artmasından dolayı SAR görüntüsü üzerinde istenmeyen, gerçek dışı hedeflerin oluşmasına neden olmaktadır.

Bu tez konusuna ek olarak gelecek çalışmalar esnasında SAR görüntüleme performansını etkileyen farklı bozucu faktörler (faz gürültüsü, platform hareketleri, gürültü kaynakları, faz bozulmaları vb.) incelenebilir. Farklı özellikteki hedefler ile benzetimler yapılarak, hedef çeşitliliğine ve hedeflerin SAR sisteminden ve/veya birbirlerinden uzaklıklarına göre performans karşılaştırması yapılabilir. Simülasyon hızını arttırabilmek adına MATLAB benzetim ortamı yerine C yazılım dili kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Capella Space. Nighttime Radar Satellite Image. https://pbs.twimg.com/media/ExcWI7zWQAYwps2?format=jpg&name=4096x4096, Son Erişim Tarihi: 03.04.2021.

2. *Ding*, M., Tang, L., Zhou, L., Wang, X., Weng, Z., and Qu, J. (2019, January). *W band mini-SAR on multi rotor UAV platform*. IEEE 2nd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), Harbin, 416-418.

3. Hao, J., Li, J., Pi, Y., and Fang, X. (2019). A drone fleet-borne SAR model and three-dimensional imaging algorithm. *IEEE Sensors Journal*, 19(20), 9178-9186.

4. Ding, M., Liang, X., Tang, L., Wen, Z., Wang, X., and Wang, Y. (2018, May). *Micro FMCW SAR with high resolution for Mini UAV*. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Chengdu, 1-3.

5. Yamada, H., Kobayashi, T., Yamaguchi, Y., and Sugiyama, Y. (2017, December). *High-resolution 2D SAR imaging by the millimeter-wave automobile radar*. IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA), Tsukuba, 149-150.

6. Zoraya, A., and Bolaños, R. (2020). Implementing the LFM-CW MIT Radar at the Ecuadorian Space Institute: Some Results. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 12.

7. Ganveer, N., Vishal, G., Rao, R. S., and Biradar, V. (2016, May). *SAR implementation using LFM signal*. IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology (RTEICT), Bangalore, 1094-1097.

8. Cumming, Ian G. ve Wong, Frank H. (2005). *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*. (First edition). Boston: Artech House, 21, 23, 83-108.

9. Özdemir, Caner. (2012). *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms.* (First edition). Hoboken: John Wiley and Sons, Inc, 50, 79-114.

10. Richards, Mark A. (2014). *Fundamentals of Radar Signal Processing.* (Second edition). New York: McGraw-Hill Education, 43, 146, 182, 643-735.

11. Schlutz, Matthew. (2009). *Synthetic Aperture Radar Imaging Simulated in MATLAB*. Master Thesis. The Faculty of the California Polytechnic State University, San Luis Obispo.

12. Ashry, M. M., Mashaly, A. S., and Sheta, B. I. (2020, July). *Comparative Analysis between SAR Pulse Compression Techniques*. 12th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG), Cairo, 234-240.

13. Shi, W., Ji, Q., and Bao, X. (2019, December). *Design of wideband real-time SAR imaging system*. Eleventh International Conference on Signal Processing Systems, Chengdu, 11384, 1138416.

14. Doerry, A. W. (2020). Digital Signal Processing of Radar Pulse Echoes; *SAND 2020-9428*, Albuquerque.

15. Marques, Paulo A.C. (2016). High Resolution SAR Imaging and Signal Processing; *STO-EN-SET-235*, Lizbon.

16. Roldán, T. G. A., and Trejo, A. (2012). Pulse compression for different types of radar signals; *Blekinge Institute of Technology MCS-2012-09*, Karlshamn.

17. Das, S., and Jena, S. (2013). Radar Pulse Compression Using Frequency Modulated Signal; *National Institute of Thechnology 5342*, Rourkela.

18. Fason, B. J. (2013). *Modeling and simulation of synthetic aperture radars in MATLAB*. Master Thesis. Naval Postgraduate School, Montrey.

19. Gorham, L. A., and Moore, L. J. (2010, April). *SAR image formation toolbox for MATLAB*. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVII, Orlando, 7699, 769906.

20. Ahmed, I. (2008). *Study Of The Local Backprojection Algorithm for Image Formation In Ultra Wideband Synthetic Aperture Radar*. Master Thesis. Blekinge Institute of Technology, Karlshamn.

21. Kobayashi, T., Yamada, H., Sugiyama, Y., Muramatsu, S., and Yamagchi, Y. (2018, October). *Study on imaging method and doppler effect for millimeter wave automotive SAR*. International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Busan, 1-2.

22. Doerry, A. W. (2016). Noise and Noise Figure for Radar Receivers; *SAND 2016-9649*, Albuquerque.

23. Meta, A., Hoogeboom, P., and Ligthart, L. P. (2006, April). *Correction of the effects induced by the continuous motion in airborne FMCW SAR*. IEEE Conference on Radar, Verona, 8.

24. de Wit, J. J., and Hoogeboom, P. (2003, July). *High resolution FM-CW SAR performance analysis*. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, 7, 4317-4319.

25. Doerry, A. W. (2006). Performance limits for synthetic aperture radar; *SAND 2006-0821*, Albuquerque.

26. Mussswar, M. A., Rashid, F., Ahmed, F., Mir, U. T.; Siddiq, K. (2007-08). Analysis and Design of a Synthetic Aperture Radar System; *National University of Computer and Emerging*, Islamabad, 10-55.

27. Adewoye, A. (2013). *Synthetic aperture radar simulation for point and extended targets*. Master Thesis. McMaster University, Hamilton.

28. Mahafza, B. R. (2013). *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*. (Third Edition). Boca Raton: CRC press, 706-717.



GAZİ GELECEKTİR...